

Document public

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

Rapport final

**BRGM/RP-52547-FR**  
septembre 2003



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

Rapport final

**BRGM/RP-52547-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-ENER-04)

**B. Sanjuan, M. Brach, J.C. Foucher**



Mots clés : Montagne Pelée, Volcan, Morne Rouge, Diamant, Saint-Pierre, Martinique, Géothermie, Géochimie, Sources thermales, Eaux, Gaz, Sols, Profils.

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

Sanjuan B., Brach M., Foucher J.C. (2003) - Réévaluation du potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique) : étude géochimique. BRGM/RP-52547-FR, 80 p., 17 fig., 9 tabl., 1 ann.

## Synthèse

Avec la reprise en 2001 des recherches géothermiques en Martinique, qui ont commencé par la réalisation de trois forages d'exploration dans la plaine du Lamentin, le Conseil régional de la Martinique, l'ADEME, l'Union européenne (fonds FEDER) et le BRGM ont décidé de lancer un projet de réévaluation du potentiel géothermique des régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant. Ces régions avaient été retenues pour leur intérêt géothermique à la suite des travaux réalisés entre 1970 et 1985.

Conformément au programme et aux échéances établis dans les deux conventions (n° 0144048 et n° 01D100304) associées à ce projet, ce rapport final a pour objectif de présenter toutes les données de terrain acquises en géochimie au cours de ce projet (eaux thermales et gaz dans les sols), de les comparer aux données antérieures ainsi que d'exposer les interprétations correspondantes. Ces informations seront, ensuite, confrontées à celles obtenues en géologie et géophysique dans un rapport de synthèse afin de regrouper les principales conclusions du projet et de proposer une sélection de sites potentiels pour l'implantation de forages d'exploration.

L'ensemble des données de terrain acquises en géochimie des eaux a permis de consolider les connaissances sur toutes les manifestations thermales présentes dans ces régions et a conduit à une meilleure compréhension de leur fonctionnement. Notons que pour certaines des sources thermales échantillonnées (Rivière Claire et Grande Rivière, sources sous-marines), les données, à notre connaissance, ont été acquises pour la première fois et sont donc inédites. Par ailleurs, la composition chimique et isotopique de l'eau de la source thermale de la rivière Picodo était très mal connue. La source de Grande Rivière, qui a demandé beaucoup d'efforts pour être échantillonnée en raison des difficultés d'accès, demeure, pour l'instant, la seule source thermale à avoir été découverte sur le flanc nord de la Montagne Pelée.

En ce qui concerne la géochimie des gaz dans les sols (dioxyde de carbone, méthane, oxygène, hélium), seize profils de mesures ont pu être établis entre le 11 et 21 juillet 2002 dans les régions étudiées, ce qui représente environ 260 points de mesure. Parmi ces points, une dizaine a été échantillonnée afin d'effectuer des analyses chimiques et isotopiques (carbone-13,  $^3\text{He}/^4\text{He}$ ) complémentaires en raison de l'intérêt des premiers résultats obtenus sur ces points.

Les résultats obtenus en géochimie permettent de citer plusieurs zones d'intérêt géothermique :

- le site de la source thermale de Petite Anse du Diamant, dont l'eau indique des conditions de température relativement élevées (autour de 180 °C) et les émanations gazeuses (principalement du CO<sub>2</sub>) une origine magmatique. Les faibles débits et températures à l'émergence de cette source, qui sont plutôt des facteurs défavorables mais pas éliminatoires (des processus de colmatage peuvent en être la cause), doivent être, néanmoins, considérés ;
- la zone de la haute vallée de la rivière Chaude où la composition chimique et isotopique des eaux thermales indique des températures en profondeur de l'ordre

de 200 °C et la présence de gaz d'origine essentiellement magmatique (principalement du CO<sub>2</sub>) ;

- les zones des forages Desgrottes et de Deux Choux où les émanations gazeuses témoignent d'une origine profonde (mais par contre, aucune présence d'eau chaude et profonde n'est observée en surface).

Si pour ces zones, il existe des manifestations de surface qui indiquent une origine profonde, les méthodes de prospection géochimique ne permettent pas de déterminer la profondeur à laquelle se trouve le réservoir d'où sont issues ces manifestations ni d'estimer la capacité de ce réservoir. Seules des méthodes de prospection géophysique peuvent apporter des éléments de réponse à ces questions, mais seule la réalisation de forages d'exploration pourra permettre de valider ou infirmer ces éléments de réponse.

Les autres zones étudiées ne présentent pas, en surface, d'indices réels d'intérêt géothermique de haute température d'un point de vue géochimique.

## Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	9
<b>2. Résultats obtenus en géochimie des eaux</b> .....	11
2.1. Échantillonnage des eaux des sources thermales.....	11
2.1.1. Première campagne d'échantillonnage (6 - 11 décembre 2001) .....	11
2.1.2. Campagnes d'échantillonnage suivantes (11 - 16 mars 2003) .....	17
2.1.3. Campagne de reconnaissance et d'échantillonnage des sources thermales de la zone de Grande Rivière (mai 2003) .....	18
2.2. Analyses chimiques et isotopiques des eaux thermales.....	19
2.2.1. Analyses chimiques et isotopiques .....	19
2.2.2. Résultats obtenus sur toutes les eaux thermales étudiées.....	20
2.3. Interprétation des résultats.....	23
2.3.1. Caractéristiques chimiques des eaux.....	23
2.3.2. Origine des eaux et temps de transit.....	25
2.3.3. Processus d'interaction eau-roche-gaz .....	30
2.3.4. Géothermométrie .....	42
<b>3. Mesures de gaz (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, He) dans les sols et quelques analyses complémentaires</b> .....	46
3.1. Intérêt de la méthodologie utilisée.....	46
3.2. Campagne de mesures (du 11 au 21 juillet 2002).....	47
3.2.1. Sélection des profils de mesures .....	47
3.2.2. Protocoles de mesure utilisés et analyses complémentaires.....	49
3.3. Résultats et interprétation .....	51
<b>4. Conclusion</b> .....	56
<b>Bibliographie</b> .....	58

## Liste des figures

Fig. 1 -	Carte des sources thermales de la Martinique (d'après Mouret, 1979) où ont été reportées les zones étudiées au cours de ces travaux (cadres en rouge). .....	12
Fig. 2 -	Carte de localisation des sources thermales situées autour de la Montagne Pelée (flanc sud-ouest) dont les eaux ont été échantillonnées au cours de cette étude. ....	13
Fig. 3 -	Carte de localisation des sources thermales situées dans la région du Diamant dont les eaux ont été échantillonnées au cours de cette étude. ....	14
Fig. 4 -	Positionnement des eaux des sources thermales et des eaux de surface analysées au cours de cette étude dans le diagramme ternaire Cl-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> de Giggenbach (1991). ....	24
Fig. 5 -	Diagrammes $\delta^{18}\text{O-Cl}$ , $\delta\text{D-Cl}$ , $\delta\text{D-}\delta^{18}\text{O}$ , $\delta\text{D-Br}$ et $\text{Br-Cl}$ pour les eaux des sources thermales étudiées au cours de cette étude. ....	28
Fig. 6 -	Diagrammes $\delta^{18}\text{O-Cl}$ et $\delta\text{D-Cl}$ pour les eaux des sources thermales de la région de la Montagne Pelée étudiées au cours de cette étude. ....	28
Fig. 7 -	Diagrammes Na-Cl, K-Cl, Ca-Cl, Mg-Cl, SO <sub>4</sub> -Cl, HCO <sub>3</sub> -Cl, SiO <sub>2</sub> -Cl et F-Cl pour les eaux des sources thermales étudiées au cours de cette étude. ....	31
Fig. 8 -	Diagrammes Li-Cl, B-Cl, Sr-Cl, Ge-Cl, Cs-Cl, Rb-Cl, As-Cl et Fe-Cl pour les eaux des sources thermales étudiées au cours de cette étude. ....	32
Fig. 9 -	Diagrammes Na-Cl, Na-K, K-Cl, Ca-Cl, Mg-Cl, HCO <sub>3</sub> -Cl, SO <sub>4</sub> -Cl et SiO <sub>2</sub> -Cl pour les eaux des sources thermales de la région de la Montagne Pelée. ....	36
Fig. 10 -	Diagrammes B-Cl, Li-Cl, Rb-Cl, Cs-Cl, Sr-Cl, Fe-Cl, Ge-Cl et As-Cl pour les eaux des sources thermales de la région de la Montagne Pelée. ....	37
Fig. 11 -	Diagrammes Ba-Cl, Mn-Cl, Co-Cl, Cu-Cl, Ni-Cl et Zn-Cl pour les eaux des sources thermales de la région de la Montagne Pelée. ....	38
Fig. 12 -	Positionnement des eaux des sources thermales et des eaux de surface analysées au cours de cette étude dans le diagramme ternaire Na-K-Mg de Giggenbach (1988). ....	43
Fig. 13 -	Carte de localisation des points de mesure de gaz dans les sols de la région de Morne Rouge - Montagne Pelée (réalisation de 14 profils). ....	48
Fig. 14 -	Carte de localisation des points de mesure de gaz dans les sols de la région du Diamant (réalisation de 2 profils). ....	48
Fig. 15 -	Schéma du dispositif de prélèvement et de mesure des gaz. ....	50
Fig. 16 -	Anomalies de CO <sub>2</sub> dans les sols de la région de la source thermale de Petite Anse du Diamant . ....	54
Fig. 17 -	Anomalies d'hélium dans les sols de la région de la source thermale de Petite Anse du Diamant. ....	54

## Liste des tableaux

Tabl. 1 - Résultats des mesures sur site effectuées sur les eaux prélevées au cours des campagnes d'échantillonnage des sources thermales des régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (2001-2003). .....	15
Tabl. 2 - Résultats des analyses chimiques (espèces majeures) effectuées sur les eaux prélevées au cours des campagnes d'échantillonnage des sources thermales des régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (2001-2003). .....	21
Tabl. 3 - Résultats des analyses chimiques (espèces traces et infra-traces) effectuées sur les eaux prélevées au cours des campagnes d'échantillonnage des sources thermales des régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (2001-2003). .....	21
Tabl. 4 - Résultats des analyses chimiques (espèces infra-traces) effectuées sur les eaux prélevées au cours des campagnes d'échantillonnage des sources thermales des régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (2001-2003). .....	22
Tabl. 5 - Résultats des analyses isotopiques effectuées sur les eaux prélevées au cours des campagnes d'échantillonnage des sources thermales des régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (2001-2003). .....	22
Tabl. 6 - Calcul des indices de saturation (IS) réalisés au moyen du code géochimique EQ3NR sur quelques eaux thermales (DIAM1, MP1, MP4 et MP10) à la température d'émergence. ....	34
Tabl. 7 - Reconstitution de la composition chimique du pôle chaud dont résultent les trois eaux des sources thermales de la rivière Chaude (MP4, MP5 et MP7), avant dilution par des eaux superficielles de ce pôle chaud au cours de sa remontée vers la surface. ....	40
Tabl. 8 - Estimation de la température en profondeur des eaux des sources thermales étudiées au cours de cette étude, au moyen des géothermomètres chimiques et isotopiques. ....	44
Tabl. 9 - Récapitulatif des résultats des analyses chimiques et isotopiques complémentaires effectuées sur des échantillons de gaz sélectionnés en fonction de leur intérêt scientifique. ....	52

## Annexe

- Ann. - Campagne de mesures de gaz dans les sols (du 11 au 21 juillet 2002) :  
description et localisation des 16 profils de mesures ..... 61
- Profil n° 1 - Route vers Zobéïde au niveau du pont sur la rivière Balisier  
(11 juillet 2002).
- Profil n° 2 - Rivière Roxelane au niveau du pont de l'Allée Pécol.
- Profil n° 3 - Habitation Grand Réduit - Petit Réduit - D11.
- Profil n° 4 - Aileron (Montagne Pelée) - Morne Calebasse.
- Profil n° 5 - Camp Chazeau - Petite Savane (Parc de loisirs) et rivière des Écrevisses  
(12 juillet 2002).
- Profil n° 6 - Habitation Morestin - Habitation Mespont - Savane Hubert (12 et 14 juillet  
2002).
- Profil n° 7 - Fond Abattoir - Ravine Notre-Dame de Lourdes (13 juillet 2002).
- Profil n° 8 - Fond Guillet (13 juillet /2002).
- Profil n° 9 - Plateau Sable - Morne Posé - Les Bambous (13 et 14 juillet 2002).
- Profil n° 10 - Quartier du Fort - Quartier La Montagne - Rivière des Pères (13 et 14  
juillet 2002).
- Profil n° 11 - Puits chaud - Rivière Claire - Sources chaudes - Bord de mer - Route  
Quartier Cimetière/Montagne Pelée (14, 15 et 16 juillet 2002).
- Profil n° 12 - Propriété De Paz - La Montagne (15 juillet /2002).
- Profil n° 13 - Forage Desgrottes (17 juillet 2002).
- Profil n° 14 - Habitation Sainte-Cécile - Champflore (17 juillet 2002).
- Profil n° 15 - Diamant - Petite Anse (19-20 juillet 2002).
- Profil n° 16 - Habitation Mullane (21 juillet 2002).

## 1. Introduction

Avec la reprise en 2001 des recherches géothermiques en Martinique, qui ont commencé par la réalisation de trois forages d'exploration dans la plaine du Lamentin, le Conseil régional de la Martinique, l'ADEME, l'Union européenne (fonds FEDER) et le BRGM ont décidé de lancer un projet de réévaluation du potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant. Ces régions avaient été retenues pour leur intérêt géothermique à la suite des travaux réalisés entre 1970 et 1985.

Ce rapport a pour objectif de présenter les principaux résultats obtenus au cours des travaux de recherche menés en géochimie des eaux et des gaz dans les sols par le BRGM en 2001-2003 dans le cadre de ce projet. Ces travaux concernent les tâches 2 et 3 des phases 2 et 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.

Suite à la synthèse des connaissances en géologie, géochimie et géophysique obtenues dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Sanjuan *et al.*, 2003), les principaux résultats obtenus en géologie, géochimie et géophysique au cours de ce projet ont été regroupés dans trois rapports correspondant à chacune des disciplines. Ce rapport, qui concerne la géochimie, présente l'ensemble des données de terrain (eaux thermales et gaz dans les sols) ainsi que les interprétations correspondantes. La tâche 2 de la phase 2 avait pour but d'échantillonner et d'analyser les eaux des sources thermales situées autour de la Montagne Pelée et dans la région du Diamant, qui sont, d'après les données bibliographiques, les seules sources à montrer un intérêt pour l'exploration géothermique. Elle visait à découvrir, éventuellement, de nouvelles sources thermales dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant. Les données analytiques acquises antérieurement demandaient à être réactualisées et élargies afin de valider certains modèles et hypothèses établis dans les études précédentes, tant au niveau de la température en profondeur des fluides que de leur circulation et leur origine. La plupart de ces objectifs ont été atteints.

En ce qui concerne la tâche 3 de la phase 2, seize profils de mesures de gaz dans les sols (dioxyde de carbone, méthane, oxygène, hélium) ont pu être établis entre le 11 et 21 juillet 2002 dans les régions étudiées, ce qui représente environ 260 points de mesure. Parmi ces points, une dizaine a été échantillonné afin d'effectuer des analyses chimiques et isotopiques (carbone-13,  $^3\text{He}/^4\text{He}$ ) complémentaires en raison de l'intérêt scientifique des premiers résultats obtenus sur ces points.

Enfin, la réalisation des tâches 2 et 3 de la phase 3 a permis d'interpréter l'ensemble des résultats obtenus en géochimie. Ces informations seront, ensuite, confrontées à celles obtenues en géologie et géophysique dans un rapport de synthèse afin de regrouper les principales conclusions du projet et de proposer une sélection de sites potentiels pour l'implantation de forages d'exploration.



## 2. Résultats obtenus en géochimie des eaux

### 2.1. ÉCHANTILLONNAGE DES EAUX DES SOURCES THERMALES

Quatre campagnes de prélèvement ont été programmées pour échantillonner les sources thermales des régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (fig. 1, 2 et 3). Pendant ces campagnes, non seulement les conditionnements des échantillons d'eau nécessaires aux analyses recherchées ont été effectués (filtration, acidification, etc.), mais aussi des mesures sur site de certains paramètres tels que la température, la conductivité, le pH, le potentiel d'oxydo-réduction (Eh), l'oxygène dissous et l'alcalinité ont été réalisées (tabl. 1). L'incertitude relative sur ces mesures ne dépasse pas 5 %. La présence de sulfure d'hydrogène dans les eaux thermales a été testée au moyen d'une solution d'acétate de cadmium.

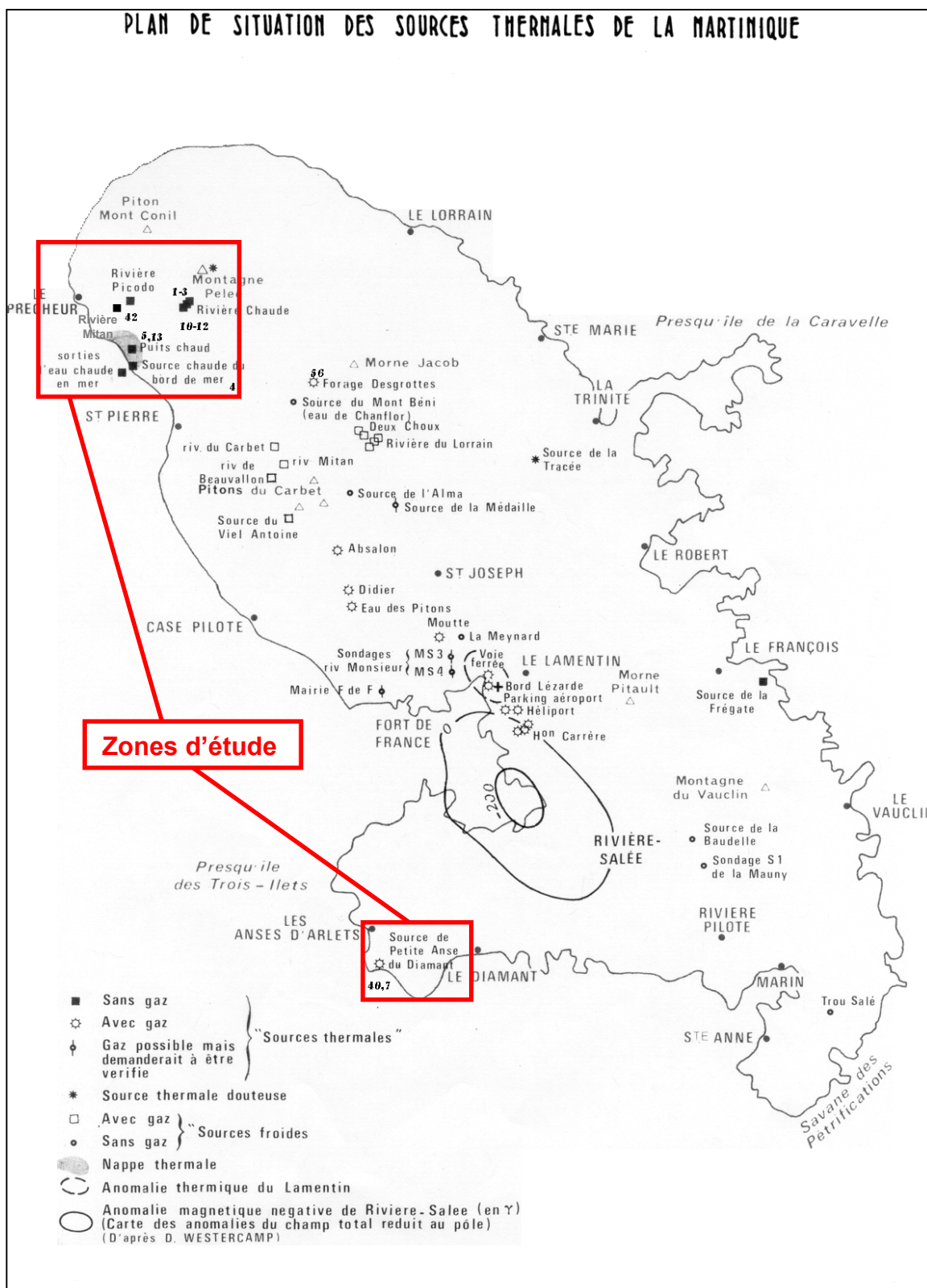
#### 2.1.1. Première campagne d'échantillonnage (6 - 11 décembre 2001)

La première campagne, la campagne principale pendant laquelle sept échantillons d'eaux thermales et quatre échantillons d'eau de surface de référence (mer, pluie, rivière, retenue d'eau) ont été prélevés (tabl. 1), a été menée par le BRGM entre le 6 et le 11 décembre 2001.

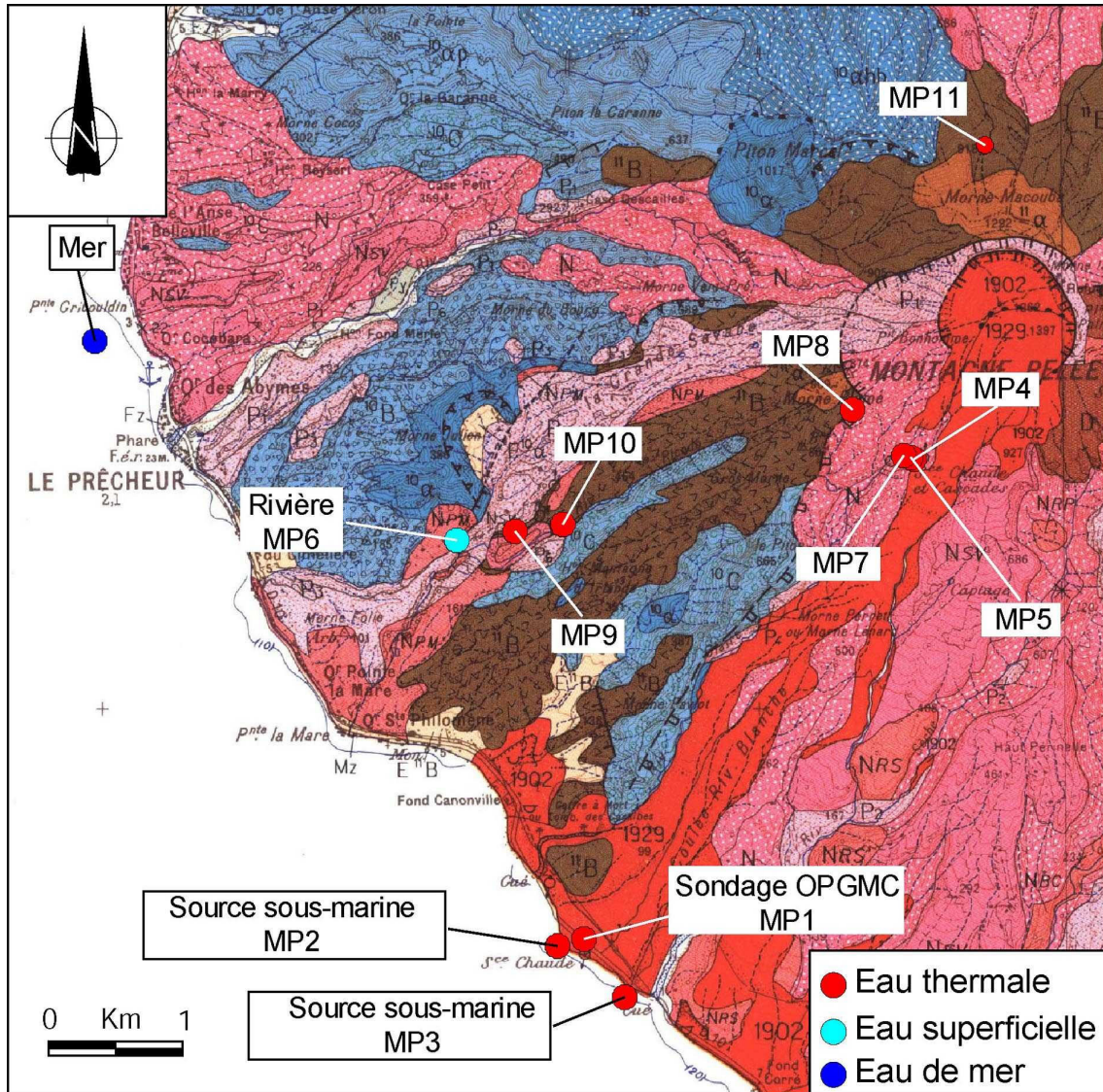
##### **a) Sources thermales situées sur le flanc ouest de la Montagne Pelée**

Parmi ces sources, le BRGM a procédé à l'échantillonnage des eaux des sources thermales de la rivière Chaude et du sondage de surveillance de l'Observatoire de Physique du Globe du Morne des Cadets (OPGMC), situé près du bord de mer (fig. 2). Pour la réalisation de ces prélèvements, le BRGM a pu bénéficier de la collaboration et du soutien logistique de Monsieur J.P. Viodé de l'OPGMC.

Les sources thermales de la rivière Chaude ont été décrites dans beaucoup d'études (voir synthèse de ce rapport) et nous ne reviendrons, donc, pas sur leur localisation et leur description. Elles font partie du réseau de surveillance mis en place par l'OPGMC, qui procède à un suivi régulier de leur température et de leur chimie, depuis de très nombreuses années. Seules les trois émergences les plus chaudes (MP4, MP5 et MP7) situées près d'une paroi verticale et juste avant la cascade, qui empêche de poursuivre le chemin, ont été échantillonnées. La température mesurée la plus élevée a été de 51,4°C et est proche de celle déterminée en 1981 (54 °C). Néanmoins, des températures plus élevées (jusqu'à 65 °C) ont déjà été mesurées sur cette zone (Sanjuan *et al.*, 2003). Les émergences de ces sources sont relativement diffuses et se trouvent dans le cours de la rivière, ce qui rend le prélèvement de leur eau relativement difficile. D'ailleurs, en juillet 2002, au cours de la campagne de mesures de gaz dans les sols, l'eau de ces émergences n'avait pas pu être prélevée en raison du niveau important de l'eau de la rivière, qui les recouvrait. À cette occasion, l'eau d'une autre émergence, dont se dégageait une forte odeur de soufre, avait été prélevée (tabl. 1, fig. 2).



**Fig. 1 - Carte des sources thermales de la Martinique (d'après Mouret, 1979) où ont été reportées les zones étudiées au cours de ces travaux (cadres en rouge).**



**Fig. 2 - Carte de localisation des sources thermales situées autour de la Montagne Pelée (flanc sud-ouest) dont les eaux ont été échantillonnées au cours de cette étude.**

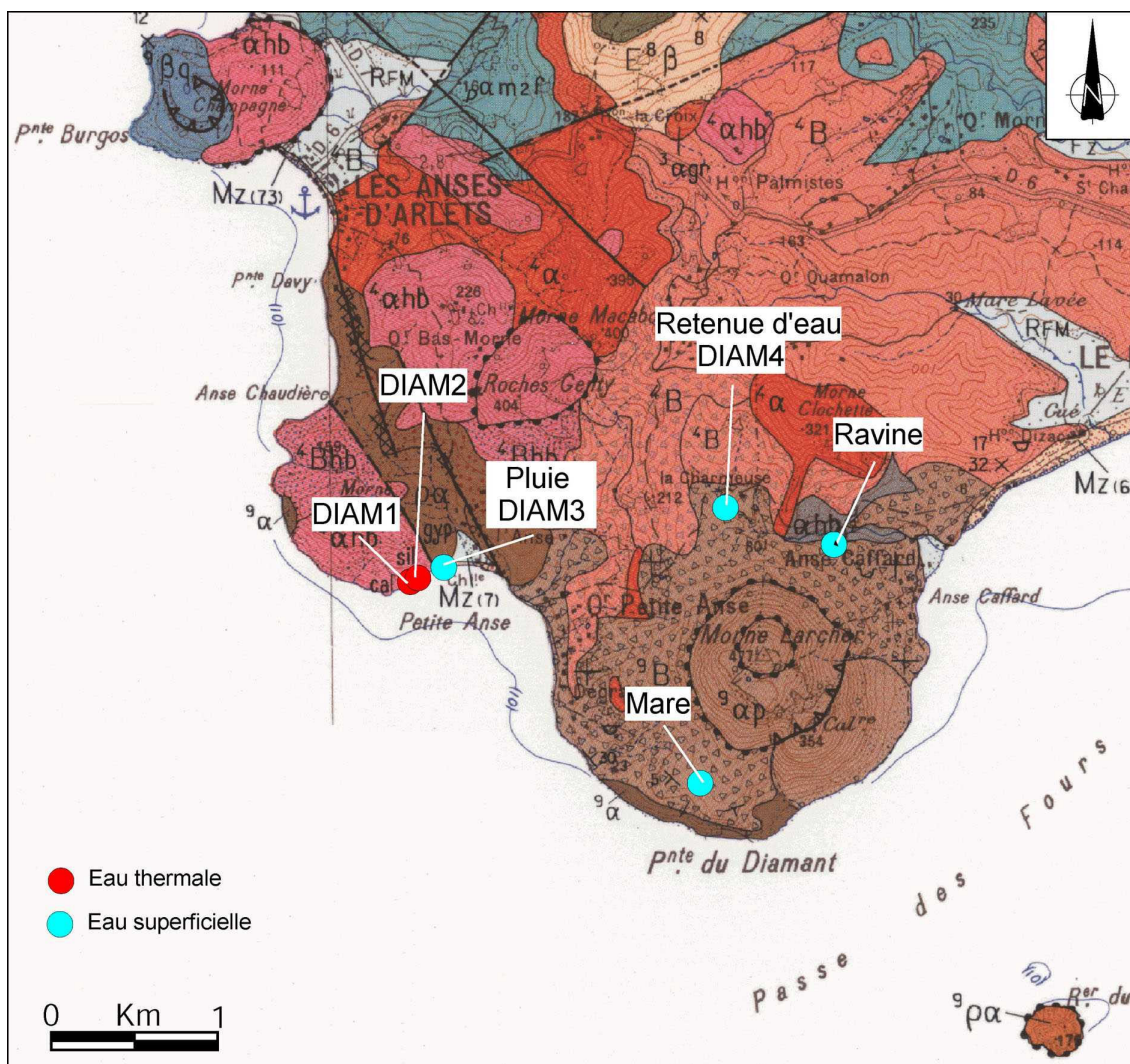


Fig. 3 - Carte de localisation des sources thermales situées dans la région du Diamant dont les eaux ont été échantillonnées au cours de cette étude.

Potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique)

Point de prélèvement	n°	Date	T <sub>émerg.</sub> °C	Débit l/mn	Cond. 25°C mS/cm	pH	Eh <sub>brut</sub> mV	O <sub>2diss.</sub> mg/l	O <sub>2diss.</sub> %	Alc. méq/l	Commentaires
Source Petite Anse - Diamant (prélèvement dans le bac)	DIAM1	06/12/2001 09:45	35,3	2,13	28,4	5,99	-23	0,22	4	27,53	Argiles vertes - Bulles de dégazage
Source Petite Anse - Diamant (prélèvement dans le bac)	DIAM1	25/03/2001 17:30	34,0	n.d.	23,8	6,15	-35	n.a.	n.a.	24,59	Argiles vertes - Bulles de dégazage
Source Petite Anse - Diamant (émergence avant le bac)	DIAM2	06/12/2001 14:20	31,3	n.d.	17,6	6,53	-53	1,70	27	28,02	Plusieurs émergenes avant d'arriver au bac
Source Petite Anse - Diamant (émergence avant le bac)	DIAM2	25/03/2001 16:30	30,4	n.d.	14,7	7,10	-55	n.a.	n.a.	27,87	Plusieurs émergenes avant d'arriver au bac
Pluie Plage Petite Anse	DIAM3	06/12/2001 15:10	n.d.	n.d.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Mare au pied du Morne Larcher		06/12/2001 16:00	26,2	n.d.	0,417	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Ravine Dominique en bord de route		06/12/2001 16:30	25,9	n.d.	0,978	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Mare proche D37		07/12/2001 08:30	25,5	n.d.	0,190	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Retenue d'eau La Charmeuse	DIAM4	07/12/2001 09:00	26,6	n.d.	0,158	6,76	230	3,38	42	0,82	Retenue située dans l'enceinte d'une carrière
Sondage OPGMC Bord de Mer (près du puits chaud)	MP1	07/12/2001 15:30	36,4	n.d.	1,382	6,55	-125	0,11	2	4,62	10 m de profondeur - niveau d'eau à 3-4 m
Source chaude sous-marine	MP2	09/12/2001 13:30	33,0	n.d.	42,1	7,00	57	3,40	62	2,95	
Source chaude sous-marine (N°45°60"-W61°11'54")	MP3	09/12/2001 15:00	36,0	n.d.	17,7	6,65	-105	1,92	35	3,59	à 1,6 m de profondeur
Eau de mer (N14°48'29"-W61°13'40")	Mer	09/12/2001 17:00	28,5	n.d.	53,5	8,19	-32	2,23	39	2,35	à 4 m de profondeur
Source Riv. Chaude (1 <sup>ère</sup> émergence)	MP4	11/12/2001 09:50	51,4	n.d.	1,490	6,40	-43	0,50	10	10,18	au pied de la cascade
Source Riv. Chaude (2 <sup>ème</sup> émergence)	MP5	11/12/2001 11:00	39,6	n.d.	1,060	6,47	-63	1,92	27	8,70	au pied de la cascade
Rivière L'Etang (au niveau du pont)	MP6	11/12/2001 15:15	24,4	n.d.	0,176	7,15	140	7,70	94	1,13	alt. : 350 m
Source Riv. Chaude (3 <sup>ème</sup> émergence) N14°47,7'46" - W61°10,8'58" - alt. : 156 m	MP7	16/07/2002 09:45	38,0	n.d.	1,085	6,58	n.a.	n.a.	n.a.	8,05	au pied de la cascade - légère odeur à soufre
Source Riv. Claire (1 <sup>ère</sup> émergence)	MP8	11/03/2003 12:30	22,9	0,30	0,356	6,23	-19	n.a.	n.a.	n.a.	odeur à soufre - altitude : 669 m
Source Riv. Claire (2 <sup>ème</sup> émergence)		11/03/2003 15:00	23,1	n.d.	0,368	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	odeur à soufre - altitude : 655 m
Source Riv. Mitan (émergence moins diluée)	MP9	14/03/2003 13:00	28,3	3,00	0,637	6,29	222	n.a.	n.a.	n.a.	altitude : 112 m
Rivière Mitan en amont de la source		14/03/2003 14:00	25,6	n.d.	0,251	7,50	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Rivière Mitan en aval de la source		14/03/2003 14:30	26,1	n.d.	0,313	7,20	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Rivière Picodo		14/03/2003 09:00	24,4	1800	0,445	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	altitude : 152 m
Rivière Picodo		16/03/2003 12:00	24,4		0,246	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	altitude : 260 m
Source Riv. Picodo	MP10	16/03/2003 13:30	36,6	1,20	2,150	6,37	-103	n.a.	n.a.	n.a.	légère odeur à soufre - altitude : 218 m
Rivière Picodo en amont de la source		16/03/2003 14:00	26,1	n.d.	0,422	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Rivière Picodo en aval de la source		16/03/2003 14:30	26,3	n.d.	0,433	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Source Grande Rivière	MP11	12/05/2003 12:30	27,1	15,0	0,353	6,29	-68	n.a.	n.a.	n.a.	légère odeur - altitude : 865 m
Rivière en amont de la source		12/05/2003	19,3	n.d.	0,058	7,56	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Rivière en aval de la source		12/05/2003	21,5	n.d.	0,148	7,77	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	

n.a. = non analysé  
n.d. = non déterminé

**Tabl. 1 - Résultats des mesures sur site effectuées sur les eaux prélevées au cours des campagnes d'échantillonnage des sources thermales des régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (2001-2003).**

Le sondage, qui fait partie du réseau de surveillance mis en place par l'OPGMC et dans lequel la température de l'eau est mesurée en continu, est proche du puits chaud qu'il a remplacé et pour lequel de nombreuses analyses chimiques d'eau sont disponibles. Ce sondage a une profondeur de 10 m et le niveau de l'eau est localisé environ à 3-4 m de profondeur. La température de l'eau y est de 36,4 °C et est plus faible que celle mesurée dans l'eau du puits chaud entre 1970 et 1990 (46-47 °C). Cette température est semblable à celle de l'eau de la source chaude du Bord de mer, mesurée en 1977 (36 °C), qui ne coule plus actuellement sur la plage mais en mer. Cette source était considérée comme un des exutoires de la nappe alimentant le puits chaud 200 m en amont (Sanjuan *et al.*, 2003).

C'est au cours de cette campagne que deux sources thermales sous-marines (MP2, MP3), situées près du sondage de surveillance de l'OPGMC et faisant, très probablement, partie de l'exutoire de la nappe, qui alimente le puits chaud (fig. 2), ont été échantillonnées pour la première fois. Les prélèvements sur ces sources ainsi que celui en haute mer (fig. 2) ont été réalisés par le BRGM avec la collaboration de trois plongeurs de l'association TROPICASUB. La température mesurée maximale a été de 36 °C mais les prélèvements d'eau sont constitués de mélange entre l'eau thermique et l'eau de mer (tabl. 1). Pendant la même journée, des recherches supplémentaires en mer, sur une zone plus élargie (recherches même faites du côté du Prêcheur), se sont avérées infructueuses.

Le prélèvement des eaux thermales sous-marines s'est effectué au moyen d'un entonnoir raccordé à un tuyau en plastique et à une pompe péristaltique, installée sur le bateau. La procédure de prélèvement était relativement simple. Après la découverte de l'émergence de la source, le plongeur recouvrait cette dernière à l'aide de l'entonnoir qu'il enfonçait légèrement dans le sable afin de minimiser les entrées d'eau de mer. Le signal donné, l'opération de pompage démarrait sur le bateau et le pH ainsi que la conductivité du fluide produit étaient alors suivis en continu dans un bécher. Rappelons que l'eau de mer a une valeur de pH et de conductivité caractéristique et que le mélange d'une eau thermique avec de l'eau de mer se traduit par une baisse du pH et bien souvent, une diminution de la conductivité. Par conséquent, le prélèvement des échantillons d'eau considérés comme les plus représentatifs de l'arrivée d'eau thermique était déclenché une fois que les valeurs de ces paramètres avaient diminué et s'étaient stabilisées. Les valeurs de ces paramètres étaient mesurées, à nouveau dans le bécher, à la fin de chaque prélèvement d'échantillon d'eau pour contrôler leur stabilité.

Après une matinée de reconnaissance, aucune émergence de la nappe d'eau chaude, souvent décrite à l'embouchure de la rivière Claire (Sanjuan *et al.*, 2003), n'a été retrouvée. Des tentatives pour accéder aux sources thermales des rivières Mitan et Picodo ont rapidement échoué en raison du relief très accidenté et de la végétation abondante de la région mais comme nous allons le voir, l'eau de ces sources a pu être, néanmoins, échantillonnée. Un échantillon d'eau de surface (MP6) représentative de la région a été prélevé à partir d'un captage dans la rivière de l'Étang, au niveau du pont (fig. 2).

### **b) Sources thermales situées dans la région du Diamant**

Seule l'eau de la source thermique, qui se trouve en bord de mer, près de la plage de Petite Anse, a été échantillonnée (fig. 3). Cette source, bien connue (Sanjuan *et al.*,

2003), présente, sur quelques dizaines de mètres, plusieurs émergences recouvertes de dépôts blanchâtres (calcite, silice amorphe) et rougeâtres (hydroxydes de fer). La zone où se trouvent ces émergences est fortement fracturée et fissurée, et à une cinquantaine de mètres au-delà de l'emplacement de ces émergences, on peut observer quelques dépôts jaunes constitués de minéraux contenant du soufre.

La plupart des émergences se caractérise par des suintements d'eau sur la roche mais l'émergence principale alimente un bac, qui permet à la population de profiter des propriétés thermales de cette eau. C'est l'eau de cette émergence (DIAM1) qui a été échantillonnée et analysée au cours de cette campagne (tabl. 1). La température mesurée a été de 35,3 °C et est semblable à celle déterminée dans les études antérieures. L'eau d'une autre émergence (DIAM2), manifestement moins minéralisée et diluée par une eau douce superficielle, a également été prélevée (tabl.1). Des résultats obtenus sur des échantillons d'eau de ces deux émergences, prélevés en mars 2001 par le BRGM, à l'occasion d'une autre étude réalisée en Martinique, et pour lesquels des mesures sur site avaient également été effectuées (tabl. 1), sont présentés à titre de comparaison.

Au cours de cette campagne, des recherches de sources thermales supplémentaires dans la région du Diamant se sont révélées infructueuses. Par ailleurs, très peu d'eaux superficielles sont répertoriées dans cette région et ont, donc, pu être échantillonnées. Seuls, des prélèvements d'eau de pluie (DIAM3) et d'une retenue d'eau (DIAM4) ont pu être effectués (fig. 3).

### **2.1.2. Campagnes d'échantillonnage suivantes (11 - 16 mars 2003)**

Ces deux campagnes concernent uniquement quelques sources localisées sur le flanc ouest de la Montagne Pelée (sources des rivières Claire, Picodo et Mitan). La plupart de ces sources, difficilement accessibles (souvent recours au canyoning), a été peu étudiée. Ainsi, à notre connaissance, l'eau des sources de la rivière Claire a été échantillonnée pour la première fois, et les résultats des analyses chimiques effectuées sur l'eau la plus chaude (37 °C) et la plus minéralisée des sources thermales de la rivière Picodo sont rares et incomplètes (Sanjuan *et al.*, 2003).

Ces deux campagnes d'échantillonnage ont été confiées à Monsieur G. Lalubie dans le cadre d'un contrat de sous-traitance entre le BRGM et l'Association Plongée Émeraude, et dans le cadre de sa thèse, intitulée « Étude des particularités hydrologiques du massif de la Montagne Pelée consécutives au volcanisme actif », qu'il devrait soutenir à l'université Antilles-Guyane, sous la direction du professeur M. Burac. Après avoir donné les principales instructions à M. Lalubie, le BRGM lui a fourni le matériel de prélèvement (flaconnage, filtres, acide nitrique Suprapur, etc.) et de mesure sur site nécessaire (thermomètre, conductimètre, pH-mètre, Eh-mètre, GPS, etc.).

Les deux premières campagnes, qui portaient sur l'échantillonnage des eaux des sources thermales des rivières Claire, Picodo et Mitan, ont été effectuées entre le 11 et le 16 mars 2003 et ont été couronnées de succès, malgré les difficultés d'accès.

La campagne d'échantillonnage des eaux des sources thermales de la rivière Claire s'est déroulée en deux jours (les 11 et 12 mars 2003), comme prévu. Sur les cinq

zones de résurgences thermales découvertes, seules deux zones, situées à 655 et 669 m d'altitude, étaient recouvertes de dépôts blancs à odeur de soufre. L'eau suintante de l'une de ces deux résurgences (MP8 ; 0,5 ml/s) a été échantillonnée au moyen d'une seringue (tabl. 1). L'eau de l'autre résurgence, située au pied d'une cascade et en amont d'une ancienne prise d'eau en béton, légèrement plus chaude au toucher que la précédente, n'a pas pu être prélevée en raison de sa localisation.

La température maximale mesurée a été de 23 °C et est légèrement supérieure à celle déterminée en amont de la rivière (20 °C ; tabl. 1). Les mesures de conductivité indiquent des eaux plutôt faiblement minéralisées pour des eaux thermales. L'emplacement des autres résurgences, au pied de cascades, a rendu les prélèvements d'eau impossible. L'originalité de ces prélèvements réside dans l'ambiance soufrée, relativement rare sur la Montagne Pelée. Des dégagements de gaz H<sub>2</sub>S émanant de certaines parois sont manifestes.

La campagne d'échantillonnage des eaux des sources thermales des rivières Mitan et Picodo s'est effectuée les 14 et 16 mars 2003. Comme cela est décrit dans la littérature (Sanjuan *et al.*, 2003), la rivière Mitan est alimentée par les eaux de nombreuses sources thermo-minérales, dont les valeurs de température (25 à 30 °C) et de conductivité (200 à 600 µS/cm) sont relativement faibles. Le prélèvement d'eau effectué le 14 mars sur l'une de ces émergences (MP9), située à 112 m d'altitude et dont le débit de l'eau était d'environ 5 ml/s, fait partie des eaux les plus chaudes et les plus minéralisées (tabl. 1).

Les sources thermales de la rivière Picodo, difficilement accessibles (une cascade de 10 m, située à 152 m d'altitude, barre le chemin) ont été atteintes le 16 mars, grâce à la collaboration d'un agriculteur de la région (M. E. Bonifaste) et du responsable de la station de pompage. La zone d'émergences principale s'étend, de 218 à 223 m d'altitude, sur une distance de 100 m (fig. 2). Les mesures de température et de conductivité montrent un gradient croissant de l'amont vers l'aval, qui va de 1 106 à 2 220 µS/cm pour les conductivités et de 31,1 à 36,6 °C pour les températures. C'est l'eau de l'émergence la plus chaude et la plus minéralisée (MP10), qui a été prélevée (tabl. 1). Son débit était d'environ 20 ml/s et une légère odeur de H<sub>2</sub>S se dégageait de la source nettoyée. Une aire de résurgences thermales assez actives, avec des dépôts d'hydroxydes de fer, est située juste à l'aval de cette zone.

### **2.1.3. Campagne de reconnaissance et d'échantillonnage des sources thermales de la zone de Grande Rivière (mai 2003)**

Cette dernière campagne concernait uniquement des sources localisées sur le flanc nord/nord-est de la Montagne Pelée (sources de Grande Rivière), très difficiles d'accès, et a également été confiée à G. Lalubie.

La campagne s'est déroulée du 12 au 13 mai 2003 et a été couronnée de succès, malgré les difficultés d'accès. La source principale (MP11), qui a été découverte (fig. 2), émerge à 865 m d'altitude dans un replat d'environ 1 m de diamètre, au milieu d'une ravine sèche. Quelques petits suintements sont visibles sur les parois rocheuses de cette ravine.

Le débit de cette source est soutenu et d'environ 250 ml/s. L'eau qui s'écoule, à son émergence, possède une température de 27,1 °C et une conductivité de 353 µS/cm, soit une température supérieure de 8 °C à celle du cours d'eau et une conductivité six fois plus élevée. Une légère odeur est perceptible et un dégagement de gaz a lieu à un rythme irrégulier (à raison d'une bulle toutes les deux à trois secondes, en moyenne). Les mesures sur site (tabl. 1) et les prélèvements d'eau correspondants ont pu être effectués sans problèmes majeurs sur l'eau de cette source.

Entre 400 et 580 m d'altitude, de nombreux petits suintements, présentant des dépôts ferrugineux, tapissent les deux rives de la gorge de la rivière mais n'ont pas pu être prélevés. La découverte et l'échantillonnage de cette source sont intéressants dans la mesure où, pour l'instant, c'est la seule source thermique à être répertoriée sur le flanc nord de la Montagne Pelée alors que toutes les autres sont situées sur le flanc sud-ouest de ce volcan.

Davantage de détails sur les emplacements et les descriptions des sources thermales échantillonnées au cours des trois dernières campagnes ainsi que sur certaines mesures sur site sont disponibles dans le rapport rédigé par G. Lalubie en mai 2003.

## **2.2. ANALYSES CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES DES EAUX THERMALES**

### **2.2.1. Analyses chimiques et isotopiques**

Les analyses chimiques des espèces majeures, traces et infra-traces ainsi que les analyses isotopiques de deutérium et d'oxygène-18 ont été effectuées sur tous les échantillons d'eaux thermales et d'eaux superficielles de référence, dans les laboratoires du BRGM, à Orléans. Pour l'échantillon d'eau de pluie, seuls les isotopes de deutérium, d'oxygène-18 et de tritium ont été déterminés. Les analyses isotopiques en tritium, soufre-34 et oxygène-18 des sulfates dissous, carbone-13 et 14, bore-11, lithium-7 ainsi que celles du rapport isotopique du strontium n'ont été réalisées que sur des échantillons sélectionnés. À l'exception des analyses isotopiques en carbone-13 et en carbone-14, qui ont été effectuées dans un laboratoire des Etats-Unis (BETA ANALYTIC, Floride), toutes les autres analyses isotopiques ont été réalisées dans les laboratoires du BRGM, à Orléans.

Des conditionnements spécifiques d'échantillonnage d'eau ont été réalisés sur site pour les différents types d'analyses. En règle générale, il a été prélevé pour tous les échantillons :

- 1 l d'eau brute (non filtrée et non acidifiée) pour les analyses isotopiques de deutérium, d'oxygène-18 et de tritium (ou 100 ml, lorsque l'analyse de tritium n'était pas prévue) ;
- 250 ml d'eau filtrée à 0,45 µm pour l'analyse des anions majeurs et de quelques traces (Cl, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, PO<sub>4</sub>, Br, F, NH<sub>4</sub>) ;
- 100 ml d'eau filtrée à 0,45 µm puis acidifiée à l'acide nitrique Suprapur pour l'analyse des cations majeurs (Na, K, Ca, Mg, Si) ;
- 100 ml d'eau filtrée à 0,1 µm puis acidifiée à l'acide nitrique Suprapur pour l'analyse des éléments traces et infra-traces (Al, Fe, Sr, Ba, Mn, B, Li, Rb, Cs, Ge, U, As, Cd, Cu, Cr, Ni, Co, Zn, Pb, Ag).

Pour des échantillons sélectionnés, il a aussi été prélevé :

- 2 l d'eau brute pour la détermination des rapports isotopiques du soufre et de l'oxygène-18 des sulfates dissous dans l'eau (stabilisation à l'acétate de cadmium) ;
- 1 l d'eau brute pour l'analyse isotopique du carbone-13 et carbone-14 ;
- 1 l d'eau filtrée à 0,1 µm pour l'analyse isotopique du bore-11 ;
- 100 ml d'eau filtrée à 0,1 µm puis acidifiée à l'acide nitrique Suprapur pour l'analyse des isotopes du strontium et du lithium.

Les techniques d'analyse chimique utilisées dans les laboratoires du BRGM, à Orléans, ont toutes été des méthodes couramment employées en analyse des eaux (plasma à couplage inductif + spectrométrie de masse : ICP-MS, spectrophotométrie par absorption atomique, chromatographie ionique, colorimétrie, titration). À l'exception des analyses isotopiques du tritium (scintillation liquide après enrichissement électrolytique) et du lithium (ICP-MS-MultiCollecteur Neptune), les techniques d'analyses isotopiques ont toutes utilisé la spectrométrie de masse.

L'incertitude analytique relative sur l'analyse des espèces majeures (Na, K, Ca, Mg, Cl, SO<sub>4</sub> et SiO<sub>2</sub>) ne dépasse pas 5 %. Pour les espèces traces et infra-traces, cette dernière est de l'ordre de 10 à 15 %, suivant leur concentration en solution.

L'incertitude absolue sur la détermination des valeurs de deutérium et d'oxygène-18 est autour de ± 0,8‰ et de ± 0,1‰ ; sur celle des valeurs de tritium, de ± 1 UT, et sur celle des valeurs de soufre-34 et d'oxygène-18 des sulfates dissous, de ± 0,3‰. Elle est de ± 0,1‰ sur celle des valeurs de carbone-13 ; de ± 0,1‰ pour les faibles valeurs, et de ± 0,9‰ pour les valeurs élevées, sur celle des valeurs de carbone-14 ; de ± 0,2‰, sur celle des valeurs de bore-11, de ± 0,5‰, sur celle des valeurs de lithium-7, et enfin, de ± 0,00001, sur celle des valeurs du rapport isotopique <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr.

### **2.2.2. Résultats obtenus sur toutes les eaux thermales étudiées**

Tous les résultats des analyses chimiques et isotopiques obtenus à la suite des quatre campagnes d'échantillonnage sont reportés dans les tableaux 1, 2, 3, 4 et 5. Les valeurs de la balance ionique (B.I.), toutes inférieures à 5 %, suggère une bonne qualité des analyses des espèces majeures.

Notons que pour certaines des sources thermales échantillonnées (Rivière Claire et Grande Rivière, sources sous-marines), les données, à notre connaissance, ont été acquises pour la première fois et sont donc inédites. Par ailleurs, la composition chimique et isotopique de l'eau de la source thermale de la rivière Picodo était très mal connue. La source de Grande Rivière, qui a demandé beaucoup d'efforts pour être échantillonnée en raison des difficultés d'accès, demeure, pour l'instant, la seule source thermale à avoir été découverte sur le flanc nord de la Montagne Pelée.

Point de prélèvement	n°	T <sub>émerg.</sub> °C	pH	Eh <sub>brut</sub> mV	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Cl mg/l	Alc. mg/l HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> mg/l	NO <sub>3</sub> mg/l	SiO <sub>2</sub> mg/l	TDS g/l	B.I. %	Cl/Br pondéral
Source Petite Anse - Diamant (bac)	DIAM1	35,3	5,99	-23	5800	295	1100	300	10200	1679	500	< 1	131	20,12	4,14	408
Source Petite Anse - Diamant (bac)	DIAM1	34,0	6,15	-35	5396	237	991	263	9730	1500	493	< 1	154	18,87	0,83	489
Source Petite Anse - Diamant (émergence)	DIAM2	31,3	6,53	-53	3340	178	565	174	5200	1709	817	< 1	137	12,13	0,34	441
Source Petite Anse - Diamant (émergence)	DIAM2	30,4	7,10	-55	3253	161	594	175	5070	1700	760	< 1	151	11,92	1,57	457
Barrage d'eau La Charmeuse	DIAM4	26,6	6,76	230	19,8	4,2	5,5	4,0	23,6	50	3,1	< 0,1	26,3	0,14	1,43	> 118
Sondage OPGMC Bord de Mer	MP1	36,4	6,55	-125	213	13,9	34,3	25,9	237	282	96,6	< 0,1	103	1,01	1,08	293
1 <sup>ère</sup> source chaude sous-marine	MP2	33,0	7,00	57	8060	240	299	872	14500	180	2311	< 1	26,6	26,54	-3,69	290
2 <sup>ème</sup> source chaude sous-marine	MP3	36,0	6,65	-105	3320	103	141	362	5960	219	888	< 1	75,5	11,09	-3,38	271
Eau de mer	Mer	28,5	8,19	-32	11400	309	390	1200	20200	143	2626	< 1	0,19	36,34	-0,77	301
Source Riv. Chaude (1 <sup>ère</sup> émergence)	MP4	51,4	6,40	-43	263	25,5	35,9	13,5	68,1	621	153	< 0,1	143	1,33	-1,93	> 340
Source Riv. Chaude (2 <sup>ème</sup> émergence)	MP5	39,6	6,47	-63	220	21,6	31,6	12,1	51,5	531	121	< 0,1	134	1,13	0,14	> 258
Rivière L'Etang (au niveau du pont)	MP6	24,4	7,15	140	16,3	2,4	13,1	4,0	12,7	69	14,6	< 0,1	76,3	0,21	-2,26	> 64
Source Riv. Chaude (3 <sup>ème</sup> émergence)	MP7	38,0	6,58	n.a.	212	23,0	29,0	13,4	51,6	491	123	< 1	115	1,06	2,41	> 258
Source Riv. Claire (1 <sup>ère</sup> émergence)	MP8	22,9	6,23	-19	24,0	3,9	35,7	8,5	12,3	97	78,0	< 0,4	133	0,39	1,04	> 123
Source Riv. Mitan (émergence moins diluée)	MP9	28,3	6,29	222	60,8	14,6	51,6	18,5	78,1	185	65,0	< 0,4	120	0,63	-2,48	473
Source Riv. Picodo	MP10	36,6	6,37	-103	268	33,3	95,4	50,6	451	440	60,5	< 0,4	181	1,59	1,04	316
Source Grande Rivière	MP11	27,1	6,29	-68	21,1	4,2	24,5	17,0	9,2	200	12,7	< 0,1	106	0,40	-2,39	> 920

**Tabl. 2 - Résultats des analyses chimiques (espèces majeures) effectuées sur les eaux prélevées au cours des campagnes d'échantillonnage des sources thermales des régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (2001-2003).**

Point de prélèvement	n°	NH <sub>4</sub> mg/l	PO <sub>4</sub> mg/l	NO <sub>2</sub> mg/l	Br mg/l	F mg/l	B mg/l	As mg/l	Al mg/l	Fe mg/l	Li mg/l	Sr mg/l	Ba mg/l	Mn mg/l	Cs mg/l	Rb mg/l
Source Petite Anse - Diamant (bac)	DIAM1	0,9	3,3	n.a.	25,0	< 0,1	78,2	2,500	0,058	6,14	10,1	14,84	0,168	1,689	0,299	1,011
Source Petite Anse - Diamant (bac)	DIAM1	0,9	< 5	< 0,01	19,9	< 0,1	79,5	2,530	0,490	0,31	9,95	9,62	0,054	1,641	0,327	0,920
Source Petite Anse - Diamant (émergence)	DIAM2	0,7	1,8	n.a.	11,8	0,3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	5,52	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Source Petite Anse - Diamant (émergence)	DIAM2	0,3	< 5	< 0,01	11,1	< 0,1	42,5	0,808	< 0,3	0,02	5,89	5,41	< 0,05	1,635	0,172	0,586
Barrage d'eau La Charmeuse	DIAM4	0,1	< 0,1	n.a.	< 0,2	0,1	0,043	0,016	0,507	1,92	< 0,005	0,034	0,0077	0,0428	0,00008	0,00329
Sondage OPGMC Bord de Mer	MP1	< 0,1	< 0,1	n.a.	0,81	0,4	1,03	0,005	0,0079	1,02	0,39	0,185	0,0052	0,679	0,0017	0,0418
1 <sup>ère</sup> source chaude sous-marine	MP2	0,2	8,8	n.a.	50,0	1,0	2,98	0,056	0,132	0,30	0,34	5,63	0,0125	0,217	0,0012	0,105
2 <sup>ème</sup> source chaude sous-marine	MP3	0,2	< 0,1	n.a.	22,0	0,6	2,15	0,037	< 0,024	0,09	0,30	2,49	0,0063	0,0013	0,0022	0,0639
Eau de mer	Mer	< 0,1	< 0,1	n.a.	67,0	1,3	3,84	0,093	0,056	0,40	0,23	7,52	0,0076	0,0010	0,00054	0,123
Source Riv. Chaude (1 <sup>ère</sup> émergence)	MP4	< 0,1	< 0,1	n.a.	< 0,2	0,3	1,77	0,015	0,010	0,23	1,50	0,135	0,060	0,869	0,00959	0,100
Source Riv. Chaude (2 <sup>ème</sup> émergence)	MP5	< 0,1	< 0,1	n.a.	< 0,2	0,4	1,42	0,008	0,0098	0,24	1,30	0,114	0,040	0,636	0,00704	0,0801
Rivière L'Etang (au niveau du pont)	MP6	< 0,1	< 0,1	n.a.	< 0,2	0,3	0,059	0,003	0,010	0,02	0,008	0,04	0,00097	0,00101	0,00007	0,0090
Source Riv. Chaude (3 <sup>ème</sup> émergence)	MP7	< 0,1	< 0,1	n.a.	< 0,2	0,2	1,60	0,003	0,0177	0,16	0,99	0,120	0,0246	0,134	0,00412	0,0701
Source Riv. Claire (1 <sup>ère</sup> émergence)	MP8	< 0,1	0,7	< 0,01	< 0,1	0,2	0,119	< 0,001	0,006	1,06	0,059	0,140	0,014	0,907	0,0011	0,011
Source Riv. Mitan (émergence moins diluée)	MP9	0,5	< 0,1	32,4	0,165	0,2	0,785	< 0,001	0,006	< 0,02	0,055	0,170	0,011	0,659	0,0006	0,029
Source Riv. Picodo	MP10	< 0,1	0,2	< 0,01	1,43	0,1	4,74	0,005	0,020	0,57	0,37	0,350	0,098	2,480	0,007	0,085
Source Grande Rivière	MP11	< 0,1	0,1	< 0,01	< 0,01	0,1	0,073	< 0,001	0,001	1,67	0,034	0,080	0,009	0,173	0,0006	0,014

n.a. = non analysé

**Tabl. 3 - Résultats des analyses chimiques (espèces traces et infra-traces) effectuées sur les eaux prélevées au cours des campagnes d'échantillonnage des sources thermales des régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (2001-2003)**

Point de prélèvement	n°	Ge µg/l	Ag µg/l	Cd µg/l	Co µg/l	Cr µg/l	Cu µg/l	Ni µg/l	Pb µg/l	Zn µg/l	U µg/l
Source Petite Anse - Diamant (bac)	DIAM1	63,9	1,0	2,0	2,6	2,0	7,0	13,0	1,4	32,0	< 0,1
Source Petite Anse - Diamant (bac)	DIAM1	n.a.	< 50	< 20	< 20	2,3	< 20	< 50	< 20	111	n.a.
Source Petite Anse - Diamant (émergence)	DIAM2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Source Petite Anse - Diamant (émergence)	DIAM2	n.a.	< 50	< 20	< 20	1,2	< 20	< 50	< 20	90,0	n.a.
Barrage d'eau La Charmeuse	DIAM4	0,12	0,03	0,51	0,43	2,0	10,0	4,1	0,45	19,6	0,02
Sondage OPGMC Bord de Mer	MP1	0,42	0,09	0,14	0,16	< 1,0	1,5	< 0,8	0,43	15,3	< 0,01
1 <sup>ère</sup> source chaude sous-marine	MP2	0,8	0,9	1,0	0,98	13,0	10,0	4,3	0,70	14,0	3,1
2 <sup>ème</sup> source chaude sous-marine	MP3	1,2	0,9	1,0	< 0,2	< 9,0	4,0	< 0,8	0,40	15,0	1,0
Eau de mer	Mer	1,5	1,1	1,0	1,04	13,0	10,0	6,4	0,60	22,0	3,5
Source Riv. Chaude (1 <sup>ère</sup> émergence)	MP4	4,8	0,09	0,15	0,37	< 1,0	0,4	< 0,8	0,28	15,8	0,2
Source Riv. Chaude (2 <sup>ème</sup> émergence)	MP5	4,1	0,09	0,09	0,24	< 1,0	0,7	< 0,8	0,17	5,5	0,05
Rivière L'Etang (au niveau du pont)	MP6	0,033	0,03	0,04	0,029	0,2	0,58	0,3	0,06	2,2	0,011
Source Riv. Chaude (3 <sup>ème</sup> émergence)	MP7	3,0	0,02	0,06	0,11	< 2,0	1,95	0,88	0,23	4,7	n.a.
Source Riv. Claire (1 <sup>ère</sup> émergence)	MP8	< 0,5	< 0,5	0,4	< 0,5	< 0,5	0,5	0,9	< 1	3,0	n.a.
Source Riv. Mitan (émergence moins diluée)	MP9	< 0,5	< 0,5	0,4	< 0,5	< 0,5	1,8	0,7	< 1	4,0	n.a.
Source Riv. Picodo	MP10	6,3	< 0,5	0,4	1,1	< 0,5	0,9	2,8	3,0	2,0	n.a.
Source Grande Rivière	MP11	0,9	< 0,5	0,2	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,7	< 1	2,0	n.a.

n.a. = non analysé

**Tabl. 4 - Résultats des analyses chimiques (espèces infra-traces) effectuées sur les eaux prélevées au cours des campagnes d'échantillonnage des sources thermales des régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (2001-2003).**

Point de prélèvement	n°	δD ‰	δ <sup>18</sup> O ‰	<sup>3</sup> H UT	δ <sup>34</sup> S (SO <sub>4</sub> ) ‰	δ <sup>18</sup> O (SO <sub>4</sub> ) ‰	δ <sup>13</sup> C ‰	<sup>14</sup> C ‰	Age <sup>14</sup> C ans	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	δ <sup>11</sup> B ‰	δ <sup>7</sup> Li ‰
Source Petite Anse - Diamant (bac)	DIAM1	-17,5	1,8	< 1	n.a.	n.a.	4,6	< 0,3	> 46970	0,704822	9,05	6,8
Source Petite Anse - Diamant (bac)	DIAM1	-22,0	1,9	< 1	11,6	10,0	2,4	< 0,3	> 46970	0,704812	n.a.	7,1
Source Petite Anse - Diamant (émergence)	DIAM2	-18,7	-0,4	< 1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	6,3
Pluie Plage Petite Anse	DIAM3	6,7	-0,8	< 1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Barrage d'eau La Charmeuse	DIAM4	-8,6	-2,0	2	17,0	7,2	-13,4	187,4	moderne	n.a.	n.a.	n.a.
Sondage OPGMC Bord de Mer	MP1	-8,6	-2,9	3	11,4	8,7	-1,3	19,2	13260	0,706276	n.a.	8,8
1 <sup>ère</sup> source chaude sous-marine	MP2	3,9	-0,2	n.a.	19,7	9,5	n.a.	n.a.	n.a.	0,709141	n.a.	18,7
2 <sup>ème</sup> source chaude sous-marine	MP3	-4,7	-1,9	n.a.	20,0	9,5	n.a.	n.a.	n.a.	0,709017	n.a.	10,1
Eau de mer	Mer	9,8	0,9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,709188	n.a.	30,1
Source Riv. Chaude (1 <sup>ère</sup> émergence)	MP4	-7,7	-2,8	3	11,7	9,1	0,1	15,2	15130	0,704233	6,25	8,1
Source Riv. Chaude (2 <sup>ème</sup> émergence)	MP5	-7,4	-2,8	n.a.	10,7	9,0	-0,3	12,0	17050	0,704247	n.a.	8,6
Rivière L'Etang (au niveau du pont)	MP6	-8,9	-2,8	2	5,8	7,4	-14,8	161,6	moderne	0,704484	n.a.	2,2
Source Riv. Claire (1 <sup>ère</sup> émergence)	MP8	-5,3	-2,5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,704250	n.a.	2,3
Source Riv. Mitan (émergence moins diluée)	MP9	-7,7	-2,7	< 1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,704383	n.a.	5,2
Source Riv. Picodo	MP10	-7,6	-2,2	< 1	10,4	8,6	n.a.	n.a.	n.a.	0,704317	n.a.	5,4
Source Grande Rivière	MP11	-7,5	-3,0	2	11,4	12,9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. = non analysé

**Tabl. 5 - Résultats des analyses isotopiques effectuées sur les eaux prélevées au cours des campagnes d'échantillonnage des sources thermales des régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (2001-2003).**

## 2.3. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

### 2.3.1. Caractéristiques chimiques des eaux

Pour les eaux des sources thermales de la rivière Chaude et de Petite Anse du Diamant ainsi que pour le fluide du sondage OPGMC en bordure de mer, les résultats des analyses chimiques des espèces majeures sont semblables à ceux acquis antérieurement, malgré quelques légères différences (Sanjuan *et al.*, 2003).

L'eau de la source thermale de la rivière Mitan, prélevée au cours de cette étude, indique des concentrations en sodium, potassium, chlorures et bicarbonates environ deux fois plus élevées que celles déterminées antérieurement sur des sources thermales de cette rivière alors que les concentrations en calcium, magnésium et sulfates sont inférieures (Sanjuan *et al.*, 2003). On peut espérer avoir récupéré, au cours de cette étude, une eau avec une signature indiquant une origine plus profonde.

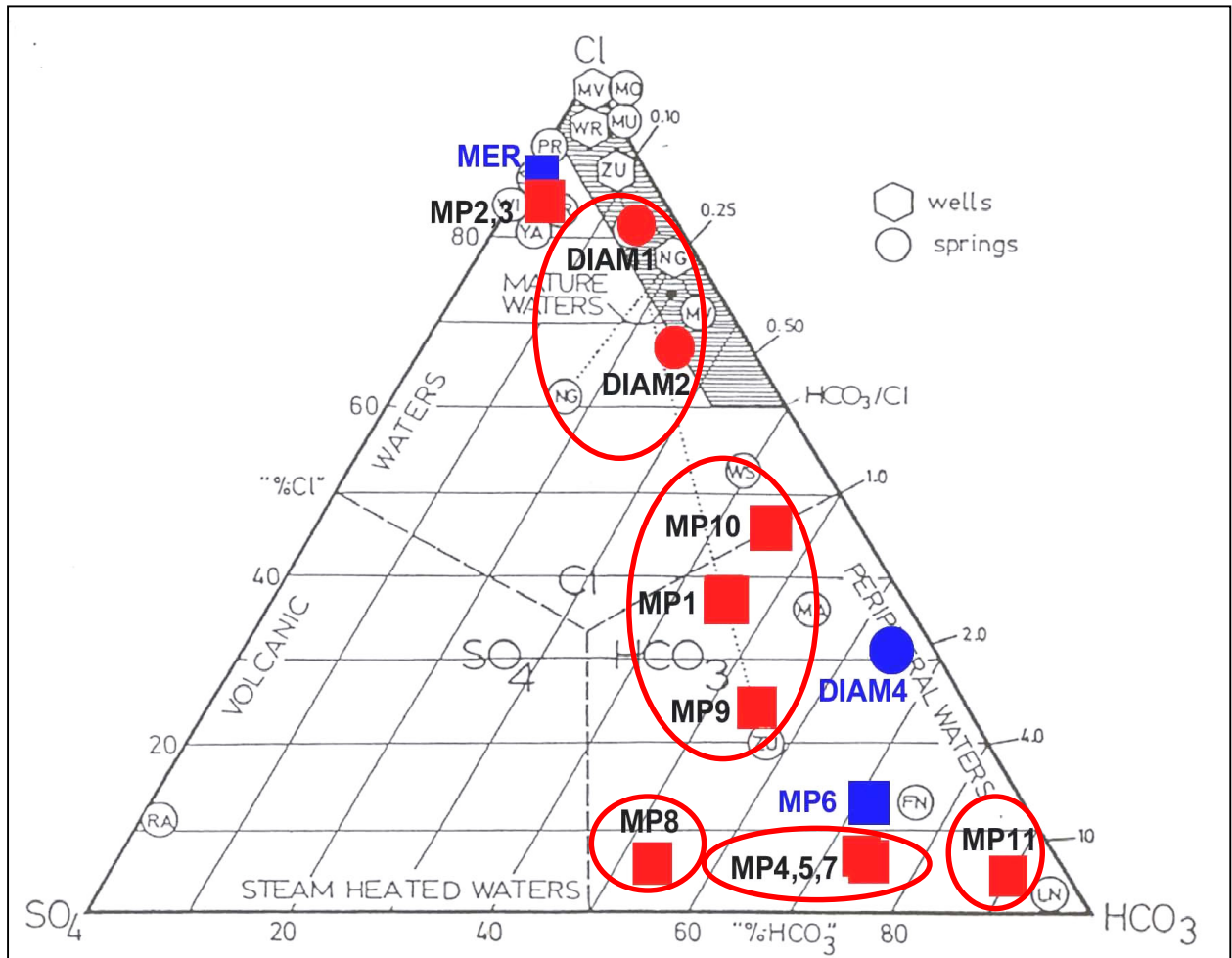
La composition chimique de l'eau de la source thermale de la rivière Picodo donnée en 1869 est proche de celle trouvée pour l'eau de la source de la rivière Mitan, prélevée au cours de cette étude, ce qui pourrait signifier que l'échantillon d'eau de 1869 correspondrait plutôt à un prélèvement effectué sur cette dernière source.

Les résultats des analyses chimiques effectuées sur les sources thermales de la rivière Picodo et de Grande Rivière sont inédits.

Dans le diagramme de Giggenbach (1991) de la figure 4, on peut distinguer cinq types d'eaux thermales.

Le groupe des eaux thermales de Petite Anse du Diamant (DIAM1 et DIAM2), dont les températures à l'émergence varient de 30 à 35 °C, se détache des autres eaux thermales. En effet, ces eaux, chlorurées sodiques et carbo-gazeuses, d'une salinité variant de 12 à 20 g/l et possédant des valeurs de pH comprises entre 6,0 et 7,1, font partie du groupe des eaux géothermales dites « matures », dont la composition chimique reflète un degré d'interaction avec les roches très important. Nous verrons ultérieurement que les différences de salinité observées entre les eaux de ce groupe sont uniquement dues à la dilution du fluide le plus concentré par une eau douce superficielle, au cours de sa remontée vers la surface.

Le groupe rassemblant les eaux du sondage OPGMC et des sources thermales carbo-gazeuses des rivières Picodo et Mitan (MP1, MP9 et MP10), dont les températures à l'émergence varient de 28 à 37 °C, reflète la présence d'un pôle d'eaux chlorurées bicarbonatées sodiques, possédant une salinité allant de 0,6 à 1,6 g/l et des valeurs de pH comprises entre 6,3 et 6,6. La composition chimique de ces eaux suggère une faible contribution d'eau de mer (< 2,5 %) avant interaction avec les roches. Les différences de salinité et de température observées à l'émergence des sources indiquent que ces eaux sont probablement diluées par des eaux superficielles peu minéralisées au cours de leur remontée vers la surface. L'eau de la source de la rivière Picodo semble être la moins affectée par les eaux superficielles. Les échantillons d'eau des sources thermales sous-marines MP2 et MP3 représentent des mélanges entre l'eau de mer et le fluide du sondage OPGMC avec une très forte proportion d'eau de mer.



**Fig. 4 - Positionnement des eaux des sources thermales et des eaux de surface analysées au cours de cette étude dans le diagramme ternaire Cl-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> de Giggenbach (1991).**

Le groupe des eaux des sources thermales carbo-gazeuses de la rivière Chaude (MP4, MP5 et MP7), qui rassemble les eaux les plus chaudes à l'émergence (températures allant de 38 à 51,4 °C), indique un faciès bicarbonaté sodique. Les salinités de ces eaux varient de 1,0 à 1,4 g/l et les valeurs de pH de 6,4 à 6,6. Le pôle le plus minéralisé (MP4) est celui qui possède la température la plus élevée et le pH le plus bas. Les valeurs de salinité relativement faibles et dispersées ainsi que les différences de température à l'émergence et la position de ces eaux sur le diagramme de la figure 4 suggèrent des processus de mélange à proportion variable entre une eau relativement chaude et moyennement minéralisée et une eau douce superficielle, au cours de la remontée de l'eau chaude vers la surface. Ces eaux ont un faciès chimique similaire à celui de l'eau de surface utilisée comme référence dans la région (MP6).

L'eau de la source thermale de la rivière Claire (MP8) possède un faciès bicarbonaté-sulfato-sodique et un pH de 6,23. Sa salinité, relativement faible (0,4 g/l), et sa température à l'émergence (22,9°C) lui confèrent des caractéristiques d'une eau superficielle d'origine météorique. Sa position dans le diagramme de la figure 4, due à sa concentration relativement élevée en sulfates, pourrait témoigner de la présence de vapeur d'eau riche en H<sub>2</sub>S ou d'émanations de ce gaz en contact avec cette eau.

Enfin, l'eau de la source thermale de Grande Rivière (MP11), bicarbonatée calcosodique, peu minéralisée (0,4 g/l) et indiquant un pH de 6,29, montre des caractéristiques d'une eau douce superficielle d'origine météorique, légèrement réchauffée. Sa température à l'émergence n'est, d'ailleurs, que de 27 °C.

### 2.3.2. Origine des eaux et temps de transit

#### a) Origine des eaux

Les ions chlorure, bromure et sodium, espèces très solubles, ainsi que le deutérium, voire l'oxygène-18, peuvent être souvent utilisés comme indicateurs d'origine des eaux ou de mélanges.

Ainsi, les diagrammes de la figure 5 permettent de conclure que les échantillons d'eau MP2 et MP3 sont le résultat d'un mélange de l'eau du sondage OPGMC et d'eau de mer avec une proportion relativement élevée d'eau de mer (environ 72 % pour MP2 et 30 % pour MP3). On constate également que l'échantillon d'eau DIAM2 est constitué d'un mélange entre l'eau la plus minéralisée de la source thermale de Petite Anse du Diamant (DIAM1) et une eau douce d'origine météorique.

Les diagrammes Br-Cl et  $\delta D-Cl$  de la figure 5 suggèrent que l'eau DIAM1 a une origine relativement complexe. Ses faibles valeurs en deutérium, déjà remarquées par Pedroni *et al.* (1999), sont très différentes de celles des eaux d'origine météorique actuelles en Martinique. Elles pourraient être expliquées par un mélange avec une eau d'origine magmatique ( $\delta D \approx -80\text{‰}$ ) ou un autre pôle d'origine encore inconnue (condensat de vapeur ?). Par ailleurs, le diagramme Br-Cl (fig. 5) indique que cette eau ne suit pas la droite de mélange entre une eau de mer et une eau douce d'origine météorique. Or, sa salinité importante, sa composition chimique (dont le rapport Na-Cl), et la proximité de la source thermale par rapport à la mer laissent supposer une contribution d'eau de mer.

La majeure partie de cette contribution aurait eu lieu avant l'interaction avec les roches car les concentrations en Mg et SO<sub>4</sub>, très faibles, et le rapport isotopique en strontium, ont été beaucoup modifiés et ne montrent quasiment plus de trace de cette contribution en eau de mer.

Si on considère cette contribution effective, deux hypothèses peuvent alors être envisagées pour expliquer l'écart observé par rapport à la droite de mélange eau de mer - eau douce du diagramme Br-Cl (fig. 5) :

- soit des ions bromures ont été éliminés (piégeage par de la matière organique ?) ;
- soit des ions chlorures ont été ajoutés (apport de Cl d'origine magmatique ? dissolution d'évaporites telles que la halite (NaCl) ?).

Suivant l'hypothèse envisagée, le pôle eau douce du mélange a alors une valeur de  $\delta D$  comprise entre -35 et -50 ‰ et la proportion d'eau de mer du mélange peut varier de 37 à 50 % (diagrammes  $\delta D$ -Br et  $\delta D$ -Cl de la figure 5). Des analyses isotopiques complémentaires de <sup>36</sup>Cl et <sup>37</sup>Cl effectuées sur des échantillons d'eau de la source thermique de Petite Anse du Diamant permettraient, très probablement, de définir précisément l'origine des chlorures (eau de mer ? évaporites ? gaz magmatiques ?) et donc de déterminer aussi l'origine de ces eaux.

Les échantillons d'eau DIAM1 et DIAM2 possèdent des valeurs fortement élevées en oxygène-18, ce qui se traduit par un écart important par rapport à la droite des eaux météoriques mondiales et locales sur le diagramme  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  de la figure 5. Cet écart témoigne d'un enrichissement en oxygène-18 de l'eau, qui provient de fortes interactions de cette eau avec les roches à température élevée. Par ailleurs, ces valeurs élevées peuvent, de plus, traduire un faible rapport eau-roche ou une circulation des fluides relativement lente.

Pour les eaux MP1 et MP10, voire MP9, les diagrammes des figures 5 et 6 suggèrent que ces fluides sont issus, à l'origine, d'un mélange entre une forte proportion d'eau douce d'origine météorique et une faible contribution d'eau de mer (de l'ordre de 1 % pour MP1 et de 2 % pour MP10). Le pôle d'eau douce dominant, pour les eaux MP1 et MP10, aurait des valeurs en  $\delta D$  et  $\delta^{18}O$  proches de celles de l'échantillon d'eau de la rivière L'Étang (- 8,9 et - 2,8 ‰, respectivement), qui se situe sur le diagramme  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  de la figure 5 entre la droite des eaux météoriques locales et celle des eaux météoriques mondiales. L'eau MP9 aurait un autre pôle d'eau douce.

Les eaux des sources thermales de la rivière Chaude et de Grande Rivière sont essentiellement constituées d'eaux douces possédant des signatures isotopiques en  $\delta D$  et  $\delta^{18}O$  proches (fig. 6). On peut constater le processus de dilution, qui intervient entre les échantillons MP4 (eau la plus concentrée en chlorure et la plus chaude) et MP5. L'eau de la source thermique de la rivière Claire, qui est, également, constituée d'eau douce, possède des valeurs en  $\delta D$  et  $\delta^{18}O$  relativement différentes des eaux précédentes.

Les forts écarts mensuels observés sur les valeurs des teneurs en  $\delta D$  et  $\delta^{18}O$  des précipitations à la station du Morne Bellevue (Montagne Pelée) et à celle de San Juan (Porto Rico ; Chéry, 1994), ainsi que l'absence d'une chronique saisonnière de mesures locales en fonction de l'altitude, rendent impossible l'utilisation d'un gradient isotopique altimétrique et donc, la détermination de l'altitude de l'aire de recharge en



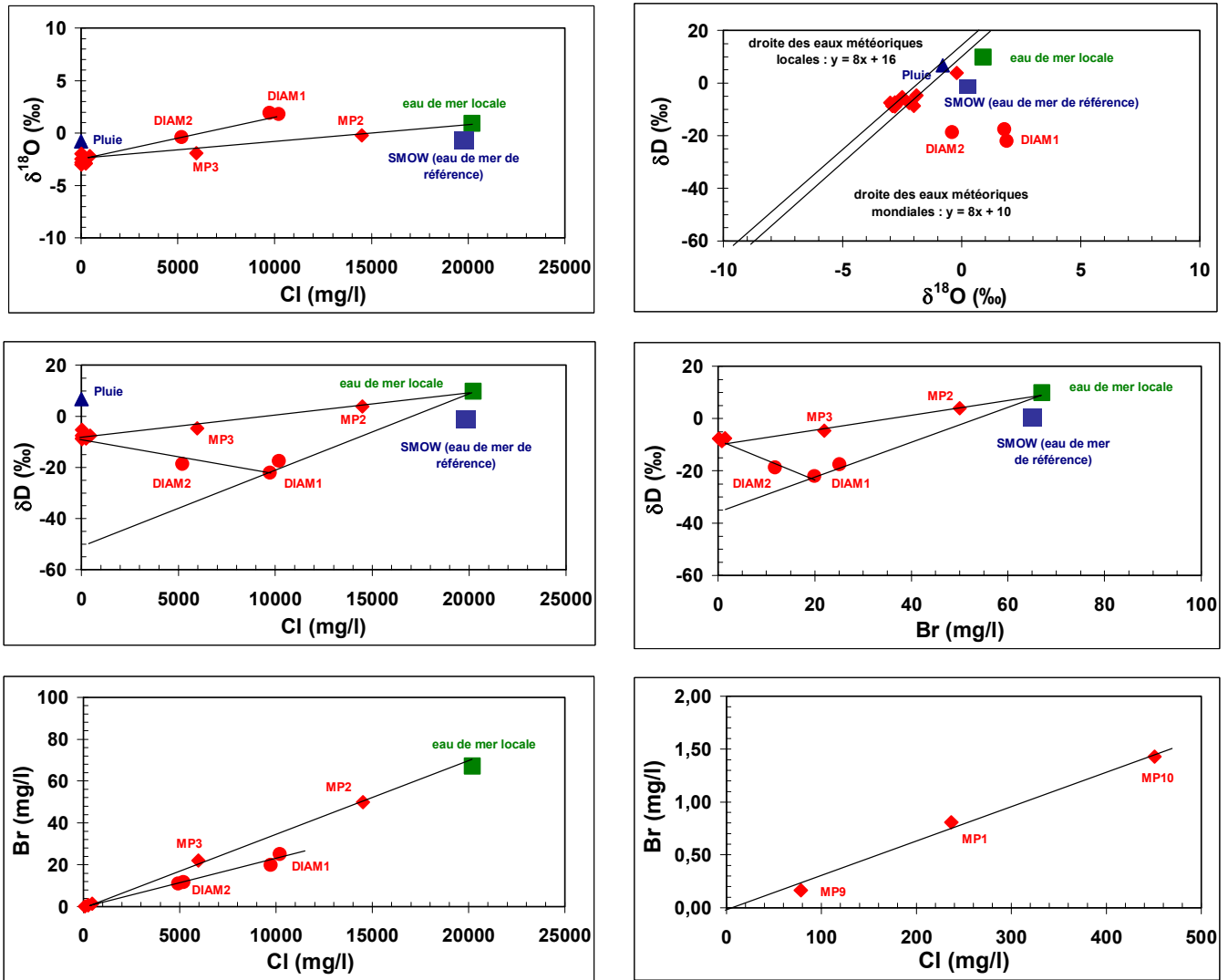


Fig. 5 - Diagrammes  $\delta^{18}\text{O}\text{-Cl}$ ,  $\delta\text{D}\text{-Cl}$ ,  $\delta\text{D}\text{-}\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}\text{-Br}$  et  $\text{Br}\text{-Cl}$  pour les eaux des sources thermales étudiées au cours de cette étude.

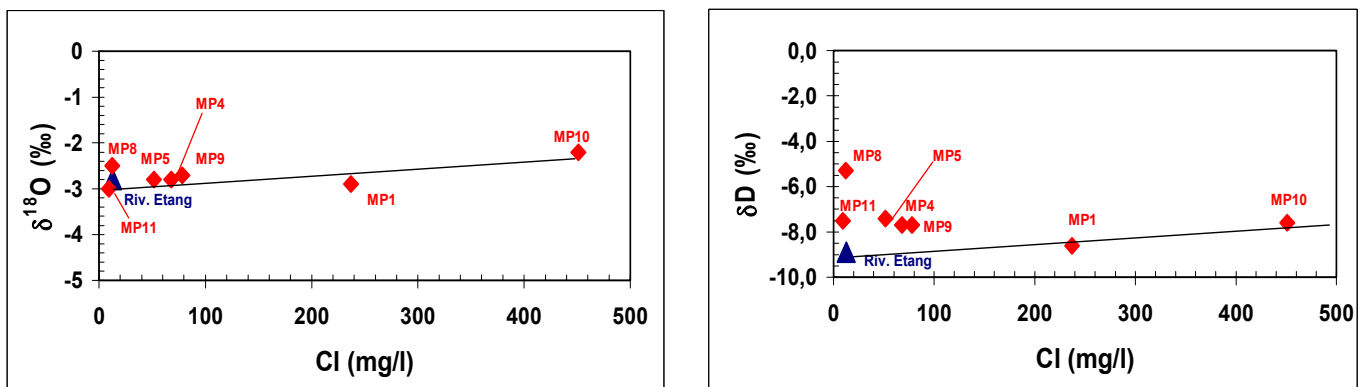


Fig. 6 - Diagrammes  $\delta^{18}\text{O}\text{-Cl}$  et  $\delta\text{D}\text{-Cl}$  pour les eaux des sources thermales de la région de la Montagne Pelée étudiées au cours de cette étude.

eau douce de ces eaux thermales. Néanmoins, la similitude des compositions isotopiques en  $\delta D$  et  $\delta^{18}O$  des eaux des sources thermales de la rivière Chaude permet de penser que ce sont les eaux de surface locales qui sont à l'origine de leur alimentation en eau.

### **b) Temps de résidence des eaux**

Le tritium est un isotope radioactif de l'hydrogène de faible période (12,5 ans), donc instable. Il est produit naturellement par la réaction du rayonnement cosmique sur les noyaux de l'azote de l'air. Cependant, lors des essais thermonucléaires aériens effectués entre 1954 et 1965, des quantités importantes de tritium ont été émises dans l'atmosphère. L'étude de la teneur en tritium dissous dans les eaux souterraines est surtout un outil pour essayer de déterminer leur temps de résidence dans l'aquifère. Comme cet isotope se désintègre progressivement au cours du temps, son activité dans l'eau infiltrée dans le sous-sol diminue en fonction du temps de séjour de cette eau.

Actuellement, le tritium est présent en très faible teneur dans l'atmosphère et donc, dans les eaux météoriques, depuis l'arrêt des explosions thermonucléaires aériennes dans l'hémisphère nord. Ainsi, les eaux de surface prélevées au cours de cette étude (DIAM4 et MP6) indiquent une activité de 2 UT. De ce fait, cet élément ne permet plus de dater les eaux souterraines mais par contre, il est possible, à partir des activités en tritium, de caractériser et de situer, dans le temps, les eaux les unes par rapport aux autres.

Par rapport aux activités en tritium mesurées sur les précipitations de San Juan, à Porto Rico, entre 1963 et 1986 (Chéry, 1994) et celles déterminées sur les eaux de surface au cours de cette étude (tabl. 5), les eaux thermales telles que celles des sources de la rivière Chaude et de Grande Rivière ainsi que du sondage OPGMC, qui indiquent des activités de 2-3 UT, peuvent être considérées comme constituées essentiellement d'eaux relativement récentes (temps de résidence < 50 ans) ou actuelles. Pour les autres eaux thermales (DIAM1, DIAM2, MP9 et MP10), qui affichent des activités en tritium inférieures à 1 UT (tabl. 5), il est difficile de conclure. Néanmoins, il est fort probable que l'eau la plus minéralisée de la source de Petite Anse du Diamant possède un temps de résidence supérieur à 50 ans.

Les activités en carbone-14 analysées sur les échantillons d'eau DIAM4 et MP6 confirment bien que ce sont des eaux actuelles (tabl. 5). Par contre, pour les eaux thermales MP1, MP4 et MP5, les activités en carbone-14 étant influencées, comme nous le verrons, par des émanations de  $CO_2$  d'origine essentiellement magmatique (activité en carbone-14 nulle), les âges estimés pour ces eaux (tabl. 5) ne peuvent pas être considérés comme représentatifs. Ces activités reflètent plutôt l'abondance du  $CO_2$  d'origine magmatique, qui s'est dissous dans l'eau.

Pour les échantillons d'eau thermale DIAM1 et DIAM2, comme le suggèrent leur signature isotopique en carbone-13 (tabl. 5) et leur concentration en bicarbonates (tabl. 2), le carbone dissous proviendrait plutôt de la dissolution de carbonates d'origine marine. Les âges donnés par le carbone-14 ne peuvent donc pas être reliés au temps de résidence de ces eaux.

### 2.3.3. Processus d'interaction eau-roche-gaz

#### a) Sources thermales de Petite Anse du Diamant

Par rapport à une eau de mer diluée par de l'eau douce, les eaux de la source thermale de Petite Anse du Diamant (DIAM1 et DIAM2) sont enrichies en calcium, bicarbonates, silice dissoute, strontium, baryum, bore, arsenic, fer, manganèse, lithium, rubidium, césium et germanium (fig. 7 et 8). Elles sont appauvries en magnésium et en sulfates (fig. 7).

Ces résultats sont caractéristiques de processus d'interactions eau-roches volcaniques (basaltes, andésites...), qui ont été observés en laboratoire (Bischoff and Dickson, 1975) et en milieu naturel (Tomasson *et al.*, 1972 ; Edmond *et al.*, 1982 ; Michard *et al.*, 1984 ; Von Damm *et al.*, 1985 ; Sanjuan *et al.*, 1990 ; Houssein *et al.*, 1993 ; Sanjuan et Brach, 1997 ; Sanjuan *et al.*, 2001 ; Sanjuan *et al.*, 2002).

Les valeurs des rapports Cl/B (concentrations exprimées en mg/l) mesurées sur les échantillons d'eau DIAM1 et DIAM2 sont comprises entre 119 et 130. Elles sont très différentes du rapport de l'eau de mer échantillonnée ( $\approx 5\,260$ ) et proches des valeurs habituellement déterminées sur la plupart des eaux géothermales (valeurs comprises entre 10 et 100). Les concentrations en bore de ces échantillons et la signature isotopique du bore (9,05 ‰ ; tabl. 4) tendent plutôt à indiquer une origine gazeuse du bore (entre 2 et 8 ‰ pour les condensats de fumerolles ; Mossadik, 1997). Dans ce cas de figure, l'influence du bore marin est, bien sûr, négligeable.

De même, les valeurs des rapports Cl/Li (concentrations exprimées en mg/l) de ces échantillons, qui varient de 861 à 1 010, sont beaucoup plus basses que celle de l'eau de mer échantillonnée ( $\approx 87\,826$ ). Elles sont également plus basses que celles trouvées sur le fluide géothermal porté à 250-260°C du champ de Bouillante ( $\approx 2\,400$  ; Sanjuan *et al.*, 2000) et celles mesurées sur le fluide du forage Californie de la plaine du Lamentin ( $\approx 4\,000$  ; Sanjuan *et al.*, 2002). Ces valeurs suggèrent une interaction de l'eau relativement forte avec la roche et probablement un rapport eau-roche plutôt faible, ce qui semble en accord avec les fortes teneurs isotopiques en oxygène-18. Comme nous le verrons ultérieurement, les valeurs isotopiques en lithium de ces eaux (tabl. 5) confirment le degré d'interaction relativement élevé de ces eaux avec la roche.

Les valeurs des rapports isotopiques en strontium de ces échantillons (tabl. 5), proches de celles des andésites, sont également en bon accord avec une forte interaction eau-roche. Néanmoins, ces valeurs, légèrement supérieures à celles des eaux thermales de la Rivière Chaude (tabl. 5), qui ont une origine purement météorique, semblent être le témoin de la contribution d'eau de mer ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,709188$ ), susceptible d'alimenter les sources thermales de Petite Anse du Diamant avant interaction avec les roches.

La teneur isotopique en soufre-34 des sulfates dissous de ces échantillons a une valeur intermédiaire (tabl. 5) entre celle de l'eau de mer (20 ‰) et celle des sulfures primaires (0 ‰). Il est fort possible qu'il reste une partie de sulfates dissous d'origine marine (une bonne proportion ayant précipité sous l'effet de la température) et qu'une autre partie provienne de l'oxydation de sulfures primaires.

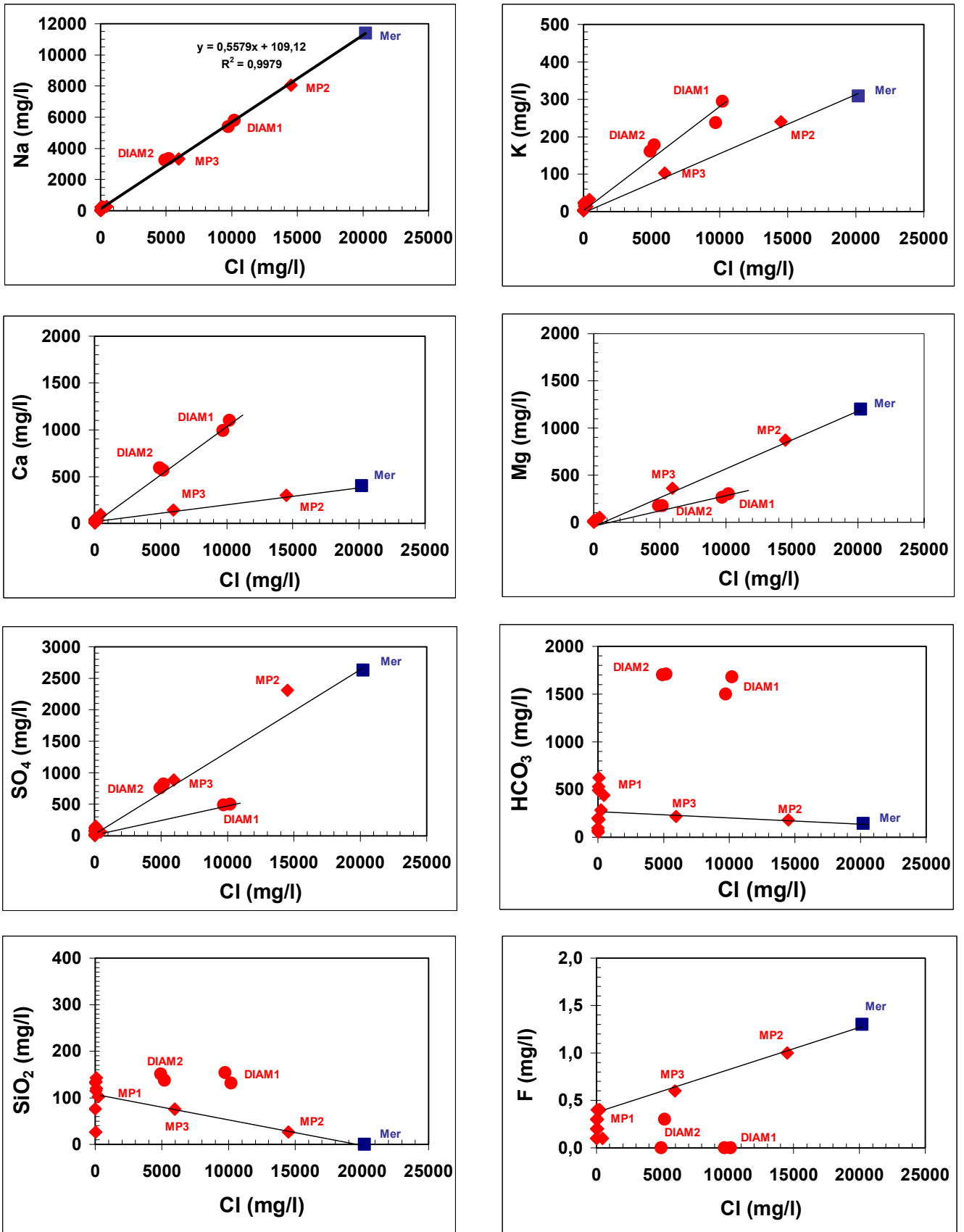


Fig. 7 - Diagrammes Na-Cl, K-Cl, Ca-Cl, Mg-Cl, SO<sub>4</sub>-Cl, HCO<sub>3</sub>-Cl, SiO<sub>2</sub>-Cl et F-Cl pour les eaux des sources thermales étudiées au cours de cette étude.

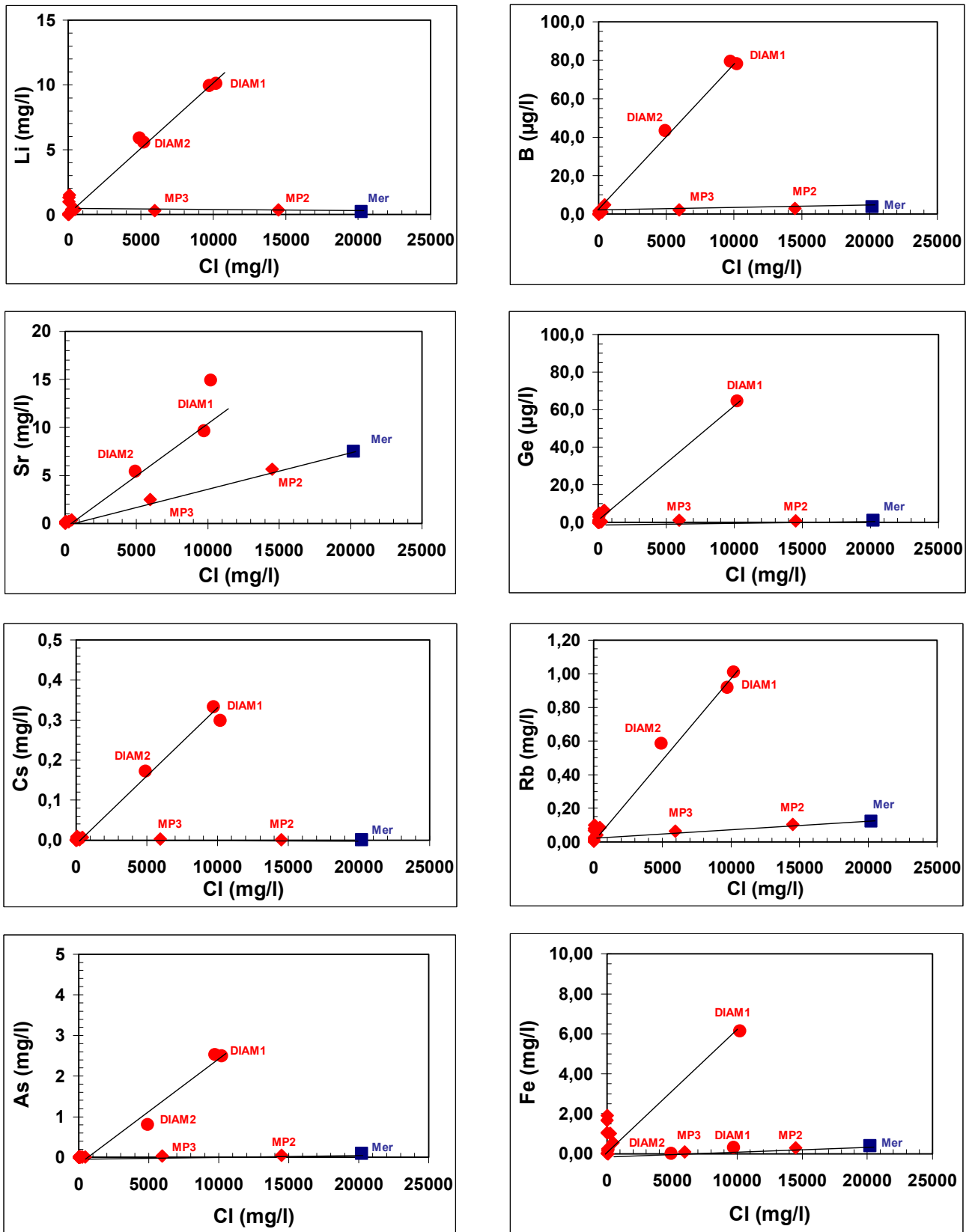


Fig. 8 - Diagrammes Li-Cl, B-Cl, Sr-Cl, Ge-Cl, Cs-Cl, Rb-Cl, As-Cl et Fe-Cl pour les eaux des sources thermales étudiées au cours de cette étude.

Afin de mieux comprendre les processus d'interaction eau-roche-gaz, des calculs de spéciation et d'indices de saturation (IS) des eaux thermales représentatives de chaque groupe vis-à-vis des principaux minéraux ont été réalisés à la température d'émergence des sources, au moyen du code géochimique EQ3NR (Wolery, 1992) et de la base de données data0.com.R2. En raison des faibles contraintes sur les mesures de Eh, de leur signification et de leur complexité, les réactions d'oxydo-réduction n'ont pas été prises en compte. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 6.

Dans ce tableau, on peut constater que la valeur minimale de pression partielle de CO<sub>2</sub> (P<sub>CO2</sub>) associée à l'eau DIAM1, à l'émergence de la source thermale de Petite Anse du Diamant, est de l'ordre de 1,25 bar. Cette valeur est probablement supérieure si on considère les processus de dégazage qui peuvent avoir lieu en surface, au cours de la remontée de l'eau et avant l'émergence. Pendant ces processus, des minéraux carbonatés tels que la calcite peuvent précipiter.

Les signatures isotopiques en carbone-13 des eaux thermales de cette source (tabl. 5) et leurs alcalinités relativement élevées (tabl. 2) sont plutôt caractéristiques d'une dissolution de carbonates d'origine marine. Ces carbonates ont pu être dissous au cours de la remontée de l'eau chaude et de son refroidissement (la calcite est plus soluble aux faibles températures). Néanmoins, cette dissolution a pu être, ensuite, remplacée par un processus de précipitation de la calcite au cours du dégazage de l'eau en surface. Comme nous le verrons dans le chapitre 2, la signature isotopique en carbone-13 des gaz libres associées à la source thermale de Petite Anse du Diamant ( $\delta^{13}\text{C} = -4,4 \text{ ‰}$ ) est très différente de celles trouvées pour le carbone dissous dans les échantillons d'eau DIAM1 et DIAM2. Elle reflète une origine essentiellement magmatique des gaz ( $-8,6\text{‰} < \delta^{13}\text{C} < -2,3 \text{ ‰}$ ; Faure, 1986 ; Marty *et al.*, 1993).

Les calculs de saturation (tabl. 6) montrent que l'eau DIAM1, à l'émergence de la source, est saturée vis-à-vis de nombreux minéraux carbonatés tels que la calcite, la dolomite désordonnée, la magnésite et la strontianite ainsi que de la cristobalite- $\beta$  et de la barytine. Elle est, entre autre, sous-saturée vis-à-vis de l'anhydrite et du gypse. Elle est sur-saturée vis-à-vis de la plupart des minéraux alumino-silicatés (feldspaths, quartz, calcédoine, zéolithes, argiles telles que kaolinite, smectites, illites...). Ceci explique que l'on puisse trouver quelques-uns de ces minéraux (calcite, smectites, zéolites, silice amorphe...) parmi les dépôts associés à cette source. Les dépôts d'hydroxydes de fer, qui sont également présents à l'émergence de la source, n'ont pas été considérés (réactions d'oxydo-réaction non prises en compte).

Une simulation effectuée au moyen du code géochimique EQ6 (Wolery and Daveler, 1992) et permettant de réchauffer cette eau thermale de 35 °C jusqu'à 200 °C a été réalisée en considérant que l'eau reste toujours à l'équilibre avec la calcite et le quartz. Les résultats de cette simulation montrent qu'entre 160 et 200 °C, la pression partielle de CO<sub>2</sub> est de l'ordre de 4-5 bar (pH proche de 5,35). À ces températures, cette eau est toujours sous-saturée vis-à-vis des feldspaths et est sur-saturée vis-à-vis des minéraux argileux. Elle est à l'équilibre avec l'anhydrite à 155-170 °C.

Echantillon	Sce Petite Anse - Diamant DIAM1	Sondage OPGMC MP1	Sce Riv. Chaude MP4	Sce Riv. Picodo MP10
Date	06/12/2001	07/12/2001	11/12/2001	16/03/2003
T (°C)	35,3	36,4	51,4	36,6
pH	5,99	6,55	6,40	6,37
Alc. (mg/l HCO <sub>3</sub> )	1679	282	621	440
Al (mg/l)	0,058	0,008	0,010	0,020
CO <sub>2</sub> aq (mg/l) calculée	1302	97	283	130
HCO <sub>3</sub> (mg/l) calculée	1336	275	610	250
P <sub>CO2</sub> (bar) calculée	1,25	0,09	0,34	0,12
IS Albite	4,23	2,16	1,93	3,29
IS Anhydrite	-0,95	-2,17	-1,81	-2,06
IS Anorthite	-1,43	-3,53	-3,35	-1,98
IS Aragonite	<b>0,16 (sat.)</b>	-0,99	-0,60	-0,80
IS Barytine	<b>0,08 (sat.)</b>	-1,13	<b>-0,03 (sat.)</b>	<b>-0,20 (sat.)</b>
Beidellite-Ca	9,24	6,55	5,84	8,60
Beidellite-Mg	9,25	6,62	5,88	8,65
IS Calcédoine	0,89	0,76	0,70	1,01
IS Calcite	<b>0,30 (sat.)</b>	-0,84	-0,45	-0,65
IS Célestite	-1,90	-3,49	-3,35	-3,54
IS Cristobalite β	<b>0,21 (sat.)</b>	<b>0,09 (sat.)</b>	<b>0,07 (sat.)</b>	0,33
IS Dolomite Désord.	<b>0,06 (sat.)</b>	-1,83	-1,23	-1,59
IS Epidote	3,01	2,05	1,44	3,12
IS Gypse	-0,88	-2,11	-1,88	-1,99
IS Heulandite	9,38	6,07	5,43	8,86
IS Illite	8,99	6,06	5,39	8,14
IS Kaolinite	7,65	5,48	4,79	6,95
IS K-feldspar	5,57	3,60	3,33	5,01
IS Magnésite	<b>-0,34 (sat.)</b>	-1,08	-0,89	-1,03
IS Montmorillonite-Ca	7,99	6,03	5,41	7,81
IS Montmorillonite-K	7,87	5,70	5,08	7,53
IS Montmorillonite-Mg	8,06	6,17	5,51	7,93
IS Montmorillonite-Na	8,06	5,85	5,21	7,59
IS Muscovite	11,88	7,98	7,20	10,38
IS Pyrophyllite	8,43	6,01	5,31	7,96
IS Quartz	1,15	1,03	0,95	1,27
IS Sidérite	-0,60	-0,80	-1,22	-1,27
IS Smectite-high-Fe-Mg	2,71	2,11	1,31	3,08
IS Smectite-low-Fe-Mg	4,38	3,35	2,63	4,55
IS Strontianite	<b>0,11 (sat.)</b>	-1,41	-1,30	-1,39
IS Wairakite	1,37	-0,97	-0,94	1,06
IS Withérite	0,53	-0,59	0,55	0,41

Tabl. 6 - Calcul des indices de saturation (IS) réalisés au moyen du code géochimique EQ3NR sur quelques eaux thermales (DIAM1, MP1, MP4 et MP10) à la température d'émergence.

## **b) Sources thermales de la région de la Montagne Pelée**

Comme nous l'avons vu dans le diagramme de la figure 4, les eaux thermales de cette région peuvent être divisées en quatre groupes.

- **Groupe sondage OPGMC (MP1), sources thermales Rivière Mitan (MP9) et Rivière Picodo (MP10)**

Ces eaux, qui sont constituées, à l'origine, d'une très faible contribution d'eau de mer et d'une forte proportion d'eau d'origine météorique, ont gardé un rapport Na/Cl proche de celui de l'eau de mer (fig. 9). Le pôle le plus minéralisé est représenté par l'eau de la source thermale de la rivière Picodo. Le prélèvement d'eau effectué sur les sources thermales de la rivière Mitan s'avère être moins dilué par les eaux de surface que ceux réalisés antérieurement (fig. 9 ; Traineau *et al.*, 1989 ; Sanjuan *et al.*, 2003).

Par rapport à une eau de mer diluée, ces eaux sont enrichies en toutes les espèces, à l'exception du sodium (fig. 9, 10 et 11). Sur ces figures, elles se démarquent le plus souvent du groupe des eaux des sources thermales de la rivière Chaude. Le fait que les concentrations en magnésium restent relativement importantes et supérieures à celles des eaux des sources thermales de la rivière Chaude suggère des températures en profondeur plus faibles et/ou des mélanges avec des eaux superficielles plus importants. Comme l'indiquent le diagramme K-Cl de la figure 9 et les diagrammes Li-Cl, Cs-Cl et Rb-Cl de la figure 10, ces eaux montrent un degré d'interaction avec la roche plus faible que celui des eaux des sources thermales de la rivière Chaude. Ainsi, par exemple, les rapports Cl/Li des eaux de ce groupe sont compris entre 608 et 1 420 tandis que ceux des eaux des sources thermales de la rivière Chaude indiquent des valeurs proches de 40-50.

Néanmoins, la similitude des valeurs isotopiques en lithium des eaux MP1, MP4 et MP5 (tabl. 5) semble confirmer les interprétations faites par Barat (1987) et Traineau *et al.* (1989), suivant lesquelles le sondage OPGMC serait alimenté, en partie, par l'eau chaude des sources thermales de la rivière Chaude, situées sur le rebord de la caldeira ancienne, en partie recouverte, et dont le réservoir pourrait se situer à l'aplomb de cette caldeira. Cette eau chaude se mélangerait, au cours de son trajet vers le bord de mer, de façon significative, avec des eaux superficielles et une faible proportion d'eau de mer. Dans la mesure où les concentrations en lithium des eaux superficielles et de l'eau de mer sont négligeables devant celles des eaux thermales de la rivière Chaude, on peut comprendre aisément pourquoi l'eau du sondage OPGMC garde la signature isotopique en lithium de ces dernières.

Par contre, les eaux des sources thermales des rivières Picodo et Mitan, qui indiquent, entre elles, des valeurs isotopiques de strontium comparables et des valeurs isotopiques de lithium similaires mais plus faibles que celles des eaux du sondage OPGMC et des sources de la rivière Chaude (tabl. 5), proviendraient plutôt d'un autre réservoir dans lequel les processus d'interaction avec la roche sont plus faibles que dans celui qui alimente les sources thermales de la rivière Chaude. Ce réservoir pourrait être, très probablement, situé à l'aplomb des sources de la rivière Picodo où de légères infiltrations d'eau de mer sont encore possibles. Par rapport aux eaux thermales de la rivière Picodo, celles de la rivière Mitan seraient diluées par davantage d'eaux superficielles. Une faille supposée, orientée NE-SW, et un cratère d'explosion jouxtent la zone des sources (Traineau *et al.*, 1989).

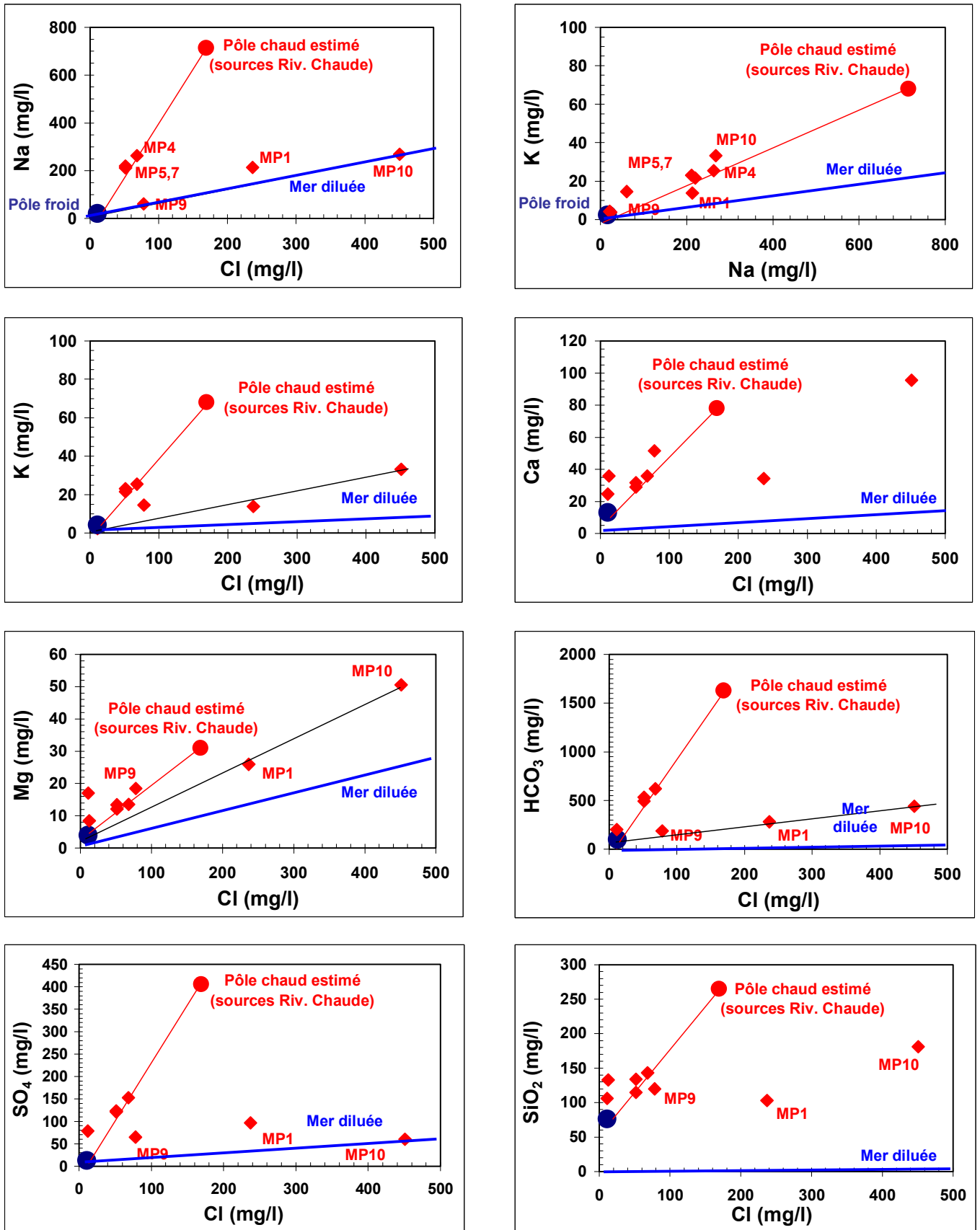


Fig. 9 - Diagrammes Na-Cl, Na-K, K-Cl, Ca-Cl, Mg-Cl, HCO<sub>3</sub>-Cl, SO<sub>4</sub>-Cl et SiO<sub>2</sub>-Cl pour les eaux des sources thermales de la région de la Montagne Pelée.

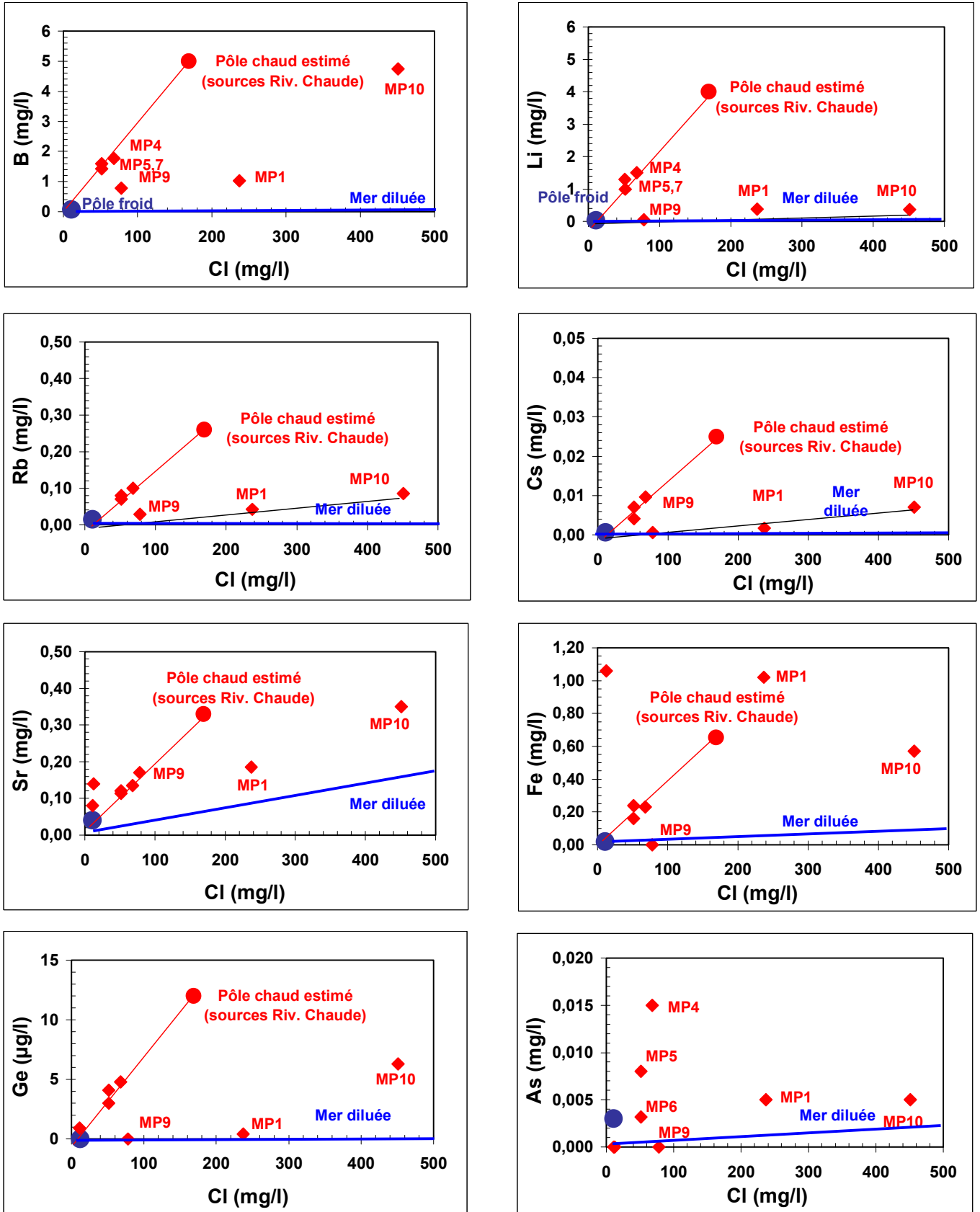


Fig. 10 - Diagrammes B-Cl, Li-Cl, Rb-Cl, Cs-Cl, Sr-Cl, Fe-Cl, Ge-Cl et As-Cl pour les eaux des sources thermales de la région de la Montagne Pelée.

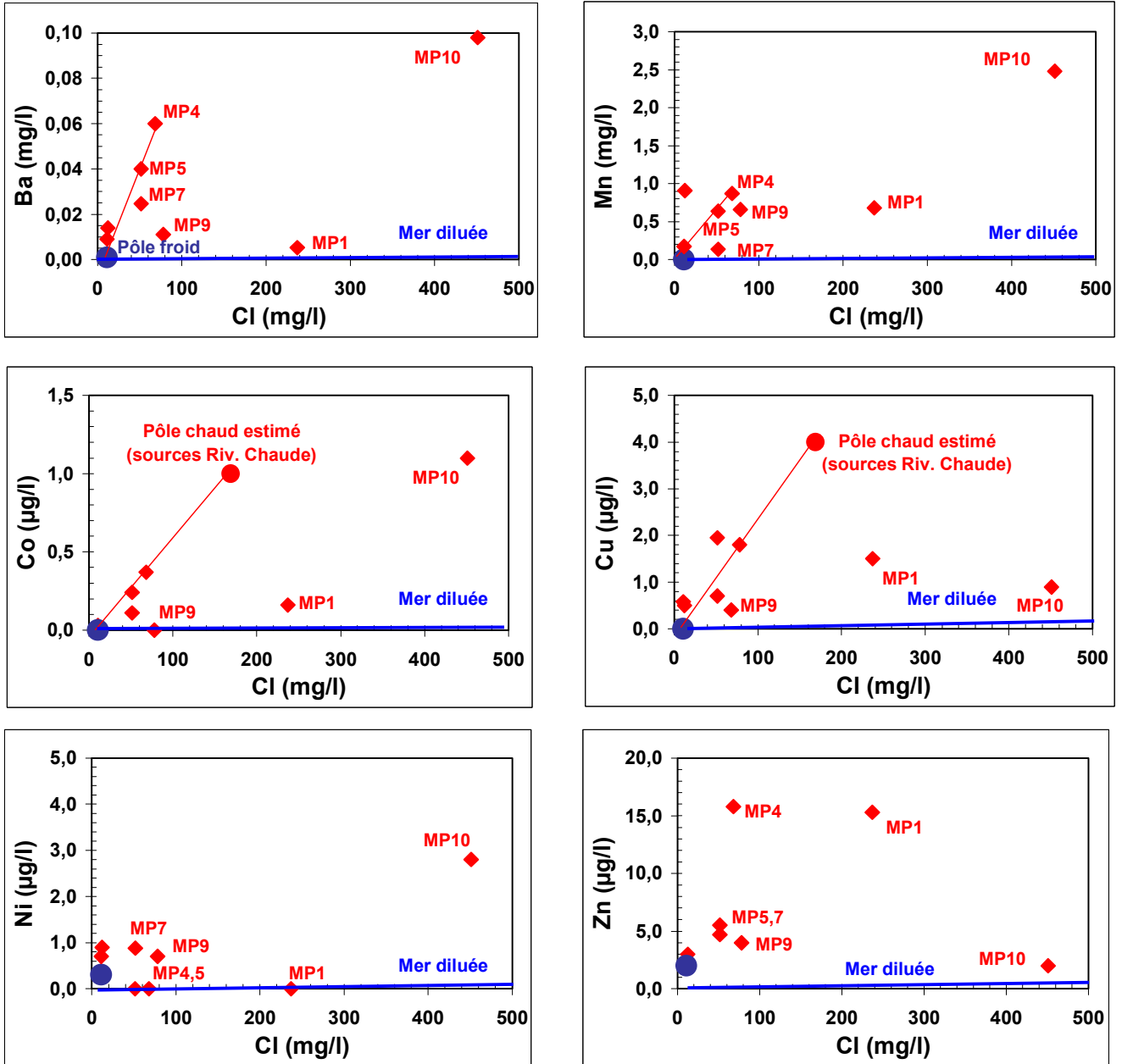


Fig. 11 - Diagrammes Ba-Cl, Mn-Cl, Co-Cl, Cu-Cl, Ni-Cl et Zn-Cl pour les eaux des sources thermales de la région de la Montagne Pelée.

Le rapport isotopique en strontium de l'eau du sondage OPGMC (tabl. 5), influencé par la présence d'eau de mer, confirme un degré d'interaction avec les roches environnantes relativement modéré et n'est pas à l'équilibre avec ces roches (andésites), contrairement aux eaux des sources thermales de la rivière Chaude. Les teneurs isotopiques en soufre-34 des sulfates dissous des eaux du sondage OPGMC et de la source thermale de la rivière Picodo ont des valeurs intermédiaires (tabl. 5) entre celle de l'eau de mer (20 ‰) et celle des sulfures primaires ( $\approx 0$  ‰). Comme pour les eaux thermales de Petite Anse du Diamant, il est fort possible que les sulfates dissous soient constitués à la fois de sulfates d'origine marine et de sulfates résultant de l'oxydation de sulfures primaires.

Les figures 7 et 8, en particulier les diagrammes  $\text{HCO}_3\text{-Cl}$ ,  $\text{SiO}_2\text{-Cl}$  et  $\text{F-Cl}$  ainsi que les valeurs en  $\delta^7\text{Li}$  (tabl. 5), montrent bien que les échantillons d'eau MP2 et MP3 sont issus d'un mélange entre l'eau thermale du sondage OPGMC (MP1) et l'eau de mer.

Les résultats des calculs de spéciation effectués à température d'émergence, au moyen du code géochimique EQ3NR, pour les eaux du sondage OPGMC et de la source thermale de la rivière Picodo permettent d'évaluer les valeurs de  $P_{\text{CO}_2}$  minimales, qui sont 0,09 et 0,12 bar, respectivement (tabl. 6). D'après les résultats de pH et d'alcalinité, la valeur minimale de  $P_{\text{CO}_2}$  associée à la source thermale de la rivière Mitan est également proche de ces valeurs. Comme nous le verrons, la valeur de  $P_{\text{CO}_2}$  estimée à l'émergence du sondage OPGMC est plus faible que celle calculée à l'émergence des sources thermales de la rivière Chaude (voir p. 39), ce qui est plutôt en bon accord avec une hypothèse d'alimentation partielle de ce sondage par les eaux de ces sources. Un degré d'interaction avec la roche moins élevé que pour les sources thermales de la rivière Chaude a été observé pour celles des rivières Picodo et Mitan. Il semble, donc, normal que les valeurs de  $P_{\text{CO}_2}$  soient plus faibles sur ces dernières.

En tenant compte des équations de fractionnement entre espèces aqueuses ( $\text{CO}_2$  aqueux et  $\text{HCO}_3$ ) et  $\text{CO}_2$  gaz libre (Mook *et al.*, 1974 ; Vogel *et al.*, 1970 ; Marty *et al.*, 1993), à la température d'émergence de l'échantillon MP1 (36,4 °C), le calcul de la teneur en carbone-13 des émanations de gaz  $\text{CO}_2$  associées à ce sondage, à partir de la signature isotopique en carbone-13 de l'eau (tabl. 5) et de la spéciation du carbone dissous de cette eau (tabl. 6), aboutit à une valeur de -5,6 ‰. Cette valeur suggère une origine magmatique des gaz ( $-8,6 \text{ ‰} < \delta^{13}\text{C} < -2,3 \text{ ‰}$  ; Faure, 1986 ; Marty *et al.*, 1993). Néanmoins, si on compare cette valeur à celle mesurée sur les gaz libres associés à la source thermale de Petite Anse du Diamant ( $\delta^{13}\text{C} = -4,4 \text{ ‰}$ ) ou à celle calculée pour les gaz libres des sources thermales de la rivière Chaude (voir p. 40), on peut constater une contribution en carbone provenant des eaux superficielles ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{atmosphère}} = -7,5 \text{ ‰}$ ), qui viennent se mélanger à l'eau thermale. Ceci est confirmé par l'activité en carbone-14 de l'eau du sondage OPGMC, qui est plus importante que celle des eaux des sources thermales de la rivière Chaude (tabl. 5)

Les calculs de saturation, à température d'émergence, montrent que les eaux du sondage OPGMC et de la source thermale de la rivière Picodo sont uniquement à l'équilibre avec la cristobalite- $\beta$  (tabl. 6). Elles sont sous-saturées vis-à-vis de la plupart des minéraux carbonatés (calcite, dolomite désordonnée, magnésite, sidérite, strontianite...) et sulfatés (anhydrite, gypse, barytine...). Elles sont sur-saturées vis-à-vis de la plupart des minéraux alumino-silicatés (feldspaths, calcédoine, quartz, minéraux argileux tels que smectites, illites, kaolinite...).

• **Groupe sources thermales Rivière Chaude (MP4, MP5 et MP7)**

Ces sources forment un groupe à part, comme le montrent les diagrammes des figures 9, 10 et 11 et comme cela avait déjà été constaté antérieurement (Traineau *et al.*, 1989 ; Sanjuan *et al.*, 2003). L'eau thermale la plus minéralisée et la plus chaude à l'émergence (MP4) est celle la moins diluée par les eaux de surface au cours de sa remontée. Les deux autres (MP5 et MP7) subissent des processus de dilution plus importants. Toutes ces eaux sont issues d'un même pôle chaud et profond.

Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, la plupart des géothermomètres chimiques indique, pour le pôle chaud et profond, des températures de l'ordre de 190-200 °C. Si on considère que ce pôle est à l'équilibre avec le quartz à cette température, on peut déterminer sa concentration en silice dissoute et estimer sa concentration en chlorure correspondante à partir des données reportées sur le diagramme SiO<sub>2</sub>-Cl de la figure 9. En utilisant les concentrations en chlorure et en silice dissoute, on peut alors estimer le facteur de dilution qui a affecté ces eaux au cours de leur remontée vers la surface. On estime ainsi que l'eau MP4 a été diluée par environ 60 % d'eau de surface au cours de sa remontée vers la surface ; les eaux MP5 et MP7 par 70 %. A partir des concentrations en chlorure, on peut également reconstituer, pour de nombreuses espèces, la composition chimique du pôle profond porté à 190-200 °C (fig. 9, 10 et 11 ; tabl. 7). Ce pôle, bicarbonaté sodique, aurait une salinité de l'ordre de 3-4 g/l.

Pôle chaud (sources Rivière Chaude)	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	HCO <sub>3</sub> mg/l	Cl mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l	SiO <sub>2</sub> mg/l	TDS g/l
<b>Concentration</b>	714	68	78	31	1630	169	406	265	3,4

Pôle chaud (sources Rivière Chaude)	B mg/l	Li mg/l	Rb mg/l	Cs mg/l	Sr mg/l	Fe mg/l	Ge µg/l	Co µg/l	Cu µg/l
<b>Concentration</b>	5	4	0,26	0,025	0,33	0,65	12	1	4

**Tabl. 7 - Reconstitution de la composition chimique du pôle chaud dont résultent les trois eaux des sources thermales de la rivière Chaude (MP4, MP5 et MP7), avant dilution par des eaux superficielles de ce pôle chaud au cours de sa remontée vers la surface.**

Les eaux thermales de ce groupe montrent un degré d'interaction eau-roche relativement élevé dans la mesure où leur rapport Cl/B, Cl/Li, Cl/Cs, Cl/Rb, Cl/As et Cl/Ge figurent parmi les plus bas de toutes les eaux thermales. Ainsi, les rapports Cl/B (concentrations exprimées en mg/l) sont de l'ordre de 30-40 et les rapports Cl/Li autour de 40-50. La valeur isotopique en bore (6,25 ‰ ; tabl. 5) ne permet pas de départager entre une origine gazeuse du bore ou résultant de processus d'interaction avec des laves d'arc insulaire (Mossadik, 1997). Les valeurs isotopiques en lithium, les plus élevées de celles des eaux thermales, ainsi que les rapports isotopiques en strontium (tabl. 5), proches de ceux des andésites, confirment le degré d'interaction important des eaux avec la roche.

Les valeurs du rapport isotopique en soufre-34, proches de celles des eaux du premier groupe, résultent, très probablement, de l'oxydation de sulfures primaires (H<sub>2</sub>S et/ou pyrite).

Les résultats des calculs de spéciation effectués à température d'émergence, au moyen du code géochimique EQ3NR, pour l'eau MP4, l'eau la moins affectée du groupe par les eaux de surface, permettent d'évaluer la valeur minimale de P<sub>CO<sub>2</sub></sub>, qui est de 0,34 bar. Cette valeur est supérieure à celles estimées pour les sources du groupe précédent (autour de 0,1 bar). Comme pour le sondage OPGMC, on peut calculer, à la température d'émergence (51,4 °C), la teneur en carbone-13 des émanations de gaz CO<sub>2</sub> associées aux sources thermales de la rivière Chaude, à partir de la signature isotopique en carbone-13 de l'eau MP4 (tabl. 5) et des résultats des calculs de spéciation du carbone dissous pour cette eau (tabl. 6). On aboutit, alors, à une valeur de -2,8 ‰. Cette valeur suggère également une origine essentiellement magmatique des gaz (-8,6 ‰ < δ<sup>13</sup>C < -2,3 ‰ ; Faure, 1986 ; Marty *et al.*, 1993). Si on compare cette valeur à celle mesurée directement sur les gaz libres associés à la source thermale de Petite Anse du Diamant (δ<sup>13</sup>C = -4,4 ‰), des processus de dissolution de calcite d'origine marine au cours de la remontée des eaux chaudes, qui feraient légèrement augmenter le δ<sup>13</sup>C du carbone dissous, ne peuvent pas être totalement exclus.

Les calculs de saturation, à température d'émergence, montrent que l'eau MP4 est uniquement à l'équilibre avec la cristobalite-β et la barytine (tabl. 6). Elle est sous-saturée vis-à-vis de la plupart des minéraux carbonatés (calcite, dolomite désordonnée, magnésite, sidérite, strontianite...) et sulfatés (anhydrite, gypse...). Elle est sur-saturée vis-à-vis de la plupart des minéraux alumino-silicatés (feldspaths, calcédoine, quartz, minéraux argileux tels que smectites, illites, kaolinite...). Une simulation effectuée au moyen du code géochimique EQ6 et permettant de réchauffer le pôle chaud reconstitué des eaux thermales de ce groupe de 51 °C jusqu'à 200 °C a été réalisée en considérant que l'eau reste toujours à l'équilibre avec la calcite, la kaolinite et le quartz. Les résultats de cette simulation montrent qu'entre 150 et 200 °C, la valeur de la pression partielle de CO<sub>2</sub> est autour de 2,5 bar (pH variant de 6,65 à 7,09). Il apparaît que le pôle chaud est à l'équilibre avec les feldspaths (albite et feldspath potassique) vers 170 °C.

#### • Groupe source thermale Rivière Claire (MP8)

L'eau de cette source, peu minéralisée (TDS < 0,5 g/l) et relativement froide (22,9 °C à l'émergence), indique un degré d'interaction faible avec la roche. Ce faible degré est confirmé par la valeur isotopique en lithium (tabl. 5), proche de celle d'une eau de surface et plus faible que celle des eaux thermales des groupes précédents. La forte concentration en sulfates de cette eau par rapport à sa minéralisation et son pH relativement faible suggèrent la présence d'émanations gazeuses (H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>), voire de vapeur, au contact avec cette eau.

#### • Groupe source thermale Grande Rivière (MP11)

L'eau de cette source thermale est, comme celle du groupe précédent, peu minéralisée (TDS < 0,5 g/l) et témoigne également d'un faible degré d'interaction avec la roche. Néanmoins, la faible valeur du pH suggère une pression partielle de CO<sub>2</sub> relativement importante.

### 2.3.4. Géothermométrie

Le diagramme triangulaire de Giggenbach (1988) de la figure 12 indique que toutes les eaux thermales étudiées sont situées dans la zone classée comme celle des « eaux immatures », hors d'un équilibre complet avec la roche. Ceci n'est pas un indice de températures très élevées en profondeur. Néanmoins, en appliquant la plupart des géothermomètres chimiques et isotopiques connus (tabl. 8), on peut estimer à environ 180 °C la température en profondeur des eaux des sources thermales de Petite Anse du Diamant, qui sont proches de la zone d'équilibre partiel, et à 190-200 °C celle des eaux des sources thermales de la rivière Chaude. L'eau du sondage OPGMC (MP1) est issue d'un mélange entre les eaux de ces sources thermales, des eaux superficielles froides et de l'eau de mer.

Pour les autres eaux thermales, on peut constater une baisse de la température en profondeur en fonction de leur proximité au pôle magnésien du diagramme de la figure 12. Ainsi, des températures en profondeur de l'ordre de 100-110 °C ont été estimées pour les eaux MP8 et MP11 (tabl. 8), qui sont les plus proches du pôle magnésien de ce diagramme, tandis qu'une température profonde d'environ 150 °C est attribuée aux eaux MP9 et MP10 (tabl. 8), plus éloignées de ce pôle. Pour les eaux MP8, MP9, MP10 et MP11, on s'aperçoit que les températures estimées à partir des géothermomètres à cations Na/K et Na/K/Ca sont dénuées de signification (tabl. 8). Ceci provient du fait que :

- le rapport Na/K n'est pas contrôlé par une réaction d'équilibre de l'eau vis-à-vis des feldspaths sodiques et potassiques, réaction qui est à la base du fonctionnement de ce géothermomètre ;
- la concentration en calcium peut être modifiée de façon importante au cours de la remontée de l'eau chaude et de son refroidissement.

Pour l'eau de mer et les eaux MP2 et MP3 issues d'un mélange avec de l'eau de mer, on sait que ces géothermomètres ne sont pas applicables (Michard, 1979). Ils donnent des températures sur-évaluées (de l'ordre de 140-180 °C).

D'après Arnorsson (1975) et Michard (1990), en milieu volcanique, la silice dissoute est plutôt contrôlée par le quartz à des températures supérieures à 160 °C et par la calcédoine à des températures inférieures. Etant donné que la plupart des eaux thermales est diluée par des eaux de surface au cours de leur remontée, les valeurs de température calculées à partir du géothermomètre à silice sont sous-estimées.

Pour les eaux thermales carbo-gazeuses, issues d'un mélange avec de l'eau de mer, même à des proportions très faibles, le tableau 8 semble montrer que le géothermomètre Na/Li de Kharaka et al. (1982) est plus adapté que celui de Fouillac et Michard (1981). Pour les eaux douces, cela semble être le contraire.

Si on écarte les échantillons d'eau MP1 et MP2, issus d'un mélange d'eau thermale et d'eau de mer, une corrélation semble être établie entre les valeurs isotopiques en lithium (tabl. 5) et les températures estimées en profondeur (tabl. 8). Ainsi, plus les valeurs isotopiques en lithium des échantillons d'eau sont importantes, plus les températures en profondeur sont élevées. Dans cette étude, ces valeurs isotopiques ont non seulement permis de différencier les origines d'eaux de faciès chimique comparable (MP1 et MP9-MP10) mais constituent également des indicateurs pertinents de température profonde des eaux.

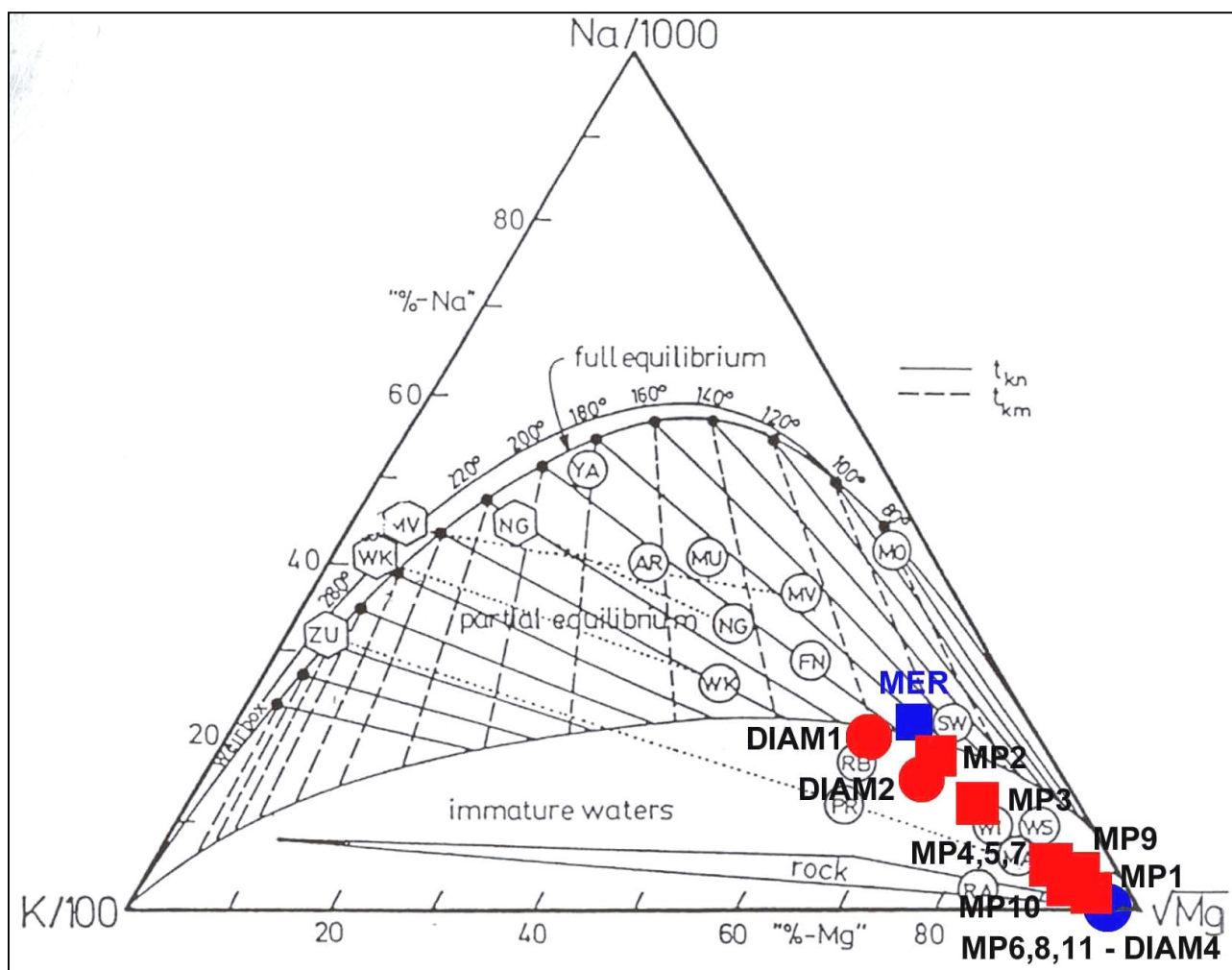


Fig. 12 - Positionnement des eaux des sources thermales et des eaux de surface analysées au cours de cette étude dans le diagramme ternaire Na-K-Mg de Giggenbach (1988).

Point d'eau	n°	T <sub>émerg.</sub> °C	T <sub>Qz</sub> °C	T <sub>Calcéd.(1)</sub> °C	T <sub>Calcéd.(2)</sub> °C	T <sub>SiO2am.</sub> °C	T <sub>Na/K (1)</sub> °C	T <sub>Na/K (2)</sub> °C
Source Petite Anse - Diamant (bac)	DIAM1	35,3	153	124	91	31	135	165
Source Petite Anse - Diamant (émergence)	DIAM2	30,4	162	133	99	39	133	163
Sondage OPGMC Bord de Mer	MP1	36,4	139	110	78	19	156	182
Source Riv. Chaude (1 <sup>ère</sup> émergence)	MP4	51,4	158	130	96	36	194	214
Source Riv. Claire (1 <sup>ère</sup> émergence)	MP8	22,9	154	125	92	32	255	262
Source Riv. Mitan (émergence moins diluée)	MP9	28,3	148	119	86	27	312	305
Source Riv. Picodo	MP10	36,6	173	145	110	50	236	247
Source Grande Rivière	MP11	27,1	141	111	79	20	283	283

Point d'eau	n°	T <sub>Na/K/Ca</sub> (β=4/3) °C	T <sub>Na/K/Ca</sub> (β=1/3) °C	T <sub>Ca/K (1)</sub> °C	T <sub>Ca/K (2)</sub> °C	T <sub>K/Mg</sub> °C	T <sub>Na/Li (1)</sub> °C	T <sub>Na/Li (2)</sub> °C
Source Petite Anse - Diamant (bac)	DIAM1	195	172	239	165	109	176	109
Source Petite Anse - Diamant (émergence)	DIAM2	173	166	217	158	100	133	61
Sondage OPGMC Bord de Mer	MP1	108	158	153	104	63	178	111
Source Riv. Chaude (1 <sup>ère</sup> émergence)	MP4	134	181	187	135	85	253	202
Source Riv. Claire (1 <sup>ère</sup> émergence)	MP8	44	167	93	50	47	196	132
Source Riv. Mitan (émergence moins diluée)	MP9	85	202	145	97	68	143	71
Source Riv. Picodo	MP10	134	197	193	123	84	155	85
Source Grande Rivière	MP11	51	178	104	60	42	170	104

Point d'eau	n°	T <sub>Mg/Li</sub> °C	T <sub>K/Sr</sub> °C	T <sub>Na/Rb</sub> °C	T <sub>Na/Cs</sub> °C	T <sub>δ<sup>18</sup>O(H2O-SO4)</sub>	T <sub>estimée</sub> °C
Source Petite Anse - Diamant (bac)	DIAM1	113	226	87	73	211	180±20
Source Petite Anse - Diamant (émergence)	DIAM2	81	217	88	74		180±20
Sondage OPGMC Bord de Mer	MP1	60	159	91	40	155	190±20
Source Riv. Chaude (1 <sup>ère</sup> émergence)	MP4	102	217	112	67	151	190±20
Source Riv. Claire (1 <sup>ère</sup> émergence)	MP8	34	96	118	99		110±10
Source Riv. Mitan (émergence moins diluée)	MP9	26	166	119	43		150±15
Source Riv. Picodo	MP10	54	223	100	57	166	150±15
Source Grande Rivière	MP11	18	113	131	62	106	105±10

T<sub>Qz</sub>, T<sub>SiO2am.</sub> : Fournier and Rowe (1966) ; T<sub>Calcéd.(1)</sub> : Arnorsson and Gunnlaugsson (1983) ; T<sub>Calcéd.(2)</sub> : Truesdell (1975).  
 T<sub>Na/K (1)</sub> : Michard (1979) ; T<sub>Na/K (2)</sub> : Fournier (1979).  
 T<sub>Na/K/Ca</sub> : Fournier and Truesdell (1973).  
 T<sub>K/Mg</sub> : Giggenbach (1988).  
 T<sub>Ca/K (1)</sub>, T<sub>K/Sr</sub>, T<sub>Na/Rb</sub>, T<sub>Na/Cs</sub> : Michard (1990).  
 T<sub>Ca/K (2)</sub> : Michard (2002).  
 T<sub>Na/Li (1)</sub> : Kharaka et al. (1982) ; T<sub>Na/Li (2)</sub> : Fouillac et Michard (1981).  
 T<sub>Mg/Li</sub> : Kharaka and Mariner (1989).  
 T<sub>δ<sup>18</sup>O(H2O-SO4)</sub> : Mizutani and Rafter (1969).

**Tabl. 8 - Estimation de la température en profondeur des eaux des sources thermales étudiées au cours de cette étude, au moyen des géothermomètres chimiques et isotopiques.**



## 3. Mesures de gaz (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, He) dans les sols et quelques analyses complémentaires

### 3.1. INTÉRÊT DE LA MÉTHODOLOGIE UTILISÉE

L'analyse dans les sols de certains gaz libres tels que l'oxygène, l'azote, le dioxyde de carbone, l'hélium et le radon, permet de détecter des anomalies de fuite associées à des discontinuités structurales dans la croûte terrestre (failles, points d'émissions magmatiques et de fumerolles) et à des flux d'énergie. Cette méthode présente donc un intérêt tout particulier pour la prospection géothermique. Quelques-unes de ces anomalies coïncident (enrichissement en He, appauvrissement en O<sub>2</sub> par rapport à la composition atmosphérique) tandis que d'autres, en raison de la présence de nappes phréatiques et de la plus grande solubilité de certains gaz dans l'eau, peuvent être décalées par rapport aux premières (enrichissement en CO<sub>2</sub> par exemple).

Le radon ne diffusant pas latéralement, contrairement à l'hélium et surtout au CO<sub>2</sub>, s'exprime en surface par des anomalies sous forme de bandes très étroites (Baubron et Sabroux, 1984). Ce gaz dont l'isotope 222 est le plus stable (période de 3,8 jours) et est celui que l'on mesure, ne doit sa grande mobilité qu'à celle des fluides qui le transportent. Il constitue, par conséquent, un bon indicateur d'un flux correspondant à des circulations d'eaux actives. Le dioxyde de carbone est un gaz ubiquiste puisque ce gaz est signalé sur tous les champs géothermiques connus et, d'une manière générale, dans les fumerolles de toutes les zones volcaniques du monde, quelle que soit, d'ailleurs, la température des émanations gazeuses (Truesdell *et al.*, 1983). La teneur d'hélium atmosphérique est de 5,24 ppm. Une valeur significativement inférieure ou supérieure à cette teneur, associée à une abondance de CO<sub>2</sub> et à des signatures isotopiques telles que celles en carbone-13 ou en <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He, est, sans aucun doute, l'un des indicateurs de fuites profondes les plus fiables.

La mesure des différents gaz contenus dans les sols est un outil précieux pour la recherche d'eaux thermales, riches en gaz. Elle permet de tracer parfaitement le flux des gaz libérés par ces eaux qui subissent, au cours de leur remontée vers la surface, une baisse de pression. Quand la pression est inférieure au « point de bulle », il y a séparation des phases (eau et gaz) et les gaz, ainsi libérés, migrent dans le proche sous-sol. Dans le contexte volcanique de la Martinique, ces gaz sont essentiellement constitués de CO<sub>2</sub>.

Dans les sols, la production de CO<sub>2</sub> d'origine biogénique se fait essentiellement au niveau des racines et lors de la décomposition de la matière organique. Ce CO<sub>2</sub> se rencontre dans la partie très superficielle du sol (15 à 20 cm) ; les concentrations sont variables selon la saison et la nature du sol mais dépassent rarement 5 % en volume. L'air atmosphérique ne possède que de très faibles teneurs en CO<sub>2</sub> (0,034 % environ). Ainsi, en utilisant une technique de prélèvement qui puisse faire abstraction du CO<sub>2</sub> superficiel d'origine biogénique (cf. paragraphe suivant), on peut détecter les émanations de CO<sub>2</sub> associées à la présence d'eaux thermales ou de discontinuités structurales profondes. Néanmoins, quand seule une anomalie importante de CO<sub>2</sub> est détectée, il vaut mieux procéder à l'analyse du carbone-13 pour bien déterminer son origine.

## 3.2. CAMPAGNE DE MESURES (DU 11 AU 21 JUILLET 2002)

### 3.2.1. Sélection des profils de mesures

Au cours de cette campagne de mesures, seize profils ont été réalisés sur plusieurs zones susceptibles de montrer un intérêt géothermique potentiel (fig. 13 et 14 ; ann.). La zone Saint Pierre - Morne Rouge, surtout au niveau de la rivière Roxelane, a été particulièrement quadrillée ; le Quartier de La Montagne et le bassin de Champflore, également. Ces profils, qui représentent environ 260 points de mesures, sont dans le détail :

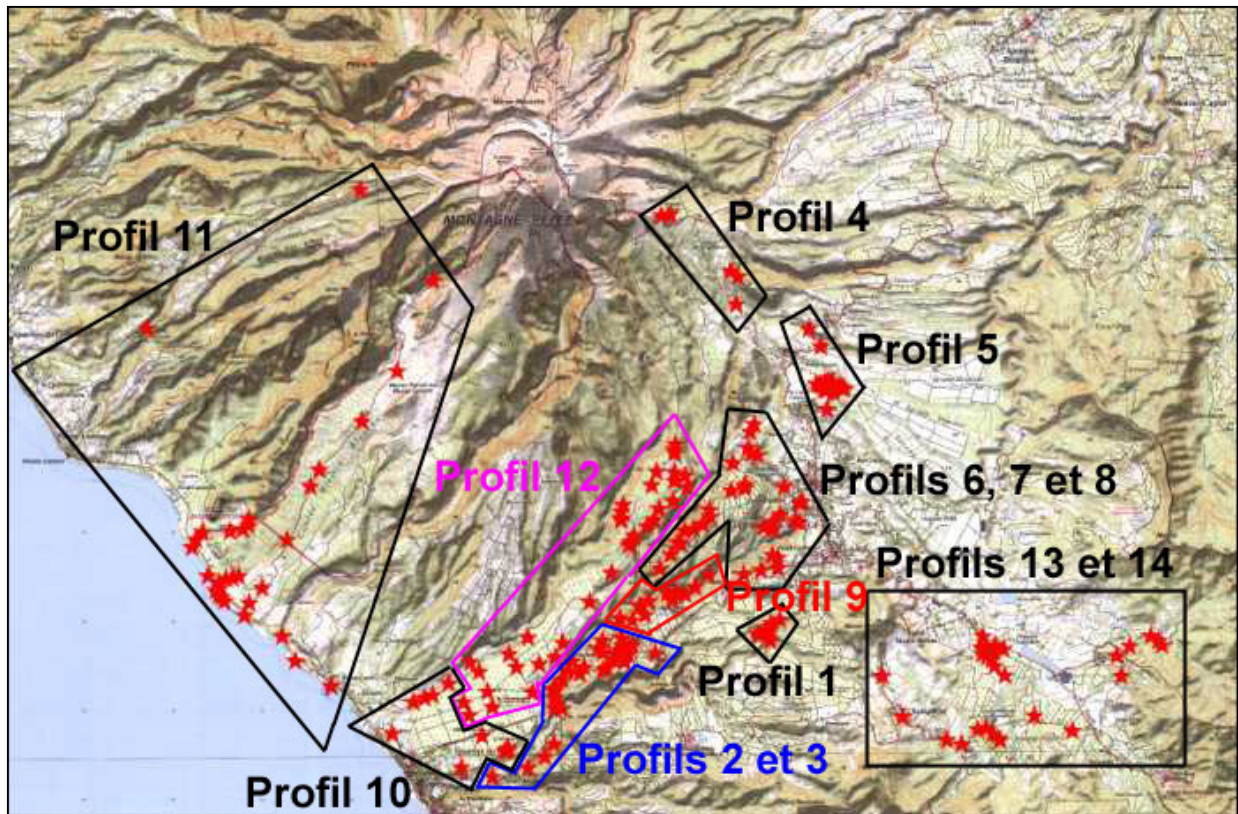
#### - Zone de Montagne Pelée - Morne Rouge (fig. 13, ann.) :

- **Profil n° 1** : Route vers Zobéide au niveau du pont sur la rivière Balisier (11/07/02) - 7 points de mesure ;
- **Profil n° 2** : Rivière Roxelane au niveau du pont de l'Allée Pécoul (11/07/02) - 8 points de mesure ;
- **Profil n° 3** : Habitation Grand Réduit - Petit Réduit - D11 (11/07/02) - 21 points de mesure ;
- **Profil n° 4** : Aileron (Montagne Pelée) - Morne Calebasse (12/07/02) - 4 points de mesure ;
- **Profil n° 5** : Camp Chazeau - Petite Savane (Parc de loisirs) et rivière des Ecrevisses (12/07/02) - 23 points de mesure ;
- **Profil n° 6** : Habitation Morestin - Habitation Mespont - Savane Hubert (12 et 14/07/02) - 18 points de mesure ;
- **Profil n° 7** : Fond Abattoir - Ravine Notre-Dame de Lourdes (13/07/02) - 11 points de mesure ;
- **Profil n° 8** : Fond Guillet (13/07/02) - 5 points de mesure ;
- **Profil n° 9** : Plateau Sable - Morne Posé - Les Bambous (13 et 14/07/02) - 13 points de mesure ;
- **Profil n° 10** : Quartier du Fort - Quartier La Montagne - Rivière des Pères (13 et 14/07/02) - 11 points de mesure ;
- **Profil n° 11** : Puits chaud - Rivière Claire - Sources chaudes - Bord de mer - Route Quartier Cimetière/Montagne Pelée (14, 15 et 16/07/02) - 30 points de mesure ;
- **Profil n° 12** : Propriétés De Paz - La Montagne (15/07/02) - 32 points de mesure ;
- **Profil n° 13** : Forage Desgrottes (17/07/02) - 12 points de mesure ;
- **Profil n° 14** : Habitation Sainte-Cécile - Champflore (17/07/02) - 16 points de mesure.

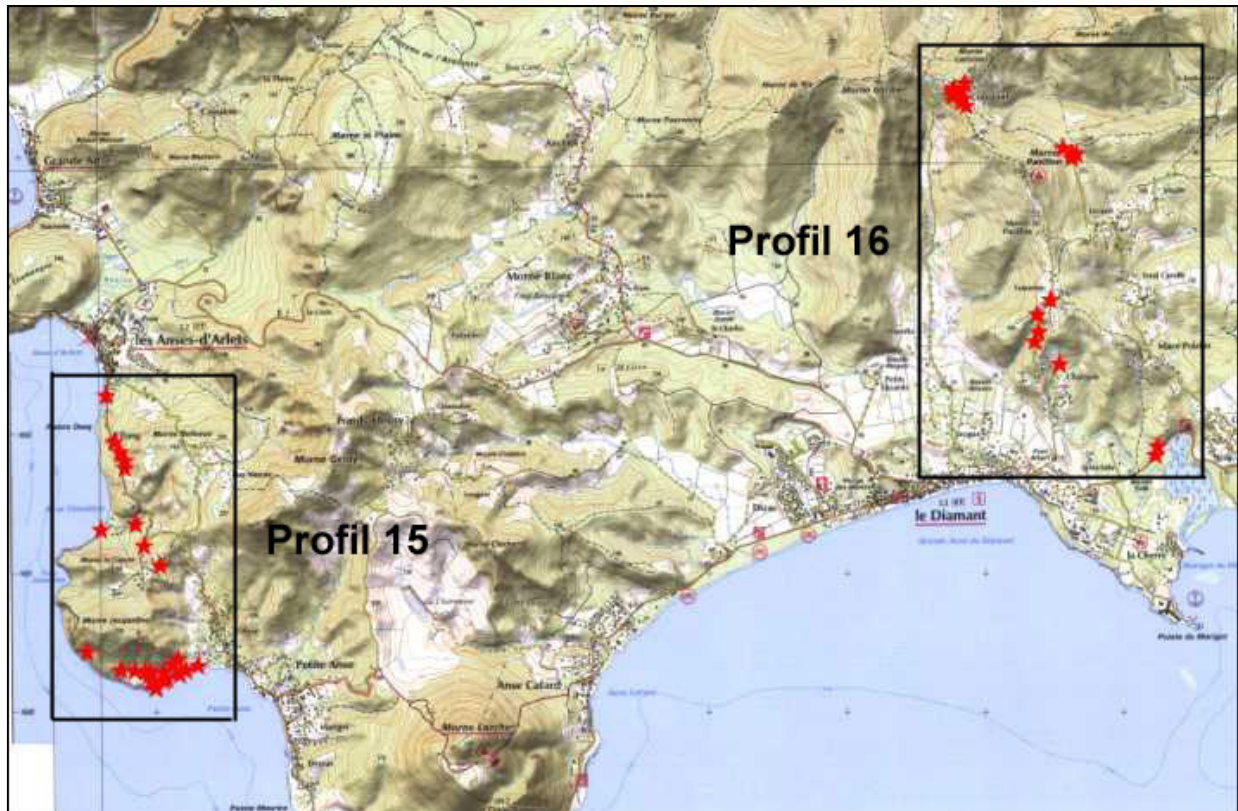
#### - Zone du Diamant (fig. 14, ann.) :

- **Profil n° 15** : Diamant - Petite Anse (19 et 20/07/02) - 28 points de mesure ;
- **Profil n° 16** : Habitation Mullane (21/07/02) - 20 points de mesure.

En dehors de ces profils, des mesures de gaz ont été effectuées dans le forage abandonné de Deux Choux (zone Deux Choux - Rivière Lorrain), qui avait été réalisé pour exploiter du CO<sub>2</sub> dans la région et qui est proche de mofettes froides de CO<sub>2</sub>.



**Fig. 13 - Carte de localisation des points de mesure de gaz dans les sols de la région de Morne Rouge - Montagne Pelée (réalisation de 14 profils).**



**Fig. 14 - Carte de localisation des points de mesure de gaz dans les sols de la région du Diamant (réalisation de 2 profils).**

### 3.2.2. Protocoles de mesure utilisés et analyses complémentaires

#### a) Protocoles de mesure utilisés

L'échantillonnage doit se faire à la pression atmosphérique afin d'éviter des calculs de corrections sur les mesures de gaz obtenues. Une analyse de gaz simultanée permet de travailler à pression atmosphérique constante et est donc recommandée, quand cela est possible.

Le choix d'une profondeur identique de prélèvement pour un même profil (profondeur conseillée 50 cm) contribue à une meilleure comparaison des résultats. Toutes les mesures ont été effectuées à l'aide de cannes de prélèvement en acier dont l'étanchéité en surface est assurée par un joint torique, et qui sont enfoncées à l'aide d'une masselotte.

Dans la mesure où l'on travaille en relatif (recherche d'anomalies de gaz), une très grande précision des mesures n'est pas exigée. Par contre, il est intéressant de pouvoir analyser sur site plusieurs gaz, à la fois.

Des analyses de radon n'ont pas pu être effectuées en raison d'une panne de l'appareil sur place.

#### • Mesures du CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et O<sub>2</sub>

Les mesures de ces trois gaz se font par infra-rouge. L'appareil est un LFG 20 TELEGAN portable, qui donne simultanément les mesures des gaz en pourcentage de volume. La précision analytique est de 0,5 % pour CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> et de 0,4 % pour O<sub>2</sub>.

Le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub> et le O<sub>2</sub> sont toujours analysés sur site. La pompe interne du LFG 20 sert également à remplir les fioles à scintillation pour les analyses de radon et à alimenter le spectromètre ou à remplir un sac téflon « Tedlar », en cas d'absence du spectromètre sur site, pour les analyses d'hélium. Le schéma du dispositif de prélèvement et de mesures est présenté sur la figure 15.

Le zéro de l'appareil est fait, soit avec du N<sub>2</sub> pur ou mieux encore, avec un mélange N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> à 80/20 %. Le réglage de la valeur en oxygène (20,9 %) se fait à l'air libre avant la connexion avec la canne de prélèvement pour s'affranchir des variations de la pression atmosphérique.

L'étalonnage en CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> est réalisé au laboratoire avec un étalon de 20 % et un étalon de 50 ou 100 %, dans des sacs soumis à la pression atmosphérique.

Les mesures sont directement lues sur l'appareil après stabilisation. Pour éviter les incertitudes dues à la dérive de l'appareil, une vérification des taux en O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> de l'air ambiant est faite avant et après la connexion sur la canne de prélèvement.

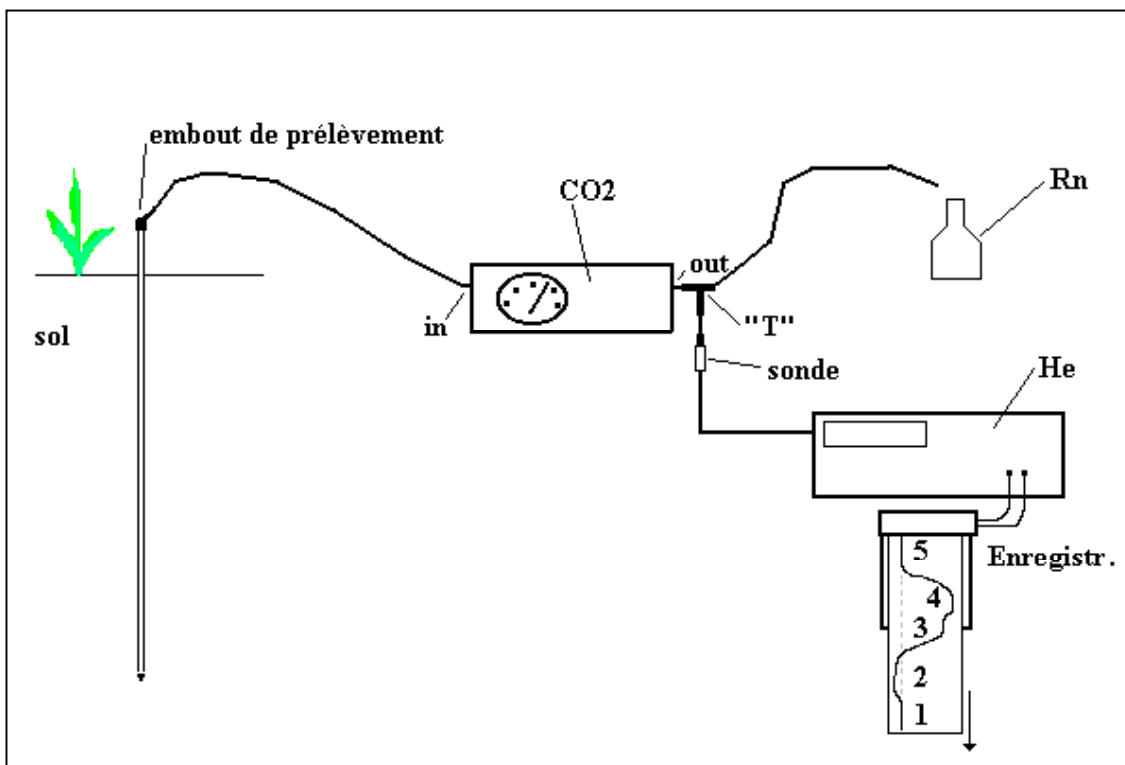


Fig. 15 - Schéma du dispositif de prélèvement et de mesure des gaz.

#### • Mesures de l'hélium

L'hélium est analysé au moyen d'un spectromètre de masse ALCATEL, type ASM 100. La précision analytique est de 0,02 ppm. Le spectromètre de masse est mis en marche au minimum 20 à 30 mn avant d'effectuer les mesures afin d'obtenir un bon vide et donc une bonne stabilité de la mesure. Le branchement He est latéral par rapport au flux de gaz pour minimiser les perturbations liées aux variations de débit de la pompe du LFG20.

Que l'analyse se fasse en direct ou après prélèvement dans un sac téflon, le protocole analytique est le même. On fait d'abord circuler du N<sub>2</sub> (ou un autre gaz dépourvu d'hélium) à travers l'analyseur CO<sub>2</sub> et le spectromètre afin d'obtenir, sur l'enregistreur papier ou sur le métrix, le zéro de l'appareil. Quand le LFG 20 indique zéro en oxygène, on peut régler le zéro en hélium du spectromètre. Ensuite, la mesure dans l'air ambiant permet de se caler sur la valeur en hélium atmosphérique de 5,24 ppm. L'idéal est alors de régler le potentiomètre de gain du spectromètre sur 52,4 mV. L'utilisation d'un étalon de 20 ppm est recommandée mais non indispensable.

L'étalonnage de l'appareil étant terminé, on peut passer l'échantillon. Lorsqu'on a atteint une bonne stabilité de la mesure en CO<sub>2</sub> sur le LFG 20, on peut alors noter la valeur en hélium mesurée. Avant et après chaque passage d'échantillon, il est recommandé de se connecter sur l'air afin de pouvoir corriger le résultat obtenu de la dérive de l'appareil.

Afin de conserver le spectromètre ALCATEL en bon état et dans l'impossibilité de l'amener sur place, l'hélium a été analysé dans les différents gîtes d'hébergement, au retour des campagnes de mesures de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et O<sub>2</sub>. L'hélium n'a pas été analysé sur tous les points de mesure. Le choix de réalisation des analyses de ce gaz a été guidé par les résultats obtenus sur site en CO<sub>2</sub>.

### **b) Analyses complémentaires**

Conjointement à ces mesures sur site, les gaz ont été prélevés sur onze points de mesure (tabl. 9), dont le choix a généralement été guidé par les anomalies en CO<sub>2</sub> et/ou He, souvent bonnes indicatrices de fuites d'origine profonde. Ces gaz ont été collectés dans des ampoules de verre de 250 ml et rapportées à Orléans pour :

- confirmer les résultats des analyses chimiques faites sur place (échantillons MPG1, MPG4, MPG5, MPG7, MPG8, DIAMG1, DIAMG2 et DIAMG3) ;
- analyser les teneurs en carbone-13, qui permettent, bien souvent, de déterminer l'origine du CO<sub>2</sub> (origine biogénique, magmatique ou dissolution de carbonates ?) (échantillons MPG1, MPG2, MPG3, MPG4, MPG5, MPG6 et MPG8) ;
- mesurer le rapport isotopique <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He, qui indique l'origine de l'hélium (atmosphérique, magmatique) (échantillons MPG1, MPG4, MPG5, MPG7, MPG8, DIAMG1, DIAMG2 et DIAMG3) .

Les analyses chimiques des gaz ont été réalisées dans les laboratoires du BRGM par chromatographie en phase gazeuse. L'incertitude relative sur les teneurs en gaz sont de 3 %. Les analyses isotopiques de carbone-13 ont également été effectuées dans les laboratoires du BRGM par spectrométrie de masse en phase gazeuse. L'incertitude analytique absolue est de 0,1 ‰. Pour chaque échantillon de gaz, une prise d'essai a été réalisée par détente dans un volume fini d'une ligne de purification et d'extraction des gaz. L'aliquote a été piégée puis purifiée avant son transfert dans un tube d'analyse. Avant l'analyse, un contrôle du spectre de masse de chaque échantillon a été effectué. Les gaz sont propres (CO<sub>2</sub>) à l'exception de l'échantillon DIAMG2, qui présente quelques impuretés non identifiables. Les valeurs isotopiques sont déterminées par un gaz de référence CO<sub>2</sub> provenant d'un carbonate ( $\delta^{13}\text{C} = 2,05 \text{ ‰}$  vs PDB).

Les mesures des rapports <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ont été confiées au laboratoire de Magmatologie et Géochimie Inorganique et Expérimentale (MAGIE, Professeur A. Jambon) de l'université Paris VI, suite à leur réponse à l'appel d'offres organisé par le BRGM. Ces rapports isotopiques ont été mesurés par spectrométrie de masse en phase gazeuse en octobre 2002. L'erreur relative, suivant l'échantillon, varie de 4 à 12 %. Les rapports isotopiques ( $R_{\text{éch.}} = (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{éch.}}$ ) sont normalisés par rapport à celui de l'atmosphère ( $R_a = 1,386 \times 10^{-6}$  ; Ozima and Podosek (1983) ; Marty *et al.*, 1993).

### **3.3. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION**

Les données brutes obtenues au cours de cette campagne sont reportées en annexe. Les anomalies y sont inscrites en rouge. Les résultats des analyses chimiques et isotopiques complémentaires sont présentés dans le tableau 9.

Point de prélèvement	Référence	Date de prélèvement	CO <sub>2</sub> % vol.	CH <sub>4</sub> % vol.	O <sub>2</sub> % vol.	He ppm
Forage Deux Choux	MPG1	10/07/2002	86,9	0,2	0,0	2,18
Rivière Roxelane	MPG2	11/07/2002	8,2	0,0	11,4	5,24
Morne Calebasse	MPG3	12/07/2002	8,1	0,0	11,7	5,29
Camp Chazeau - Petite Savane	MPG4	12/07/2002	20,4	1,0	0,0	5,28
Riv. des Ecrevisses - Chazeau	MPG5	13/07/2002	10,0	0,0	1,8	5,43
Propriété De Paz - Chemin principal	MPG6	15/07/2002	9,8	0,0	8,7	5,24
Propriété De Paz - Chemin principal	MPG7	15/07/2002	15,2	0,0	0,2	5,45
Forage Desgrottes	MPG8	17/07/2002	61,2	30,6	0,5	5,21
Source Diamant	DIAMG1	19/07/2002	98,1	0,0	2,4	5,83
Zone altérée Diamant 1	DIAMG2	19/07/2002	42,5	0,0	10,3	6,11
Zone altérée Diamant 2	DIAMG3	20/07/2002	99,2	0,0	0,0	7,56

Point de prélèvement	Référence	Analyses chimiques faites en laboratoire % en volume
Forage Deux Choux	MPG1	90,2% CO <sub>2</sub> - 1,21% O <sub>2</sub> - 6,51% N <sub>2</sub> - 0,08% CH <sub>4</sub> - 0,06% Ar
Rivière Roxelane	MPG2	
Morne Calebasse	MPG3	
Camp Chazeau - Petite Savane	MPG4	19,7% CO <sub>2</sub> - 0,78% O <sub>2</sub> - 80,6% N <sub>2</sub> - 0,57% CH <sub>4</sub> - 1,00% Ar
Riv. des Ecrevisses - Chazeau	MPG5	10,7% CO <sub>2</sub> - 3,61% O <sub>2</sub> - 84,4% N <sub>2</sub> - < 0,0002% CH <sub>4</sub> - 1,09% Ar
Propriété De Paz - Chemin principal	MPG6	
Propriété De Paz - Chemin principal	MPG7	14,9% CO <sub>2</sub> - 1,39% O <sub>2</sub> - 82,0% N <sub>2</sub> - < 0,0002% CH <sub>4</sub> - 1,03% Ar
Forage Desgrottes	MPG8	44,5% CO <sub>2</sub> - 1,85% O <sub>2</sub> - 23,5% N <sub>2</sub> - 30,0% CH <sub>4</sub> - 0,32% Ar
Source Diamant	DIAMG1	97,2% CO <sub>2</sub> - < 0,001% O <sub>2</sub> - 0,17% N <sub>2</sub> - < 0,0002% CH <sub>4</sub> - < 0,001% Ar
Zone altérée Diamant 1	DIAMG2	34,7% CO <sub>2</sub> - 12,5% O <sub>2</sub> - 50,3% N <sub>2</sub> - < 0,0002% CH <sub>4</sub> - 0,64% Ar
Zone altérée Diamant 2	DIAMG3	81,1% CO <sub>2</sub> - 3,14% O <sub>2</sub> - 14,8% N <sub>2</sub> - 0,002% CH <sub>4</sub> - 0,16% Ar

Point de prélèvement	Référence	Date de prélèvement	δ <sup>13</sup> C ‰	<sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He	Incrt. %	R <sub>éch.</sub> /R <sub>a</sub>
Forage Deux Choux	MPG1	10/07/2002	-6,1	6,64E-06	4,5	4,74
Rivière Roxelane	MPG2	11/07/2002	-24,5			
Morne Calebasse	MPG3	12/07/2002	-16,1			
Camp Chazeau - Petite Savane	MPG4	12/07/2002	-17,2	1,36E-06	10	0,97
Riv. des Ecrevisses - Chazeau	MPG5	13/07/2002	-26,1	1,48E-06	10	1,05
Propriété De Paz - Chemin principal	MPG6	15/07/2002	-21,8			
Propriété De Paz - Chemin principal	MPG7	15/07/2002		1,28E-06	12	0,91
Forage Desgrottes	MPG8	17/07/2002	-8,3	6,16E-06	4	4,40
Source Diamant	DIAMG1	19/07/2002	-4,4	6,20E-06	10	4,43
Zone altérée Diamant 1	DIAMG2	19/07/2002	-1,7	3,93E-06	4,5	2,81
Zone altérée Diamant 2	DIAMG3	20/07/2002	-2,5	7,49E-06	9	5,35

$$R_{éch.}/R_a : ({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_{\text{échantillon}}/({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_{\text{atmosphérique}}$$

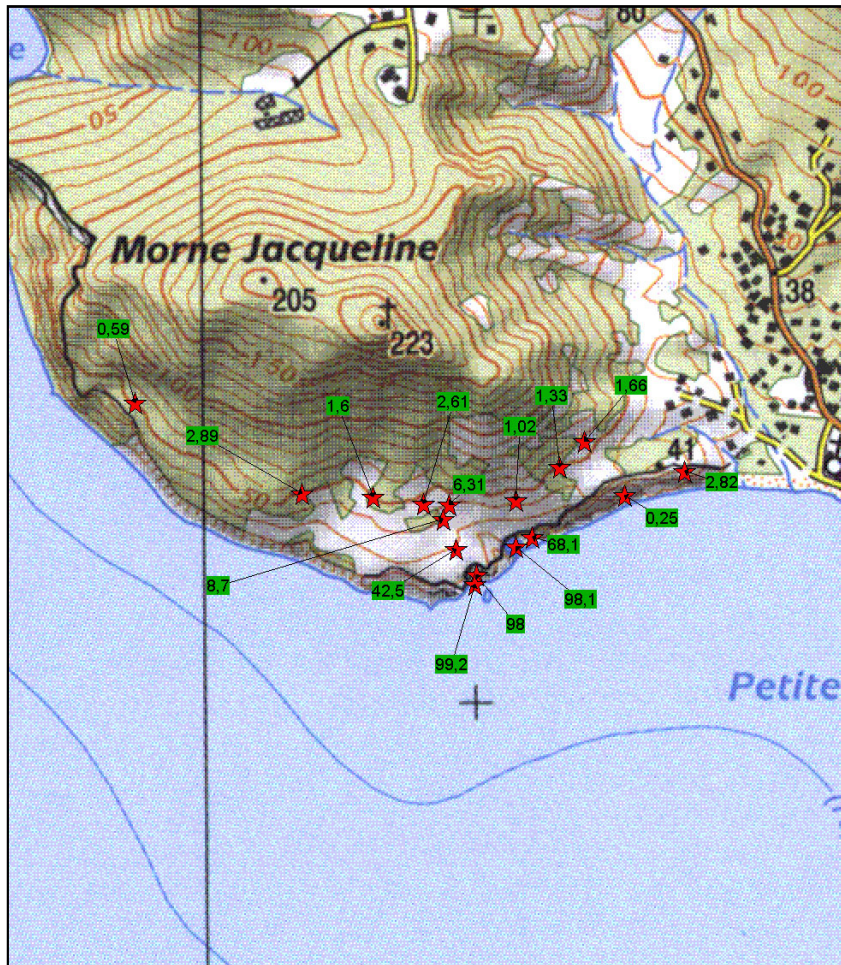
**Tabl. 9 - Récapitulatif des résultats des analyses chimiques et isotopiques complémentaires effectuées sur des échantillons de gaz sélectionnés en fonction de leur intérêt scientifique.**

À partir de ce tableau, on peut constater que les analyses chimiques des gaz faites en laboratoire confirment la plupart des données acquises sur le terrain. Au vu de tous les résultats obtenus, deux zones d'intérêt géothermique potentielles peuvent être retenues :

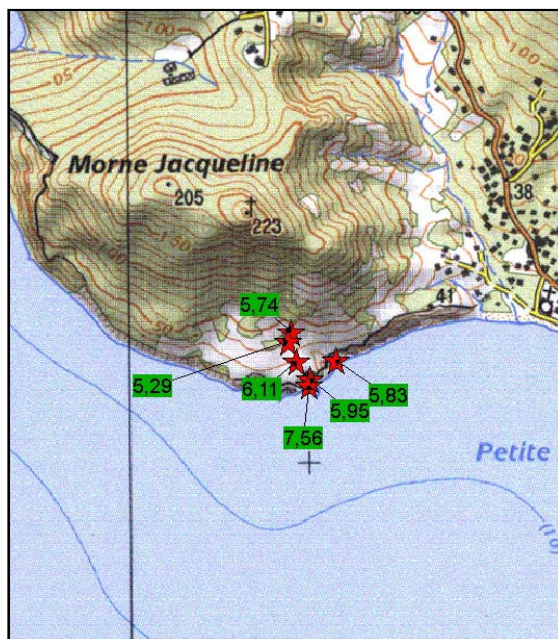
- les zones des forages Desgrottes et de Deux Choux, qui montrent la présence d'émanations gazeuses d'origine magmatique (fortes teneurs en CO<sub>2</sub>, signature isotopique du carbone-13 et du rapport <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He caractéristique), légèrement mélangées à des gaz d'origine atmosphérique (présence de O<sub>2</sub>, rapports volumiques N<sub>2</sub>/Ar de 73 et de 109, proches du rapport atmosphérique, qui est égal à 84). Signalons, à titre de comparaison, que les mesures effectuées sur les fumerolles situées au sommet de certains volcans de l'arc insulaire antillais (Nevis, Montserrat, Guadeloupe et La Dominique) indiquent des rapports en hélium 8 fois supérieurs au rapport atmosphérique. Des valeurs isotopiques en carbone-13 et en hélium similaires à celles de cette étude avaient été trouvées par Pedroni *et al.* (1999) ;
- la zone de la source thermique de Petite Anse du Diamant, qui indique également une très forte contribution d'émanations gazeuses d'origine magmatique (fortes teneurs en CO<sub>2</sub> et He sur figures 16 et 17, signature isotopique du carbone-13 et du rapport <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He caractéristique). Le prélèvement fait sur l'émergence principale de cette source (Bac) indique l'absence de O<sub>2</sub> et Ar (absence d'apports atmosphériques). À signaler que Pedroni *et al.* (1999) avaient trouvé pour la source thermique de Petite Anse du Diamant des rapports isotopiques en He (de 5,74 à 7,79) et des valeurs de carbone-13 (-2,7 et -3,08 ‰) légèrement supérieurs à ceux de cette étude, qui confirment l'importance de la signature d'origine magmatique dans les manifestations superficielles de cette zone.

En raison de l'absence d'hydrogène, la plupart des géothermomètres utilisés pour les gaz n'a pas pu être appliquée pour estimer les températures en profondeur de ces émanations gazeuses. Pour les prélèvements faits sur la zone de la source thermique de Petite Anse du Diamant et pour le forage de Deux Choux, l'application des géothermomètres CO<sub>2</sub>-Ar et CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> (Giggenbach, 1991) ne donne pas d'estimations de température cohérentes. Par contre, pour le forage Desgrottes, on aboutit à des températures profondes de 190 °C (avec le géothermomètre CO<sub>2</sub>-Ar) et de 179 °C (avec le géothermomètre CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub>), qui sont relativement concordantes.

Les analyses des teneurs en carbone-13 ou des rapports isotopiques <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He, pour les autres zones qui montrent des anomalies en CO<sub>2</sub> ou en He (Rivière Roxelane, Morne Calebasse, Camp Chazeau, Petite Savane, Rivière des Ecrevisses, Propriété De Paz) suggèrent plutôt des origines organiques du CO<sub>2</sub> (-26,1 à -16,1‰) ou atmosphérique de l'hélium (R<sub>éch.</sub>/R<sub>a</sub> ≈ 1).



**Fig. 16 - Anomalies de CO<sub>2</sub> dans les sols de la région de la source thermique de Petite Anse du Diamant .**



**Fig. 17 - Anomalies d'hélium dans les sols de la région de la source thermique de Petite Anse du Diamant.**



## 4. Conclusion

Les principaux résultats obtenus par le BRGM au cours des travaux de recherche en géochimie des eaux et des gaz dans les sols dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant ont été présentés dans ce rapport.

Les eaux de la plupart des sources thermales situées autour de la Montagne Pelée ont été échantillonnées au cours de quatre campagnes de prélèvements. À notre connaissance, les eaux des sources thermales de la rivière Claire et de Grande Rivière ainsi que celles des sources sous-marines ont été prélevées pour la première fois. Les résultats des analyses chimiques et isotopiques de ces eaux ainsi que ceux de l'eau de la source thermale de la rivière Picodo, mal connus, ont permis d'élargir nos connaissances sur la chimie des aquifères associés à la Montagne Pelée.

Les eaux thermales de deux griffons de la source côtière de Petite Anse du Diamant ont également été prélevées. Quelques échantillons d'eaux de surface (pluie, rivière, retenue d'eau), qui ont servi de référence, ont aussi été échantillonnés. Une campagne de reconnaissance restreinte dans le secteur du Diamant n'a pas mis en évidence d'autres émergences thermales.

Les résultats des analyses chimiques et isotopiques acquis sur toutes les eaux thermales, à la suite de ces campagnes, ainsi que les données obtenues sur les mesures de gaz dans les sols, ont été confrontés aux données antérieures et interprétés. Il apparaît que les nouvelles sources échantillonnées, si elles permettent d'affiner le modèle de circulation des eaux thermales dans le massif de la Montagne Pelée, ne montrent pas d'indices de température élevée en profondeur. Ainsi, les zones des rivières Picodo et Mitan ou celle de Grande Rivière, relativement difficiles d'accès, n'indiquent pas d'anomalies thermiques intéressantes ( $> 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) pour l'exploitation de la géothermie haute enthalpie. Il semble en être de même pour la zone côtière où se trouve le sondage OPGMC.

Les résultats obtenus permettent de sélectionner essentiellement trois zones d'intérêt géothermique, d'un point de vue géochimique :

- le site de la source thermale de Petite Anse du Diamant, dont l'eau indique des conditions de température relativement élevées (autour de  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) et de fortes interactions avec les roches volcaniques et où les émanations gazeuses (principalement du  $\text{CO}_2$ ) ont essentiellement une origine magmatique. Les faibles débits et températures à l'émergence de cette source, qui sont plutôt des facteurs défavorables mais pas éliminatoires (des processus de colmatage peuvent en être la cause), doivent être, néanmoins, cités ;
- la zone de la haute vallée de la rivière Chaude où la composition chimique et isotopique des eaux thermales indique des températures en profondeur de l'ordre de  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  et la présence de gaz d'origine essentiellement magmatique (principalement du  $\text{CO}_2$ ).
- la zone des forages Desgrottes et de Deux Choux où les émanations gazeuses témoignent d'une origine profonde (mais par contre, aucune présence d'eau chaude et profonde n'a été mise en évidence) ;

Si pour ces zones, il existe des manifestations de surface qui indiquent une origine profonde, les méthodes de prospection géochimique ne permettent pas de déterminer la profondeur à laquelle se trouve le réservoir d'où sont issues ces manifestations ni d'estimer la capacité de ce réservoir. Seules des méthodes de prospection géophysique peuvent apporter des éléments de réponse à ces questions, mais seule la réalisation de forages d'exploration pourra permettre de valider ou infirmer ces éléments de réponse.

D'un point de vue géochimique, les autres zones étudiées ne présentent pas, en surface, d'indices réels d'intérêt géothermique haute enthalpie.

### **Remerciements**

Nous tenons à remercier :

- M. Jean-Pierre VIODE, directeur de l'Observatoire de Physique du Globe du Morne des Cadets, pour son aimable collaboration et participation à la campagne de prélèvements des échantillons d'eau de certaines sources thermales de la Montagne Pelée et du puits d'observation en bord de mer ;
- la direction de la rhumerie De Paz pour son accueil et les facilités d'accès à leur site ;
- la direction de la Maison du Volcan, et tout particulièrement, M. Maurice HENRY, pour sa collaboration au cours de la campagne de mesures de gaz dans les sols.

## Bibliographie

- Arnorsson S. (1975) - Application of the silica geothermometer in low temperature hydrothermal areas in Iceland. *Amer. J. Sci.*, 275, p. 763-784.
- Arnorsson S. and Gunnlaugsson E. (1983) - The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, p. 567-577.
- Barat A. (1987) - Etude du rôle des eaux souterraines dans le mécanisme des éruptions phréatiques. Application à la Montagne Pelée de Martinique et à la Soufrière de Guadeloupe. Document BRGM n° 115, 205 p.
- Baubron J.C. et Sabroux J.C. (1984) - Analyses des gaz dans les sols sur les zones de Bouillante et de Moscou (Guadeloupe). Rapport BRGM n° 84 SGN 400 GTH, 94 p.
- Benauges (1981) - Étude géochimique et isotopique et circulation des eaux de sources chaudes, sources froides et rivières aux abords du volcan de la Soufrière-Guadeloupe. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, université Paris VI, 85 p.
- Bischoff J.L. and Dickson F.W. (1975) - Seawater-basalt interaction at 200 °C and 500 bars. Implications for origin of sea floor heavy-metal deposits and regulation of seawater chemistry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 25, p. 385-397.
- Chéry L. (1994) - Interprétation des résultats des analyses isotopiques dans le cadre de l'étude géochimique de la source carbogazeuse de Didier (Martinique). Rapport BRGM n° R 37990, 34 p.
- Edmond J.M., Von Damm K.L., McDuff R.E. and Measures C.J. (1982) - Chemistry of hot springs on the East Pacific Rise and their effluent dispersal. *Nature*, 297, p. 187-191.
- Faure G. (1986) - Principles of isotope geology. Ed. John Wiley and Sons, 2<sup>nd</sup> Edition, printed in USA, 589 p.
- Fouillac C. et Michard G. (1981) - Sodium/lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoir. *Geothermics* 10, p. 55-74.
- Fournier R.O. (1979) - A revised equation for the Na/K geothermometer. *Geoth. Res. Council Trans.*, 3, p. 221-224.
- Fournier R.O. and Rowe J.J. (1966) - Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells. *Amer. J. Sci.*, 264, p. 685-697.
- Fournier R.O. and Truesdell A.H. (1973) - An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, p. 1255-1275.
- Giggenbach W.F. (1988) - Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, p. 2749-2765.

- Giggenbach W.F. (1991) - Chemical techniques in geothermal exploration. In : Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development. Series of technical guides on the use of geothermal energy, Italy, p. 119-144.
- Houssein I., Sanjuan B. et Michard G. (1993) - Indices géochimiques de l'existence d'un fluide à 210 °C dans la région d'Obock (République de Djibouti). C.R. Acad. Sci. Paris, t. 316, série II, p. 771-776.
- Kharaka Y-K., Lico M.S. et Law-Leroy M. (1982) - Chemical geothermometers applied to formation waters, Gulf of Mexico and California basins. *AAPG Bulletin*. 66, 5, p. 588-595.
- Kharaka Y.K. and Mariner R.H. (1989) - Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. In: Naeser, N.D. and McCulloch, T.H. (eds), Thermal history of sedimentary basins: methods and case histories. *Springer-Verlag*, New York, p. 99-117.
- Lalubie G. (2003) - Localisations, analyses et prélèvements des sources thermales, jusqu'alors inconnues, de la Montagne Pelée, Martinique. Compte-rendu d'expéditions, 21 p.
- Marty B., Meynier V., Nicolini E., Griesshaber E. and Toutain J.P. (1993) - Geochemistry of gas emanations : a case study of the Réunion Hot Spot, Indian Ocean. *Applied Geochemistry*, vol. 8, p. 141-152.
- Michard G. (1979) - Géothermomètres chimiques. Bull. du BRGM (2<sup>ème</sup> série), Section III, n°2, p. 183-189.
- Michard G. (1990) - Behaviour of major elements and some trace elements (Li, Rb, Cs, Sr, Fe, Mn, W, F) in deep hot waters from granitic areas. *Chem. Geol.*, 89, p. 117-134.
- Michard G. (2002) - Chimie des eaux naturelles. Publisud, 461 p.
- Michard G., Albarède F., Michard A., Minster J.F., Charlou J.L. et Tan N. (1984) - Chemistry of solutions from the 13° East Pacific Rise hydrothermal site. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 67, p. 297-307.
- Mizutani Y. and Rafter T.A. (1969) - Oxygen isotopic composition of sulphates, 3. Oxygen isotopic fractionation in the bisulphate ion-water system. *N. Zealand J. Sci.*, 12, p. 54-59.
- Mook W.G., Bommerson J.C., and Staverman W. H. (1974) - Carbon isotope fractionation between dissolved bicarbonate and gaseous carbon dioxide. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 22, p. 169-176.
- Mossadik H. (1977) - Les isotopes du bore, traceurs naturels dans les eaux. Mise au point de l'analyse en spectrométrie de masse à source solide et applications à différents environnements. Thèse géochimie, université d'Orléans, 224 p.
- Ozima M. and Podosek F.P. (1983) - Noble Gas Geochemistry. Cambridge University Press.

- Pedroni A., Hammerschmidt K. and Friedrichsen H. (1999) - He, Ne, Ar, and isotope systematics of geothermal emanations in the lesser Antilles Islands Arc. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 63, n° 3/4, p. 515-532.
- Sanjuan B., Michard G. et Michard A. (1990) - Origine des substances dissoutes dans les eaux des sources thermales et des forages de la région Asal-Ghoubbet (République de Djibouti). *J. Volcanol. Geotherm. Research*, 43, p. 333-352.
- Sanjuan B, Genter A., Baltassat J.M., Serra H., Roig J.Y., Brach M. (2003) - 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 d'avancement des travaux BRGM/RP-52283-FR, 140 p.
- Traineau H., Westercamp D. et Benderitter Y (1989) - Case study of a volcanic geothermal system, Mount Pelée, Martinique. *J. of Volcan. and Geoth. Res.* 38, p. 49-66.
- Truesdell A.H. (1975) - Geochemical techniques in exploration, summary of section III. Proc. Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, 1, p. 53-79.
- Truesdell A.H., Mazor E., Nehring N.L. (1983) - The origin of thermal fluids at Lassen volcanic national park: evidence from noble and reactive gas abundances. *Geothermal Resources Council*, Transactions vol. 7, October 1983.
- Vogel J.C., Grootes P.M. and Mook W.G. (1970) - Isotopic fractionation between gaseous and dissolved carbon dioxide. *Z. Phys.*, 230, p. 225-234.
- Von Damm K.L., Edmond J., Grant B., Measures C.J., Walden B. and Weiss R.F. (1985) - Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21°N, East Pacific Rise. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, p. 2197-2220.
- Wolery T.J. (1992) - EQ3NR, A Computer Program for Geochemical Aqueous Speciation-Solubility Calculations: Theoretical Manual, User's Guide, and Related Documentation (version 7.0), 246 p.
- Wolery T.J. and Daveler S.A. (1992) - EQ6, A Computer Program for Reaction Path Modeling of Aqueous Geochemical Systems: Theoretical Manual, User's Guide, and Related Documentation (version 7.0), 338 p.



## **ANNEXE**

### **Campagne de mesures de gaz dans les sols (du 11 au 21 juillet 2002) : description et localisation des 16 profils de mesures**

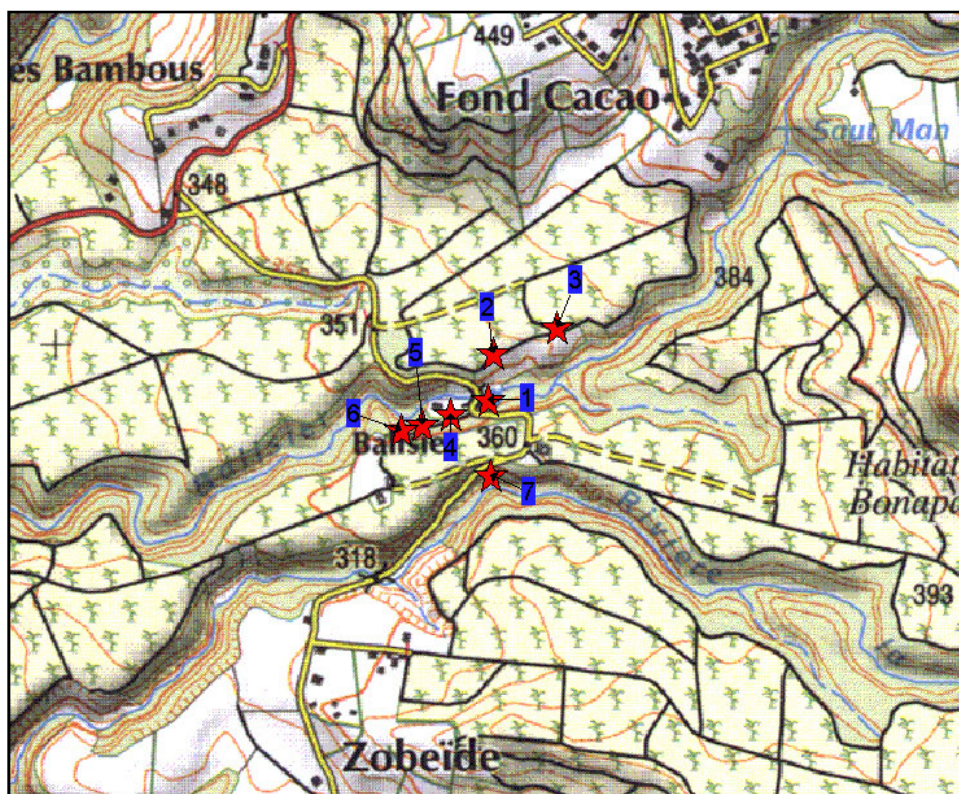
Note : dans les tableaux de mesures, les valeurs indiquées en rouge correspondent à des teneurs en gaz anormales.

N° échantillon	Description	Coordonnées GPS	Mode de prélèvement	Date prélèvement	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	O <sub>2</sub> %	He ppm	Remarques
1	chemin rive gauche	N14°45,840' W61°08,477' Alt. : 330 m	canne inox	11/07/2002	4,1	0,0	17,5	5,24	pompage eau de rivière
2	chemin rive gauche		"	"	6,2	0,0	15,4		
3	chemin rive gauche		"	"	3,5	0,0	19,8		
4	chemin rive gauche		"	"	4,5	0,0	18,8		
5	rive droite rivière		"	"	6,5	0,0	13,3		
6	chemin rive droite		"	"	1,4	0,0	16,7		
7	route vers direction Zobéide		"	"	1,5	0,0	19,3		

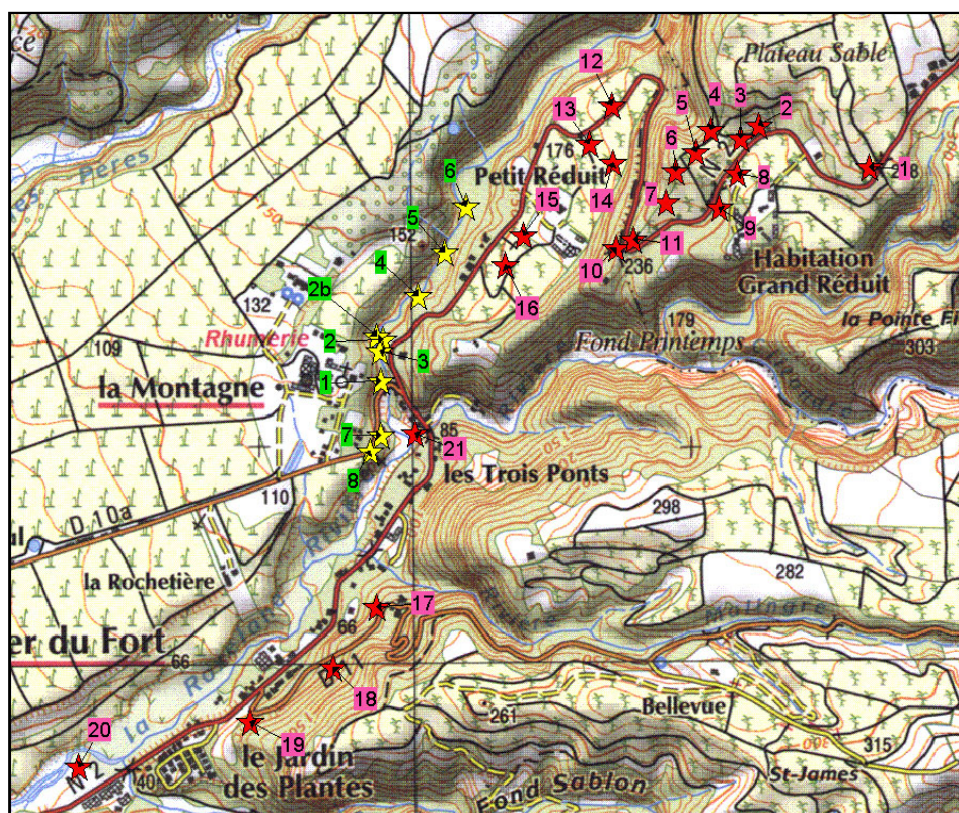
**Profil n° 1 - Route vers Zobéide au niveau du pont sur la rivière Balisier (11/07/2002).**

N° échantillon	Description	Coordonnées GPS	Mode de prélèvement	Date prélèvement	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	O <sub>2</sub> %	He ppm	Remarques	
1	rive droite rivière, à 10 m du pont en amont	N14°45,433' W61°09,802' Alt. : 139 m	canne inox	11/07/2002	8,2	0,0	11,4	5,24	Prélèvement <sup>13</sup> C échantillon MPG2	
2	rive gauche rivière, à 100 m du pont en amont		"	"	1,5	0,0	19,0	5,24		
2 bis	rive gauche rivière, à 100 m du pont en amont		"	"	7,7	0,0	11,4			
3	rive gauche rivière, à 80 m du pont en amont		"	"	4,0	0,0	16,0			
4	rive gauche rivière, à 200 m du pont en amont		"	"	0,9	0,0	19,2			
5	rive gauche rivière, à 300 m du pont en amont		"	"	1,4	0,0	19,0			
6	rive gauche rivière, à 400 m du pont en amont		"	"	6,5	0,0	14,6			5,24
7	rive gauche rivière, à 500 m du pont en amont		"	"	2,6	0,0	17,9			
8	Allée Pécoul, à 150 m du pont, vers De Paz	"	"	1,7	0,0	19,1		pendage horizontal		

**Profil n° 2 - Rivière Roxelane au niveau du pont de l'Allée Pécoul.**



**Profil n° 1 -** Route vers Zobéïde au niveau du pont sur la rivière Balisier (11 juillet 2002).



**Profils n° 2 et n° 3 -** Rivière Roxelane au niveau du pont de l'Allée Pécoul et Habitation Grand Réduit - Petit Réduit - D11.

Potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique)

N° échantillon	Description	Coordonnées GPS	Mode de prélèvement	Date prélèvement	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	O <sub>2</sub> %	He ppm	Remarques
1	route RN2 - Habitation Grand Réduit	N14°45,730' W61°09,181' Alt. : 298 m	canne inox	11/07/2002	1,9	0,0	18,3		champ de bananes
2	route RN2 - chemin Plateau Sable	N14°45,760' W61°09,330' Alt. : 286 m	"	"	3,3	0,0	17,2	5,24	champ de bananes
3	chemin // à RN2		"	"	1,4	0,0	18,7		champ de bananes
4	chemin // à RN2 à 200 m entrée		"	"	2,0	0,0	18,6		champ de bananes
5	chemin // à RN2 à 300 m entrée		"	"	2,6	0,0	18,3		champ de bananes
6	chemin // à RN2 à 400 m entrée		"	"	1,9	0,0	18,5		champ de bananes
7	chemin // à RN2 à 500 m entrée		"	"	5,6	0,0	14,8	5,24	champ de bananes
8	à gauche RN2 direction St Pierre		"	"	2,5	0,0	17,6		
9	à gauche RN2 direction St Pierre		"	"	1,9	0,0	18,3		près d'une rivière
10	virage RN2		"	"	3,3	0,0	16,8		croisée de 2 failles
11	virage RN2		"	"	3,4	0,0	17,4		
12	virage RN2 - Petit Réduit		"	"	4,4	0,0	15,1	5,24	
13	Petit Réduit		"	"	3,2	0,0	16,9		champ de tomates
14	Petit Réduit		"	"	2,4	0,0	18,1		champ de tomates
15	champ à gauche RN2 direction St Pierre		"	"	2,1	0,0	18,5		
16	champ à gauche RN2 direction St Pierre		"	"	2,4	0,0	17,8		
17	à droite D11 direction St Pierre	N14°45,154' W61°09,840' Alt. : 109 m	"	"	1,4	0,0	19,4		
18	à gauche D11 direction St Pierre		"	"	0,5	0,0	20,2		
19	à gauche D11 direction St Pierre		"	"	1,7	0,0	18,6		virage avant RN2
20	à droite RN2 direction St Pierre - bord rivière Roxelane	N14°45,151' W61°09,836' Alt. : 125 m	"	"	4,9	0,0	15,3	5,24	
21	à gauche RN2 direction St Pierre - juste avant pont proche Allée Pécouf	N14°45,400' W61°09,748' Alt. : 117 m	"	"	4,6	0,0	11,4		

**Profil n° 3 - Habitation Grand Réduit - Petit Réduit - D11.**

N° échantillon	Description	Coordonnées GPS	Mode de prélèvement	Date prélèvement	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	O <sub>2</sub> %	He ppm	Remarques
1	Aileron Montagne Pelée - Abri début sentier		canne inox	12/07/2002	1,8	0,0	19,0	5,24	
2	Parking Aileron	N14°48,372' W61°09,087' Alt. : 824 m	canne inox	12/07/2002	1,6	0,0	18,6		
3	Morne Calebasse - au niveau du restaurant	N14°48,034' W61°08,713' Alt. : 711 m	canne inox	12/07/2002	4,0	0,0	17,3		
3 bis	Morne Calebasse - au niveau du restaurant (+ haut)		canne inox	12/07/2002	7,6	0,0	12,6	5,24	
4	Morne Calebasse - à gauche D39 vers direction Morne Rouge	N14°47,792' W61°08,646' Alt. : 716 m	canne inox	12/07/2002	8,1	0,0	11,7	5,29	prélèvement <sup>13</sup> C - échantillon MPG3

**Profil n° 4 - Aileron (Montagne Pelée) - Morne Calebasse.**

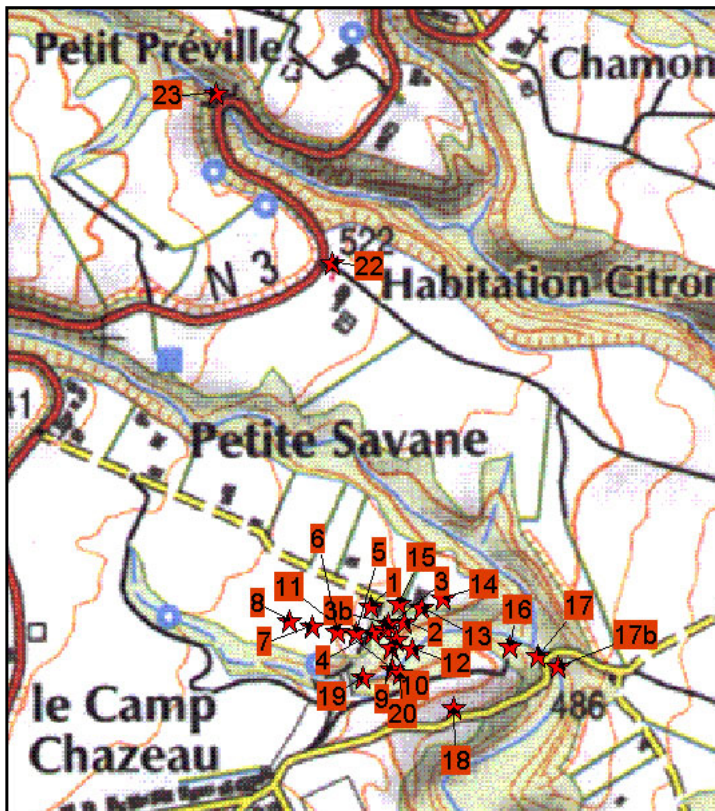
Potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique)

N° échantillon	Description	Coordonnées GPS	Mode de prélèvement	Date prélèvement	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	O <sub>2</sub> %	He ppm	Remarques
1	fin sentier Petite savane	N14°47,357' W81°08,099' Alt. : 512 m	canne inox	12/07/2002	7,7	0,0	12,0		Parc de loisirs
2	à 20 m au SE du point 1	N14°47,338' W81°08,121' Alt. : 521 m	canne inox	12/07/2002	20,4	1,0	0,0	5,28	premier essai : CO <sub>2</sub> = 22,1%, CH <sub>4</sub> = 4,3% et O <sub>2</sub> = 0% - prélèvement GL, <sup>13</sup> C et <sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He échantillon MPG4
3	à 10 m à l'ouest du point 2		canne inox	12/07/2002	5,8	0,0	9,9		
3 bis	légèrement + bas		canne inox	12/07/2002	8,1	0,0	5,5		
4	à 20 m au NW du point 2		canne inox	12/07/2002	18,8	0,0	1,4		début profil parallèle au sentier Petite Savane dans Parc de loisirs
5	à 30 m au NW du point 2		canne inox	12/07/2002	15,4	0,0	0,3		
6	à 40 m au NW du point 2		canne inox	12/07/2002	8,8	0,0	6,2		
7	à 50 m au NW du point 2		canne inox	12/07/2002	8,4	0,0	9,4		
8	à 80 m au NW du point 2		canne inox	12/07/2002	5,2	0,0	14,3		fin profil parallèle au sentier Petite Savane dans Parc de loisirs
9	légèrement + bas que le point 2		canne inox	12/07/2002	7,2	0,0	4,6		
10	près du point 2		canne inox	12/07/2002	8,0	0,1	9,7		
11	rive gauche rivière des Ecrevisses		canne inox	12/07/2002	7,3	0,0	9,8		
12	rive gauche rivière des Ecrevisses (50 m + à l'aval)		canne inox	12/07/2002	8,6	0,0	4,7		
13	à 50 m au NE du point 4		canne inox	12/07/2002	14,3	0,0	2,6		
14	à 20 m au NE du point 13 (à droite du sentier)		canne inox	12/07/2002	4,1	0,0	13,7		
15	à 50 m au NW du point 14		canne inox	12/07/2002	6,8	0,0	11,6		
16	rivière des Ecrevisses (+ à l'aval) - virage avant fin de route		canne inox	12/07/2002	6,1	0,0	10,3		à la fin de la route, avant bifurcation des chemins : CO <sub>2</sub> = 0%
17	rivière des Ecrevisses - virage route 20 m + bas	N14°47,320' W81°08,005' Alt. : 507 m	canne inox	12/07/2002	7,9	0,0	4,2	5,40	
17 bis	rivière des Ecrevisses - virage route 20 m + bas		canne inox	13/07/2002	10,0	0,0	1,8	5,43	mesures le lendemain et prélèvement pour gaz libres et <sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He - échantillon MPG5
18	à gauche de la route vers camp Chazeau		canne inox	12/07/2002	4,2	0,0	15,5		
19	rive droite rivière des Ecrevisses au niveau point 4		canne inox	12/07/2002	6,3	0,0	9,5		
20	rive droite rivière des Ecrevisses (+ à l'aval)	N14°47,376' W81°08,062' Alt. : 509 m	canne inox	12/07/2002	4,7	0,0	15,7		
21	stade de foot (station d'épuration)		canne inox	12/07/2002	7,4	0,0	12,2		
22	virage RN2 - chemin Habitation Citron	N14°47,575' W81°08,143' Alt. : 528 m	canne inox	12/07/2002	0,1	0,0	20,5		
23	virage RN2 - pont sur rivière des Ecrevisses	N14°47,539' W81°08,376' Alt. : 568 m	canne inox	12/07/2002	2,5	0,0	17,4		

**Profil n° 5 - Camp Chazeau - Petite Savane (Parc de loisirs) et rivière des Ecrevisses (12 juillet 2002).**



Profil n° 4 - Aileron (Montagne Pelée) - Morne Calebasse.



Profil n° 5 - Camp Chazeau - Petite Savane (Parc de loisirs) et rivière des Ecrevisses (12 juillet 2002).

Potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique)

N° échantillon	Description	Coordonnées GPS	Mode de prélèvement	Date prélèvement	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	O <sub>2</sub> %	He ppm	Remarques
1	chemin Habitation Morestin (SW)	N14°46,254' W61°09,020' Alt. : 352 m	canne inox	12/07/2002	1,4	0,0	20,1		champ d'ananas
2	chemin Habitation Morestin (au NE du point 1)		canne inox	12/07/2002	1,9	0,0	19,0		
3	pont rivière Ferrée (Habitation Mespont)	N14°47,063' W61°08,583' Alt. : 456 m	canne inox	12/07/2002	3,8	0,0	15,2		
4	rive gauche rivière Ferrée (amont pont)		canne inox	12/07/2002	6,4	0,0	13,1	5,24	propriété privée
5	croisement route - chemin (Savane Morestin)		canne inox	12/07/2002	8,1	0,0	10,5		
6	chemin Savane Hubert (SE)	N14°46,876' W61°08,474' Alt. : 391 m	canne inox	12/07/2002	1,6	0,0	18,7		
7	chemin Savane Hubert (+ au NW que le point 6)		canne inox	12/07/2002	2,2	0,0	18,2		
8	station de pompage (Savane Morestin)	N14°46,882' W61°08,704' Alt. : 424 m	canne inox	12/07/2002	1,9	0,0	18,4		
9	hangar chemin Habitation Morestin	N14°46,505' W61°08,959' Alt. : 346 m	canne inox	14/07/2002	7,6	0,0	11,9	5,24	
10	à 100 m du point 9 vers la ligne de crête		canne inox	14/07/2002	2,3	0,0	17,3		
11	entre les points 2 et 10		canne inox	14/07/2002	4,1	0,0	14,5	5,24	
12	à 50 m, au SE du point 11		canne inox	14/07/2002	3,2	0,0	16,0		
13	à 200 m, au NE du hangar		canne inox	14/07/2002	2,4	0,0	16,7		
14	chemin Habitation Morestin, au nord du point 13		canne inox	14/07/2002	2,8	0,0	16,6		à gauche du chemin, direction Morne Rouge
15	chemin Habitation Morestin, au nord du point 14		canne inox	14/07/2002	1,4	0,0	18,6		à gauche du chemin, direction Morne Rouge
16	chemin Habitation Morestin, au NE du point 15	N14°46,695' W61°08,711' Alt. : 429 m	canne inox	14/07/2002	5,9	0,0	13,0	5,24	à gauche du chemin, direction Morne Rouge - prairie
17	sentier qui monte à partir du chemin Habitation Morestin		canne inox	14/07/2002	2,7	0,0	17,2		point situé au NE du point 16
18	arrivée plateau (champ d'ananas)		canne inox	14/07/2002	2,5	0,0	17,5		point situé au SE du point 17

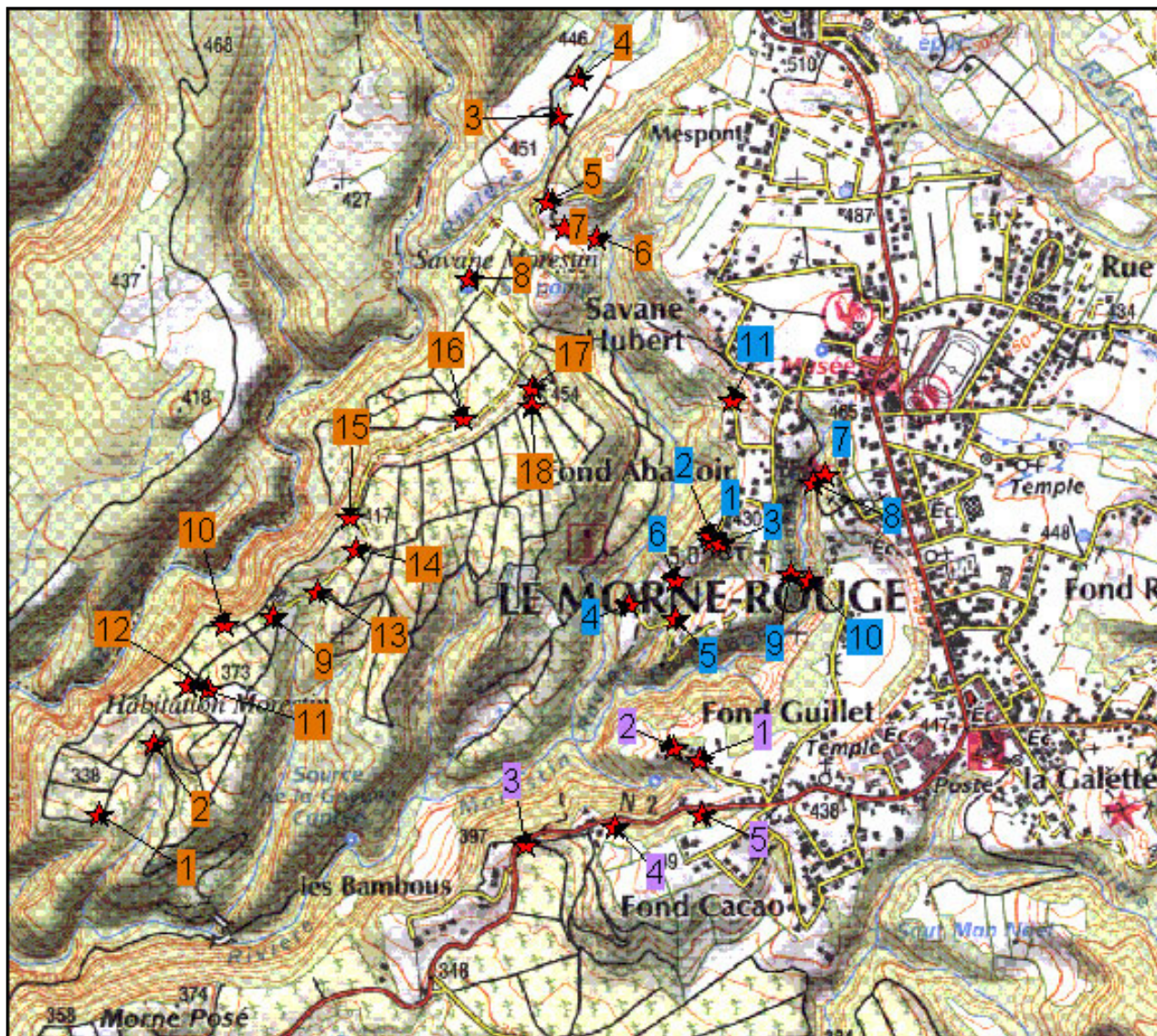
**Profil n° 6 - Habitation Morestin - Habitation Mespont - Savane Hubert (12 et 14 juillet 2002).**

N° échantillon	Description	Coordonnées GPS	Mode de prélèvement	Date prélèvement	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	O <sub>2</sub> %	Remarques
1	fin route Fond Abattoir	N14°46,553' W61°08,670' Alt. : 443 m	canne inox	13/07/2002	6,2	0,0	11,1	
2	fin route Fond Abattoir vers maison Massiny		canne inox	13/07/2002	1,5	0,0	17,5	
3	fin route Fond Abattoir vers maison Massiny		canne inox	13/07/2002	0,8	0,0	19,1	cabane avant pente
4	maison Massiny - vue sur ravine		canne inox	13/07/2002	1,4	0,0	18,1	
5	rive droite ravine (pont sur route Fond Abattoir - maison Massiny)		canne inox	13/07/2002	1,1	0,0	18,3	
6	au SW des points 1 et 2		canne inox	13/07/2002	4,9	0,0	13,3	
7	statue vierge - rive droite ravine Notre-Dame de Lourdes	N14°46,641' W61°08,282' Alt. : 421 m	canne inox	13/07/2002	2,2	0,0	15,1	présence d'eau
8	statue vierge - rive gauche ravine Notre-Dame de Lourdes		canne inox	13/07/2002	1,9	0,0	16,9	
9	à droite du chemin en allant de Massiny à Fond Abattoir		canne inox	13/07/2002	4,2	0,0	13,9	
10	à gauche fin chemin Massiny vers Fond Abattoir		canne inox	13/07/2002	3,9	0,0	14,9	
11	fin de la dernière route perpendiculaire à la route Fond Abattoir - maison Massiny	N14°46,694' W61°08,370' Alt. : 440 m	canne inox	13/07/2002	1,8	0,0	17,0	

**Profil n° 7 - Fond Abattoir - Ravine Notre-Dame de Lourdes (13 juillet 2002).**

N° échantillon	Description	Coordonnées GPS	Mode de prélèvement	Date prélèvement	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	O <sub>2</sub> %	Remarques
1	fin de la route partant de la RN3	N14°46,297' W61°08,463' Alt. : 465 m	canne inox	13/07/2002	2,4	0,0	17,5	
2	fin de la route partant de la RN3		canne inox	13/07/2002	2,3	0,0	17,5	point situé légèrement + bas que point 1
3	RN3 - début SW de la faille (à gauche RN3 direction Morne Rouge)	N14°46,297' W61°08,463' Alt. : 465 m	canne inox	13/07/2002	3,1	0,0	15,9	
4	RN3 - suite faille (à gauche RN3 direction Morne Rouge)		canne inox	13/07/2002	1,4	0,0	19,0	point situé au NE du point 3
5	RN3 - suite faille (à gauche RN3 direction Morne Rouge)		canne inox	13/07/2002	1,1	0,0	19,0	point situé au NE des points 3 et 4

**Profil n° 8 - Fond Guillet (13 juillet /2002).**



**Profils n° 6, n° 7 et n° 8 - Habitation Morestin - Habitation Mespont - Savane Hubert (12 et 14 juillet 2002), Fond Abattoir - Ravine Notre-Dame de Lourdes (13 juillet 2002), Fond Guillet (13 juillet 2002).**

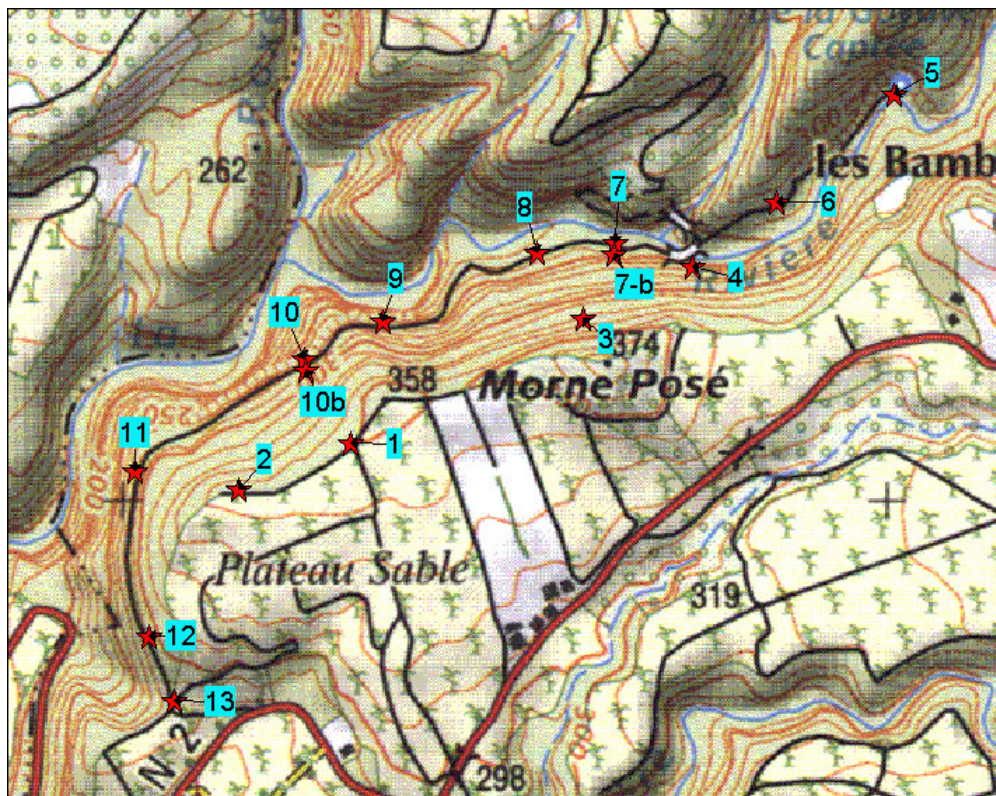
Potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique)

N° échantillon	Description	Coordonnées GPS	Mode de prélèvement	Date prélèvement	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	O <sub>2</sub> %	He ppm	Remarques
1	Plateau Sable (fin du chemin du champ de bananes, avant faille)	N14°45,944' W61°09,254' Alt. : 363 m	canne inox	13/07/2002	2,1	0,0	18,5		
2	Plateau Sable (point situé au SW du point 1)		canne inox	13/07/2002	2,2	0,0	17,4		
3	Plateau Sable (point situé au NE du point 1)		canne inox	13/07/2002	0,5	0,0	19,7		
4	pont sur rivière Morestin		canne inox	14/07/2002	1,1	0,0	17,7		chemin provenant du plateau Sable
5	source Goyave captée		canne inox	14/07/2002	1,2	0,0	16,5		
6	point situé entre points 4 et 5		canne inox	14/07/2002	2,6	0,0	18,0		
7	à 150 m du pont, vers Plateau Sable		canne inox	14/07/2002	0,2	0,0	19,8		
7 bis	à 150 m du pont, vers Plateau Sable		canne inox	14/07/2002	0,5	0,0	19,1		à côté du point 7
8	à 100 m du point 7, vers Plateau Sable		canne inox	14/07/2002	1,2	0,0	18,1		
9	à 200 m du point 8, vers Plateau Sable		canne inox	14/07/2002	2,8	0,0	13,3	5,38	présence d'eau - valeurs finales : CO <sub>2</sub> = 5,4% et O <sub>2</sub> = 6,1%
10	à 100 m du point 9, vers Plateau Sable		canne inox	14/07/2002	0,4	0,0	19,5		au pied d'un affleurement d'andésite
10 bis	à 100 m du point 9, vers Plateau Sable		canne inox	14/07/2002	2,4	0,0	17,1		
11	à 300 m du point 10, vers Plateau Sable		canne inox	14/07/2002	4,9	0,0	13,9	5,24	croisée de 2 chemins
12	à 300 m du point 11, vers Plateau Sable		canne inox	14/07/2002	4,6	0,0	12,1		
13	à 100 m du point 12, vers Plateau Sable	N14°45,765' W61°09,383' Alt. : 291 m	canne inox	14/07/2002	3,4	0,0	15,7		à l'entrée du champ de bananes

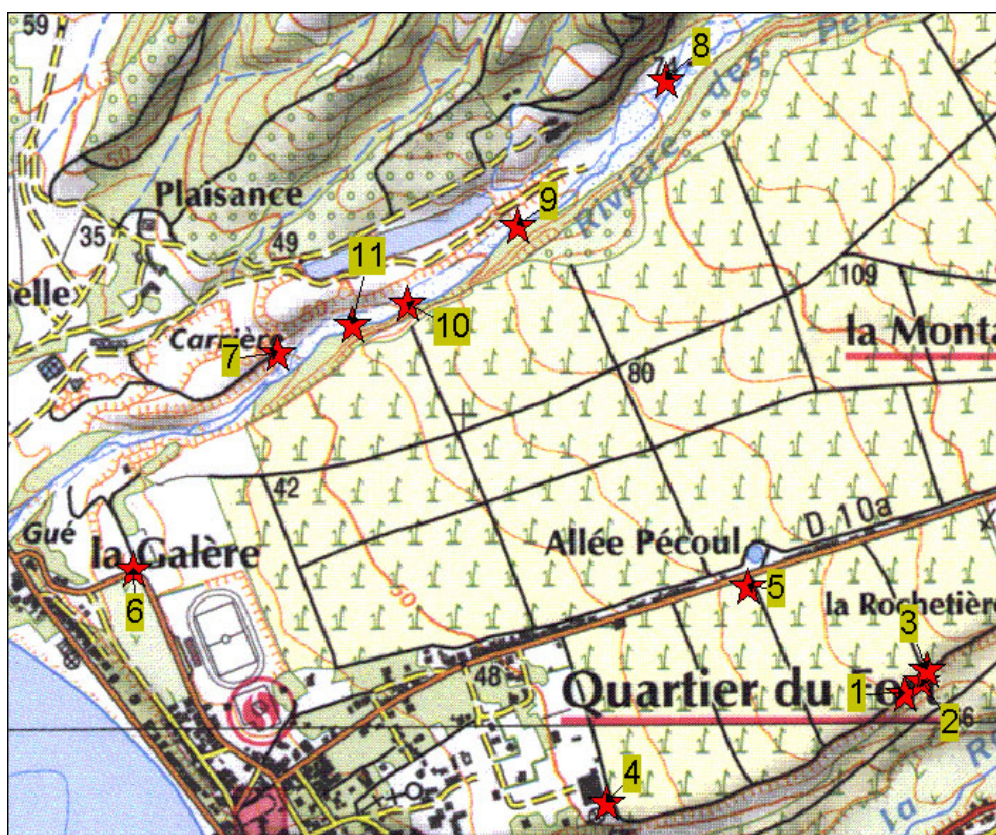
**Profil n° 9 - Plateau Sable - Morne Posé - Les Bambous (13 et 14 juillet 2002).**

N° échantillon	Description	Coordonnées GPS	Mode de prélèvement	Date prélèvement	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	O <sub>2</sub> %	He ppm	Remarques
1	Quartier du Fort (fin chemin dans champ de cannes)	N14°45,154' W61°10,070' Alt. : 326 m	canne inox	13/07/2002	4,4	0,0	16,7		ruches d'abeilles - près de la rivière Roxelane (au bas de l'escarpement)
2	à 50 m à l'ouest du point 1		canne inox	13/07/2002	1,2	0,0	19,4		
3	Quartier du Fort (fin chemin dans champ de cannes)		canne inox	13/07/2002	3,2	0,0	17,2	5,24	point situé en haut de l'escarpement
4	Quartier du Fort (point situé au SW du point 3)		canne inox	13/07/2002	2,6	0,0	17,8		point situé en haut de l'escarpement
5	intersection chemin dans champ de cannes - Allée Pécol (citerne en face)		canne inox	13/07/2002	3,0	0,0	17,5		
6	Quartier de la Galère (intersection chemin - Allée Pécol)	N14°45,251' W61°10,837' Alt. : 32 m	canne inox	13/07/2002	0,5	0,0	20,0		
7	carrière Gouyer	N14°45,448' W61°10,690' Alt. : 46 m	canne inox	14/07/2002	5,8	0,0	11,4	5,30	
8	rivière des Pères, à 900 m du point 7	N14°45,700' W61°10,336' Alt. : 79 m	canne inox	14/07/2002	0,7	0,0	19,3		roche saine, sol peu altéré et fracturé
9	rivière des Pères, à 300 m du point 8, vers carrière Gouyer		canne inox	14/07/2002	2,3	0,0	16,1		roche saine, sol peu altéré et fracturé
10	rivière des Pères, à 250 m du point 9, vers carrière Gouyer		canne inox	14/07/2002	1,1	0,0	19,2		roche saine, sol peu altéré et fracturé
11	rivière des Pères, à 200 m du point 10, vers carrière Gouyer		canne inox	14/07/2002	3,1	0,0	15,9		près de l'étang, au niveau du milieu de cet étang

**Profil n° 10 - Quartier du Fort - Quartier La Montagne - Rivière des Père (13 et 14 juillet 2002).**



Profil n° 9 - Plateau Sable - Morne Posé - Les Bambous (13 et 14 juillet 2002).

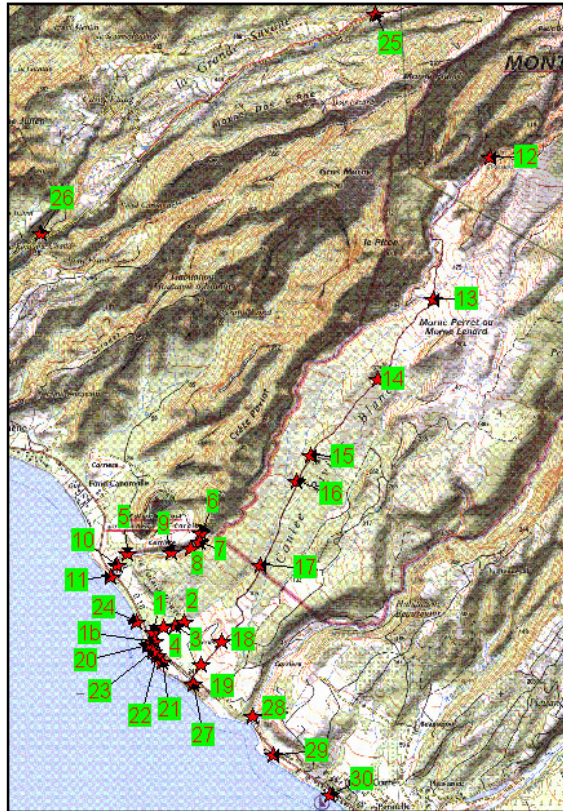


Profil n° 10 - Quartier du Fort - Quartier La Montagne - Rivière des Pères (13 et 14 juillet 2002).

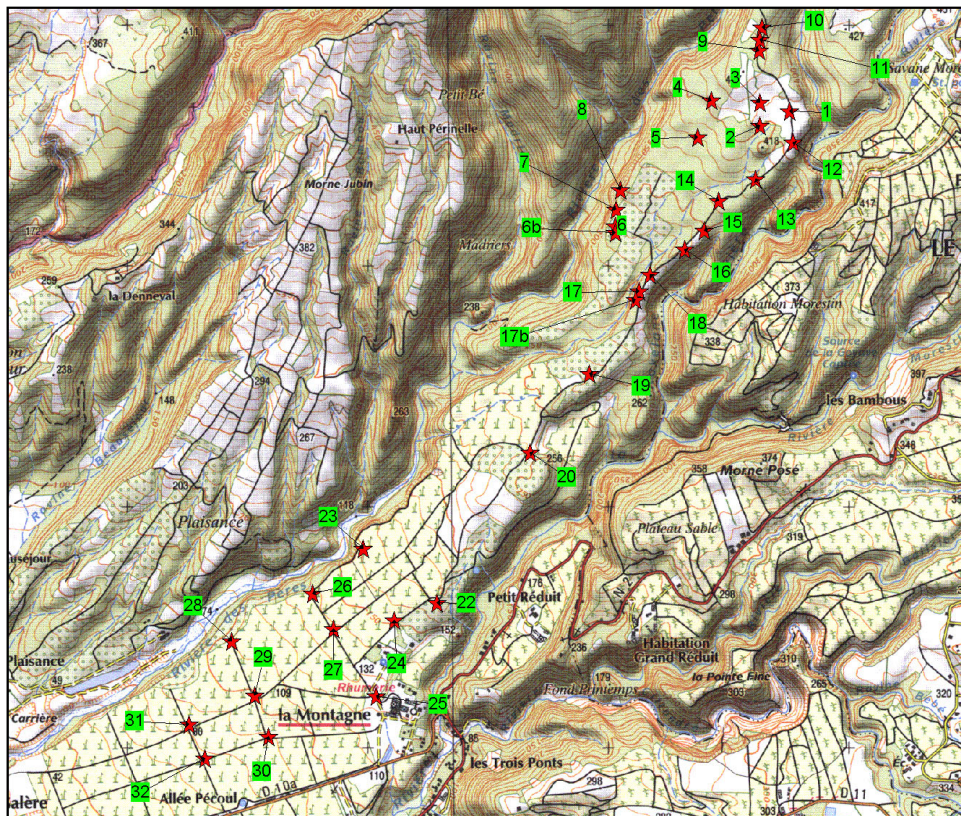
Potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique)

N° échantillon	Description	Coordonnées GPS	Mode de prélèvement	Date prélèvement	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	O <sub>2</sub> %	Remarques
1	puits d'observation IPGP - puits chaud	N14°46,266' W61°11,976' Alt. : 18 m	canne inox	14/07/2002	2,3	0,0	18,2	
1 bis	puits d'observation IPGP		mesures directes	16/07/2002	0,0	0,0	20,0	à l'aide d'un entonnoir + tube
2	à 200 m des puits, vers le NE		canne inox	14/07/2002	1,1	0,0	19,2	
3	à 100 m, au SW du point 2		canne inox	14/07/2002	2,0	0,0	18,4	
4	à 100 m, au NW du point 3		canne inox	14/07/2002	1,1	0,0	19,4	
5	chemin // à rivière Claire		canne inox	15/07/2002	1,9	0,0	19,2	
6	rive droite rivière Claire (point le plus haut)	N14°46,497' W61°11,755' Alt. : 168 m	canne inox	15/07/2002	1,5	0,0	19,3	implantation de la canne très difficile
7	rive droite rivière Claire (50 m + bas que le point 6)		canne inox	15/07/2002	1,5	0,0	19,3	implantation de la canne très difficile
8	rive gauche rivière Claire (75 m + bas que le point 7)		canne inox	15/07/2002	0,4	0,0	20,5	implantation de la canne très difficile
9	rive droite rivière Claire (150 m + bas que le point 8)		canne inox	15/07/2002	3,5	0,0	17,2	implantation de la canne très difficile
10	rive droite rivière Claire (à 30 m du pont, en amont)		canne inox	15/07/2002	1,9	0,0	19,2	implantation de la canne très difficile
11	rive droite rivière Claire (sous le pont)		canne inox	15/07/2002	0,5	0,0	20,3	implantation de la canne très difficile
12	sources thermales de la rivière chaude	N14°47,746' W61°10,858' Alt. : 156 m	canne inox	16/07/2002	1,1	0,0	19,8	prélèvement de gaz impossible car absence de bulles (en plus, émergences immergées)
13	début du sentier des sources thermales hors rivière Claire		canne inox	16/07/2002	0,0	0,0	20,2	rive droite de la rivière Claire - implantation de la canne très difficile
14	sentier des sources thermales (panneau dans fougères)		canne inox	16/07/2002	0,2	0,0	19,7	implantation de la canne très difficile
15	sentier des sources thermales (à 250 m du chemin praticable en 4x4)		canne inox	16/07/2002	0,2	0,0	19,2	implantation de la canne très difficile
16	début du chemin des sources thermales, praticable en 4x4		canne inox	16/07/2002	0,5	0,0	19,6	implantation de la canne très difficile
17	chemin des sources thermales, praticable en 4x4, au SW du point 16		canne inox	16/07/2002	1,8	0,0	19,1	implantation de la canne très difficile
18	chemin des sources thermales, praticable en 4x4, au SW du point 17		canne inox	16/07/2002	1,2	0,0	19,8	implantation de la canne très difficile
19	chemin des sources thermales, praticable en 4x4, au SW du point 18		canne inox	16/07/2002	1,0	0,0	20,2	à l'intérieur de la carrière
20	plage face au puits IPGP (milieu)		canne inox	16/07/2002	0,3	0,0	19,9	
21	plage face au puits IPGP (extrémité SE)		canne inox	16/07/2002	0,3	0,0	20,0	
22	plage face au puits IPGP (au NW du point 21)		canne inox	16/07/2002	0,9	0,0	19,6	
23	plage face au puits IPGP (entre les points 20 et 22)	N14°46,155' W61°11,148' Alt. : 9 m	canne inox	16/07/2002	0,8	0,0	19,6	
24	plage face au puits IPGP (extrémité NW)		canne inox	16/07/2002	2,2	0,0	18,4	
25	route Quartier Cimetière (Prêcheur) - Montagne Pelée (Martineaud - fin de la route)	N14°48,352' W61°11,045' Alt. : 669 m	canne inox	16/07/2002	1,4	0,0	19,4	
26	route Quartier Cimetière (Prêcheur) - Montagne Pelée (au niveau du robinet sur la route)		canne inox	16/07/2002	1,3	0,0	19,6	
27	carrière au bord de la mer (au niveau du début du chemin des sources thermales)		canne inox	16/07/2002	0,7	0,0	19,8	
28	chemin parallèle à la rivière Sèche (rive gauche) - près de l'embouchure		canne inox	16/07/2002	1,1	0,0	19,3	
29	bord de mer au SE du point 28 - chemin vente de briques		canne inox	16/07/2002	0,2	0,0	19,8	
30	bord de mer - Fond Corré (au niveau UCPA)		canne inox	16/07/2002	0,3	0,0	19,6	

**Profil n° 11 - Puits chaud - Rivière Claire - Sources chaudes - Bord de mer - Route Quartier Cimetière/Montagne Pelée (14, 15 et 16 juillet 2002).**



**Profil n° 11 - Puits chaud - Rivière Claire - Sources chaudes - Bord de mer - Route Quartier Cimetière/Montagne Pelée (14, 15 et 16 juillet 2002).**



**Profil n° 12 - Propriété De Paz - La Montagne (15 juillet 2002).**

Potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique)

N° échantillon	Description	Coordonnées GPS	Mode de prélèvement	Date prélèvement	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	O <sub>2</sub> %	He ppm	Remarques
1	chemin propriété De Paz	N14°46,747' W61°08,986' Alt. : 441 m	canne inox	15/07/2002	1,1	0,0	19,2		face à l'escarpement - rivière Roxelane
2	sur autre chemin, à l'ouest du chemin principal De Paz		"	"	0,2	0,0	19,8		
3	à 100 m du point 2, sur le même chemin, vers le nord		"	"	4,3	0,0	15,6		début d'un escarpement
4	à 300 m du point 3, sur le même chemin	N14°46,740' W61°08,975' Alt. : 411 m	"	"	0,5	0,0	19,7		
5	à 300 m du point 4, sur le même chemin		"	"	0,8	0,0	19,1		
6	chemin au NW du chemin principal De Paz		"	"	6,6	0,7	14,0		chemin après bifurcation - près escarpement riv. des Pères
6 bis	chemin au NW du chemin principal De Paz		"	"	2,6	0,0	16,5		chemin après bifurcation - près escarpement riv. des Pères
7	à 50 m du point 6, au NE, sur le même chemin		"	"	6,7	0,0	12,0	5,24	chemin après bifurcation - près escarpement riv. des Pères
8	à 200 m du point 7, au NE, sur le même chemin (fin des cannes)		"	"	3,2	0,0	15,6	5,24	chemin après bifurcation - près escarpement riv. des Pères - près station d'observation IGP
9	sur chemin principal propriété De Paz	N14°46,824' W61°08,995' Alt. : 414 m	"	"	9,8	0,0	8,7	5,24	autres mesures : CO <sub>2</sub> = 9,4% et O <sub>2</sub> = 9,3% - prélèvement <sup>13</sup> C - échantillon MPG6
10	à 200 m du point 9, au nord, sur le même chemin	N14°46,929' W61°09,075' Alt. : 459 m	"	"	3,4	0,0	16,6		
11	point intermédiaire entre points 9 et 10		"	"	7,1	0,0	14,0		
12	point situé au SW du point 1, sur le même chemin		"	"	4,9	0,0	13,9		
13	point situé au SW du point 12, à 100 m, sur le même chemin		"	"	2,5	0,0	17,2		
14	point situé au SW du point 13, à 100 m, sur le même chemin		"	"	2,7	0,0	17,5		à droite du chemin, vers la rhumerie
15	point situé au SW du point 14, à 160 m, sur le même chemin	N14°46,576' W61°09,199' Alt. : 413 m	"	"	8,4	0,0	9,5	5,24	à gauche du chemin, vers la rhumerie
16	point situé au SW du point 15, à 250 m, sur le même chemin		"	"	2,6	0,0	16,8		à gauche du chemin, vers la rhumerie
17	point situé au SW du point 16, sur le même chemin	N14°46,454' W61°09,313' Alt. : 330 m	"	"	15,2	0,0	0,2	5,45	à la bifurcation de 2 chemins (fourche) - prélèvements GL et <sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He - échantillon MPG7
17 bis	point situé à 30 m du point 17, sur le même chemin	N14°46,454' W61°09,313' Alt. : 330 m	"	"	3,5	0,0	15,9		
18	point situé à 180 m du point 17, au SW, sur le même chemin		"	"	0,9	0,0	18,9		à droite du chemin, vers la rhumerie
19	point situé au SW du point 18, sur le même chemin		"	"	3,5	0,0	15,8		à gauche du chemin, vers la rhumerie
20	point situé au SW du point 19, sur le même chemin	N14°46,455' W61°09,315' Alt. : 321 m	"	"	3,7	0,0	16,1		à la bifurcation de 2 chemins, vers la rhumerie
21	point situé au SW du point 20, sur le même chemin		"	"	6,9	0,0	12,1		
22	point situé à 100 m du point 21, au SW, sur le même chemin		"	"	3,8	0,0	17,0		
23	point situé au NW du point 22 (près rivière des Pères)		"	"	2,0	0,0	18,4		
24	point situé au SE du point 23		"	"	1,8	0,0	18,7		
25	point situé au SW du point 24		"	"	8,9	0,0	5,6	5,24	intersection chemin - route rhumerie (La Montagne)
26	point situé au NW du point 25 (près rivière des Pères)		"	"	7,2	0,0	12,3		La Montagne
27	point situé au SE du point 26		"	"	4,3	0,0	13,6		La Montagne
28	point situé au NW du point 27 (près rivière des Pères)		"	"	3,6	0,0	17,3		La Montagne
29	point situé au SE du point 28	N14°45,569' W61°10,137' Alt. : 125 m	"	"	5,2	0,0	15,3		La Montagne - allée du milieu champ de cannes
30	point situé au SE du point 29		"	"	2,0	0,0	19,0		La Montagne (allée du milieu)
31	point situé au NW du point 30 (près rivière des Pères)		"	"	0,9	0,0	19,9		
32	point situé au SE du point 31		"	"	2,4	0,0	18,5		allée du milieu champ de cannes

Profil n° 12 - Propriété De Paz - La Montagne (15 juillet 2002).

Potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique)

N° échantillon	Description	Coordonnées GPS	Mode de prélèvement	Date prélèvement	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	O <sub>2</sub> %	He ppm	Remarques
1	Forage Desgrottes	N14°45,710' W61°07,157' Alt. : 346 m	Entonnoir	17/07/2002	61,2	30,6	0,5	5,21	échantillon MPG8  Valeur CH <sub>4</sub> ?  Nelle série de mesures cause PB LFG 20  "
2	Sol à 1m forage		Canne inox	"	34,6	12,7	1,4	4,95	
3	80 m WSW forage		"	"	9,3	20	7,3		
4	80 m NNW forage		"	"	8,5	0	5,9		
5	80 m SE forage		"	"	3,5	0	16,5		
6	80m ENE forage		"	"	9,3	0	4,6		
7	175 m NW forage Bord rivière Madame	N14°45,724' W61°07,228' Alt. : 338 m	"	"	2,8	0	18,1		
8	200 m SSE forage	N14°45,616' W61°07,067' Alt. : 339 m	"	"	14,5	0,9	4,1	5,03	
9	300 m SSE forage	N14°45,573' W61°07,026' Alt. : 345 m	"	"	16,0	1,71	0,03	5,34	
10	210 m E forage	N14°45,741' W61°07,025' Alt. : 351 m	"	"	2,4	n.a.	17,7		
11	212 m N forage	N14°45,814' W61°07,159' Alt. : 352 m	"	"	5,1	n.a.	15,2		
12	420 m SE forage	N14°45,556' W61°06,956' Alt. : 348 m	"	"	12,9	0	2,2		

**Profil n° 13 - Forage Desgrottes (17 juillet 2002).**

N° échantillon	Description	Coordonnées GPS	Mode de prélèvement	Date prélèvement	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	O <sub>2</sub> %	He ppm
1	Ste Cécile dans bananeraie	N14°45,646' W61°06,127' Alt. : 423 m	Canne inox	17/07/02	4,8	0,0	14,4	5,24
2	pont canal sur rivière Blanche	N14°45,795' W61°06,095' Alt. : 386 m	"	"	4,5	0,0	14,2	
3	2 <sup>ème</sup> ruisseau		"	"	8,7	0,0	8,5	
4	SE du point 3		"	"	4,0	0,0	15,8	
5	Sentier Habitation Ste Cécile	N14°45,690' W61°06,336' Alt. : 412 m	"	"	3,0	0,0	17,1	
6	Fourche sentier Ste Cécile	N14°45,652' W61°06,452' Alt. : 360 m	"	"	1,3	0,0	19,3	
7	D11, chemin avant Habitation des Gazons	N14°45,148' W61°06,665' Alt. : 380 m	"	"	0,1	0,0	19,7	
8	Habitation des Gazons		"	"	1,2	0,0	18,7	
9	D11, rivière Capot		"	"	5,0	0,0	15,9	
10	Usine Champflore	N14°45,148' W61°07,025' Alt. : 390 m	"	"	1,2	0,0	18,4	
11	NE point 9 (chemin face usine)		"	"	3,2	0,0	12,5	
12	Pont rivière Lafort		"	"	4,8	0,0	16,2	
13	D11, pont rivière Madame	N14°45,141' W61°07,293' Alt. : 382 m	"	"	5,3	0,0	13,7	
14	Pont rivière à 250 m du 13	N14°45,179' W61°07,425' Alt. : 379 m	"	"	2,0	0,0	19,2	
15	D11 vers Champflore	N14°45,304' W61°07,660' Alt. : 428 m	"	"	1,8	0,0	18,4	
16	D11 vers Champflore	N14°45,572' W61°07,710' Alt. : 439 m	"	"	1,0	0,0	19,2	

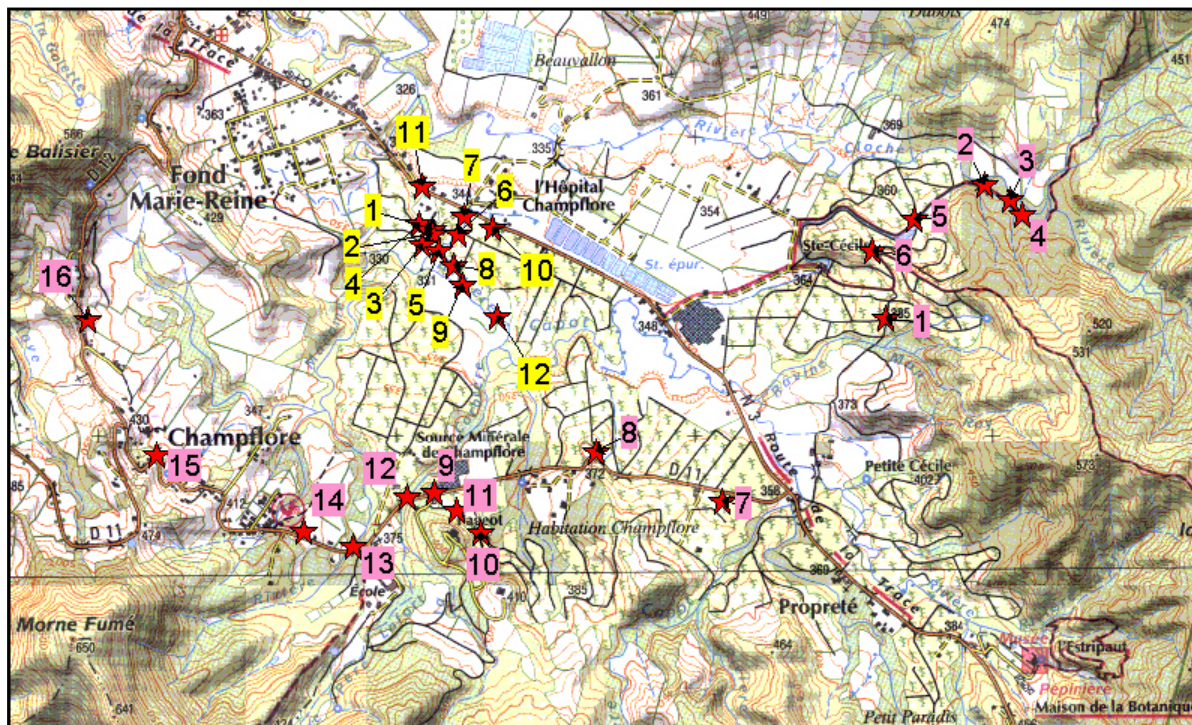
**Profil n° 14 - Habitation Sainte-Cécile - Champflore (17 juillet 2002).**

Potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique)

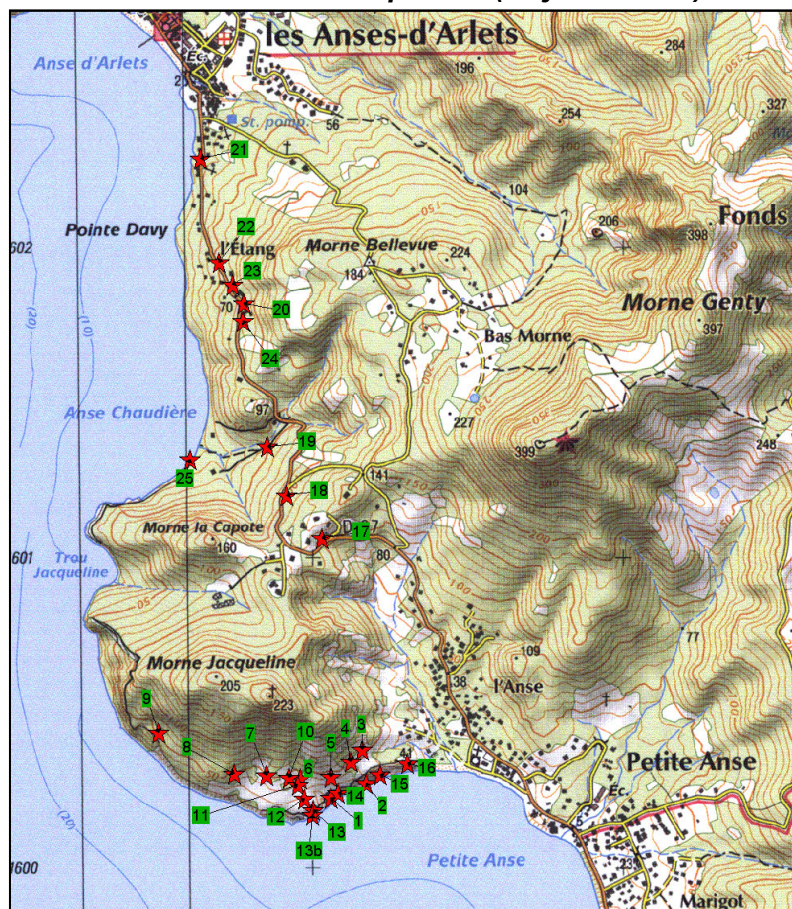
N° échantillon	Description	Coordonnées GPS	Mode de prélèvement	Date prélèvement	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	He	Remarques
					%	%	%	ppm	
1	Source Diamant (Ferrée)	N14°28,105' W61°04,508' Alt. : 002 m	Entonnoir	19/07/2002	88,1	0,0	2,4	5,83	Echantillon DIAMG1 GL + <sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He
2	Borne DM	N14°28,148' W61°04,392' Alt. : 001m		"	n.a.	n.a.	n.a.		Présence de gaz non prélevables
3	170 m NE source	N14°28,184' W61°04,463' Alt. : 60m	Canne inox	"	1,7	0,0	19		
4	128 m ENE source	N14°28,154' W61°04,458' Alt. : 58m	"	"	1,3	0,0	18,1		
5	61m N source	N14°28,138' W61°04,513' Alt. : 53m	"	"	1,0	0,0	17,2		
6	116 m NW source axe talweg	N14°28,130' W61°04,566' Alt. : 47m	"	"	6,3	0,0	14,2	5,74	
7	200 m WNW source	N14°28,106' W61°04,617' Alt. : 44m	"	"	1,6	0,0	18,6		
8	310 m WNW source	N14°28,123' W61°04,678' Alt. : 39m	"	"	2,9	0,0	16,8		
9	590 m WNW source	N14°28,198' W61°04,823' Alt. : 59m	"	"	0,6	0,0	19,3		
10	210 m WNW source (marigot-faille?)	N14°28,114' W61°04,624' Alt. : 51m	"	"	2,6	0,0	17,3		
11	185 m NW source axe talweg au-dessus zone soufrée	N14°28,147' W61°04,587' Alt. : 57m	"	"	8,7	0,0	11,8	5,29	
12	90 m WNW source axe talweg	N14°28,114' W61°04,157' Alt. : 35m	"	"	42,5	0,0	10,3	6,11	Echantillon DIAMG2 <sup>13</sup> C + <sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He
13	55 m W source Bord Plage	N14°28,090' W61°04,533' Alt. : 001m	"	"	98,0	0,0	0,6	5,95	
13bis	56 m W source Bord Plage	N14°28,090' W61°04,534' Alt. : 001m	"	20/07/2002	99,2	0,0	0	7,56	Echantillon DIAMG3 GL + <sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He
14	20 m E source (soufre natif)	N14°28,109' W61°04,495' Alt. : 001m	"	19/07/2002	68,1	0,0	5,2		
15	175 m E source	N14°28,146' W61°04,414' Alt. : 005m	"	"	0,3	0,0	19,3		
16	305 m E source (faille présumée)	N14°28,165' W61°04,350' Alt. : 003m	"	20/07/2002	2,8	n.a.	18,4		
17	D37, faille est col Morne La Capote	N14°28,548' W61°04,543' Alt. : 111m	"	"	1,0	n.a.	19,8		
18	D37, faille ouest col Morne La Capote	N14°28,590' W61°04,612' Alt. : 115m	"	"	0,2	n.a.	20,6		
19	D37, faille ravine Chaudière	N14°28,709' W61°04,66" Alt. : 49m	"	"	2,4	n.a.	18,6		
20	D37 vers Anse d'Arlot 50m E faille présumée	N14°29,967' W61°04,675' Alt. : 89m	"	"	3,0	n.a.	17,8		
21	D37 à Anse d'Arlot sur faille présumée	N14°29,225' W61°04,743' Alt. : 20m	"	"	1,0	n.a.	19,7		
22	D37, 100 m N point 20 sur faille présumée	N14°29,014' W61°04,705' Alt. : 60m	"	"	2,3	n.a.	18,7		
23	D37, 50m N point 20 sur faille présumée	N14°28,148' W61°04,392' Alt. : 001m	"	"	2,2	n.a.	19		
24	D37, 70 m S point 20 sur faille présumée	N14°28,929' W61°04,675' Alt. : 78m	"	"	2,2	n.a.	18,3		
25	Anse Chaudière sur faille présumée	N14°28,630' W61°04,854' Alt. : 002m	"	"	2,0	n.a.	18,7		
26	Anse Chaudière	N14°28,637' W61°04,845' Alt. : 002m	"	"	0,4	n.a.	20,2		
27	Anse Chaudière	N14°28,659' W61°04,811' Alt. : 002m	"	"	0,5	n.a.	19,9		
28	Anse Chaudière	N14°28,670' W61°04,798' Alt. : 001m	"	"	1,0	n.a.	19,3		

Prospection Anse Chaudière sur 740 m N de faille présumée : pas d'anomalies.

Profil n° 15 - Diamant - Petite Anse (19-20 juillet 2002).



**Profils n° 13 et n° 14 - Forage Desgrottes (17 juillet 2002) et Habitation Sainte-Cécile - Champ Flore (17 juillet 2002).**

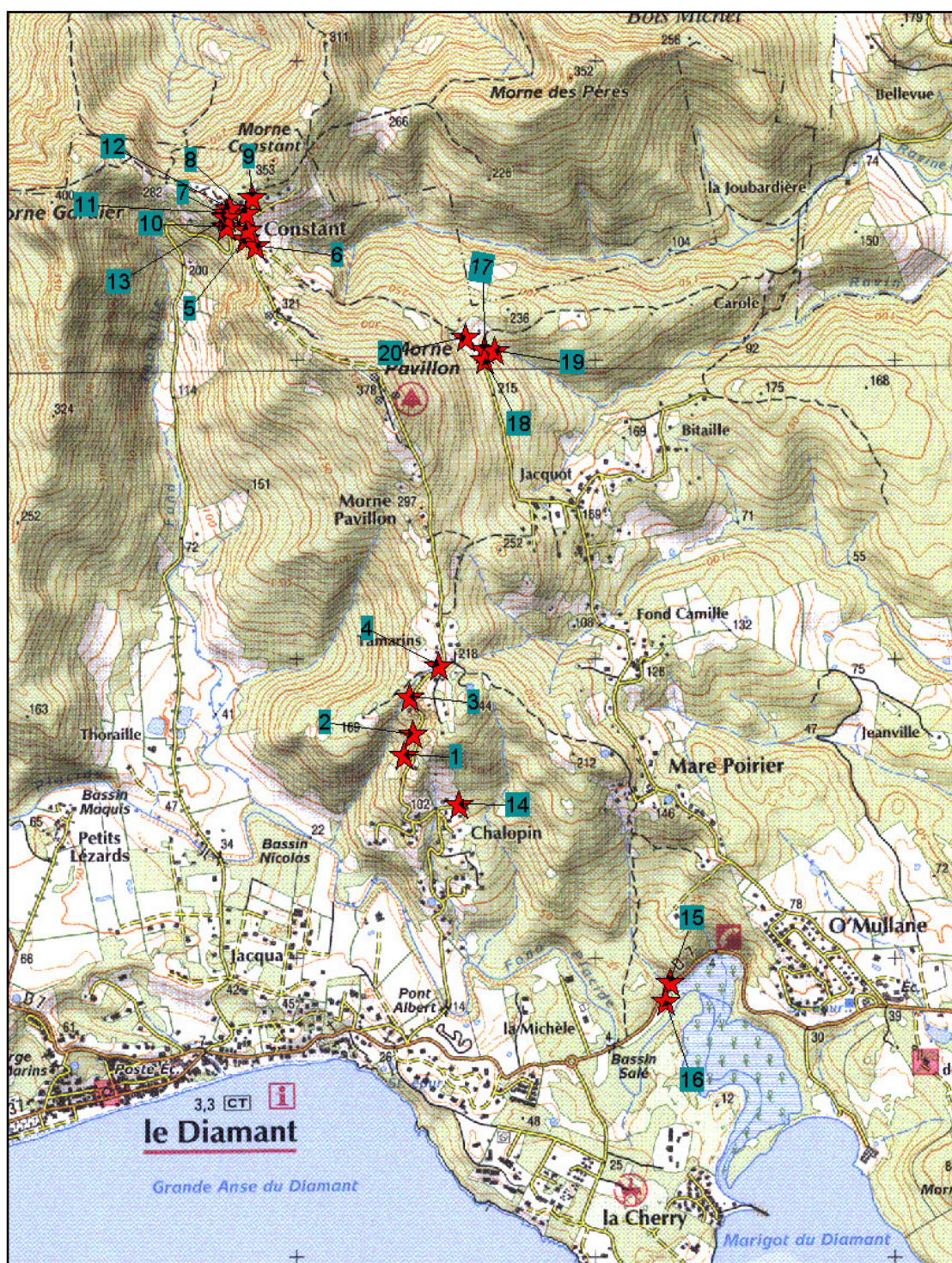


**Profil n° 15 - Diamant - Petite Anse (19-20 juillet 2002).**

Potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge - Montagne Pelée et du Diamant (Martinique)

N° échantillon	Description	Coordonnées GPS	Mode de prélèvement	Date prélèvement	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	O <sub>2</sub> %	He ppm
1	CD dir. Morne Pavillon (faille Mullane)	N14°29,357' W61°01,009' Alt. : 125 m	Canne inox	21/07/2002	0,48	0,0	20,0	
2	CD dir. Morne Pavillon (faille Mullane)	N14°29,410' W61°00,987' Alt. : 162 m	"	"	0,97	0,0	19,7	
3	CD dir. Morne Pavillon (faille Mullane)	N14°29,452' W61°00,980' Alt. : 192 m	"	"	0,42	0,0	20,2	
4	CD dir Morne Pavillon (Tamarin)	N14°29,558' W61°00,929' Alt. : 220 m	"	"	0,53	0,0	19,6	
5	CD dir. Morne Pavillon (faille col de Morne Constant)	N14°30,282' W61°01,271' Alt. : 300 m	"	"	3,89	0,0	16,3	
6	CD dir. Morne Pavillon (50 m S faille Constant)	N14°30,259' W61°01,261' Alt. : 309 m	"	"	0,92	0,0	19,2	
7	CD dir. Morne Pavillon (40 m N point 5)	N14°30,304' W61°01,281' Alt. : 303 m	"	"	4,50	0,0	16,2	5,24
8	CD dir. Morne Pavillon (90 m N point 5)	N14°30,328' W61°01,287' Alt. : 300 m	"	"	4,60	0,0	15,0	
9	CD dir. Morne Pavillon (150 m N point 5)	N14°30,362' W61°01,290' Alt. : 302 m	"	"	2,54	0,0	18,7	
10	CD de Fond Thoraille sur faille Constant	N14°30,349' W61°01,317' Alt. : 307 m	"	"	2,19	0,0	18,3	
11	CD de Fond Thoraille 40 m N point 10 sur faille Constant	N14°30,359' W61°01,330' Alt. : 301 m	"	"	8,36	0,0	12,3	5,24
12	CD de Fond Thoraille 50 m N point 10 sur faille Constant	N14°30,074' W61°01,324' Alt. : 296 m	"	"	1,19	0,0	19,3	
13	CD de Fond Thoraille 30 m N point 10 sur faille Constant	N14°30,362' W61°01,323' Alt. : 293 m	"	"	3,26	0,0	17,7	
14	CD de Chalopin - faille Mullane	N14°29,316' W61°00,884' Alt. : 120 m	"	"	0,28	0,0	20,4	
15	D7, ravine prox. bassin salé - faille Mullane	N14°28,979' W61°00,512' Alt. : 5 m	"	"	2,56	0,0	18,0	
16	D7, ravine prox. bassin salé - sur axe faille Mullane	N14°28,983' W61°00,504' Alt. : 5 m	"	"	2,82	0,0	17,0	
17	CD Jacquot sur faille Constant	N14°30,151' W61°00,856' Alt. : 213 m	"	"	4,13	0,0	15,9	
18	CD Jacquot - faille Constant 20 m S point 17	N14°30,140' W61°00,857' Alt. : 215 m	"	"	1,69	0,0	18,8	
19	CD Jacquot - faille Constant 30 m E point 17	N14°30,158' W61°00,841' Alt. : 213 m	"	"	2,45	0,0	18,1	
20	CD Jacquot - faille Constant 125 m NNW point 17	N14°30,204' W61°00,897' Alt. : 242 m	"	"	0,26	0,0	20,0	

**Profil n° 16 - Habitation Mullane (21 juillet 2002).**



Profil n° 16 - Habitation Mullane (21 juillet 2002).

**Centre scientifique et technique**  
**Service analyse et caractérisation minérale**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34