

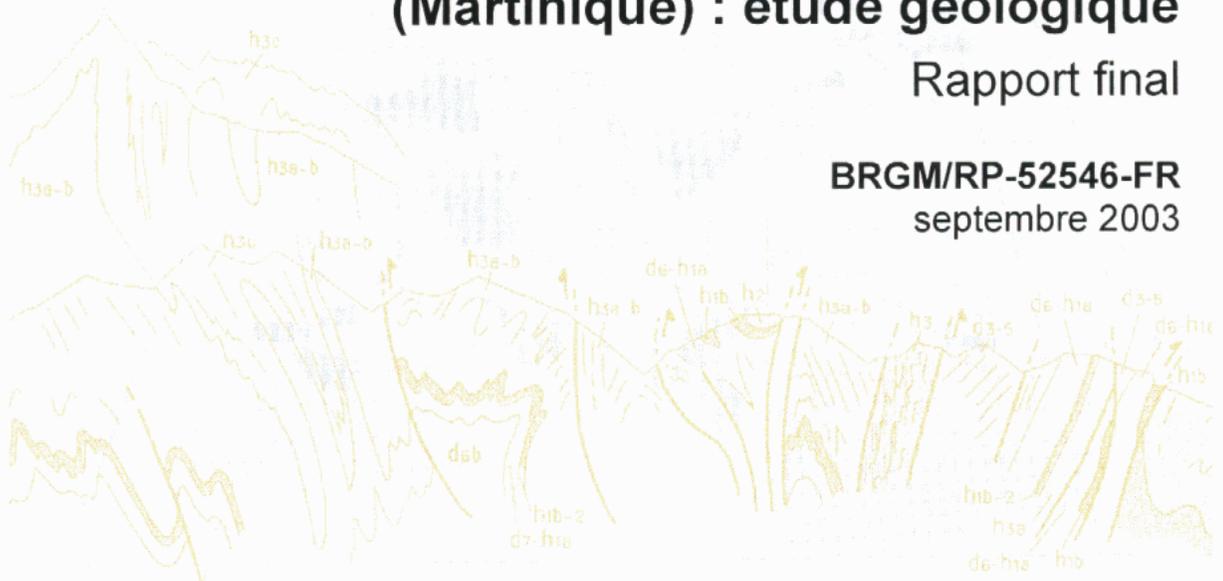


RP-52546

Réévaluation du potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique) : étude géologique

Rapport final

BRGM/RP-52546-FR
septembre 2003



BRGM

ADP

DRM

DRM



Géosciences pour une Terre durable

brgm

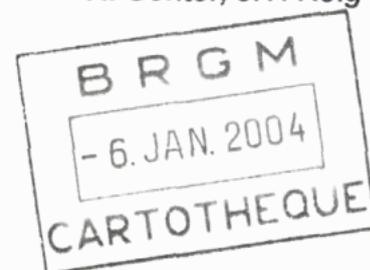
Réévaluation du potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique) : étude géologique

Rapport final

BRGM/RP-52546-FR
septembre 2003

Étude réalisée dans le cadre des conventions
n° 0144048 et n° 01D100304 établies,
respectivement, entre le BRGM, l'ADEME et le
Conseil Régional de la Martinique et entre le
BRGM et le FEDER (projet 2003-ESNER-04)

A. Genter, J.Y. Roig



F.E.D.E.R.

A D E M E



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : Montagne Pelée, Morne Rouge, Diamant, Saint-Pierre, Martinique, Géothermie, Géologie, Volcan, Fractures, Sources thermales, Altérations hydrothermales.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Genter A., Roig J.Y. (2003) - Réévaluation du potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique) : étude géologique. BRGM/RP-52546-FR, 46 p., 18 fig., 2 tabl.

© BRGM, 2003, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre d'un projet de réévaluation du potentiel géothermique de l'île de La Martinique, une étude pluridisciplinaire combinant géologie, géochimie des fluides et géophysique, cofinancée par l'Ademe, le Conseil Régional de La Martinique et le FEDER, a été confiée au BRGM sur la période 2001-2003.

L'objectif de ces travaux de reconnaissance est d'analyser, hiérarchiser et délimiter les zones d'intérêt géothermique dans l'optique de proposer des sites pour l'implantation de futurs forages d'exploration.

Ce rapport, qui fait suite à un premier rapport bibliographique (Sanjuan *et al.*, 2003a), rassemble les données de terrain et leur interprétation, acquises dans les secteurs de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant, ces deux zones ayant été retenues comme potentiellement favorables au développement d'un réservoir géothermique. Les principales méthodes mises en œuvre sur le terrain sont la géologie structurale pour identifier des fractures ou des failles, drains potentiels pour la remontée des fluides géothermaux et l'étude des dépôts hydrothermaux qui matérialisent les interactions entre ces fluides et l'encaissant volcanique.

Au nord de l'île, compte tenu des conditions d'affleurement difficiles, c'est surtout la région de Saint-Pierre, qui a fait l'objet d'une reconnaissance dans la zone de Morne Rouge - Montagne Pelée. Des escarpements morphologiques de laves massives orientés E-W s'individualisent au niveau de Saint-Pierre. Cependant, aucun indice sérieux sur la présence d'une faille régionale n'a été observé à l'exception d'une zone fracturée potentielle mais qui n'a qu'un caractère mineur. À l'échelle du volcan, ces escarpements forment un dispositif en fer à cheval qui serait cohérent avec les interprétations en terme d'instabilité gravitaire (Vincent *et al.*, 1989 ; Deplus *et al.*, 2001). La faille dite de Saint-Pierre - Morne Rouge, qui représentait une cible géothermique potentielle, n'a donc pas été identifiée. Dans ce secteur, il n'y a pas non plus de trace d'activité hydrothermale significative puisque aucune source chaude n'est associée à la « faille » de Saint-Pierre et les indices de minéralisation hydrothermale (silice, argile) sont très rares. Pour observer des structures susceptibles de drainer des fluides, la zone côtière sud entre Saint-Pierre et Bellefontaine a été étudiée. De nombreuses fentes, joints et petites failles normales supposées ont été collectés dans les séries volcaniques du système des Pitons du Carbets. Ces structures qui se regroupent selon un axe dominant WNW-ESE à NW-SE avec des pendages forts indiqueraient une extension NNE à nord-est. Le rebord morphologique de Saint-Pierre n'est donc pas une structure enracinée capable de drainer les fluides hydrothermaux. Cette interprétation est cohérente avec l'absence de manifestation hydrothermale de surface (sols chauds, sources thermales, dépôts hydrothermaux). Les structures tectoniques observées vers le sud seraient compatibles avec une extension nord-est. Ce dispositif implique que les structures les plus intéressantes à rechercher pour les circulations de fluides seraient orientées NW-SE c'est-à-dire perpendiculairement à la « faille » de Saint-Pierre.

Géologiquement, la zone de la source thermique de Petite Anse émergeant le long de la côte près du Diamant, présente des caractéristiques intéressantes, mais non univoques, quant à son potentiel géothermique. En effet, les indices de surface montrent une densité de fracturation élevée, matérialisée par des réseaux de joints très

connectés, des témoins d'activité hydrothermale passée et actuelle spatialement superposés avec des précipitations minérales de type smectite, sulfate, et zéolites et des encroûtements actuels (calcite, hydroxyde de fer). Des fractures sub-verticales remplies de dépôts hydrothermaux organisées en réseaux de joints orthogonaux affectent les laves massives au niveau des sources de Petite Anse. En revanche, aucune faille n'a été identifiée sur le terrain. Au niveau des altérations hydrothermales, on observe des masses importantes de lave altérée correspondant probablement à des paléo-fumerolles. La lave est complètement déstructurée et forme des masses pulvérulentes avec des dépôts de sulfates, smectite et zéolites localement.

Compte tenu de l'histoire géologique locale (absence d'édifice volcanique récent), les témoins de l'activité hydrothermale indiqueraient un système hydrothermal en refroidissement, les réseaux de joints permettant la remontée de fluides profonds. Une seconde hypothèse sur le prospect de Petite Anse consisterait à considérer que la zone d'émergence actuelle avec ses dépôts principalement carbonatés n'a pas de lien direct avec un système fossile réactivé, les sources utilisant les fractures anciennes comme des drains bien connectés.

Géologiquement, la zone côtière de Petite Anse présente davantage d'indices d'activité hydrothermale que celle reconnue autour de Saint-Pierre. Le soubassement profond de Petite Anse représenterait donc une zone à explorer par forage.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Géologie de terrain du prospect Montagne Pelée - Morne Rouge	10
2.1. Introduction	11
2.2. Résultats géologiques	13
2.3. Interprétation géologique	15
3. Géologie de terrain du prospect Diamant	17
3.1. Introduction	17
3.2. Résultats géologiques dans la zone d'émergence	19
3.2.1. Géologie d'ensemble et description du log terrain	19
3.2.2. Données structurales le long de la côte	29
3.2.3. Observations minéralogiques	35
3.3. Interprétation de la géologie	37
3.4. Conclusions sur Petite Anse	40
4. Conclusion	43

Liste des figures

Fig. 1 -	Localisation des secteurs d'intérêt pour la reconnaissance géothermique.	11
Fig. 2 -	Escarpement morphologique à Saint-Pierre (A), zone sub-verticale rubéfiée présentant quelques plans de fractures à côté de Saint-Pierre (B), exemples de fractures sub-verticales à proximité de Bellefontaine (C, D)	12
Fig. 3 -	Esquisse géologique de la montagne Pelée : 1 : principales sources thermales ; 2 : rebord de la caldeira d'avalanche reconnue par Vincent <i>et al.</i> (1989) ; 3 : rebord de la caldeira de Macouba ; 4 : rebord de la caldeira de l'Etang sec ; 5 : dômes de lave historique (a : 1902-1905 ; b : 1929-1932). S1 : sources de la Rivière Claire ; S2 : sources du bord de mer ; S3 : sources Picodo-Mitan.....	14
Fig. 4 -	Position des stations de mesures structurales dans le secteur de Morne Rouge - Montagne Pelée. Projection de Schmidt, hémisphère inférieur. Le fond géologique correspond à la carte géologique de Martinique au 1/50 000 (Westercamp <i>et al.</i> , 1989).	16
Fig. 5 -	Les contours géologiques des formations volcaniques du secteur de Petite Anse drapés sur la topographie.....	17
Fig. 6 -	A - Vue générale de la baie de Petite Anse et du Morne Jacqueline, région du Diamant. B - Plage de Petite Anse avec vue sur le Morne Larcher en arrière-plan. C - La côte au niveau des émergences thermales de Petite Anse, vue vers l'ouest. D - Vue de la côte vers l'est.	18
Fig. 7 -	Log géologique de la plage de Petite Anse. De la gauche vers la droite, il s'agit d'un relevé géologique sur la côte de l'ouest vers l'est. La lithologie d'ensemble a été observée sur le platier et la falaise. La densité de fracturation, la présence de calcite et d'hydroxyde de fer, de minéraux du soufre, la localisation des émergences et celle des concrétions associées ont été reportées.....	19
Fig. 8 -	A - Formation bréchique située à l'extrémité du profil géologique fait à Petite Anse. B - Détail de la formation bréchique et de son réseau de fractures. C - Les fractures présentes s'organisent en réseau. D - Le remplissage des fractures est de la calcite et des hydroxydes de fer. E - Détail de la formation bréchique montrant des blocs relativement arrondis et de nature hétérogène. F - Contact géologique entre la lave recouvrant cette formation bréchique. Cette interface est soulignée par un horizon plus riche en hydroxydes de fer.	20
Fig. 9 -	A - Lave très fracturée affleurant à l'extrémité occidentale du levé géologique fait à Petite Anse. B - Réseau de fractures dans la lave au pied du Morne Jacqueline. C - Lave jaunâtre à orangé dans laquelle les fractures ne sont plus visibles. D - Détail des affleurements côtiers de lave altérée précédents. E - Thalweg orienté N150°E ceinturé par de la lave altérée. F - Vue sur la falaise altérée de couleur jaunâtre au-dessus du bassin principal, le platier apparaît plus massif.....	22

Fig. 10 -	A - Petite Anse, Lave orangée altérée ayant perdu toute cohésion. B - Même affleurement de lave déstructurée dont l'aspect s'apparente à un sable. C - Lave grise à jaunâtre recoupée par un dyke. D - Détail de la photo précédente.	23
Fig. 11 -	A - Bassin principal où jaillit la source thermique de Petite Anse. B - Vue vers l'est de la côte au niveau de l'émergence principale. C - Concrétions de calcite et d'hydroxyde de fer associées à la source principale. D - Vue de la côte vers l'ouest au niveau de la source. La falaise est complètement altérée (lave jaunâtre) tandis que le platier est formé d'une lave massive fracturée. E - Lave fracturée et altérée juste au-dessus de la source. F - Fractures à calcite dans la lave au-dessus de la source. G - Falaise formée d'une lave altérée jaunâtre à proximité de la source. H - Détail de la roche altérée.	24
Fig. 12 -	A - Petite Anse, zone de concrétions précipitant sur de la lave fracturée, vue vers l'Est. B - Lave fracturée. C - Emergence actuelle et concrétions de calcite. D - Coraux cimentés par les concrétions liées aux petites émergences actuelles. E - Placage de calcite sur la lave massive noire. F - Lave grise parcourue par des réseaux de joints. G - Concrétions de calcite sur la lave. H - Lave fracturée avec dépôt rouge le long des fractures.	26
Fig. 13 -	A - Petite Anse, lave fracturée le long de la côte. B - Placage sur lave noire. C - Lave fracturée avec calcite géodique brune et hydroxyde de fer. D - Détail de la calcite géodique. E - Calcite brune et hydroxyde de fer. F - Détail de la photo précédente.	28
Fig. 14 -	A - Petite Anse, zone d'encroûtement le long de la côte. B - Placage de calcite sur lave. C - Fracture à calcite géodique à Petite Anse. D - Pointe du Diamant, faille normale à remplissage de calcite. E - Route des Anses d'Arlet, réseau de joints dans lave rubéfiée. F - Anse Chaudière, affleurement côtier de lave fracturée avec remplissage de calcite.	30
Fig. 15 -	Position des stations de mesures structurales le long de la côte de Petite Anse. Projection de Schmidt, hémisphère inférieur. La zone d'émergence principale se situe au niveau de la station 4.	31
Fig. 16 -	Position des stations de mesures structurales dans le secteur du Diamant - Anses d'Arlets. Projection de Schmidt, hémisphère inférieur.	34
Fig. 17 -	Localisation des échantillons de roche ou de remplissages de fractures ayant fait l'objet d'une analyse minéralogique (diffraction de rayons X, lames minces) dans le secteur de Petite Anse. Localisation des remplissages de fractures présentant de la calcite ou des carbonates, des argiles et des sulfates dans le secteur de Petite Anse.	36
Fig. 18 -	Localisation des édifices volcaniques récents dans la Presqu'île des Trois Ilets entre Pointe Burgos et Rocher du Diamant. 1 : Appareils volcaniques avec leur âge ; 2 : Source thermique et altération ; 3 : Failles cartographiques in Westercamp <i>et al.</i> , 1989. En grisé, axe volcanique.	38

Liste des tableaux

Tabl. 1 - Caractéristiques géométriques des familles de fractures mesurées à Petite Anse et sa périphérie.....	33
Tabl. 2 - Caractéristiques des échantillons prélevés et résultats des analyses diffractométriques de rayons X réalisées sur les prélèvements de terrain, secteur de Petite Anse-Diamant et de Morne Rouge. Echelle relative d'abondance : TA = Très Abondant, A = Abondant, P = Présent, f = faible, Tf = Très faible, T = Trace.	35

1. Introduction

La demande croissante en énergie dans les îles de la Caraïbe et la volonté politique de rechercher des solutions à l'autonomie énergétique ont conduit à reprendre des recherches géothermiques sur l'île de La Martinique dans les régions de Montagne Pelée - Morne Rouge et du Diamant. Ces régions avaient été retenues pour leur intérêt géothermique, à la suite des travaux réalisés entre 1970 et 1985.

Ce rapport final fait suite à un premier rapport qui avait pour objectif de présenter la synthèse des connaissances en géologie, géochimie et géophysique ainsi que les premiers travaux de recherche réalisés sur le terrain par le BRGM en 2001-2003 dans le cadre du projet de réévaluation du potentiel géothermique des régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Sanjuan *et al.*, 2003a). L'objectif de ce rapport est de présenter l'interprétation des résultats géologiques acquis sur le terrain en 2002 dans ces régions dans le but d'aider à l'évaluation de leur potentiel géothermique. Ces travaux concernent la phase 3 du programme inscrit dans les conventions n° 0144048 et n° 01D100304, qui ont été, respectivement, établies entre le BRGM, l'Ademe et le Conseil Régional de la Martinique, d'une part, et le BRGM et le FEDER, d'autre part, dans le cadre de ce projet.

Les deux zones d'intérêt sélectionnées pour la reconnaissance et l'exploration de sites de réservoir géothermique potentiel haute enthalpie en Martinique sont la zone du Diamant au sud-ouest de l'île, à Petite Anse, et la zone de Morne Rouge - Montagne Pelée au nord (fig. 1). Ces régions appartiennent à l'arc récent d'âge post-miocène moyen et supérieur.

Une campagne de terrain a consisté, principalement, à mener une mission de reconnaissance de géologie structurale dans ces régions, dans des zones sélectionnées à partir des informations acquises à partir de la synthèse bibliographique. Cette campagne avait pour principal objectif de rechercher des indices superficiels de structures tectoniques et volcano-tectoniques à l'échelle semi-régionale, susceptibles de guider les circulations de fluides, ainsi que des zones d'altérations hydrothermales en surface. Sur le terrain, des observations géologiques, des mesures structurales et des prélèvements d'échantillons (roches, altérations) ont été réalisés. L'analyse des données structurales et l'interprétation des résultats minéralogiques font l'objet de ce rapport.

Ce rapport se divise en deux parties :

- une première partie est consacrée à la région de Morne Rouge - La Montagne Pelée située au nord de l'île. Cette région avait été largement explorée par le passé et la reconnaissance de terrain s'est surtout attachée à chercher des indices de fracturation naturelle (fracture, faille) ;
- une seconde partie est consacrée à la région de Petite Anse située à proximité du Diamant au sud de l'île. Cette zone n'avait pas fait l'objet de travaux de terrain approfondis. De ce fait, une analyse détaillée du secteur des sources de Petite Anse et de leur périphérie est présentée.

2. Géologie de terrain du prospect Montagne Pelée - Morne Rouge

2.1. INTRODUCTION

Ce secteur Montagne Pelée - Morne Rouge qui couvre une surface étendue, est situé à la limite entre deux grands blocs de l'île : le bloc peléen au nord et le reste de l'île au sud. La Montagne Pelée dont l'édification a débuté il y environ 300 000 ans, a produit des magmas de composition andésitique ayant donné lieu essentiellement à des éruptions explosives accompagnant ou non la mise en place de dômes. Ce strato-volcan actif a été largement étudié par le BRGM pour l'établissement de la carte géologique au 1/20 000 et au 1/50 000 (Westercamp et Traineau, 1983 ; Traineau *et al.*, 1989 ; Westercamp *et al.*, 1989). Le secteur de Morne Rouge situé au pied de la Pelée a également fait l'objet de travaux de reconnaissance géologique et géothermique par le BRGM (Chovelon, 1984 ; Traineau *et al.*, 1989). La présence des sources thermales sur le flanc ouest du volcan, ainsi que la présence de structures caldériques emboîtées ont conduit ces auteurs à suggéré l'existence d'un système hydrothermal localisé à l'aplomb de la zone sommitale de la montagne Pelée. Pour différentes raisons (conditions d'accès, aléas volcaniques, environnements, besoins socio-économiques, ...), l'exploitation d'un tel système hydrothermal apparaît difficile et les travaux antérieurs ont eu pour objectif de rechercher des zones de fuites à partir de ce système sur les flancs du volcan.

L'accent a donc été mis sur la reconnaissance des structures tectoniques ou volcano-tectoniques susceptibles de représenter des zones favorables pour le développement d'un système géothermal, sur les flancs sud-ouest du volcan et notamment au niveau du rebord morphologique s'étendant depuis Saint-Pierre jusqu'à Morne Rouge.

La synthèse bibliographique (Sanjuan *et al.*, 2003a) a montré que les zones d'intérêt géothermique dans le nord de l'île de la Martinique, correspondent aux secteurs de la

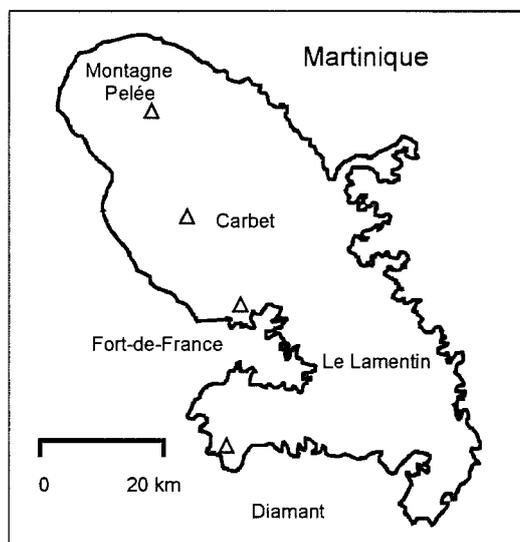


Fig. 1 - Localisation des secteurs d'intérêt pour la reconnaissance géothermique.

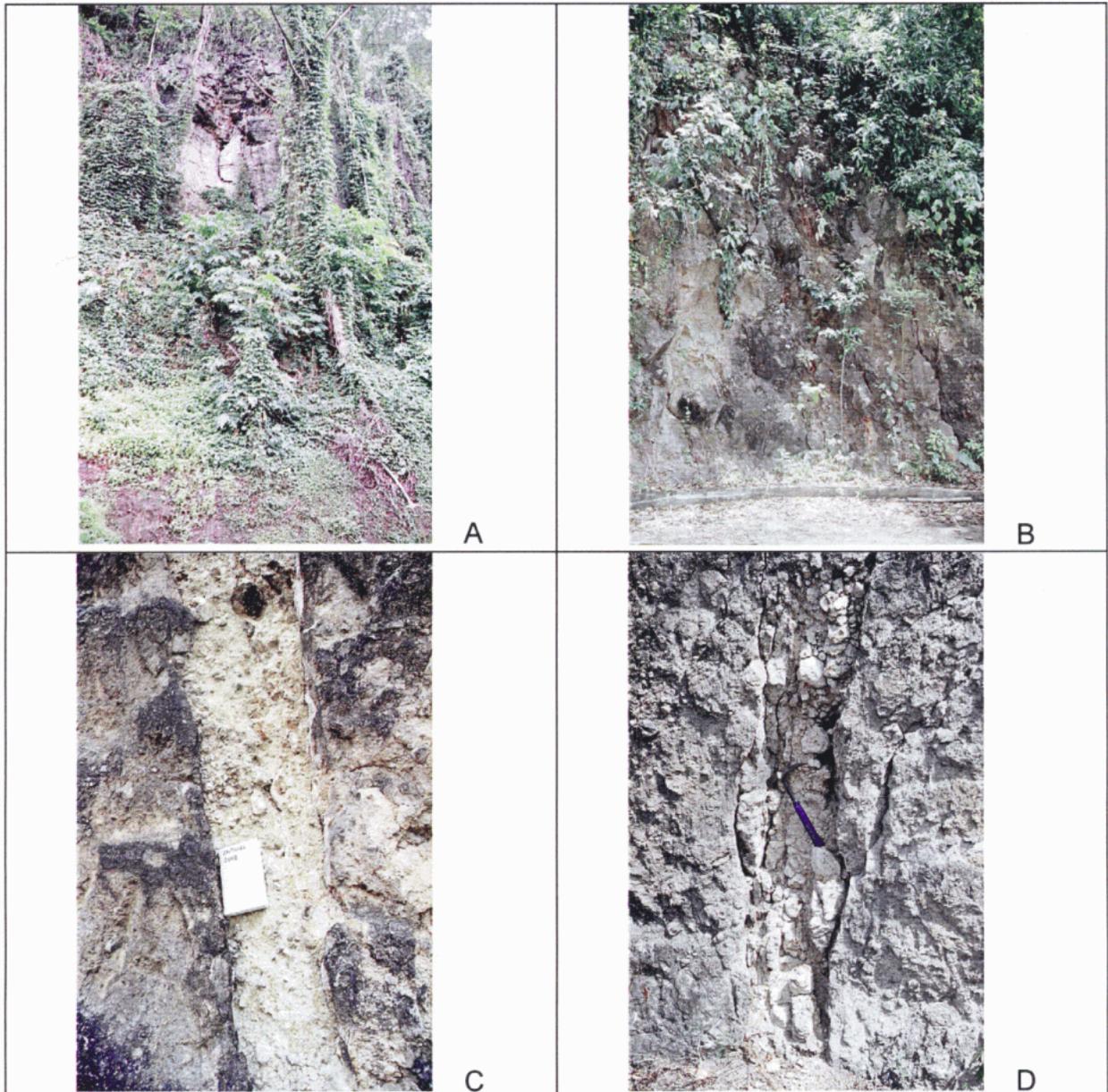


Fig. 2 - Escarpement morphologique à Saint-Pierre (A), zone sub-verticale rubéfiée présentant quelques plans de fractures à côté de Saint-Pierre (B), exemples de fractures sub-verticales à proximité de Bellefontaine (C, D).

faille de Saint-Pierre - Morne Rouge, au fossé de Champ Flore et au quadrant sud-ouest de la Montagne Pelée. Cependant, en raison des mauvaises conditions d'affleurement (forte végétation, fort relief), la zone de champ Flore n'a pas fait l'objet d'une reconnaissance géologique approfondie. En revanche, des études géophysiques et géochimiques y ont été conduites (Baltassat *et al.*, 2003 ; Sanjuan *et al.*, 2003b).

2.2. RÉSULTATS GÉOLOGIQUES

Entre Saint-Pierre et Morne Rouge, un rebord morphologique de près de 100 m de hauteur est visible dans la topographie. Sur la carte géologique, son tracé est rectiligne et délimite la Montagne Pelée au nord-ouest du reste de l'île au sud-est (fig. 2A, fig. 3). Sur des arguments cartographiques, ce rebord avait été interprété comme un accident tectonique important de type faille normale séparant le bloc peléen du reste de la Martinique (Westercamp et Traineau, 1983 ; Westercamp *et al.*, 1989). Depuis l'éruption du Mont Saint Helens aux Etats-Unis, les géologues ont interprété ce type d'escarpement comme la trace de la cicatrice d'arrachement consécutif à un effondrement sectoriel du volcan vers le sud-ouest (Vincent *et al.*, 1989). Les dépôts sous-marins mis en évidence par des techniques géophysiques au large de Saint-Pierre témoigneraient de l'écoulement en mer de l'avalanche de débris résultante (Deplus *et al.*, 2001). L'un des objectifs des travaux de terrain était de recueillir des informations en faveur de l'une ou l'autre de ces hypothèses.

Sur le terrain, des escarpements morphologiques composés de laves massives surplombent la région de Saint-Pierre et de sa périphérie selon un axe NE-SW. À la faveur d'un virage sécant sur l'escarpement (SP01), de rares structures sont visibles. Une zone rubéfiée montrant une structuration N90°E à fort pendage vers le nord s'individualise. Cette structure pourrait s'interpréter comme une faille senestre avec un pitch de 18° vers le N268°E. Dans le même secteur, ces escarpements d'au moins 10 m de haut, sont orientés localement N100°E (SP03) et ont une extension horizontale d'amplitude au moins hectométrique. Hormis la présence d'un réseau sub-vertical de joints orientés N175°E, il n'y a pas d'évidence de faille. Sur la route du Morne d'Orange (SP04), les formations pyroclastiques qui forment l'escarpement sont également affectées par des joints sub-verticaux N90°E remplis de dépôts blanchâtres.

Pour trouver des structures (joints, fentes, failles) bien exprimées dans la lithologie, nous avons dû nous éloigner de Saint-Pierre en particulier en étudiant les affleurements relativement continus qui se situent sur la côte Caraïbes au sud de Saint-Pierre entre Le Carbet et Bellefontaine (fig. 4).

Lorsqu'on quitte Saint-Pierre par la route côtière sud, on observe le long de la route N2, des structures cassantes qui affectent les formations volcaniques appartenant au système des Pitons du Carbet. L'analyse des structures rencontrées sur le terrain entre les stations SP07 et SP12 est présentée ci-dessous.

Station SP07. Les structures observées sur le terrain correspondent essentiellement à des fentes ouvertes ou des joints d'épaisseur millimétrique à pluri centimétrique remplis par des dépôts blanchâtres récents. Localement, on observe en plus des joints, une structure trans-falaise très épaisse de 70 cm montrant un décalage vertical à jeu normal de 40 cm. Cette structure orientée E-W a été interprétée en faille normale. Sur ce site, la famille dominante de joints remplis verticaux est orientée N120°E (fig. 4).

Station SP08. Sur ce site, on observe des structures du même type que celles observées sur la station précédente. Il s'agit essentiellement de joints partiellement remplis et d'une faille à rejet normal de 50 cm d'épaisseur. Ces structures sont de forme irrégulière, épaisses, souvent trans-falaises et se pincent parfois vers le bas.

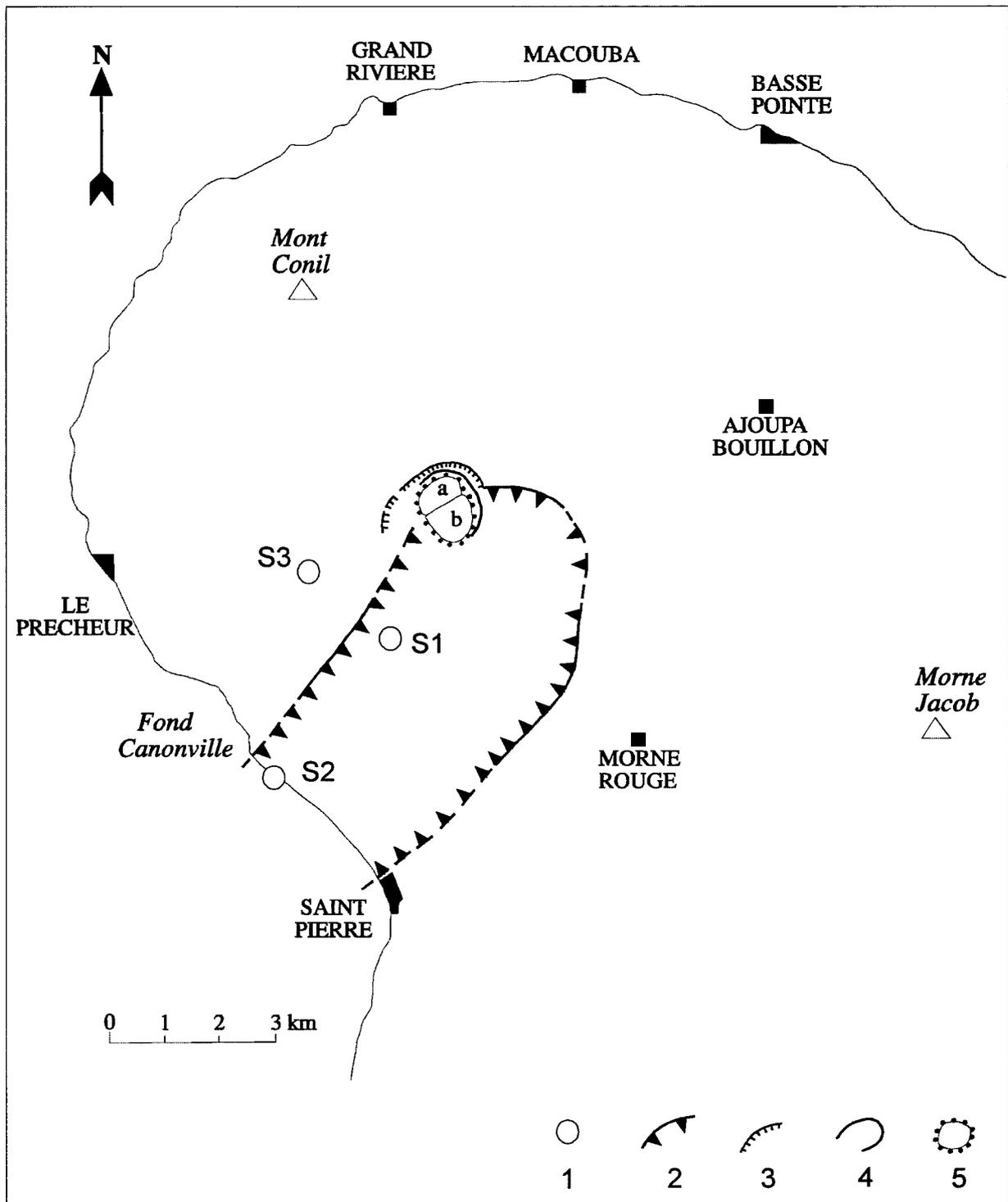


Fig. 3 - Esquisse géologique de la Montagne Pelée : 1 : principales sources thermales ; 2 : rebord de la caldeira d'avalanche reconnue par Vincent et al. (1989) ; 3 : rebord de la caldeira de Macouba ; 4 : rebord de la caldeira de l'Étang sec ; 5 : dômes de lave historique (a : 1902-1905 ; b : 1929-1932). S1 : Sources de la Rivière Claire ; S2 : Sources du bord de mer ; S3 : Sources Picodo-Mitan.

Bien que relativement dispersés, ces joints à fort pendage se regroupent dans une famille ESE-WNW.

SP09. Cette station montre les mêmes caractéristiques que la précédente. Elle permet d'observer des fentes ouvertes à fort pendage d'orientation NW-SE et d'une faille normale supposée montrant un rejet de l'ordre de 2 m. En plus des dépôts blanchâtres, on observe également aux épontes des joints un liseré orangé d'hydroxyde de fer.

SP10. Cet affleurement de type brèche est recoupé par un réseau de fractures non remplies. Ces fractures de petite dimension sont orientées NW-SE.

Au niveau de la nature des remplissages blanchâtres des fissures, la diffraction de rayons X sur deux échantillons prélevés sur les stations SP08 et SP09, a montré qu'il ne s'agissait ni de carbonates ni de minéraux argileux mais de phases amorphes. Au microscope, cette phase amorphe est de couleur brune probablement mélangée avec des oxydes de fer.

2.3. INTERPRÉTATION GÉOLOGIQUE

Il n'y a pas d'évidence d'indices de terrain sur la présence d'une structure tectonique de type faille au niveau du rebord morphologique Saint-Pierre - Morne Rouge. Ceci conforterait l'hypothèse selon laquelle, ce rebord correspond à la cicatrice d'un effondrement sectoriel de grande ampleur ayant affecté le flanc sud-ouest du volcan (fig. 3). Les conséquences en terme de potentiel géothermique sont importantes puisqu'il ne s'agit pas d'une structure enracinée profonde capable de favoriser les circulations de fluides hydrothermaux *per ascensum*, comme cela avait été envisagé antérieurement. Ceci est cohérent avec l'absence d'activité hydrothermale dans ce secteur.

L'ensemble des fentes, joints et failles normales supposées observés au sud de Saint-Pierre dans les séries volcaniques associées aux Pitons du Carbet se regroupent selon un axe dominant WNW-ESE à NW-SE avec des pendages forts. Bien que nous n'ayons pas observé de stries pour calculer des paléo-tenseurs, la création de ces fissures ouvertes partiellement colmatées probablement par des dépôts récents serait compatible avec une extension NNE à NE. Cette extension perpendiculaire à l'arc crée des structures NW-SE c'est-à-dire parallèlement aux alignements volcaniques récents du Carbet et de la Pelée. Elle pourrait donc être liée à cet axe volcanique. Si cette extension est récente et perdue, elle tend à favoriser le jeu des structures qui lui sont perpendiculaires. Ce dispositif implique que les structures verticales les plus intéressantes à rechercher pour les circulations de fluides devraient être orientées NW-SE. Les structures ayant cette orientation sont quasi-absentes sur les flancs de la Montagne Pelée.

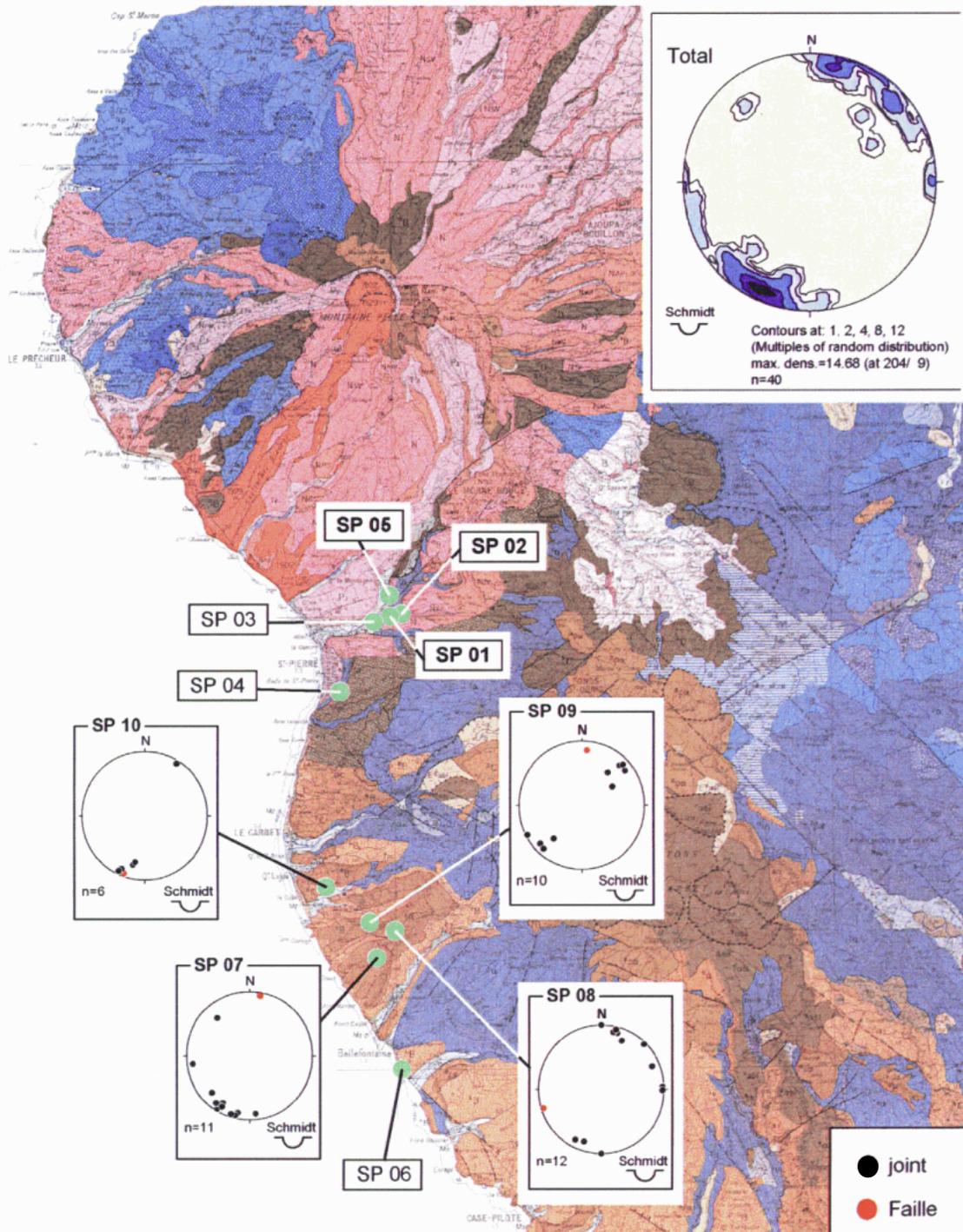


Fig. 4 - Position des stations de mesures structurales dans le secteur de Morne Rouge - Montagne Pelée. Projection de Schmidt, hémisphère inférieur. Le fond géologique correspond à la carte géologique de Martinique au 1/50 000 (Westercamp et al., 1989).

3. Géologie de terrain du prospect Diamant

3.1. INTRODUCTION

Le secteur de Petite Anse - Diamant est situé dans la presqu'île des Trois Ilets au sud-ouest de La Martinique (fig. 1). Cette région s'est édifiée principalement entre - 8 et - 2 Ma. Cependant, une activité volcanique plus récente (0,8 à 2 Ma) a été reconnue le long d'un axe majeur NW-SE s'étendant depuis Morne Réduit au nord jusqu'au Rocher du Diamant au sud (Gourgaud et Bourdier, 1982 ; Westercamp *et al.*, 1989).

Les caractéristiques géologiques du secteur de Petite Anse-Diamant sont connues d'après le levé de la carte géologique (Westercamp *et al.*, 1989) et ont été synthétisées dans le précédent rapport (Sanjuan *et al.*, 2003a). Une vue en relief des formations géologiques permet de visualiser que le secteur des sources de Petite Anse est localisé sur la terminaison sud de la presqu'île des Trois Ilets au niveau du Morne Jacqueline (fig. 5).

À l'ouest de la plage de Petite Anse, au pied du Morne Jacqueline, la source thermale dite du Diamant émerge au niveau de la mer. À cet endroit, la côte forme une petite falaise de quelques mètres de haut orientée schématiquement W-E (fig. 6A, 6B). En fait, il ne s'agit pas d'une émergence unique, mais d'une série de petits griffons dont le plus important en débit est canalisé dans un bassin.



Fig. 5 - Les contours géologiques des formations volcaniques du secteur de Petite Anse drapés sur la topographie.

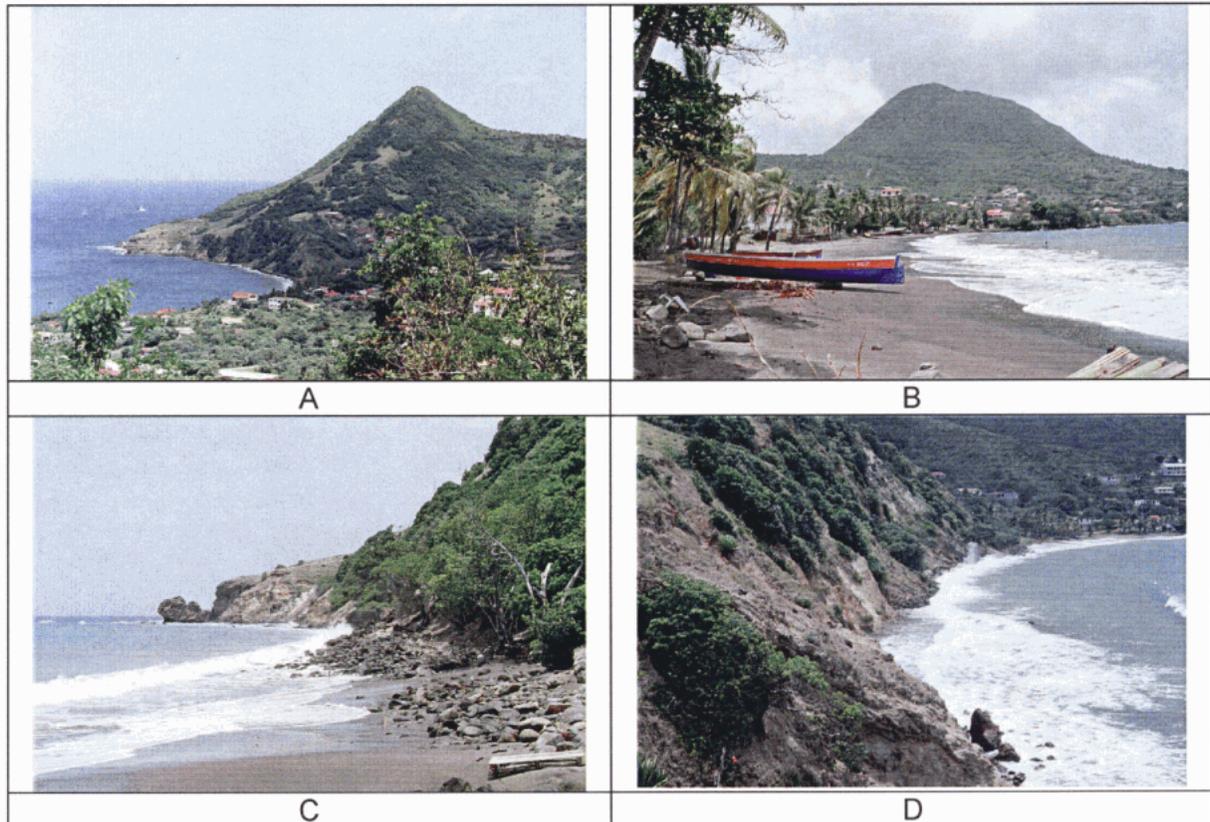


Fig. 6 - A - Vue générale de la baie de Petite Anse et du Morne Jacqueline, région du Diamant. B - Plage de Petite Anse avec vue sur le Morne Larcher en arrière-plan. C - La côte au niveau des émergences thermales de Petite Anse, vue vers l'ouest. D - Vue de la côte vers l'est.

Compte tenu des conditions d'affleurements et de la proximité de la mer, un levé géologique de terrain de 450 m de long, parallèle à la côte a été réalisé de l'ouest vers l'est (fig. 6C, 6D). Sur ce profil, les différentes données géologiques collectées sont :

- la nature de la roche encaissante visible sur le platier ou sur la falaise ;
- son état d'altération souligné par des variations significatives de couleur de la roche ;
- son état de fracturation naturelle, c'est-à-dire la présence de discontinuités (orientation, type). Quand les conditions d'affleurements le permettaient, une analyse structurale plus fine a été réalisée avec en particulier des mesures structurales à la boussole pour mesurer la géométrie des fractures ou des profils 1D perpendiculaires aux familles principales pour estimer la densité de fracturation ;
- la nature des remplissages dominants de fractures ou les dépôts hydrothermaux présents ;
- la présence des concrétions liées à l'activité thermique des sources.

L'ensemble des données géologiques acquises a été rassemblé sous la forme d'un log géologique (fig. 7).

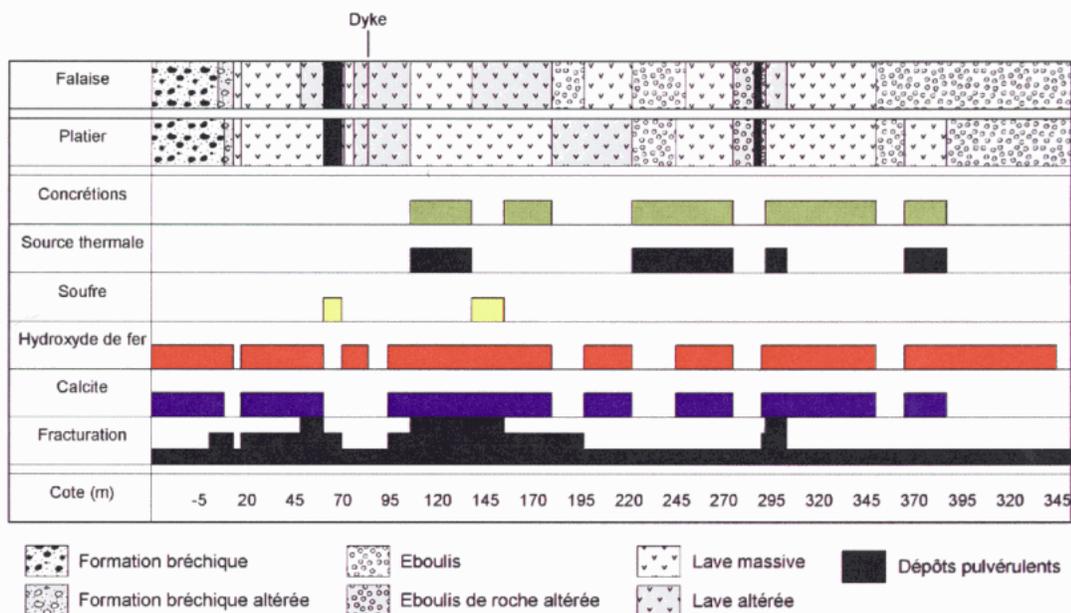


Fig. 7 - Log géologique de la plage de Petite Anse. De la gauche vers la droite, il s'agit d'un relevé géologique sur la côte de l'ouest vers l'est. La lithologie d'ensemble a été observée sur le platier et la falaise. La densité de fracturation, la présence de calcite et d'hydroxyde de fer, de minéraux du soufre, la localisation des émergences et celle des concrétions associées ont été reportées.

Quelques affleurements situés sur le pourtour de la zone d'étude (Anses d'Arlets, Morne Larcher, Petite Anse) ont été étudiés de manière à qualifier la fracturation au-delà de l'environnement immédiat des sources. La prise en compte de ces affleurements doit permettre de comparer l'état de fracturation au droit des sources avec celui présent à une échelle semi-régionale.

3.2. RÉSULTATS GÉOLOGIQUES DANS LA ZONE D'ÉMERGENCE

3.2.1. Géologie d'ensemble et description du log terrain

D'une manière générale, le site de Petite Anse se caractérise par la présence d'une lave massive grise de type andésitique, aphyrique à porphyrique, qui est affectée par des systèmes de fractures sub-verticales et des phénomènes d'altération hydrothermale associés qui ont pour effet de provoquer des changements de couleur. À l'extrémité occidentale du profil (intervalle -15 à +13 m), on observe un faciès hétérogène correspondant à une formation bréchique comportant des éléments hétérométriques et polygéniques. Ce faciès bréchique est également parcouru par un système de fractures verticales (fig. 8A, 8B, 8C, 8D). D'après la carte géologique du secteur, ce faciès, noté 4B α , correspondrait à des brèches pyroclastiques \pm homogènes en particulier sur le flanc nord du Morne Jacqueline au niveau de l'Anse Chaudière. Elles matérialisent le stade intermédiaire du cycle éruptif du Morne Jacqueline (Westercamp *et al.*, 1989). Ces brèches sont recouvertes par des laves massives d'une centaine de mètres d'épaisseur notées 4 α hb sur la carte géologique. Il s'agit du stade effusif terminal daté entre 2,3 et 3 Ma qui correspond à des formations

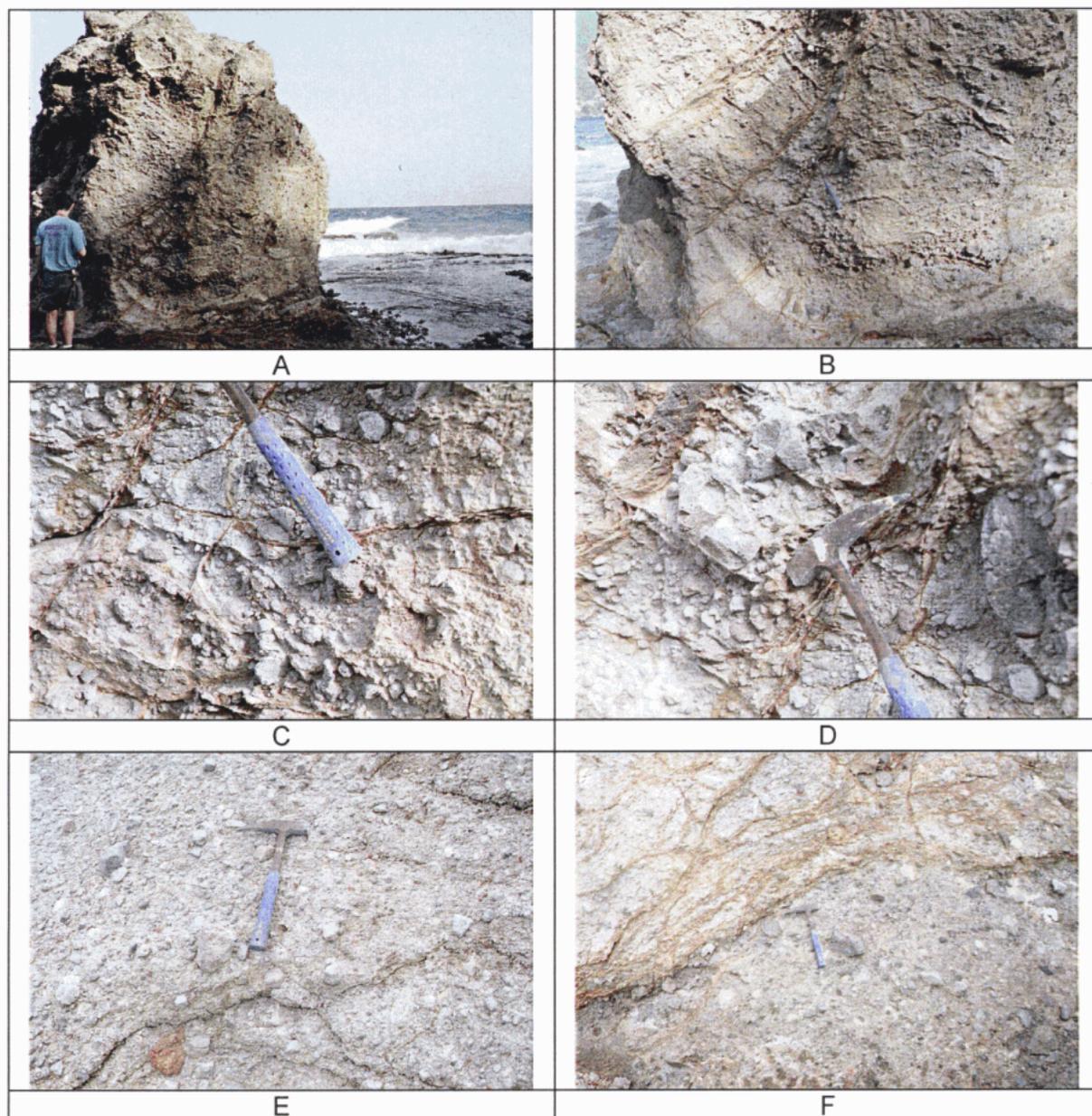


Fig. 8 - A - Formation bréchique située à l'extrémité du profil géologique fait à Petite Anse. B - Détail de la formation bréchique et de son réseau de fractures. C - Les fractures présentes s'organisent en réseau. D - Le remplissage des fractures est de la calcite et des hydroxydes de fer. E - Détail de la formation bréchique montrant des blocs relativement arrondis et de nature hétérogène. F - Contact géologique entre la lave recouvrant cette formation bréchique. Cette interface est soulignée par un horizon plus riche en hydroxydes de fer.

laviques massives. Au niveau pétrographique, cette lave est une andésite acide porphyrique contenant 30 à 50 % de phénocristaux (plagioclase, hornblende verte, minéraux opaques, rares quartz, clinopyroxène et olivine instable). Enfin, au niveau de la partie occidentale du Morne Jacqueline, on trouve un pipe andésitique de nature bréchique, noté 9 α sur la carte géologique (Westercamp *et al.*, 1989).

Au niveau du levé géologique, on distingue :

De -15 à 5 m, une zone composée d'une formation bréchique à blocs constituée de clastes d'éléments volcaniques de taille hétérométrique emballés dans une matrice grossière dont l'origine n'est pas établie (fig. 8E, 8F). Elle pourrait correspondre à une formation volcano-sédimentaire de type lahar ou traduire une activité volcanique explosive (brèche). Cette formation bréchique forme une falaise. Un éperon rocheux isolé par la mer permet de faire des observations 3D sur la géométrie du réseau de fractures (fig. 8A).

De 5 à 8 m, une formation bréchique fracturée parcourue par un réseau anastomosé de fractures associées à une halo d'altération brun rouille à jaune avec en particulier une dizaine de fractures importantes, d'épaisseur centimétrique, sub-verticales à remplissage blanc de calcite et brun rouille d'oxyde de fer.

De 8 à 13 m, une zone complètement hydrothermalisée jaunâtre à orangée brique. Il s'agit encore des brèches mais la roche est déstructurée et parcourue par un réseau très dense de fissures. Se superpose dans la masse, une forte altération qui se traduit par des dépôts d'hydroxyde de fer et surtout par un encaissant qui devient pulvérulent. Le contact entre cette formation et la lave est vertical et se caractérise par une série de plans montrant des traces d'oxydation. Il est difficile de dire à la lumière de ce seul affleurement quelles sont les relations spatiales entre ces deux formations. Un affleurement du même type observé plus vers l'ouest, montre le contact entre ces niveaux bréchiques et des laves ou intrusions andésitiques correspond. Ce contact correspond à un plan orienté N170°E avec un pendage variable de 30 à 50° vers l'ouest. La lave serait postérieure aux brèches comme l'indique la carte géologique.

De 13 à 17 m, une zone de lave grise à jaunâtre très fracturée. La lave porphyrique est complètement hydrothermalisée et de couleur jaunâtre formant des masses pulvérulentes. Le réseau de fractures est moyennement dense.

De 17 à 48 m, une zone de lave grise riche en minéraux ferromagnésiens légèrement hydrothermalisée, altérée dans la masse. On observe un réseau très dense de fractures découpant la roche en triangle et en dièdre (fig. 9A, 9B). Les fissures sont remplies de minéraux blancs carbonatés (effervescence à HCl) et d'hydroxyde de fer brun rouille. La densité de fractures est de 15 à 20 fractures/m. Les fractures à calcite sont tardives. Les fractures sont millimétriques et de l'altération hydrothermale se développe dans la lave. Il n'y a pas de failles ni de structures épaisses.

De 48 à 60 m, une zone de lave jaunâtre altérée, identique à l'intervalle précédent mais avec une intensité de l'altération qui est plus forte. On observe autour des fractures à remplissage de calcite - hydroxyde de fer, un effet d'éponte pluri-centimétrique se traduisant par une coloration gris-vert de la lave altérée. L'altération de l'encaissant semble proportionnelle à la densité de fracturation. Ces affleurements altérés forment des falaises jaunâtres, la base étant décapée par la mer. Les plans de fractures importants sont orientés N134°E75°S à 48 m, N24°E55°E à 55 m et N14°E35°E à 60 m.

De 60 à 70 m, une zone de lave altérée hydrothermalisée jaunâtre avec dépôt pulvérulent de soufre entre 67 et 70 m (fig. 9C, 9D, 9E, 9F). La lave a perdu sa texture et sa cohésion et on ne distingue plus les fractures. La zone avec dépôt de soufre ressemble à du sable et forme, dans la topographie, une dépression qui se prolonge



Fig. 9 - A - Lave très fracturée affleurant à l'extrémité occidentale du levé géologique fait à Petite Anse. B - Réseau de fractures dans la lave au pied du Morne Jacqueline. C - Lave jaunâtre à orangé dans laquelle les fractures ne sont plus visibles. D - Détail des affleurements côtiers de lave altérée précédents. E - Thalweg orienté N150°E ceinturé par de la lave altérée. F - Vue sur la falaise altérée de couleur jaunâtre au-dessus du bassin principal, le platier apparaît plus massif.

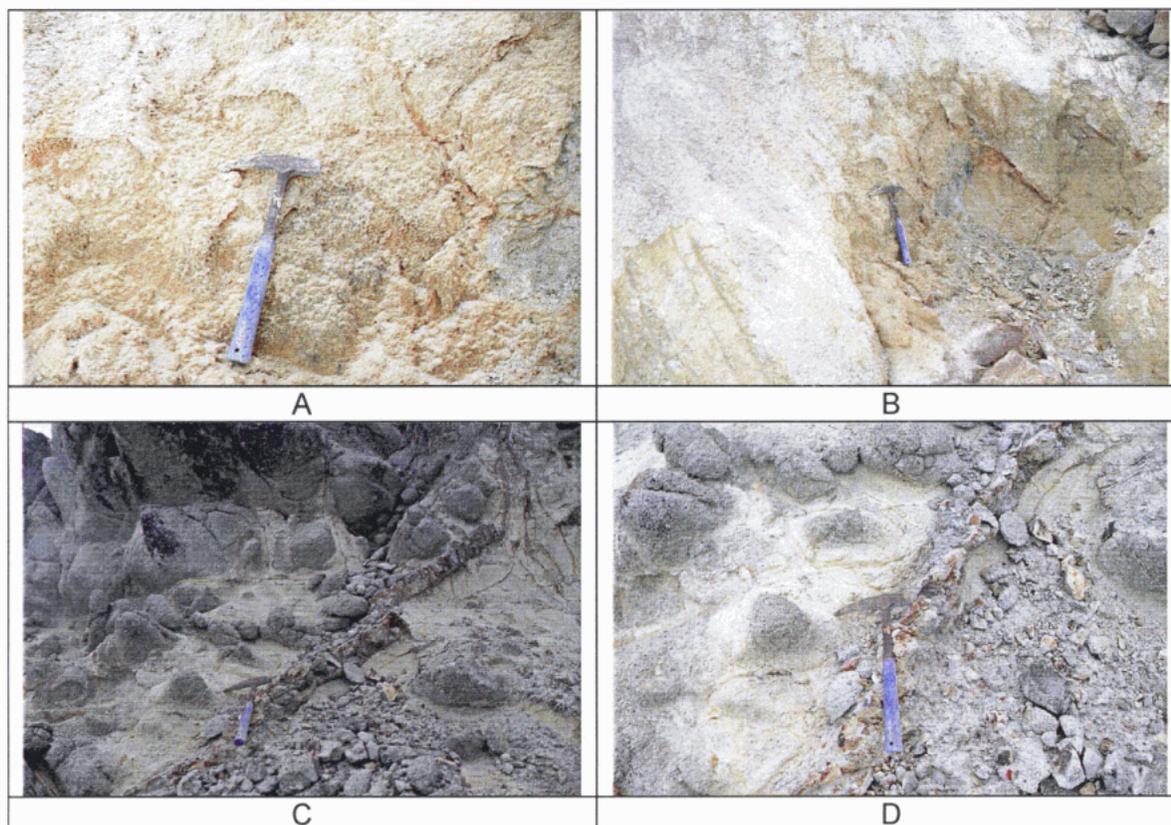


Fig. 10 - A - Petite Anse, lave orangée altérée ayant perdu toute cohésion. B - Même affleurement de lave déstructurée dont l'aspect s'apparente à un sable. C - Lave grise à jaunâtre recoupée par un dyke. D - Détail de la photo précédente.

vers le piton du Morne Jacqueline selon un axe N150°E (fig. 9E, 9F). En surface, on note la présence d'un niveau rubéfié sub-horizontale d'origine probablement supergène.

De 70 à 71 m, une zone de lave altérée jaunâtre mais sans dépôt de soufre (fig. 10A, 10B). Il y a quelques plans de fractures verticales soulignés par des traces de rubéfaction (oxyde de fer) organisés en plusieurs directions mais pas de structures majeures.

De 71 à 76 m, le même faciès qu'entre 17 et 48 m. La lave est grise légèrement altérée avec une fracturation modérée. On note la présence de remplissage à hydroxyde de fer de couleur jaune.

De 76 à 83,5 m, le même faciès qu'entre 70 et 71 m. Il s'agit d'une lave altérée jaunâtre. On voit encore la fracturation soulignée par des plans verticaux à hydroxyde de fer avec des reliques de blocs de laves gris entourés de zones plus altérées jaunâtres (fig. 10C, 10D).

De 83,50 à 83,60 m, un dyke de couleur gris clair aphyrique. Ce dyke montre des traces d'oxydation et est orienté N157°E 40°W (fig. 10C, 10D).

De 83,60 à 94 m, une zone de lave jaunâtre à blanchâtre très altérée ayant l'aspect d'un sable. Il s'agit du même faciès que dans la section 60-70 m qui se caractérise par

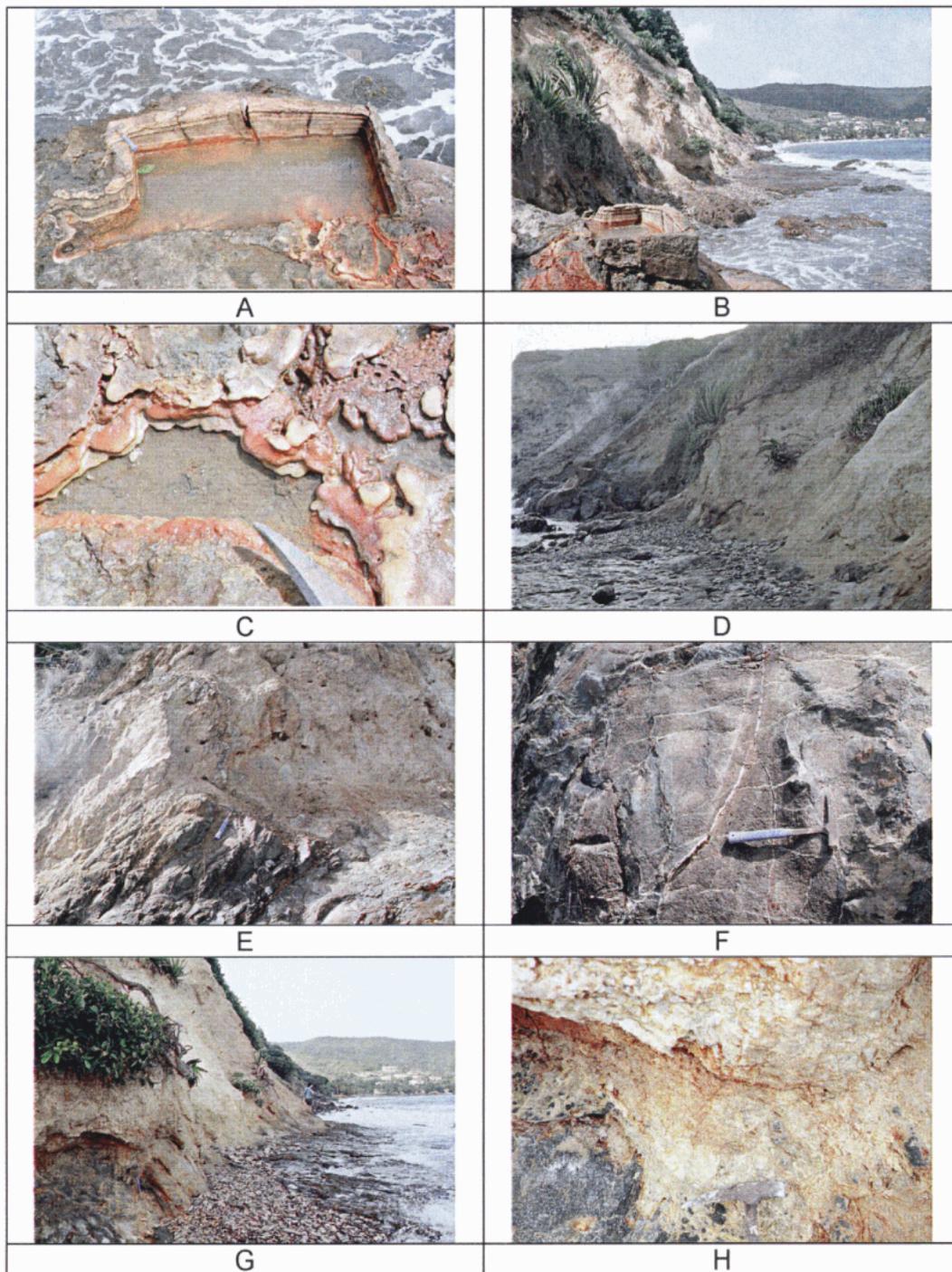


Fig. 11 - A - Bassin principal où jaillit la source thermique de Petite Anse. B - Vue vers l'est de la côte au niveau de l'émergence principale. C - Concrétions de calcite et d'hydroxyde de fer associées à la source principale. D - Vue de la côte vers l'ouest au niveau de la source. La falaise est complètement altérée (lave jaunâtre) tandis que le platier est formé d'une lave massive fracturée. E - Lave fracturée et altérée juste au-dessus de la source. F - Fractures à calcite dans la lave au-dessus de la source. G - Falaise formée d'une lave altérée jaunâtre à proximité de la source. H - Détail de la roche altérée.

une perte de la texture et de la cohésion de la roche. Il n'y a pas de dépôt de soufre d'où la couleur plus blanchâtre de la roche altérée. On ne voit plus les fractures. La limite à 94 m est interprétative car il y a des éboulis.

De 94 à 106 m, une zone de lave très altérée gris blanchâtre caractérisée par une perte de cohésion. Les feldspaths sont altérés en minéraux verts. La densité de fracturation à calcite et hydroxyde de fer est forte. L'altération dans la masse est importante.

De 106 à 138 m, une zone de lave gris-noir aphyrique parcourue par un réseau de fractures très dense à calcite blanche dominante. A la base de la falaise décapée par la mer, il y a beaucoup de concrétions formant des placages dont l'emprise atteint plusieurs mètres carrés. Ces concrétions font jusqu'à 30 cm d'épaisseur et ont piégé des coraux ramenés par la mer sur le rivage. Au dessus de la zone décapée, la falaise montre une lave complètement altérée jaune parcourue par un dense réseau de fissures à hydroxyde de fer dominant et de la calcite tardive. La cataclase est très forte. Le plan le plus important est orienté N24E60E à 118 m. La source thermale à 130 m est aménagée avec un petit bassin (fig. 11). Le débit est faible et on y observe des concrétions de calcite blanche et d'hydroxyde de fer rouille. La calcite forme des masses mamelonnées. A l'émergence, il y a un dégagement de gaz carbonique qui s'exprime de façon intermittente. L'exutoire ne correspond pas exactement à une fracture individuelle mais il y a un réseau dense de petites fractures dans la lave avoisinante. La source est située à 1 m au dessus du niveau de la mer. Les concrétions forment des placages de plusieurs mètres carrés autour de la source. Il y a plusieurs points de sortie de l'eau thermale. Le plan de fracture alimentant le bassin est orienté N124E80S à 140 m. Il s'agit d'un plan relativement court qui mesure 2 m de long.

De 138 à 155 m, une dalle de lave gris-brun à gris sombre sur le platier avec les minéraux ferromagnésiens visibles et les plagioclases en microlithes. La lave est parcourue par un réseau très dense de fractures sub-verticales à hydroxydes de fer et calcite blanche. Les fractures provoquent un effet d'éponte centimétrique souligné par une coloration gris-vert. Il y a un plan majeur orienté N04°E60°W à 148 m. En falaise, la lave est complètement altérée en masse jaunâtre donnant un aspect pulvérulent de sable. On note la présence de soufre natif jaune pulvérulent et de minéraux blancs qui pourraient être des sulfates (fig. 11F, 11G). Les rares fractures visibles sont en relief car leur remplissage est moins érodé que l'encaissant altéré.

De 155 à 180 m, une zone de lave massive. Sur le platier, on observe comme dans la section précédente une dalle de lave gris-brun à gris sombre fracturée. En falaise, il y a une masse altérée jaunâtre avec des fractures. Sur le platier, la lave gris-blanc à jaunâtre est très altérée avec un réseau très dense de fractures. La lave est rubéfiée et argilisée d'où la couleur rouille à jaune. Il y a plusieurs plans majeurs orientés N139°E60°W à 156 m, N69°E40°S à 164 m, et N119°E80°S à 170 m. On note la présence de dépôts et d'encroûtements rougeâtres à blanchâtres de plusieurs centimètres d'épaisseur.

De 180 à 197 m, en falaise une zone d'éboulis avec des blocs de lave. En platier, la lave est complètement altérée jaunâtre sans cohésion, les fractures n'étant plus visibles.

De 197 à 222 m, en falaise, la lave grise microporphyrrique altérée est parcourue par un réseau dense de fractures verticales à hydroxyde de fer et calcite. Les minéraux ferromagnésiens sont altérés et les plagioclases verdâtres sont argilisés. Sur le platier, il s'agit de petits affleurements de lave verdâtre à jaunâtre dans la masse. L'altération est forte mais quelques blocs plus sains apparaissent localement.

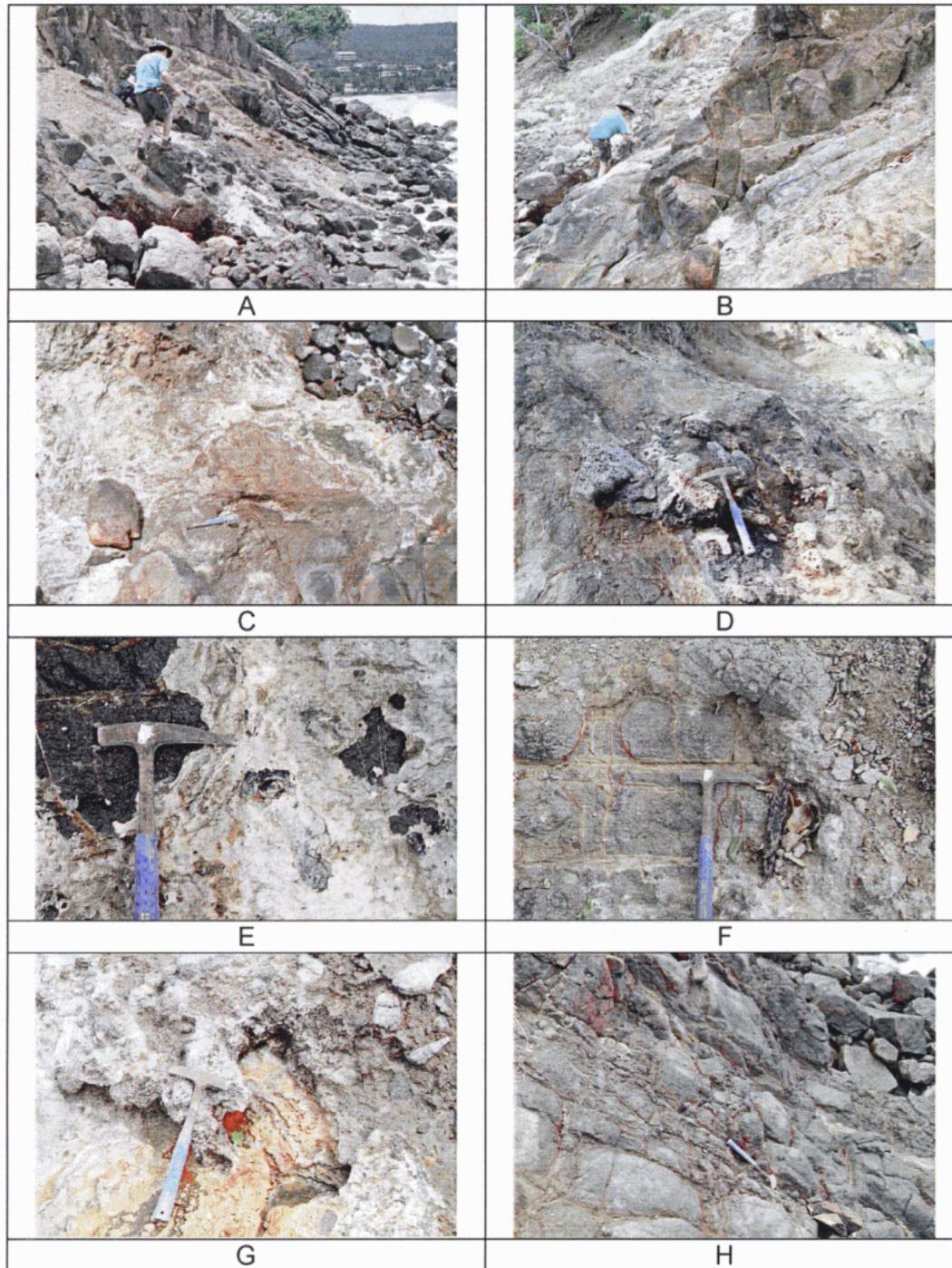


Fig. 12 - A - Petite Anse, zone de concrétions précipitant sur de la lave fracturée, vue vers l'Est. B - Lave fracturée. C - Émergence actuelle et concrétions de calcite. D - Coraux cimentés par les concrétions liées aux petites émergences actuelles. E - Placage de calcite sur la lave massive noire. F - Lave grise parcourue par des réseaux de joints. G - Concrétions de calcite sur la lave. H - Lave fracturée avec dépôt rouge le long des fractures.

De 222 à 250 m, une zone d'éboulis empêchant de voir le platier et la falaise. Il semble s'agir d'une lave grise fracturée.

De 250 à 275 m, une lave grise fracturée sur le platier avec des systèmes de fractures à hydroxyde de fer et calcite. L'altération est faible. Cette section est une zone d'émergence et de concrétions centimétriques comme en témoigne les observations faites entre 245 et 246 m, à 257 m, à 258 m, à 262 m, à 264 m et à 269 m (fig. 12A, 12B, 12C). Des coraux sont piégés dans les concrétions (fig. 12D). Les plans majeurs qui passent à proximité de la source sont orientées N174°E40°E à 258 m et N39°E80°W à 262 m. Sur la falaise, entre 250 et 275 m, on note la présence d'une lave grise très fracturée et altérée identique à celle du platier formant un éperon rocheux jaunâtre.

De 275 à 286 m, une zone d'éboulis constituée de lave très altérée qui affecte à la fois le platier et la falaise.

De 286 à 290 m, une zone de lave altérée fracturée jaune orangé complètement argilisée qui présente quelques passées moins altérées sur le platier et sur la falaise. Le réseau de fractures est très dense induisant une certaine bréchification de la lave mais avec une orientation préférentielle N04°E 65 à 80°E.

De 290 à 292 m, une zone de lave altérée moins fracturée gris-blanc formant un thalweg (éboulis) avec les minéraux ferromagnésiens rubéfiés et des plagioclases argilisés blancs porcelanés. On observe un système de fractures dense à hydroxyde de fer et calcite. Le platier n'est pas visible.

De 292 à 303 m, le platier et la falaise montrent la même géologie. Il s'agit d'une lave gris sombre à la base à ocre-jaune vers le haut, altérée et recoupée par un réseau sub-vertical de fractures à calcite et hydroxyde de fer orienté N34°-N44°E à pendage fort (80 à 90°) vers l'ouest. L'espacement interfractural moyen de cette famille est de 20 cm (fig. 12D, 12E, 12F, 12G). On note la présence d'un réseau de fractures secondaire orienté N134°E80°N. Il y a un effet d'éponte pluri-centimétrique sur toutes les fractures montrant un encroûtement de calcite blanche. Le plan majeur se situe à 300 m avec des encroûtements et des petites émergences. On observe une organisation avec un relais senestre sur une structure orientée N32°E90°. Les émergences se situent à 300 et 301 m.

De 303 à 350 m, le platier et la falaise montrant la même géologie. Il s'agit d'une lave grise peu altérée avec des plagioclases blancs dans une matrice aphyrique. Le réseau dense de fractures systématiques à calcite et hydroxyde de fer est orienté N04° à N14°E. Il y a un effet d'éponte sur les fractures induisant une coloration gris-vert et un rubanement de la roche autour des fractures ferrugineuses donnant une coloration brun jaunâtre à la lave. L'apparence feuilletée du rubanement est due à la présence de plusieurs plans parallèles à hydroxyde de fer. On observe une chronologie entre les fractures, le réseau N104°E 80°N serait antérieur au réseau N09°E80°E, qui est sécant et qui représente la direction dominante. Il y a une légère composante senestre vers 315 et 320 m avec un rejet horizontal de 2 cm et de 10 cm respectivement. À 322 m, on note la présence d'un plan majeur N19°E85°E, d'épaisseur comprise entre 3 à 5 cm à calcite blanche géodique et avec un rubanement et des concrétions blanchâtres sur la roche (fig. 13).

De 350 à 365 m, la falaise et le platier montrant une zone de rochers plus ou moins éboulés. La lave rosée montre un rubanement magmatique (?) avec des alternances

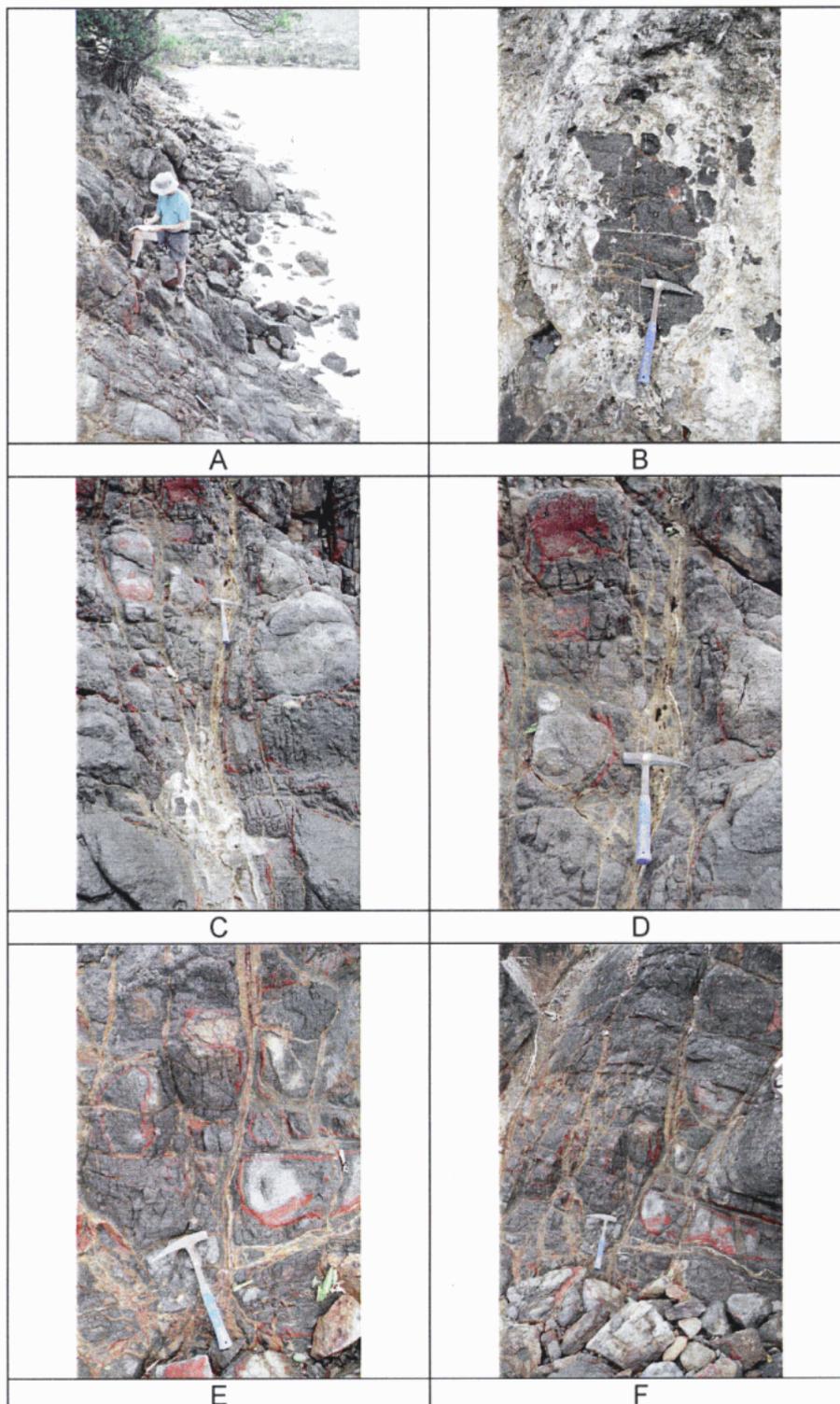


Fig. 13 - A - Petite Anse, lave fracturée le long de la côte. B - Placage sur lave noire. C - Lave fracturée avec calcite géodique brune et hydroxyde de fer. D - Détail de la calcite géodique. E - Calcite brune et hydroxyde de fer. F - Détail de la photo précédente.

de bandes rosées et brunes. La texture est grenue dans le faciès brun. Il y a quelques fractures visibles, une altération faible mais les affleurements ne sont pas en place.

De 365 à 387 m, la falaise montre des éboulis masqués par de la végétation. Sur le platier, il y a des sources à 368 m, 370 m et 380 m. La zone d'émergence et de concrétions est située entre 366 et 387 m (fig. 14A, 14B). Des placages blanchâtres sont dominants et recouvrent la lave fracturée. La lave sombre à gris clair avec des plagioclases en microlithes est affectée par un réseau de fractures verticales à calcite et hydroxyde de fer avec un rubanement parallèle aux fractures. Le système N14°E sub-vertical et le système N104°E sub-vertical s'individualisent. Le réseau de fractures à calcite N104°E recoupe celui orienté N14°E.

De 387 à 445 m, une zone d'éboulis sur le platier et la falaise. Le faciès dominant est une lave fracturée grise avec remplissage d'hydroxyde de fer, la direction dominante étant orientée N019°E.

De 445 à 453 m (fin du profil), une zone de lave gris clair à blanc moyennement à faiblement altérée sur la falaise. Les minéraux ferromagnésiens sont altérés et les plagioclases sont verdâtres à blanchâtres (argiles ?). La fracturation est à dominante E-W. Il n'y a pas de plan majeur. Le platier correspond à la plage de Petite Anse.

Synthèse données de terrain de la zone d'émergence

Le relevé géologique fait dans le secteur de la source de Petite Anse montre (fig. 7) que la roche hôte où se concentrent préférentiellement les émergences et les concrétions récentes correspond à une lave massive fracturée et présentant des signes d'altération significatifs. D'une manière générale, l'intensité de la fracturation est toujours importante. Les zones les plus fracturées se corrélaient globalement avec les zones d'émergences ou de concrétions. La calcite blanchâtre voire localement brunâtre est ubiquiste en remplissage de fractures à la fois dans la lave et la formation bréchique. La présence d'hydroxyde de fer matérialisée par une coloration rouge sang de la lave (fig. 13) est également ubiquiste le long du profil. Elle traduit probablement une altération des minéraux primaires riche en fer en liaison avec des circulations hydrothermales dans les fractures. Dans les zones où la roche volcanique est la plus altérée, on observe une perte totale de cohésion de la roche et une transformation ultime soulignée par la présence de minéraux de la famille du soufre (soufre natif, sulfates). On observe également des différences entre l'état de la roche visible sur le platier balayé par la mer et la falaise. En effet, le platier est généralement fracturé mais plus massif tandis que la falaise montre des affleurements pulvérulents au sein desquels la fracturation n'est plus identifiable.

3.2.2. Données structurales le long de la côte

Sur le terrain, 7 stations notées 1 à 7 ont fait l'objet de relevés de fracturation. Des structures créées en Mode 1 de type joint, c'est-à-dire ne présentant aucune trace de cisaillement ont été mesurées à la boussole. Les stations 1 à 6 sont distribuées sur le profil de détail et la station n° 7 est localisée un peu plus vers l'ouest (fig. 15). Sur le terrain, il s'agit de fractures rectilignes pluri-métriques à fort pendage. Le réseau

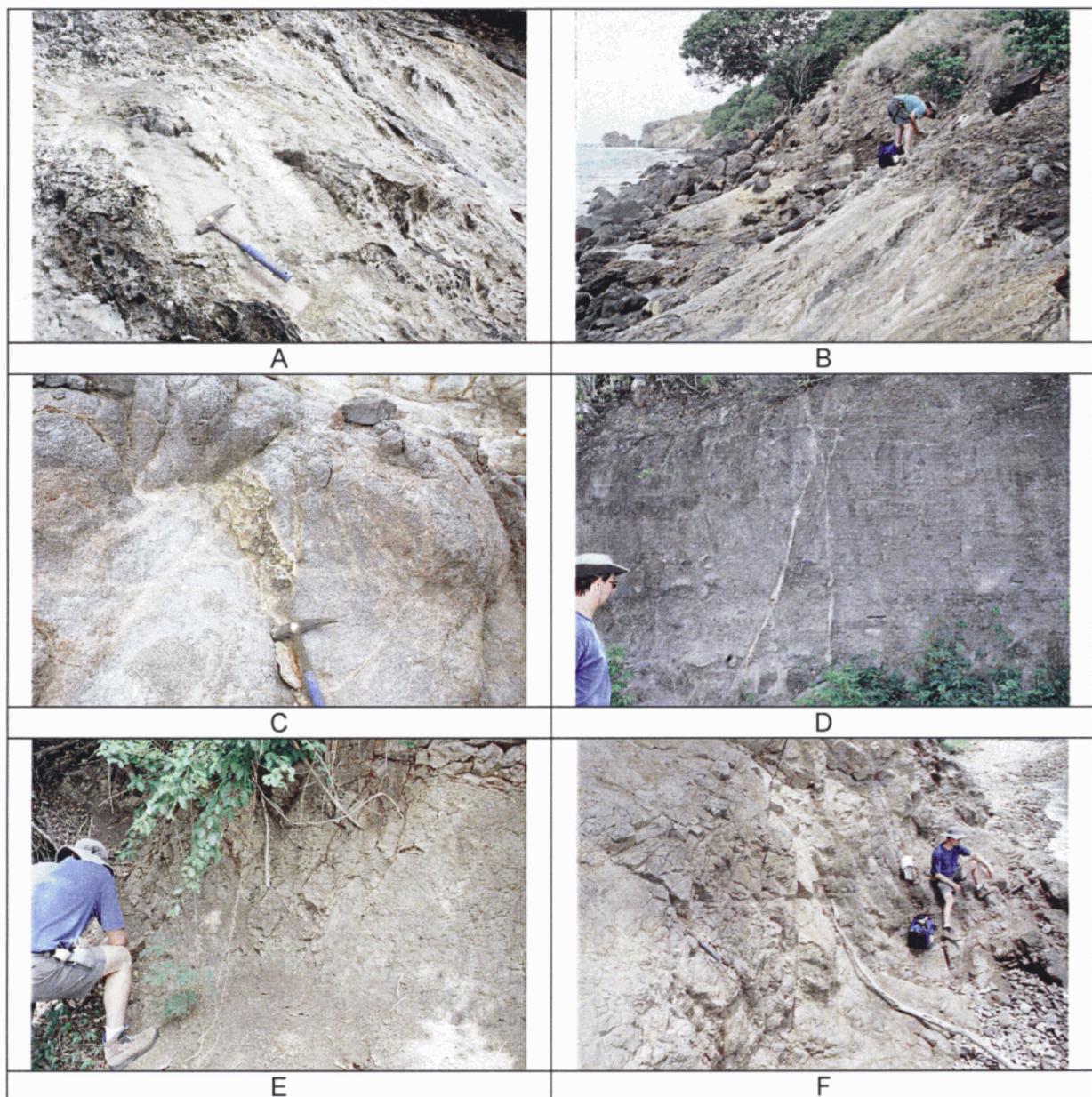


Fig. 14 - A - Petite Anse, zone d'encroûtement le long de la côte. B - Placage de calcite sur lave. C - Fracture à calcite géodique à Petite Anse. D - Pointe du Diamant, faille normale à remplissage de calcite. E - Route des Anses d'Arlet, réseau de joints dans lave rubéfiée. F - Anse Chaudière, affleurement côtier de lave fracturée avec remplissage de calcite.

perpendiculaire à la côte est le plus visible. Les valeurs d'orientation ont été corrigées de la déclinaison magnétique.

Station 1 (zone à +372 m). Il s'agit d'une zone présentant des encroûtements et des petites émergences. La densité de fractures est de l'ordre de 6 à 8 fractures par mètre. On observe à la fois des fractures à remplissage d'hydroxyde de fer seul et des fractures à hydroxyde de fer puis calcite dominante. Le remplissage carbonaté semble

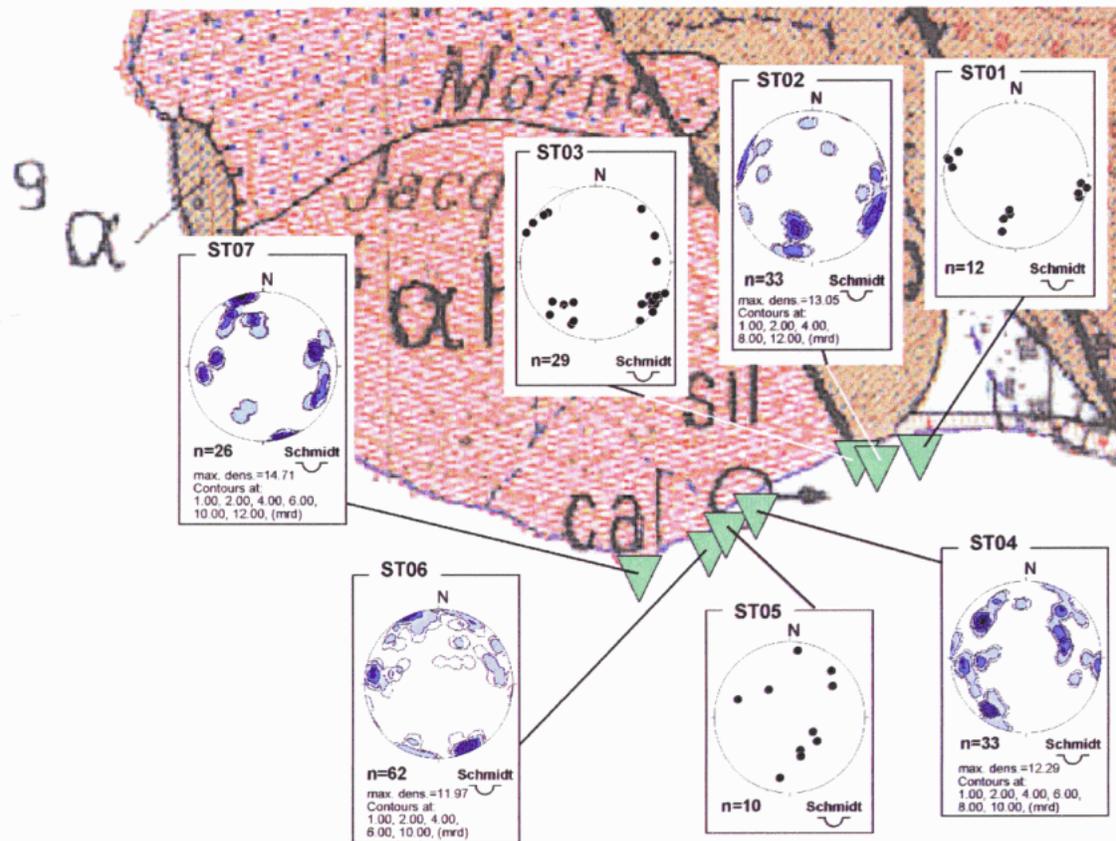


Fig. 15 - Position des stations de mesures structurales le long de la côte de Petite Anse. Projection de Schmidt, hémisphère inférieure. La zone d'émergence principale se situe au niveau de la station 4.

tardif. Au niveau géométrique, un système composé de deux familles orthogonales s'individualise. Il est caractérisé par des fractures à pendage oblique avec la famille secondaire ESE-WNW qui semble postérieure à la famille principale NNE-SSW (fig. 15). Les petites émergences semblent associées à la famille principale NNE-SSW.

Station 2 (zone à 320 m). Il s'agit d'une zone fortement fracturée avec une densité de fractures de l'ordre de 4 fract./m. Comme pour la zone précédente, on note la présence d'encroûtements carbonatés et de petites sources. Deux profils 1D perpendiculaires aux familles principales N30°E et N105°E ont été réalisés sur le terrain. On observe des fractures N30°E avec un remplissage blanc géodique de nature carbonatée (fig. 15). Le remplissage est de plusieurs centimètres d'épaisseur en association avec des encroûtements qui recouvrent la lave. On note un effet d'éponte ou halo d'altération mis en évidence par une décoloration brun-ocre de la lave.

Station 3 (zone à 300 m). Il s'agit encore d'un secteur avec des encroûtements carbonatés et des petites émergences. On observe le réseau de fractures systématiques N30°E qui est bien développé avec quelques encroûtements de calcite. La famille N125°E à fort pendage vers le nord est secondaire.

Station 4 (zone à 130 m). Cet affleurement correspond à la zone d'émergence principale au niveau du bassin. La majorité des fractures sont de puissance millimétrique et à remplissage de calcite blanche. Il y a de nombreux encroûtements

autour du bassin. Au niveau géométrique, on note une plus forte dispersion directionnelle mais les familles NE-SW et NW-SE sont dominantes (fig. 15). Il y a une famille secondaire à pendage oblique orientée NNW-SSE.

Station 5 (zone à 84 m). Cet affleurement est relativement altéré et il est difficile de visualiser les fractures. Compte tenu de l'état de la roche en place, peu de données ont été acquises et on note une certaine dispersion. On note la présence d'un dyke orienté N145°E40°W.

Station 6 (zone à 45 m). Ce secteur montre une zone de lave très fortement fracturée. Les fractures les plus longues sont les plus rectilignes et sont celles qui sont orientées N140°E. Leur jeu est peut-être le plus tardif. Cet affleurement est proche du contact avec les formations de type brèche. Deux familles directionnelles s'individualisent : une famille ESE-WNW sub-verticale et une famille NNE-SSW fortement pentée. Localement, on observe des décalages horizontaux. Une fracture N142°E 61°W est décalée en senestre apparent de plusieurs centimètres à la fois par une fracture N61°E 87°N et une fracture N71°E 86°S. Aucune strie n'a été observée.

Station 7. Cet affleurement est localisé plus vers l'ouest en dehors du profil. On observe localement à la fois de la lave en place ainsi que son contact avec la brèche. Dans la lave, deux familles sub-verticales directionnelles s'individualisent : une famille ENE-WSW verticale et une famille NNW-SSE à fort pendage (fig. 15). On observe des fractures à calcite blanche géodique dans la lave fracturée (fig. 14C). Les fractures sont principalement orientées ENE-WSW dans la brèche.

Dans l'optique de connaître les caractéristiques structurales des réseaux de fractures à l'échelle semi-régionale, des compléments de terrain ont été réalisés sur 7 stations de mesures, notées station 8 à station 14, réparties sur le pourtour de Petite Anse (fig. 16).

Les principaux résultats par stations sont présentés ci-dessous.

Station 8. Sur une dalle d'andésite massive, des fractures et des fentes à calcite millimétrique s'organisent en deux familles directionnelles sub-verticales, une famille NW-SE et une famille ENE-WSW (tabl. 1).

Station 9. Il s'agit d'affleurements de lave de couleur jaunâtre à orangé altérée par le climat. On y distingue quelques fractures millimétriques remplies d'un dépôt blanc. Les fractures sont orientées NE-SW et ESE-WNW.

Station 10. Il s'agit du même type d'affleurement que pour la station 9. La famille principale est orientée NW-SE et la famille secondaire NE-SW.

Station 11. Cet affleurement est localisé sur le Morne Larcher à l'extrémité sud de la Pointe du Diamant. Les structures observées sont des fentes à calcite millimétrique à centimétrique qui recoupent les formations volcaniques stratifiées du Morne Larcher (scories, brèches). Ces fractures sont bien réglées au niveau directionnel avec une famille principale orientée N-S. Plusieurs de ces structures présentent clairement un jeu en faille normal avec des rejets apparents pluricentimétriques (fig. 14D).

Station	Famille principale 1	Famille principale 2	Famille secondaire	Lithologie
1	N013°E 84°W (système conjugué)		N106°E 45°N	Lave andésitique
2	N107°E 54°N (système conjugué)	N029°E 81°W		Lave andésitique
3	N032°E 84°W (système conjugué)		N127°E 67°E	Lave andésitique
4	N39°E 70°E	N125°E 75°N	N167°E 45°W	Lave andésitique
5				Dyke dans lave altérée
6	N065°E 87°N (jeu senestre)	N10°E 78°E		Lave andésitique Brèche
7	N074°E 90°	N164°E 63°E		Lave andésitique
8	N134°E 78°S	N069°E 70°N		Lave andésitique
9	N030°E 84°E	N108°E 84°N		Lave altérée
10	N131°E 72°S		N035°E 60°W	Lave altérée
11	N009°E 87°W			Formations volcaniques
12	N150°E 66°W	N065°E 72°N		Lave rubéfiée
13	N120°E 84°S	N177°E 85°E		Brèche
14	N088°E 81°E	N165°E 53°E		Lave andésitique

Tabl. 1 - Caractéristiques géométriques des familles de fractures mesurées à Petite Anse et sa périphérie.

Station 12. Dans les laves altérées largement rubéfiées (fig. 14E), des fractures millimétriques s'organisent en deux familles principales orientées NW-SE et ENE-WSW. On note une certaine dispersion directionnelle autour de la famille NW-SE.

Station 13. Cette station, située au nord du Morne Jacqueline sur la côte au niveau de Anse Chaudière (fig. 14F), montre des fractures millimétriques qui recoupent une brèche polygénique de même nature que celle observée à Petite Anse. Les familles principales sont orientées NW-SE et N-S.

Station 14. Cette station montre un réseau de fractures à calcite blanche dans une lave grise andésitique. Au niveau directionnel, on observe deux familles principales sub-verticales orthogonales : une famille E-W et une famille NNW-SSE (fig. 16).

Synthèse fractures

La fracturation dans la périphérie de Petite Anse est surtout marquée par des fractures ou des fentes à calcite de taille millimétrique voire centimétrique. Des failles à jeu apparent normal ont été observées à la Pointe du Diamant et sont les seules structures observées ayant une composante décrochante. Plusieurs familles directionnelles sont généralement présentes à l'exception de la Pointe du Diamant où on ne rencontre que des failles normales orientées N-S. Ailleurs, deux familles directionnelles co-existent et sont souvent orthogonales entre elles et à très fort pendage. Les directions principales observées sont E-W, N-S, NW-SE et pour une moindre part NE-SW.

Les affleurements situés dans les laves massives au niveau de Anse Chaudière au nord du Morne Jacqueline sont ceux qui ressemblent le plus aux affleurements de Petite Anse (station 14). En effet, la lave est découpée par des réseaux de même allure à remplissage de carbonate.

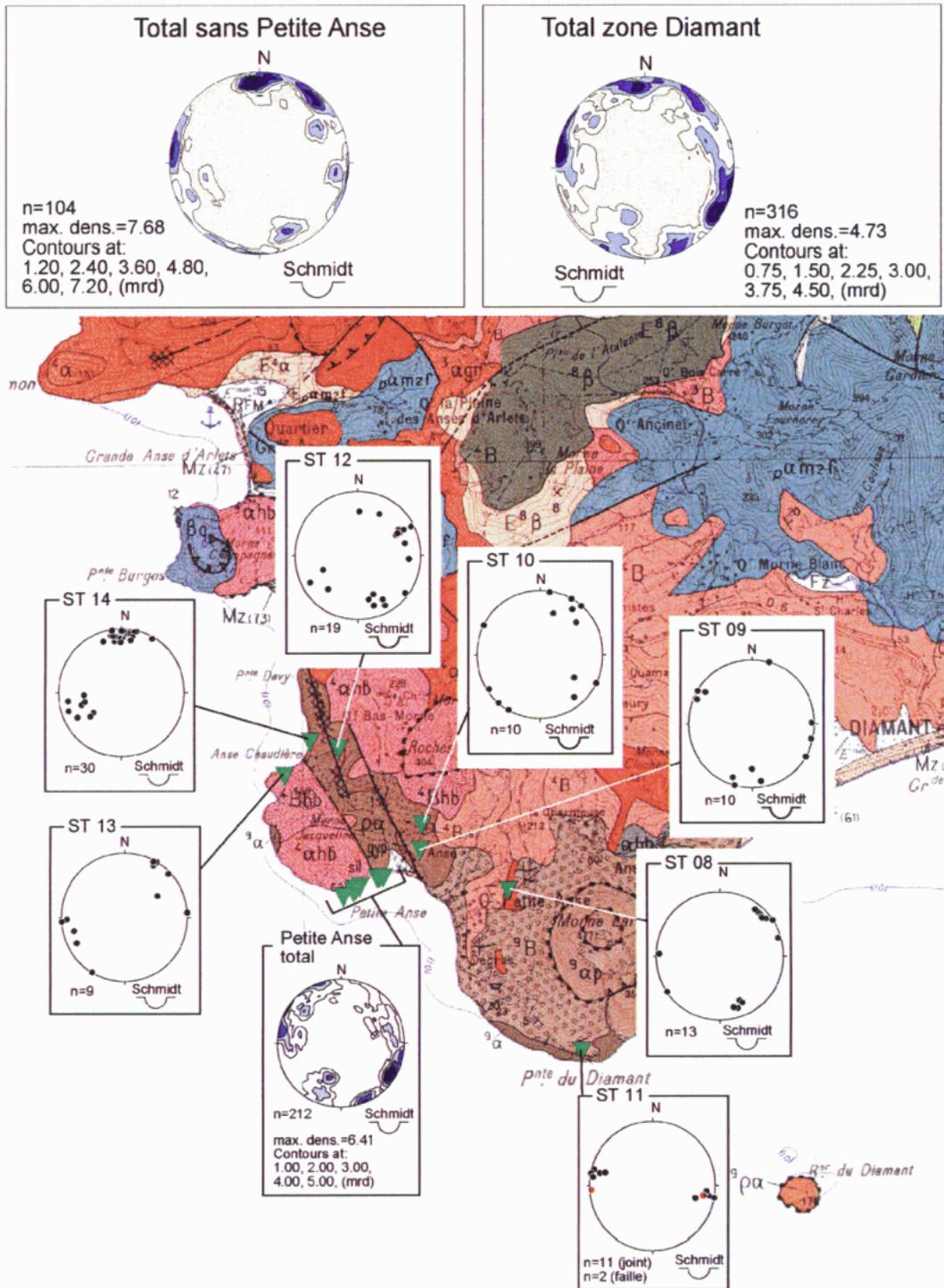


Fig. 16 - Position des stations de mesures structurales dans le secteur du Diamant – Anses d'Arlets. Projection de Schmidt, hémisphère inférieur.

À Anse Chaudière et Petite Anse, deux familles orthogonales s'individualisent. Cependant, à Petite Anse (stations 1 à 6), bien que dispersée, la fracturation présente deux orientations principales N32°E 81°W et N110°E 49°N. Seule la famille proche de E-W se retrouve dans la lave sur la côte à Anse Chaudière. En effet, la famille N30°E n'existe pas.

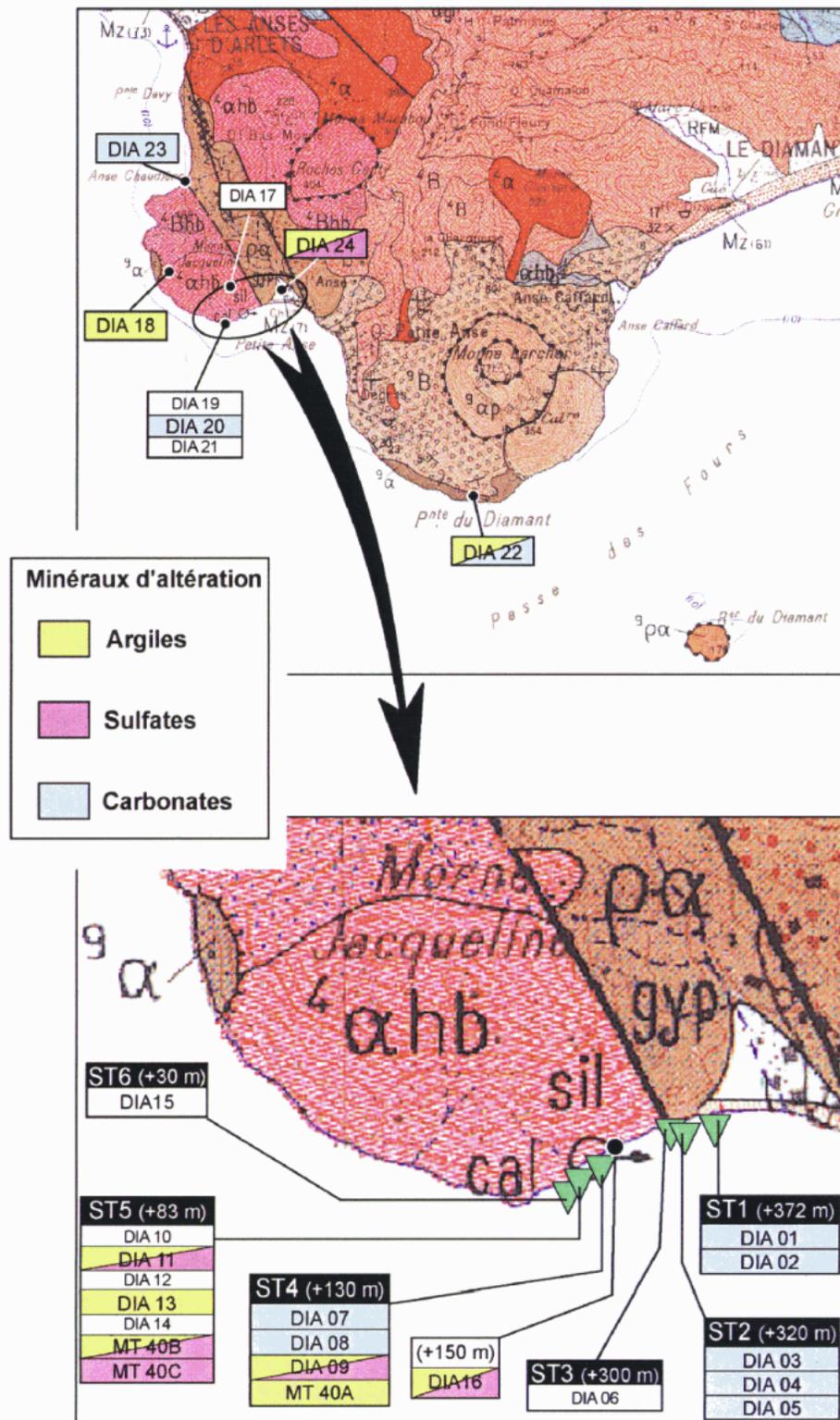


Fig. 17 - Localisation des échantillons de roche ou de remplissages de fractures ayant fait l'objet d'une analyse minéralogique (diffraction de rayons X, lames minces) dans le secteur de Petite Anse. Localisation des remplissages de fractures présentant de la calcite ou des carbonates, des argiles et des sulfates dans le secteur de Petite Anse.

Parfois, une auréole rougeâtre, probablement issue de la déstabilisation des minéraux ferro-magnésiens comme les pyroxènes en hydroxyde de fer, entoure les fractures (fig. 13A). Au niveau répartition spatiale, la calcite est relativement ubiquiste et a été observée en remplissage de fractures sur une grande partie des sites (Diamant, Anse Chaudière, Petite Anse, fig. 17). Lorsqu'elle se présente sous forme d'encroûtement et de concrétions en placage sur la lave, elle n'a été observée qu'au niveau des émergences le long du secteur de Petite Anse (DIA01, DIA04, DIA07).

Dans les échantillons de roche altérée, on trouve des argiles principalement de type smectite autour de l'émergence actuelle (ST3, ST4, DIA16) mais également sur des échantillons localisés en dehors des sources (DIA24, DIA18, DIA22). Localement dans les dépôts pulvérulents, on trouve des argiles interstratifiées illite-smectite et de la sépiolite (MT40A).

Des sulfates sont également présents dans la roche altérée. Il s'agit principalement de gypse, de jarosite, d'epsomite, de hexahydrate, de tamagurite et d'hydro-sulfate de potassium et d'aluminium (tabl. 2). Les échantillons riches en sulfates sont en majorité localisés autour de l'émergence actuelle dans les niveaux jaunâtres pulvérulents (fig. 17). Ils dérivent très probablement de l'oxydation du soufre natif précipité à partir de l'hydrogène sulfuré (H₂S), gaz dissous dans le fluide hydrothermal, ainsi que de l'oxydation des sulfures. Très localement, des zéolites et des sulfures ont été mis en évidence ainsi que des phases mal cristallisées de type amorphe (tabl. 2).

3.3. INTERPRÉTATION DE LA GÉOLOGIE

3.3.1. Au niveau géologie régionale

La source thermique de Petite Anse se situe au pied du Morne Jacqueline, donc dans la partie occidentale de la presqu'île des Trois Îlets (fig. 18). Dans ce secteur, l'axe volcanique Burgos – Diamant orienté NW-SE représente le système volcanique le plus récent avec des appareils mis en place depuis moins d'un million d'années (Gourgaud et Bourdier, 1982 ; Gourgaud, 1985 ; Westercamp *et al.*, 1989). Parmi ces appareils, le Morne Larcher situé à 2 km au sud-est de la source thermique de Petite Anse a un âge supposé autour de 0,9 Ma. Au sud-est, le Rocher du Diamant, plus distant, a été daté à 0,96 Ma (Bellon *et al.*, 1974). Au nord, le dôme de la Pointe Burgos (Morne Champagne) n'est pas daté mais serait également donné pour 0,9 Ma. Il n'y a pas de datation absolue pour le Morne Jacqueline, mais cet appareil est plus ancien que le Morne Larcher et serait daté vers 2 Ma d'après la carte géologique. En revanche, sur son flanc ouest, il y a un pipe andésitique contemporain de la mise en place du Morne Larcher. L'environnement géologique de la source de Petite Anse se caractérise donc par la présence d'un volcanisme récent susceptible d'avoir représenté une source de chaleur potentielle pour le développement de systèmes hydrothermaux, le Morne Larcher étant l'appareil le plus proche géographiquement et le plus récent.

Au niveau structural, la présence de deux failles cartographiques orientées NNW-SSE a été reportée sur la carte géologique au 1/50 000. Elles mettent en contact les laves massives andésitiques du Morne Jacqueline avec le substratum massif mio-pliocène composé de dacites. La réalité de ces failles n'a cependant pas pu être vérifiée pendant la campagne de terrain. En revanche, les mesures effectuées au niveau de quelques stations proches de ces deux failles indiquent la présence d'une famille de

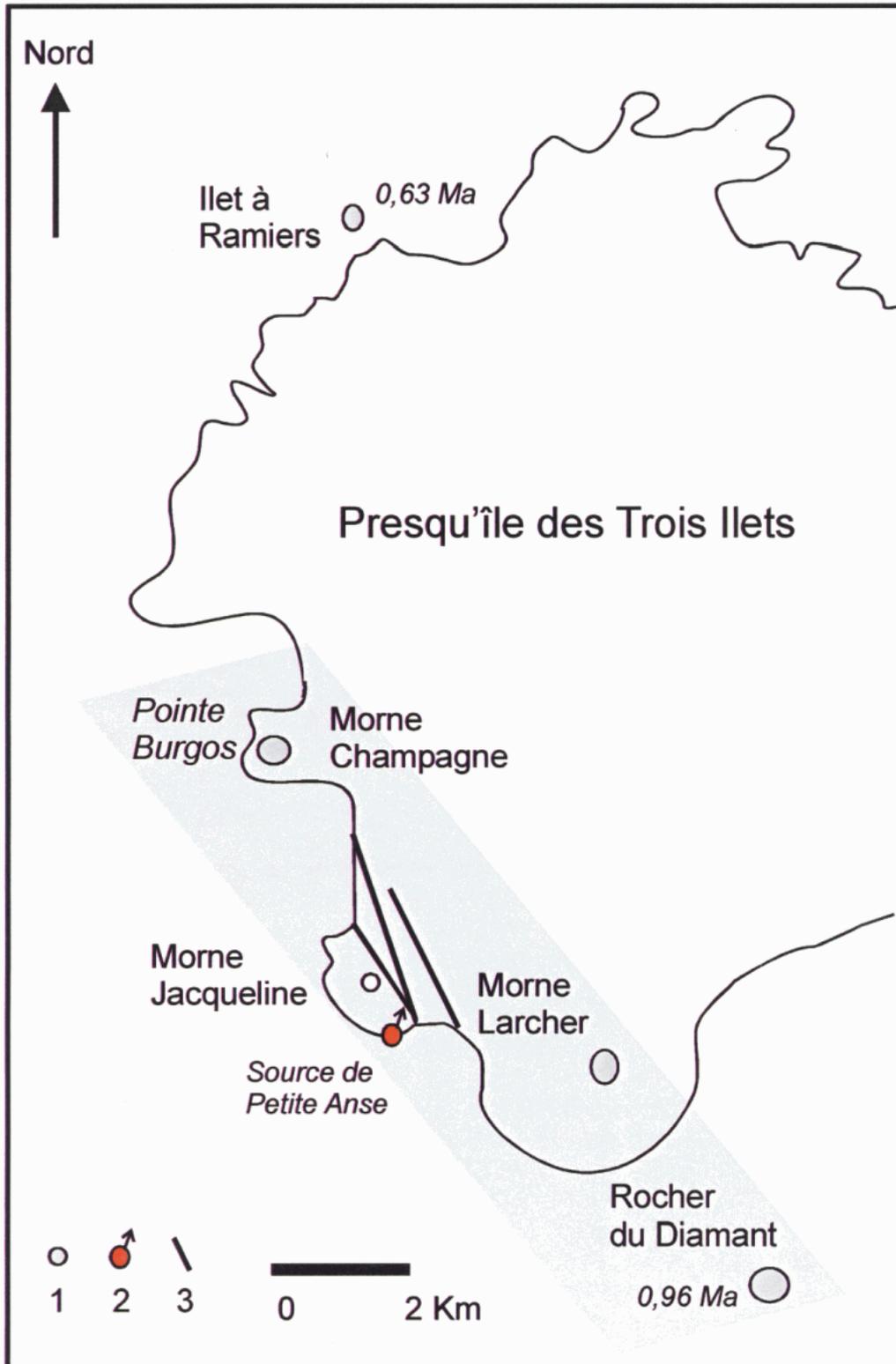


Fig. 18 - Localisation des édifices volcaniques récents dans la Presqu'île des Trois Ilet entre Pointe Burgos et Rocher du Diamant. 1 : Appareils volcaniques avec leur âge ; 2 : Source thermique et altération ; 3 : Failles cartographiques in Westercamp et al., 1989. En grisé, axe volcanique récent.

joints orientée NNW-SSE (stations 9, 10, 12, 13, 14) associée avec des familles E-W, ENE-WSW et NW-SE.

Au niveau régional, les directions dominantes de joints directions sont orientées ENE-WSW et NW-SE mais la présence de familles directionnelles secondaires génère un réseau relativement isotrope avec des familles qui font entre elles un angle de 30° en moyenne. L'origine de cette fracturation n'est pas connue mais elle pourrait correspondre à des fentes de refroidissement de la lave en liaison avec la mise en place des différents édifices volcaniques. Dans certaines zones, on n'observe que deux familles directionnelles, peut être en raison d'un problème de biais d'échantillonnage. La station 11 qui présente des failles normales orientées N10°E, indiquerait une extension N100°E ayant affecté le Morne Larcher.

3.3.2. Au niveau géologie locale

La source thermique de Petite Anse émerge au niveau de la mer sur le flanc sud du Morne Jacqueline. L'encaissant correspond à des laves massives de nature andésitique datées à plus de 2 Ma d'après la carte géologique (Westercamp *et al.*, 1989). Localement, on observe plusieurs points de sortie dans la lave fracturée avec des zones d'encroûtements composées de calcite blanchâtre et d'une phase mal cristallisée à base d'hydroxydes de fer.

Au niveau structural, les laves et les brèches du secteur de Petite Anse sont intensément fracturées et affectées par des systèmes de fracturation qui possèdent les mêmes caractéristiques géométriques (organisation en réseau, mêmes familles directionnelles). Les structures correspondent à des joints, c'est-à-dire des fractures sans indice de cisaillement. Il n'y a pas de failles hormis quelques rares décalages de structures à jeu apparent senestre. Dans la zone d'émergence principale, il y a 3 familles verticales sub-orthogonales qui se recoupent au niveau de la station 4. Dans la zone d'émergence (stations 1 à 6), les familles directionnelles dominantes sont orientées NNE-SSW à NE-SW, E-W à ESE-WNW, et plus localement NNW-SSE.

La principale conclusion que l'on peut proposer à l'échelle locale, est l'importance de la fracturation et des phénomènes d'altération associés qui ont affecté les formations volcaniques affleurant en bord de mer de part et d'autre de la zone d'émergence de la source thermique de Petite Anse sur plusieurs centaines de mètres. Cette intensité est en partie contradictoire avec l'activité hydrothermale actuelle relativement ponctuelle de cette source thermique. Il faut également souligner que Petite Anse est le seul endroit dans le sud-ouest de la presqu'île des Trois Îlets où fracturation naturelle, altération hydrothermale et présence d'une source thermique, aient été reconnues et coexistent spatialement. La question de leur relation temporelle se pose et on ne peut exclure que l'activité hydrothermale actuelle représente le stade avancé du fonctionnement d'un système hydrothermal en cours de refroidissement. On peut également envisager la possibilité qu'elle se soit superposée à une activité hydrothermale ancienne indépendante.

3.3.3. Au niveau hydrothermal

Les laves andésitiques fracturées ainsi que les brèches sous-jacentes observées à Petite Anse, montrent un colmatage assez systématique par de la calcite blanche tapissant les réseaux de joints. Cet épisode à calcite souvent géodique apparaît être le plus précoce. La présence de calcite qui tapisse également les fentes et les failles normales observées au sud du Morne Larcher (station 11), indique que cet épisode est postérieur au Morne lui-même, daté à 0,9 Ma.

On trouve également de manière relativement ubiquiste des argiles de type smectite à la fois dans le secteur des sources mais également un peu à l'extérieur du prospect. La smectite ou les argiles interstratifiées de type illite-smectite représentent une phase d'altération assez commune des systèmes hydrothermaux dans la partie la plus superficielle des systèmes hydrothermaux à pH neutre pour des températures variant entre 30 et 220 °C (Reyes, 1990).

Dans le secteur de Petite Anse, le long de la côte, à proximité des émergences, on trouve des volumes de laves altérées pulvérulentes qui contiennent en plus des argiles de type smectite, des minéraux du soufre (sulfates) et plus localement des zéolites. Les minéraux de la famille des sulfates (gypse, jarosite, hexahydrate, tamarugite, epsomite, hydro-sulfate de K et Al) sont des minéraux qui caractérisent également les environnements hydrothermaux à pH neutre (Reyes, 1990). Leur formation pourrait également être liée à une interaction avec l'eau de mer car on les trouve dans les environnements marins évaporitiques. Ils peuvent donc marquer des conditions de température assez basses. Ces minéraux sont également symptomatiques de l'activité fumerollienne accompagnant l'activité volcanique.

La lave altérée correspond à une forte déstabilisation des minéraux primaires (plagioclases, pyroxènes, opaques) et de la mésostase ce qui se traduit par un changement de couleur et une perte de texture et de cohésion de la lave qui ressemble à un sable. Ces volumes de laves extrêmement altérées traduisent une activité hydrothermale importante sans rapport avec le débit limité de la source actuelle de Petite Anse.

L'épisode de dépôt le plus récent et qui paraît être associé aux émergences actuelles correspond à des encroûtements mixtes de carbonates et d'hydroxydes de fer mal cristallisés. Ces encroûtements ont également « fossilisé » des coraux ce qui témoigne de leur activité récente.

3.4. CONCLUSIONS SUR PETITE ANSE

D'un point de vue géologique, le secteur de Petite Anse se caractérise par une fracturation et une altération hydrothermale localisées et intenses. L'origine de cette fracturation organisée sous la forme de réseaux de joints extrêmement développés n'est pas établie car les failles cartographiques orientées NNW-SSE, connues sur la carte géologique n'ont pas été retrouvées sur le terrain. Au niveau de Petite Anse, aucune structure tectonique ou volcano-tectonique de grande ampleur (caldeira, graben, faille locale ou régionale) susceptible de favoriser la circulation des fluides en profondeur n'a été identifiée. En revanche, les réseaux de joints sont particulièrement

développés sur le pourtour du Morne Jacqueline même au-delà du secteur des émergences.

L'altération hydrothermale actuelle est limitée à des encroûtements de carbonates et d'hydroxydes de fer qui précipitent au niveau de la source et de petits griffons latéraux en bordure de mer. Cette activité hydrothermale se superpose clairement à un épisode antérieur d'altération et de fracturation largement développé de part et d'autre de la source thermique. Les relations temporelles entre ces deux épisodes ne sont pas clairement établies. L'activité actuelle pourrait représenter le stade avancé d'un système hydrothermal ancien, en cours de refroidissement, responsable des altérations en masse. On peut supposer que c'est la mise en place du Morne Larcher, appareil volcanique spatialement le plus proche et le plus récent situé au sud-est de ce secteur, qui soit à l'origine de cette activité ancienne. On peut également envisager, que l'activité actuelle n'ait pas de lien direct avec l'épisode antérieur d'altération et que la source thermique représente l'expression d'un système indépendant.

La source thermique de Petite Anse se situe donc dans une région qui témoigne d'une histoire volcano-tectonique polyphasée qui a permis la mise en place d'un système fracturé en grand avec une forte densité de fractures.

Dans ce contexte, l'activité hydrothermale pourrait se décomposer en deux stades :

- un stade fossile qui se caractérise par une activité hydrothermale qui provoque une forte altération des formations volcaniques ;
- un stade actuel caractérisé par les émergences et les encroûtements de carbonates et d'hydroxydes de fer.

4. Conclusion

Dans le cadre de la réévaluation du potentiel géothermique de l'île de La Martinique, deux zones distinctes ont fait l'objet de reconnaissance géologique de terrain. Il s'agit des régions de Morne Rouge - Montagne Pelée au nord, avec en particulier, le secteur de Saint-Pierre, et la zone du Diamant au sud, avec en particulier, le secteur côtier de Petite Anse.

La zone de Saint-Pierre ne présente pas de trace significative d'activité hydrothermale (absence de sources, de dépôts hydrothermaux, de fumerolles). Bien que de nombreux escarpements morphologiques existent sur le terrain, la faille de Saint-Pierre n'a pas été retrouvée. Ces escarpements sont le résultat de la déstabilisation gravitaire du volcan comme l'ont montré des études antérieures (Deplus *et al.*, 2001). De nombreuses fractures ont bien été identifiées sur le secteur sud de Saint-Pierre dans les formations volcaniques associées au système des Pitons du Carbets. Le secteur de Saint-Pierre est peu intéressant pour d'autres reconnaissances par forage.

La zone côtière de Petite Anse présente des traces d'activité hydrothermale actuelles (sources thermales, dépôts de carbonates, d'hydroxydes de fer) et fossiles (fumerolles, minéraux hydrothermaux). De nombreuses fractures sub-verticales organisées en réseaux ont été observées au niveau des sources et de leur périphérie. En revanche, nous n'avons pas trouvé de failles sur le terrain. Les dépôts hydrothermaux qui tapissent les fractures et qui précipitent dans les masses importantes de laves altérées traduisent une activité hydrothermale (fossile et actuelle) probablement superposée dans le temps.

Géologiquement, la zone de Petite Anse présente des indices d'activité hydrothermale plus intéressants pour reconnaissance en profondeur par forage.

La sélection d'un site favorable pour une reconnaissance par forage ou des investigations complémentaires doit s'appuyer sur l'ensemble des travaux réalisés dans les domaines de la géologie, de la géochimie et de la géophysique (Baltassat *et al.*, 2003 ; Sanjuan *et al.* ; 2003b).

Bibliographie

- Baltassat J.M., Miehé J.M., Debeglia N., Dupont F., Martelet G. (2003) - Réévaluation du potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique) - Deuxième rapport d'avancement des travaux (données de terrain et interprétations géophysiques préliminaires). Rapport BRGM/RP-52548-FR, 48 p.
- Bellon H., Pelletier B., Westercamp D. (1974) - Données géochronométriques relatives au volcanisme martiniquais, Antilles françaises. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, Paris, 279, 457-460.
- Chovelon P. (1984) - Contexte géothermique des prospectes du Lamentin et du Morne Rouge (Martinique). Rapport BRGM 84 SGN 003 GTH.
- Deplus C., Le Friant A., Boudon G., Komorowski J.C., Villemant B., Harford C., Ségoufin J., Cheminée J.L. (2001) - Submarine evidence for large-scale debris avalanches in the Lesser Antilles Arc. *Earth Planet. Sci. Letters* 192, 145-157.
- Gourgaud A. (1985) - Mélanges de magmas dans les séries alcalines et calco-alcalines : leur rôle dans la genèse des laves intermédiaires et leur influence sur les mécanismes éruptifs. *Ann. sci. Univ. Clermont Ferrand II, Géol., Minéral.*, vol. 86, 522 p.
- Gourgaud A., Bourdier J.L. (1982) - Le système volcanique Diamant - Burgos (sud-ouest martiniquais) : mélanges de magma en volcanisme différencié linéaire et origine des basaltes à quartz. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 294, 1349-1354.
- Reyes A.G. (1990) - Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 43, 279-309.
- Sanjuan B., Genter A., Baltassat J.M., Serra H., Roig J.Y., Brach M. (2003a) - Synthèse des connaissances concernant le potentiel géothermique des régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique). Premiers travaux du BRGM en 2001-2003. Rapport BRGM RP-52283-FR, 140 p.
- Sanjuan B., Foucher J.C., Brach M. (2003b) - Réévaluation du potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique) : Etude géochimique. BRGM/RP-52547-FR, 80 p.
- Traineau H., Westercamp D., Benderitter Y. (1989) - Case study of a volcanic geothermal system. Mount Pelée, Martinique. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 38, 49-66.
- Vincent P.M., Bourdier J.L., Boudon G. (1989) - The primitive volcano of Mount Pelée : its construction and partial destruction by flank collapse, Martinique. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 38, 1-15.

Westercamp D., Andreieff P., Bouysse P., Cottez S., Battistini R. (1989) - Notice explicative, Carte géologique France à 1/50 000, feuille Martinique, Orléans, BRGM, 246 p.

Westercamp D., Traineau H. (1983) - Notice explicative de la carte géologique de la montagne Pelée (département de la Martinique). Echelle 1/20 000, Edition BRGM, 12 p.

Westercamp D., Traineau H. (1987) - Schéma hydrogéologique et géothermique d'un stratovolcan d'arc insulaire : exemple de la montagne Pelée, Martinique (Antilles françaises). *Bull. Soc. géol. Fr.*, 8, t. III, n° 6, 1063-1073.



Centre scientifique et technique
Service connaissance et diffusion de l'information géologique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34