

*Etude hydrogéochimique du champ
géothermique de Bouillante (Guadeloupe)*

R 39880
décembre 1997

23 FEV. 1998
BIBLIOTHEQUE



BRGM
L'ENTREPRISE AU SERVICE DE LA TERRE

*Etude hydrogéochimique du champ
géothermique de Bouillante (Guadeloupe)*

B. Sanjuan et M. Brach

**R 39880
décembre 1997**



Mots-clés : Géothermie, Réservoir, Forages, Sources thermales, Fumerolles, Analyses chimiques et isotopiques, Gaz, Bouillante, Soufrière, Guadeloupe.

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

Sanjuan B., Brach M. (1998) - Etude hydrogéochimique du champ géothermique de Bouillante (Guadeloupe). Rap. BRGM R 39880, 84 p., 12 fig., 4 tabl., 3 ann.

© BRGM, 1998, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans les années 1970, plusieurs travaux de reconnaissance dans la région de Bouillante, en Guadeloupe, ainsi que la réalisation de quatre forages ont permis de mettre en évidence l'existence de fluides à haute température (240-250°C), à faible profondeur. Actuellement, la centrale géothermique implantée est connectée à un seul forage (BO2), qui produit environ 30 t/h de vapeur. Cette étude, qui s'inscrit dans le projet de recherche scientifique S24 "Optimisation des exploitations géothermiques haute enthalpie", a pour principal objectif d'établir un modèle hydrogéochimique du champ géothermique, d'évaluer les limites du réservoir et d'essayer d'étendre ce champ. A cette fin, il est nécessaire de déterminer l'origine des eaux thermales dans la région de Bouillante et de mieux comprendre leur circulation ainsi que l'acquisition de leur composition chimique.

Après un bref rappel des principaux résultats obtenus au cours des travaux précédents, cette étude présente une série aussi complète que possible d'analyses chimiques et isotopiques effectuées sur les sources thermales de la région de Bouillante ainsi que sur les fluides des forages BO2 et BO4. Les températures d'émergence des sources varient de 29 à 97°C. Les fluides des forages (240-250°C) ont été prélevés en tête de puits en ce qui concerne BO2 et à 650 m de profondeur dans le forage BO4. Des échantillons de sources thermales sous-marines (Pointe Lézard, Ilet Pigeon), pour lesquelles les températures d'émergence peuvent être élevées (jusqu'à 92°C), ont été prélevées pour la première fois. Des échantillons d'eau de mer et d'eaux superficielles (rivières, pluie), destinés à servir de référence, ainsi que ceux d'eaux thermales provenant d'autres régions de Guadeloupe (principalement la Soufrière) ont également été analysés. En outre, des analyses de gaz associés à certaines sources et à des zones fumerolliennes de la région de Bouillante ainsi qu'au forage BO2 ont aussi été réalisées.

Les résultats des analyses chimiques et isotopiques obtenus sur les eaux thermales de la région de Bouillante permettent de les diviser en deux groupes principaux :

- des eaux bicarbonatées sodiques avec de basses salinités (< 0,5 g/l), qui sont des eaux superficielles d'origine météorique probablement réchauffées par conduction, jusqu'à environ 80°C ;
- des eaux chlorurées sodiques avec une salinité relativement élevée de 1 à 35 g/l et un rapport molaire Cl/Br proche de celui de l'eau de mer.

Ce dernier type d'eaux est présent uniquement dans les sources sous-marines ou situées en bordure de mer. La composition chimique et isotopique de ces eaux peut être expliquée par des mélanges de deux ou trois pôles, à savoir l'eau de mer, des eaux superficielles d'origine météorique et un fluide chaud semblable à celui du forage BO2.

La plupart de ces sources, associées à des accidents tectoniques majeurs, révèlent des fuites de fluide profond chaud, ce qui permet une meilleure définition, en surface, de futures zones d'exploitation du champ. Même si ces fuites ne permettent pas de localiser le réservoir géothermique principal, elles suggèrent l'existence d'un réservoir assez important. Les résultats des analyses chimiques et isotopiques effectuées sur les eaux des sources thermales des autres régions de la Guadeloupe indiquent des caractéristiques d'eaux superficielles relativement froides. Elles n'apportent aucune information intéressant le champ géothermique de Bouillante.

Les fluides des forages BO2 et BO4 sont chlorurés sodiques et ont des salinités autour de 20 et 18 g/l, respectivement. Les analyses chimiques et isotopiques montrent qu'ils résultent d'un mélange d'eau de mer et d'eau douce (58-42 % pour BO2 et 54-46 % pour BO4). Ce type de mélange est en bon accord avec la direction générale de la fracturation (N100 -120°), qui permet une contribution, à la fois, d'eau de mer et d'eau d'origine météorique provenant de l'est (probablement, Pitons de Bouillante).

Par rapport à une eau de mer diluée, les fluides des forages sont appauvris en Mg, SO₄ et Na et sont enrichis en K, Ca, Si, B, Li, Cs, Rb, Sr, Ba, Mn et As. Ces observations résultent d'un processus d'interaction entre roche et eau de mer. Ce type de résultats est généralement observé dans des études d'interaction entre basalte et eau de mer sur des sources hydrothermales sous-marines, des eaux thermales d'Islande et de Djibouti ainsi que des expériences de laboratoire. Les géothermomètres chimiques, le rapport isotopique en strontium, ainsi que des calculs de saturation, indiquent que le fluide du forage BO2 est à l'équilibre à 240-250°C avec la roche encaissante, constituée de quartz, d'albite, de feldspath potassique, de zéolites, de smectites, d'anhydrite et de calcite. Les rapports eau-roche et/ou les vitesses de circulation des fluides doivent être élevés, car on n'observe pas d'enrichissement en isotopes lourds de l'oxygène provenant des silicates ou des carbonates dans les solutions.

La similitude de la composition chimique et isotopique des fluides des forages BO2 et BO4 suggère une appartenance commune à un seul réservoir. L'évolution irrégulière des profils de température en fonction de la profondeur, dans les forages BO3 et BO4 et l'absence de dégazage important, inspirent un écoulement plutôt latéral du fluide géothermal. Les analyses de gaz associés à certaines sources thermales et au forage BO2 indiquent une origine mixte de ces gaz (contributions mantellique, crustale et atmosphérique). Les fuites gazeuses d'origine mantellique seraient contrôlées par la tectonique régionale plutôt que par une intrusion magmatique d'extension limitée. Les résultats du test de traçage à l'acide isophtalique font pencher pour l'absence d'une connexion hydraulique directe entre BO2 et BO4, situés environ à 400 m l'un de l'autre. Néanmoins, d'autres tests de traçage sont nécessaires pour confirmer et valider ces premiers résultats.

Sommaire

Introduction	9
1. Résultats géochimiques antérieurs	11
1.1. Région de Bouillante.....	11
1.2. Région Soufrière et autres	12
2. Prélèvements et techniques analytiques	13
2.1. Campagnes de prélèvements	13
2.1.1. Points échantillonnés	14
2.1.2. Description sommaire des sites et conditions de prélèvement dans la région de Bouillante.....	17
2.1.3. Mesures sur le terrain et conditionnement des échantillons.....	19
2.2. Techniques analytiques	20
3. Résultats et discussion	23
3.1. Région de Bouillante.....	23
3.1.1. Résultats	23
3.1.2. Origine des eaux.....	27
3.1.3. Interactions eau de mer - roches volcaniques.....	32
3.1.4. Mise en évidence des processus de mélange.....	40
3.1.5. Géothermométrie.....	49
3.1.6. Origine des gaz.....	52
3.1.7. Modèle hydrogéochimique de champ	53
3.2. Sources des autres régions (essentiellement autour de la Soufrière).....	54
4. Test de traçage	57
Conclusion	59
Références bibliographiques	61

Liste des figures

Fig. 1 - Localisation des prélèvements réalisés dans la région de Bouillante (sept. 1995- mai 1996).....	15
Fig. 2 - Diagramme Br - Cl.	28
Fig. 3 - Diagramme deutérium - oxygène-18.	30
Fig. 4 - Teneurs en deutérium (‰) et en oxygène-18 (‰), en fonction des concentrations en chlorures (mmol/l).	33
Fig. 5 - Diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - Li/Cl.	35
Fig. 6 - Diagrammes Na/Cl-Li/Cl, K/Cl-Li/Cl, Ca/Cl-Li/Cl et Mg/Cl-Li/Cl.	37
Fig. 7 - Diagrammes SO_4/Cl -Li/Cl, B/Cl-Li/Cl, Sr/Cl-Li/Cl et Rb/Cl-Li/Cl.	38
Fig. 8 - Diagrammes Cs/Cl-Li/Cl, Ba/Cl-Li/Cl, Mn/Cl-Li/Cl et As/Cl-Li/Cl.	39
Fig. 9 - Diagrammes Na-Cl, K-Cl, Ca-Cl et Mg-Cl.	41
Fig. 10 - Diagrammes SO_4 -Cl, SiO_2 -Cl, Li-Cl et B-Cl.	42
Fig. 11 - Diagrammes Sr-Cl, Ba-Cl, Mn-Cl et As-Cl.	43
Fig. 12 - Diagrammes Rb-Cl et Cs-Cl.	44

Liste des tableaux

Tabl. 1 - Analyses chimiques réalisées à la suite des deux campagnes de prélèvements. Campagnes 1995 et 1996.....	24
Tabl. 2 - Analyses isotopiques réalisées à la suite des deux campagnes de prélèvements. Campagnes 1995 et 1996, région de Bouillante.	26
Tabl. 3 - Proportions estimées d'eau de mer, d'eau douce et de fluide chaud dans les eaux des sources thermales de la région de Bouillante.	46
Tabl. 4 - Géothermomètres chimiques appliqués aux échantillons prélevés pendant les campagnes de 1995-1996.....	50

Liste des annexes

Ann. 1 - Analyse chimiques et isotopiques des échantillons prélevés dans les études antérieures.....	65
Ann. 2 - Géothermomètres chimiques utilisés. Applications sur les échantillons analysés dans les études antérieures	73
Ann. 3 - Composition chimique des échantillons de gaz prélevés sur certaines sources et fumerolles, ainsi que dans le forage BO2. Application des géothermomètres à gaz	81

Introduction

A la suite de plusieurs travaux de reconnaissance dans la région de Bouillante, en Guadeloupe, la présence de fluides à haute température (240-250°C), à faible profondeur, a été mise en évidence dès 1970. Sur quatre forages (BO1, BO2, BO3 et BO4), seul le forage BO2, d'une profondeur de 338 m, s'est révélé être bon producteur (30 t/h de vapeur) et permet actuellement l'exploitation du champ géothermique pour la production d'électricité. Cependant, le forage BO4 (2 505 m de profondeur), environ trois fois moins productif que le précédent à environ 700 m de profondeur, pourrait peut-être contribuer à l'exploitation s'il était stimulé. D'autre part, les résultats acquis jusqu'à présent laissent supposer que le principal réservoir d'eau chaude n'a pas encore été découvert. Cette étude, qui s'inscrit dans le projet de recherche scientifique S24 : "Optimisation des exploitations géothermiques haute enthalpie", a pour principal objectif de mieux comprendre les circulations de fluides, afin de proposer un modèle hydrogéochimique de champ, d'évaluer les limites du réservoir et d'essayer d'étendre ce champ. On s'interrogera, notamment, sur la présence d'un ou plusieurs réservoirs et sur l'existence ou non d'éventuelles connexions entre les forages BO2 et BO4.

Pour atteindre cet objectif, il est indispensable de déterminer précisément l'origine des fluides et de bien comprendre l'évolution de leur composition chimique. Après un bref rappel des principaux résultats obtenus au cours des précédents travaux, cette étude s'appuie sur une série de prélèvements, d'analyses chimiques et isotopiques d'eaux thermales de la région de Bouillante aussi complète que possible. Les fluides des forages BO2 (en production) et BO4 (non utilisé jusqu'ici) ont aussi été prélevés et analysés, ainsi que l'eau de mer et certaines eaux de rivière, qui serviront de base de comparaison. Un test de traçage à l'acide isophtalique entre les forages BO4 (injection du traceur) et BO2 (suivi du traceur), distants d'environ 400 m, a également été entrepris.

Quelques eaux thermales d'autres régions (essentiellement celle de la Soufrière) ont aussi été prélevées et analysées, pour confirmer les résultats d'études précédentes et les comparer avec ceux obtenus dans la région de Bouillante. Ceci a été réalisé dans l'espoir de trouver des caractéristiques locales communes entre ces eaux et d'apporter ainsi de nouveaux éléments à la compréhension de l'acquisition de la composition chimique des eaux thermales de la région de Bouillante. Cependant, ces analyses supplémentaires, qui sortent un peu du cadre principal de cette étude, seront peu exploitées si elles s'avèrent être d'un intérêt mineur.



1. Résultats géochimiques antérieurs

1.1. REGION DE BOUILLANTE

Au sein de l'archipel des Petites Antilles, la Guadeloupe fait partie de l'arc insulaire résultant du prolongement de la plaque Atlantique sous la plaque Caraïbe. Dans un tel contexte, la présence de ressources géothermiques dans la région de Bouillante n'a rien d'accidentel.

Depuis 1968, les eaux thermales de la région de Bouillante ont fait l'objet de différentes études menées d'abord par Eurafrep (Tonani, 1963), puis ensuite par le BRGM (Fouillac et Ouzounian, 1976 ; Iundt et Ouzounian, 1984a, 1984b ; Fabriol et Ouzounian, 1985 ; Abou Akar *et al.*, 1992). Les résultats des analyses chimiques et isotopiques obtenus au cours de ces études sont présentés dans l'annexe 1. Les températures à l'émergence des sources s'échelonnent de 30°C (source amont Ravine Bouillante) à 99°C (source Terrain de football). Cependant, cette source avait un débit pratiquement nul en 1976 (Fouillac et Ouzounian, 1976) et n'existait plus en 1984 (Iundt et Ouzounian, 1984a). Les pH mesurés des eaux varient de 6 à 8,3 et leur salinité maximale ne dépasse pas celle de l'eau de mer.

Parmi les eaux étudiées dans la région de Bouillante, on distingue deux grands groupes :

- les eaux de composition chimique à dominante NaCl et contenant une certaine proportion d'eau de mer ;
- les eaux bicarbonatées sodiques.

Des premiers travaux, il résulte que la plupart des eaux thermales, bien que portées en température, présentent des caractéristiques d'eaux superficielles :

- faible minéralisation, parfois identique à celle de l'eau superficielle des rivières ;
- teneurs en magnésium relativement importantes, plus proches de celles des eaux superficielles que de celles des eaux profondes ;
- signature isotopique δD et $\delta^{18}O$ d'eau d'origine météorique (absence de shift en ^{18}O).

En intégrant les analyses chimiques et isotopiques des fluides des forages BO2, BO3 et BO4 (ann. 1), Iundt et Ouzounian (1984b), ainsi que Fabriol et Ouzounian (1985), proposent un modèle hydrogéochimique du système géothermique de la région de Bouillante.

Ce système est constitué d'un réservoir profond alimenté par des eaux de surface et de l'eau de mer. Le fluide du réservoir est représenté par celui des forages. Les calculs géothermométriques (silice, Na-K, Na-K-Ca) indiquent que ce fluide est à l'équilibre

avec la roche du réservoir à une température comprise entre 230 et 250°C (ann. 2). Cette gamme de température est en accord avec les valeurs indiquées dans les profils de température mesurés dans les différents forages (Demians d'Archimbaud et Munier-Jolain, 1976). Ainsi, au fond du forage BO1 (800 m de profondeur), il a été trouvé une température de 220°C ; au fond du forage BO2, il a été mesuré une température de 242°C. La température maximale indiquée pour les quatre forages fut 245°C (Demians d'Archimbaud et Surcin, 1976). Ce réservoir présente peu de fuites. Seules, l'eau de la source T3 (Bord de mer), prélevée par Tonani (1963), et celle de la source Thomas, située au sud de Bouillante, ont des caractéristiques similaires au fluide produit par les forages. Cependant, la source T3 avait disparu en 1984 (Iundt et Ouzounian, 1984a). L'eau de la source Thomas proviendrait d'un réservoir intermédiaire, alimenté à la fois par l'eau du réservoir profond, de l'eau de mer et de l'eau d'origine météorique. Par ailleurs, l'eau de la source Terrain de football, qui n'a pas été retrouvée en 1984, était également constituée de fluide du réservoir profond avec une forte proportion d'eau superficielle.

Les eaux de la plupart des sources thermales, subsuperficielles, sont chauffées par conduction et ne sont pas en relation directe avec le réservoir géothermique (pas de contribution significative du fluide profond). Seuls, les géothermomètres calcédoine, Na-K-Ca ($\beta = 4/3$) et K-Mg, indiquent des valeurs de température convergentes pour chacune de ces sources (ann. 2). Ces valeurs sont toutes inférieures à 80°C.

1.2. REGION SOUFRIERE ET AUTRES

Malgré des températures élevées à l'émergence, qui traduisent des anomalies thermiques importantes, les sources thermales d'autres régions de la Guadeloupe (essentiellement de la région située autour du massif de la Soufrière), étudiées par Tonani (1963), ainsi que Fabriol et Ouzounian (1985), ne présentent pas d'indices significatifs de l'existence de réservoirs chauds profonds. Ces sources semblent être alimentées par des aquifères superficiels, constitués d'eau d'origine météorique et dont la température ne dépasse pas 80°C. Les analyses chimiques et isotopiques des eaux de ces sources sont reportées dans l'annexe 1. Ces eaux sont peu minéralisées et ne forment pas de groupes homogènes. Elles sont de type chloruré-calcique (Carbet et Grosse Corde), de type bicarbonaté-calcique (Dolé et Habitation Revel), ou encore de type sulfaté-calcique (Saint-Charles, Bains Jaunes, Galion, Matouba). Elles ne contiennent ni lithium, ni arsenic détectables et les teneurs en bore sont très faibles. Les calculs géothermométriques sont présentés dans l'annexe 2. Les valeurs de température, estimées par les géothermomètres calcédoine, Na-K-Ca ($\beta = 4/3$) et K-Mg, sont les seules qui convergent pour chaque source et sont toutes inférieures à 80°C. Le géothermomètre, basé sur le fractionnement isotopique entre l'oxygène des sulfates et de l'eau, donne des résultats élevés, non significatifs.

2. Prélèvements et techniques analytiques

2.1. CAMPAGNES DE PRELEVEMENTS

Malgré l'acquisition d'un bon nombre d'analyses chimiques et isotopiques effectuées dans le passé sur la plupart des manifestations présentes, il était nécessaire de réactualiser ces analyses et de les compléter, car elles manquaient souvent d'homogénéité et s'avéraient être souvent incomplètes. La réalisation systématique de nouvelles analyses, telles que la détermination de l'ion bromure (traceur d'origine), celle du lithium, césium, rubidium (indicateurs d'interaction eau-roche), ou encore celle des rapports isotopiques du strontium (traceur à la fois d'origine et d'interaction eau-roche), doit permettre de mieux comprendre l'origine et la circulation des fluides thermaux de la région de Bouillante.

Deux campagnes de prélèvements d'eaux ont été réalisées :

- l'une en septembre 1995 par M. Brach (BRGM) et B. Gauthier (CFG), pendant la période humide ;
- et l'autre, en mai 1996, par M. Brach et B. Sanjuan (BRGM), pendant la saison sèche.

La première campagne, considérée plutôt comme une phase de reconnaissance, a été réalisée principalement sur des sources thermales de la région de Bouillante et de quelques sources d'autres régions (région de la Soufrière et source Sofaïa). Au cours de cette campagne, des sources sous-marines de la région de Bouillante ont été échantillonnées pour la première fois.

Le principal objectif de la deuxième mission était d'effectuer une campagne de prélèvements de fluides aussi complète que possible de l'ensemble des manifestations thermales répertoriées dans la région de Bouillante, depuis le début des études de prospection géothermique. C'est pourquoi l'échantillonnage a été axé uniquement sur les sources de cette région et devait permettre de compléter les résultats obtenus lors de la première mission.

Par ailleurs, cette mission a été mise à profit pour améliorer le mode de prélèvement de l'eau des sources sous-marines échantillonnées au cours de la première campagne. Enfin, cette deuxième campagne, réalisée pendant la période sèche, contrairement à la première effectuée en période humide, pouvait apporter quelques informations sur les conditions d'alimentation des sources thermales de la région de Bouillante (influence des nappes superficielles, vitesse d'alimentation).

2.1.1. Points échantillonnés

Seul, l'ensemble des prélèvements réalisés dans la région de Bouillante est reporté sur la carte de la figure 1. Les prélèvements effectués en dehors de cette région, sortant du cadre principal de cette étude, n'ont pas été reportés sur la carte.

a) Première campagne de prélèvements (septembre 1995)

Au cours de cette campagne, les points d'eau échantillonnés ont été :

- Région de Bouillante :

- . cinq sources thermales de la région de Bouillante (Lise, Bain Curé, rivière Bouillante aval, Dieudonné, source dans la cave du forage BO2),
- . plusieurs sources chaudes sous-marines (Pointe à Lézard à 10 et 23 m de profondeur, Ilet Pigeon à 22 et 54 m de profondeur),
- . l'eau de mer,
- . l'eau de pluie (plusieurs prélèvements entre la période du 12-09-95 et 13-11-95 ont été réalisés par G. Hamouya à la station du Houelmont de l'observatoire de l'IPG).

- Région de la Soufrière :

- . cinq sources thermales (Joséphine, Carbet 2ème chute, Rivière Grosse Corde, Habitation Revel, Bains Jaunes).

- Autre région :

- . la source thermale Sofaïa.

b) Deuxième campagne de prélèvements (mai 1996)

Au cours de la deuxième campagne, seules des points d'eau de la région de Bouillante ont été échantillonnés dont :

- huit sources thermales (Lise, Bain Curé, anse Marsolle, rivière Bouillante amont, Tuyau, une source située entre ravine Blanche et BO4, anse Thomas, ravine Renoir aval, près de l'anse à la Barque) ;
- deux sources chaudes sous-marines (Pointe à Lézard, à -10 m et Ilet Pigeon, à -23 m) ;
- deux "zones chaudes" (maison Cabarrus, plage proche du forage BO3 et du cimetière) ;
- le forage BO2 ;
- la ravine Renoir à deux points différents (près de l'anse à la Barque) ;
- la rivière Bouillante ;

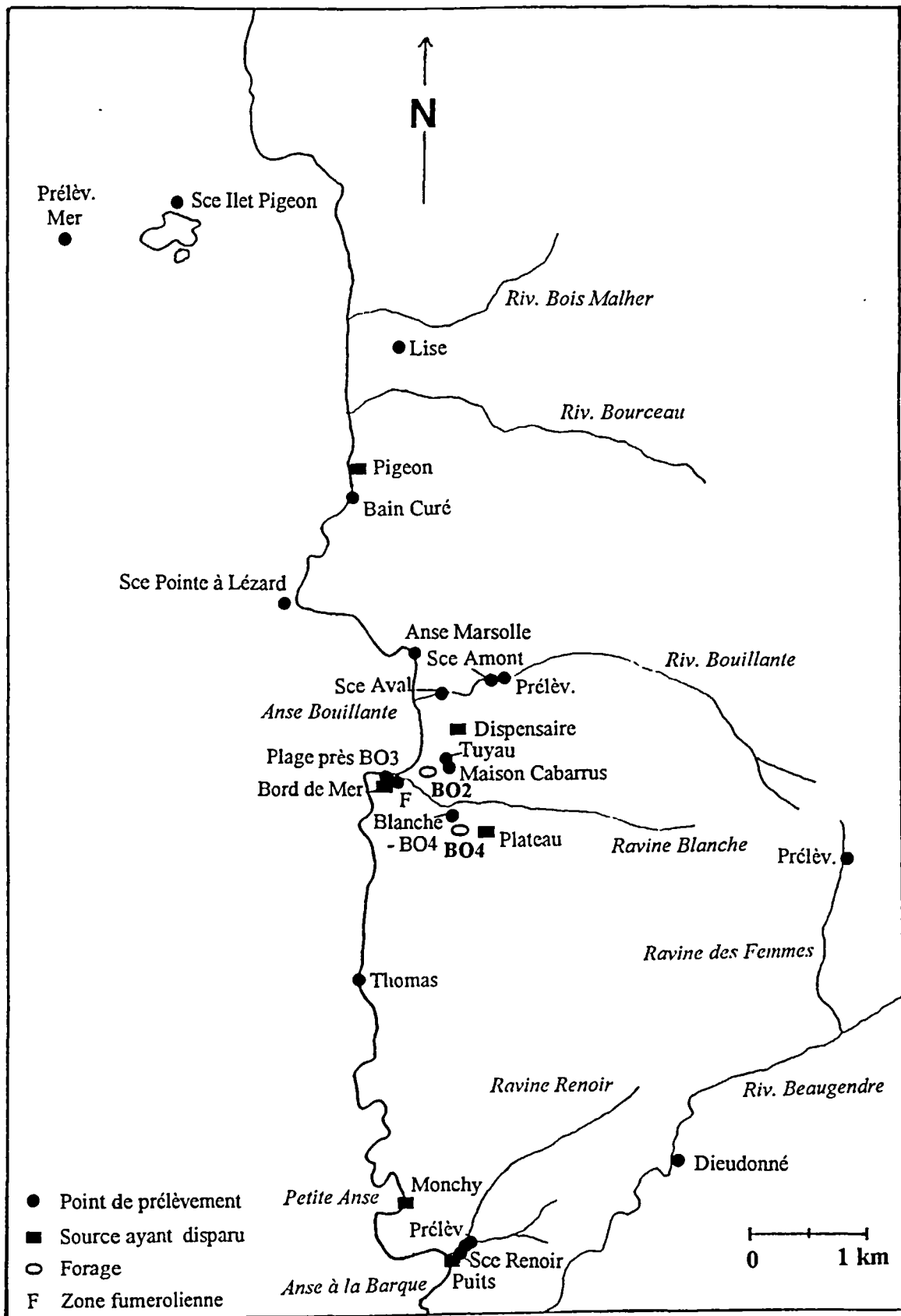


Fig. 1 - Localisation des prélèvements réalisés dans la région de Bouillante (sept. 95 - mai 96).

- la ravine des Femmes ;
- la mer (prélèvement réalisé en haute mer au large de l'îlet Pigeon et à 8 m de profondeur).

Ces trois derniers échantillons, ainsi que celui de l'eau de pluie, serviront respectivement de référence en tant qu'eaux de surface et eau de mer de la région de Bouillante.

Plusieurs sources signalées dans l'étude de prospection géochimique appliquée à la géothermie, réalisée en 1963 par Tonani, ont été recherchées mais n'ont pas été trouvées. Il s'agit des sources : Terrain de football, Bord de mer, Plateau, Dispensaire, NE Terrain de football (fig. 1).

La disparition des trois premières sources avait déjà été indiquée dans des études effectuées par Iundt et Ouzounian (1984a). Le nouvel emplacement du terrain de football et la construction d'habitations récentes ne permettent pas de repérer facilement les sources Terrain de football et NE Terrain de football. Il se peut que la "zone chaude" trouvée dans la cour de la maison Cabarrus, où une température de 97°C a été mesurée, corresponde à une de ces deux sources. La disparition de la source Plateau, située au bord d'une route et près du forage BO4, nous a été confirmée par un habitant de Bouillante. En ce qui concerne la source Dispensaire, qui se situait derrière le dispensaire et dont le débit était décrit comme très faible en 1984, des habitants de cette zone nous ont indiqué que cette source avait disparu après la construction de leur maison.

Malgré une recherche intensive, la source située à l'aval de la rivière Bouillante (fig. 1), émergeant sur la rive gauche, sous un bloc de roches, qui avait été échantillonnée lors de la première mission, n'a pas été retrouvée.

La source Pigeon (fig. 1), décrite par Iundt et Ouzounian (1984a), n'a pas non plus été repérée. En revanche, des eaux d'évacuation provenant du centre "UCPA" ruisselaient par deux endroits différents le long d'une falaise avant de se jeter dans la mer, dans la zone où était censée se situer cette source.

Enfin, la source de Petite Anse à Monchy et le puits situé sur un terrain en bord de mer à l'anse à la Barque, décrits dans des études précédentes (fig. 1), n'ont pas pu être échantillonnés à cause de perturbations engendrées par le passage des deux cyclones de l'année dernière. Ainsi, la source de Petite Anse, située à environ à 2 m de la plage et à 40 cm de profondeur dans la mer, a été recouverte par un énorme rocher qui empêche tout prélèvement. Cependant, trois prélèvements d'eau ont été réalisés de l'autre côté de la route, le long de la ravine Renoir, dans une cocoteraie. A notre connaissance, ces prélèvements ont été effectués pour la première fois. La composition de l'eau du prélèvement le plus chaud (BO9621) semble être proche de celle du puits.

c) Prélèvements de gaz et de condensats de vapeur d'eau

Bien que n'ayant pas été prévus initialement dans cette étude, quelques prélèvements de gaz, et parfois de condensats de vapeur d'eau, ont été réalisés au cours des deux campagnes.

Les gaz émanant des sources sous-marines (échantillons BO9512 et BO9513), de la source cave du forage BO2 (échantillon BO9504), du forage BO2 et d'une zone fumerollienne située près du pont sur la ravine Blanche et du cimetière de Bouillante (échantillons BO9624B et BO9624C), ont été prélevés dans des ampoules en verre de 250 ml.

Des condensats de vapeur d'eau associés aux gaz de la zone fumerollienne ont également été collectés (échantillons BO9624B et BO9624C). Un prélèvement de condensat de vapeur a été réalisé sur les forages BO2 et BO4 (échantillons BO9631B et BO9632B). Il a été décidé de réaliser sur tous ces condensats des analyses isotopiques de deutérium et d'oxygène-18. Pour certains, des analyses de chlorure, de bore et de bromure ont aussi été effectuées.

2.1.2. Description sommaire des sites et conditions de prélèvement dans la région de Bouillante

a) Sites ne posant pas de problèmes de prélèvements

Les prélèvements d'eau des sources Lise, Bain du Curé, rivière Bouillante aval et amont, près de BO2, Tuyau, ravine Blanche-BO4, ravine Renoir aval, Dieudonné, ainsi que ceux effectués dans les rivières et les ravines, ne demandent pas de conditions de prélèvement particulières. Les sites sont faciles d'accès et pour trois d'entre eux (Bain du Curé, rivière Bouillante amont, Tuyau), l'eau est prélevée à partir d'un tuyau de captage.

L'embouchure de la ravine Renoir forme un système hydrologique relativement complexe, car en plus de la présence d'eau thermale, de l'eau de mer vient se mélanger à l'eau de la ravine. Des mesures de conductivité le long de la ravine ont permis de déterminer la fin de cette zone de mélange. Néanmoins, nous avons découvert un peu plus en amont une portion d'eau saumâtre comprise entre deux zones d'eau douce. Un des prélèvements (BO9622) concerne cette eau saumâtre, alors que l'autre a été effectué dans l'eau douce située encore plus en amont (BO9623).

b) Zone chaude de la maison Cabarrus

Le prélèvement d'eau effectué dans cette "zone chaude", dans une cavité protégée par une grille qui se trouve dans la cour de la maison Cabarrus, n'est sans doute pas représentatif d'une émergence. En effet, les habitants de la maison versent régulièrement de l'eau du réseau urbain afin de refroidir cette cavité où il règne, à sec, une température de 97°C. Même si le prélèvement a été réalisé après avoir interrompu tout versement

d'eau du réseau pendant deux jours, il est possible que l'eau prélevée dans le fond boueux et bullant de cette cavité soit un résidu de l'eau du réseau.

c) Sites en bordure de mer

Pour les sources situées au bord de la mer (anse Marsolle, anse Thomas) et la "zone chaude" de la plage qui se trouve près du forage BO3, l'échantillonnage a été réalisé à marée basse, afin d'éviter ou de minimiser l'introduction d'eau de mer dans les échantillons prélevés.

Le prélèvement d'eau de la source de l'anse Marsolle, qui émerge parmi les rochers légèrement au-dessus du niveau de la mer, s'est avéré être assez aisé, si ce n'est qu'il fallait surveiller l'arrivée des vagues.

Par contre, il n'a pas été possible d'éviter un mélange entre l'eau de la source de l'anse Thomas et l'eau de mer, car l'émergence de cette source débouche directement dans la mer à travers une fissure. Pour minimiser la proportion d'eau de mer dans le mélange, nous avons isolé l'émergence de cette source, à l'aide d'une plaque en bois, et les prélèvements ont été réalisés lorsque d'importantes arrivées d'eau chaude parvenaient jusqu'à l'émergence (le débit de cette source n'était pas régulier).

Pour prélever de l'eau dans la "zone chaude" de la plage proche du forage BO3, un trou qui se remplissait d'eau au fur et à mesure que l'on creusait, a été fait avec une pelle américaine sur la plage, à environ 1 m de la mer.

d) Sources chaudes sous-marines

Pour réaliser les prélèvements d'eau des sources chaudes sous-marines situées près de la pointe à Léopard et de l'îlet Pigeon, les mêmes plongeurs ont participé aux deux campagnes d'échantillonnage. D'après ces derniers, le passage des deux cyclones en 1995 avait bouleversé quelque peu la localisation des émergences des sources chaudes, surtout de celles qui étaient près de l'îlet Pigeon.

Afin d'améliorer les prélèvements effectués lors de la première mission, qui avaient été réalisés à l'aide d'une pompe à main, une pompe péristaltique alimentée par un groupe électrogène et équipée de 50 m de tuyau avec, au bout, un flacon d'un litre renversé et dépourvu de son col, a été installée sur le bateau. L'utilisation de ce dispositif de prélèvement a permis un bon échantillonnage de ces sources, car la remontée de l'eau échantillonnée était très rapide, et il suffisait aux plongeurs de bien placer le flacon renversé sur l'émergence de la source. Au début, l'eau prélevée était versée dans des bocaux, afin de suivre les valeurs de conductivité et de pH. Dès que ces valeurs devenaient très différentes de celles de l'eau de mer et se stabilisaient, les prélèvements étaient déclenchés. L'homogénéité de l'eau prélevée a été systématiquement contrôlée par des mesures de conductivité et de pH, réalisées avant et après chaque remplissage de flacon de prélèvement. Ces valeurs sont toujours restées très stables.

La source prélevée près de l'îlet Pigeon a été trouvée à 23 m de profondeur. Son débit était assez fort et sa température, à l'émergence, était de 52°C. De l'eau de mer a également été prélevée au large de la côte, au cours du trajet entre l'îlet Pigeon et Pointe à Lézard. Près de cette pointe, les plongeurs ont repéré deux sources relativement proches l'une de l'autre, et à environ 10 m de profondeur. Seule, la source qui avait le débit le plus fort a été prélevée. La température mesurée de l'eau chaude était de 92°C. Une zone où se dégageaient essentiellement des bulles nous a été signalée par les plongeurs mais, faute de temps, aucun prélèvement de gaz n'a été réalisé.

e) Forages BO2 et BO4

Les prélèvements d'eau et de condensat de vapeur du forage BO2 ont été réalisés au cours de la deuxième campagne d'échantillonnage, alors que le forage fonctionnait sans interruption depuis un mois environ, qu'il produisait approximativement 80 % d'eau et 20 % de vapeur. Les échantillons d'eau et de condensat de vapeur ont été prélevés, après le séparateur, respectivement aux points de piquage eau haute pression et vapeur haute pression, en utilisant à chaque fois le même serpentin de refroidissement.

Remarque. La qualité des prélèvements d'eau est médiocre, car les tuyaux utilisés pour relier les points de piquage au serpentin de refroidissement avaient des fuites. Or, celles-ci ont pour principal effet de concentrer la composition chimique de l'eau récupérée sans que l'on puisse connaître le facteur de concentration.

Au cours d'une campagne de mesures de pression dans le forage BO4 en mai 1996, un prélèvement de fond du fluide de ce forage a été réalisé à 650 m de profondeur, à l'aide d'un préleveur Fuster, par la CFG. Malheureusement, il ne nous est parvenu de ce prélèvement qu'un échantillon dilué dix fois avec de l'eau déionisée. En conséquence, les analyses isotopiques correspondantes n'ont pas pu être réalisées.

2.1.3. Mesures sur le terrain et conditionnement des échantillons

Plusieurs paramètres, tels que le débit des eaux, leur température à l'émergence, leur conductivité à 20°C, leur pH, leur Eh, leur oxygène dissous et leur alcalinité (titration avec acide chlorhydrique, méthode de Gran), ont été mesurés sur le terrain. Les résultats sont reportés dans le tableau 1 (p. 24 et 25). Remarquons que pour la plupart des points d'eau prélevés dans les études précédentes, on retrouve des données similaires. Il est à noter, cependant, que la température, à l'émergence de la source Tuyau, est supérieure d'environ 5°C à celles qui avaient été mesurées dans les études antérieures.

Des mesures de radon ont été réalisées uniquement au cours de la première campagne et indiquent des valeurs élevées pour les sources Cave forage BO2 et Sofaïa (tabl. 1). Compte tenu des valeurs mesurées et de leur important mélange avec l'eau de mer, les teneurs en radon des eaux des sources sous-marines doivent être également élevées. Il avait été prévu de mesurer sur place le radon et l'hélium dissous et/ou libres pendant la

deuxième campagne. Cependant, ces mesures n'ont pas pu être réalisées. Pour le radon, ce sont des problèmes liés à l'affichage numérique électronique du scintillateur (écran éteint car accumulateurs déchargés et non rechargeables) qui n'ont pas permis les analyses, alors que plusieurs échantillons avaient déjà été conditionnés. En ce qui concerne l'hélium, la panne du spectromètre, expédié depuis Orléans, liée à un choc accidentel, n'a pas permis de réaliser de mesures.

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

- 100 ml d'eau brute (non filtrée et non acidifiée) pour les analyses isotopiques de deutérium et d'oxygène-18 ;
- 100 ml d'eau filtrée à 0,45 µm pour l'analyse des anions Cl, SO₄ et Br ;
- 3 x 100 ml d'eau filtrée à 0,45 µm puis acidifiée à l'acide nitrique Suprapur pour l'analyse des cations Na, K, Ca, Mg et Si, des traces Sr, Ba, Mn, B, Li, As, Rb et Cs ainsi que des isotopes du strontium.

Exceptionnellement, les fluides des forages BO2, BO4 et de la source située dans la cave du forage BO2, riches en silice dissoute, ont été dilués sur place d'un facteur 10 avec de l'eau déionisée pour l'analyse de la silice en solution. Pour certains échantillons, il a aussi été prélevé :

- 1 l d'eau brute (non filtrée et non acidifiée) pour l'analyse isotopique de tritium ;
- 2 l d'eau brute pour la détermination des teneurs en soufre-34 et en oxygène-18 des sulfates dissous dans l'eau.

2.2. TECHNIQUES ANALYTIQUES

Les analyses chimiques, isotopiques et gazeuses ont été réalisées dans les laboratoires centraux du BRGM, à Orléans.

• Analyses chimiques

- les cations majeurs Na, Mg et les éléments traces Sr, Ba, Mn, B, Li, As, Rb, Cs ont été analysés à l'aide d'un spectromètre en torche à plasma, couplé à un spectromètre de masse (ICP-MS) ;
- les cations majeurs K et Ca ont été déterminés par absorption atomique en flamme ;
- les anions majeurs Cl, SO₄ et l'anion trace Br ont été analysés par chromatographie ionique ;
- la silice dissoute a été déterminée par colorimétrie (heptamolybdate).

Suivant la valeur des concentrations des espèces en solution et la salinité de l'eau, les incertitudes analytiques relatives varient de 2 à 5 % pour les espèces majeures et de 10 à 15 % pour les éléments traces. En ce qui concerne l'analyse de la silice dissoute, l'incertitude est de 2 %.

• *Analyses isotopiques*

Toutes les analyses isotopiques (teneurs en ^{18}O , D, ^3H , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans les eaux et teneurs en ^{18}O et ^{34}S des sulphates dissous) ont été réalisées par spectrométrie de masse. Pour l'analyse des teneurs en ^{18}O et D sur des échantillons d'eaux fortement minéralisées, ceux-ci ont été préalablement lyophilisés. Le tritium n'a pas pu être déterminé dans le fluide du forage BO2, en raison de problèmes analytiques.

Les incertitudes sur les mesures des teneurs en ^{18}O , D, ^3H , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans les eaux, ainsi que celles sur les teneurs en ^{18}O et ^{34}S des sulphates dissous, sont, respectivement, 0,1 ‰, 0,8 ‰, 1 UT, 0,00001, 0,3 ‰ et 0,3 ‰.

• *Analyses de gaz*

Les gaz libres suivants : CO_2 , N_2 , O_2 , He, H_2 , H_2S , Ar, CH_4 , éthane, propane, butane et pentane, ont été analysés par chromatographie en phase gazeuse dans les échantillons de gaz.

L'incertitude relative sur les mesures est de 3%, excepté pour les gaz He, H_2 , H_2S où elle est de 5 %.



3. Résultats et discussion

3.1. REGION DE BOUILLANTE

3.1.1. Résultats

Les résultats des analyses chimiques et isotopiques sont respectivement reportés dans les tableaux 1 et 2. Pour les sources déjà analysées dans des études antérieures (ann. 1), on retrouve des résultats similaires. On peut distinguer à nouveau deux grands types d'eaux : des eaux chlorurées-sodiques relativement minéralisées et des eaux bicarbonatées sodiques possédant une faible minéralisation (< 0,5 g/l). La salinité des échantillons varie de 0,22-0,26 g/l (rivière Bouillante et ravine des Femmes, source Dieudonné) à 36 g/l (eau de mer). Les valeurs de pH sont comprises entre 6 et 8,2.

On peut constater que la composition chimique des eaux des sources Bain du Curé et Lise en éléments majeurs est semblable et très proche de celle de l'eau de la rivière Bouillante et de la ravine des Femmes. Par ailleurs, ces eaux, qui ont été les seules à être échantillonnées à la fois pendant la période sèche et la période humide, n'ont pas subi de modifications significatives d'une période à l'autre.

La composition chimique du fluide au fond du forage BO2 a été calculée en considérant les proportions de liquide et de vapeur, lors de la séparation du fluide en surface. Normalement, les proportions utilisées auraient dû être respectivement : 80 % de liquide et 20 % de vapeur. Cependant, compte-tenu des mauvaises conditions de prélèvement (légères fuites dans les tuyaux), qui ont eu pour effet d'augmenter la proportion de vapeur, les calculs de correction ont été réalisés avec des proportions de liquide-vapeur égales à 76-24 %. Pour aboutir à ces valeurs, nous avons supposé que la valeur de la teneur de silice dissoute du fluide du réservoir était égale à celle qui correspondait à une température de 242°C (géothermomètre quartz). La composition chimique et isotopique du fluide du forage BO2 ainsi obtenue (tabl. 1 et 2) est en bon accord avec des résultats antérieurs (Fabriol et Ouzounian, 1985 ; Abou Akar *et al.*, 1992). La salinité de ce fluide est d'environ 20 g/l. Elle est légèrement supérieure à celle du fluide du forage BO4 (18 g/l), qui a été prélevé directement au fond du forage.

Les études antérieures (Iundt et Ouzounian, 1984a, 1984b ; Fabriol et Ouzounian, 1985) et un examen rapide des résultats d'analyses chimiques et isotopiques suggèrent que les principaux processus qui influencent la composition chimique des eaux thermales de la région de Bouillante sont :

- la contribution d'eau d'origine météorique ;
- l'apport d'eau de mer ;
- l'interaction eau-roches volcaniques à température plus ou moins élevée ;
- les mélanges d'eaux.

Campagne 95

point de prélèvement	réf.	T°C °C	cond. mS/cm	pH	Eh mV	O ₂ mg/l	Radon cpm	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄ méq/l	Alc. méq/l	SiO ₂
<i>Bouillante</i>															
source Bain Curé	9501	39.6	0.34	7.38	104	10	27	1.81	0.15	0.47	0.16	0.80	0.07	2.26	1.27
source Riv. Bouillante (aval)	9502	47.2	0.554	7.43	99	9.6	42	3.18	0.20	0.50	0.26	1.80	0.09	3.07	1.68
source Lise	9503	35.2	0.316	7.19	142	10	52	1.84	0.10	0.30	0.24	0.77	0.05	2.18	1.27
source Cave forage BO2	9504	97.4	27.2	5.89	-165	n.d.	181	175	13.00	36.00	0.27	270	0.77	1.20	2.39
source Dieudonné	9508	23.9	0.208	6.81	109	9.6	3	0.79	0.10	0.37	0.24	0.83	0.05	1.10	1.22
<i>Mer</i>															
Ilet Pigeon (54 m)	9505	31.6	51	8.06	n.a.	n.a.	n.a.	450	10.50	10.20	58.04	543	28.1	2.10	n.d.
Ilet Pigeon (54 m)	9506C	34.1	50.3	8.06	17	10	4	448	11.50	11.60	57.73	550	27.4	2.38	n.d.
Ilet Pigeon (22 m)	9507B	31.2	47.9	6.96	-5.8	8.2	6	440	12.30	16.50	55.20	540	26.5	2.23	0.27
Ilet Pigeon (22 m)	9507C	n.d.	46.1	n.a.	n.a.	n.a.	9	410	12.70	21.80	49.79	530	24.5	2.10	0.69
Pointe Léopard (23 m)	9512B	n.d.	47.3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	451	11.60	11.00	57.23	550	27.7	2.35	0.03
Pointe Léopard (10 m)	9513B	30.7	48.5	7.37	n.a.	n.a.	8	440	11.60	11.70	56.08	545	28.0	2.20	0.19
		n.d.	48.5	5.76	n.a.	n.a.	n.a.	439	11.30	10.70	54.58	534	27.7	2.10	n.d.
<i>Soufrière</i>															
source Joséphine	9509	23.4	0.11	6.20	n.a.	n.a.	n.a.	0.40	0.05	0.20	0.12	0.49	0.08	0.47	0.76
source Carbet (2ème chute)	9510	43.4	1.89	6.20	n.a.	n.a.	54	4.30	0.70	4.00	2.85	12.00	2.80	2.02	1.65
Riv. Grosse Corde	9511	37.7	2.18	6.19	n.a.	n.a.	73	5.00	0.70	4.50	2.66	15.00	1.60	2.00	1.51
source Hab. Revel	9515	34.0	0.247	6.53	n.a.	n.a.	71	1.40	0.10	0.35	0.15	0.45	0.11	1.73	1.17
source Bains Jaunes	9516	27.2	0.831	5.14	218	n.a.	37	1.50	0.10	2.80	1.10	1.50	3.70	0.35	1.42
<i>Divers</i>															
source Sofaïa	9514	29.0	0.186	3.50	-112	n.a.	152	0.46	0.05	0.10	0.09	0.49	0.38	n.d.	0.09

n.a. : non analysé ; n.d. : non déterminé

Campagne 95

point de prélèvement	réf.	Br	B	Sr	Li	Mn	Ba	Rb	Cs	As	S+ méq/l	S- méq/l	B. I. %	TDS mg/l	Br/Cl molaire
<i>Bouillante</i>															
source Bain Curé	9501	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	3.22	3.20	0.62	319	n.a.
source Riv. Bouillante (aval)	9502	2.63E-03	1.05E-02	1.24E-03	2.13E-03	4.55E-06	1.16E-05	2.49E-04	3.84E-06	4.81E-05	4.91	5.05	-2.78	469	1.46E-03
source Lise	9503	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	3.02	3.05	-0.92	306	n.a.
source Cave forage BO2	9504	4.20E-01	7.78E-01	1.63E-01	3.27E-01	2.58E-02	1.75E-02	1.45E-02	1.79E-03	3.82E-03	261.30	273.16	-4.44	15908	1.55E-03
source Dieudonné	9508	1.75E-03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2.11	2.03	3.77	217	2.11E-03
<i>Mer</i>															
Ilet Pigeon (54 m)	9500	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	596.98	601.30	-0.72	34654	n.a.
Ilet Pigeon (54 m)	9505	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	598.19	607.18	-1.49	34894	n.a.
Ilet Pigeon (54 m)	9506C	n.a.	4.73E-01	1.00E-01	4.65E-02	5.19E-03	5.78E-04	2.30E-03	1.51E-04	2.07E-03	595.97	595.23	0.12	34457	n.a.
Ilet Pigeon (22 m)	9507B	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	565.88	581.10	-2.65	33319	n.a.
Ilet Pigeon (22 m)	9507C	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	599.05	607.75	-1.44	34959	n.a.
Pointe Léopard (23 m)	9512B	n.a.	4.55E-01	8.91E-02	3.14E-02	3.49E-03	2.09E-04	2.12E-03	6.32E-05	1.23E-03	587.38	603.20	-2.66	34572	n.a.
Pointe Léopard (10 m)	9513B	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	580.49	591.50	-1.88	34002	n.a.
<i>Soufrière</i>															
source Joséphine	9509	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1.09	1.12	-2.71	121	n.a.
source Carbet (2ème chute)	9510	1.41E-02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	18.70	19.63	-4.87	1274	1.18E-03
Riv. Grosse Corde	9511	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	20.01	20.20	-0.93	1286	n.a.
source Hab. Revel	9515	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2.50	2.40	4.08	256	n.a.
source Bains Jaunes	9516	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	9.39	9.25	1.53	693	n.a.
<i>Divers</i>															
source Sofaïa	9514	1.25E-03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1.21	1.25	-3.27	78	2.55E-03

Hydrochimie du champ géothermique de Bouillante (Guadeloupe)

Tabl. 1 - Analyses chimiques réalisées à la suite des deux campagnes de prélèvement. Campagnes 1995 et 1996 (les concentrations des espèces sont exprimées en mmol/l).

Campagne 96 (Région de Bouillante)

source	réf.	T °C	débit approx. l/mn	cond. (20°C) mS/cm	pH	Eh mV	O ₂ diss. mg/l	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	Alc. méq/l	SiO ₂
Mer (prof. 8 m, au large de l'Îlet Pigeon)	9600	28.7	n.a.	46.5	8.2	n.a.	n.a.	460	11.40	11.10	59.00	560	29.0	2.20	0.003
Source Bain Curé	9601	39.0	2	0.334	7.4	108	10	1.78	0.10	0.50	0.15	0.82	0.07	2.13	1.36
Source Lise	9603	35.7	n.a.	0.3	7.26	-8	2	1.78	0.10	0.30	0.25	0.76	0.05	2.05	1.28
Maison Cabarrus	9617A	97.3	n.a.	0.377	7.43 (32°C)	102	5.5	0.67	n.a.	1.20	0.28	0.45	1.24	n.a.	0.64
Source ravine Blanche-BO4	9618	29.2	très faible	1.34	7.84	145	n.a.	11.00	0.90	0.70	0.16	7.50	0.50	4.78	1.35
Tuyau (près Centrale)	9619	60.5	3.1	3.4	6.29 (60°C)	110	2.8	18.92	1.10	5.30	0.46	26.20	0.98	2.56	2.11
Source anse Thomas	9620	54.6	n.a.	36	7.18	55	4.7	300	8.10	11.10	40.00	388	18.3	1.91	1.29
Anse à la Barque															
Source ravine Rénier (aval)	9621	36.9	n.a.	2.7	7.63	20	6.1	16.05	0.50	1.70	2.87	20.60	1.01	2.68	1.60
Ravine Rénier (intermédiaire)	9622	29.2	n.a.	27.2	7.29	-12	1.8	190	4.70	5.00	23.29	227	11.0	2.92	0.81
Ravine Rénier (amont)	9623	28.7	n.a.	0.937	7.36	31	7	6.83	0.40	0.50	0.52	5.97	0.14	2.86	1.49
Plage (près BO3)	9624A	81.0	n.a.	36	6.80 (74°C)	126	n.a.	280	17.10	45.50	21.79	415	2.50	0.80	2.02
	9624C	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.48	0.09	n.a.	n.a.
Rivière Bouillante	9625	26.9	n.d.	0.236	7.83	120	7.5	1.07	0.15	0.40	0.27	0.62	0.03	1.76	0.84
Source Riv. Bouillante (amont)	9626	29.6	2.7	0.323	7.13	104	6.1	1.29	0.25	0.50	0.40	0.90	0.04	2.25	1.24
Source anse Marsolle	9627	44.3	10	2.29	7.18	135	5.8	7.44	0.40	1.10	0.52	7.80	0.30	2.73	1.45
Source pointe à Léopard (prof. 10 m)	9628	92.0	n.a.	40.2	6.05 (29°C)	n.a.	n.a.	351	15.00	25.30	41.72	481	17.3	2.66	2.18
Source îlet Pigeon (prof. 23m)	9629	52.0	n.a.	43.7	6.81 (30°C)	0	3.5	430	12.00	20.80	53.81	550	27.1	2.32	0.71
Ravine des Femmes	9630	24.6	1.3	0.235	7.42	n.a.	7	0.96	0.10	0.50	0.26	0.52	0.04	2.00	1.11
Forage BO2 (eau)	9631A	34.4	76%	34.9	7.19	-112	n.a.	280	25.50	59.50	0.06	433	0.18	0.33	10.00
Forage BO2 (corrigé)	9631A							213	19.38	45.22	0.04	329	0.14	0.25	7.60
Forage BO2 (condensat vapeur)	9631B	30.2	24%	0.048	4.45	-223	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.68	0.05	n.a.	n.a.
Forage BO4	9632	35.0	n.a.	28.4	6.01	-216	n.a.	191	14.00	45.00	0.04	300	0.30	n.a.	4.72

Campagne 96 (Région de Bouillante)

source	réf.	Br	B	Sr	Li	Mn	Ba	Rb	Cs	As	S+	S-	B. I.	TDS	Br/Cl
		még/l	még/l	%	mg/l	molaire									
Mer (prof. 8 m, au large de l'Îlet Pigeon)	9600	8.44E-01	4.57E-01	8.86E-02	1.74E-02	2.18E-05	4.08E-05	1.43E-03	3.76E-06	8.01E-04	611.80	621.04	-1.50	35754	1.51E-03
Source Bain Curé	9601	1.38E-03	5.09E-03	9.37E-04	5.19E-04	5.10E-06	5.32E-05	1.61E-04	1.43E-06	2.00E-05	3.18	3.09	2.73	316	1.68E-03
Source Lise	9603	1.50E-03	5.27E-03	6.62E-04	2.59E-04	9.65E-05	2.99E-05	1.03E-04	7.52E-07	2.27E-05	2.99	2.91	2.54	297	1.98E-03
Maison Cabarrus	9617A	n.d.	5.05E-03	2.88E-03	1.59E-04	8.83E-03	4.69E-04	9.13E-05	6.02E-07	1.33E-05	3.65	2.93	n.d.	245	n.d.
Source ravine Blanche-BO4	9618	8.76E-03	1.64E-02	1.54E-03	6.07E-03	6.64E-04	7.28E-04	1.67E-04	1.66E-06	4.94E-05	13.63	13.29	2.57	1008	1.17E-03
Tuyau (près Centrale)	9619	4.47E-02	4.25E-02	1.85E-02	1.95E-02	1.83E-02	7.16E-04	1.65E-03	1.94E-04	2.67E-04	31.63	30.76	2.77	2015	1.71E-03
Source anse Thomas	9620	5.79E-01	4.16E-01	7.10E-02	6.11E-02	2.73E-03	8.81E-04	2.36E-03	1.92E-04	1.76E-03	410.51	427.09	-3.96	24397	1.49E-03
Anse à la Barque															
Source ravine Rénier (aval)	9621	3.57E-02	1.70E-02	7.17E-03	2.57E-03	2.55E-04	4.30E-05	2.45E-04	5.34E-06	7.87E-05	25.70	25.34	1.43	1617	1.73E-03
Ravine Rénier (intermédiaire)	9622	3.31E-01	1.81E-01	3.56E-02	3.75E-03	4.79E-02	1.10E-03	6.10E-04	< 4.00E-06	6.27E-04	251.46	252.25	-0.31	14684	1.46E-03
Ravine Rénier (amont)	9623	9.76E-03	1.29E-02	1.64E-03	< 3.00E-05	2.35E-02	2.83E-04	1.21E-04	< 1.50E-07	2.67E-06	9.32	9.12	2.15	697	1.64E-03
Plage (près BO3)	9624A	6.19E-01	1.16E+00	1.96E-01	4.39E-01	5.70E-03	1.01E-02	1.59E-02	1.73E-03	3.26E-03	432.55	421.42	2.61	24668	1.49E-03
	9624C	n.d.	5.08E-03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.					n.a.
Rivière Bouillante	9625	n.d.	3.51E-03	7.86E-04	< 3.00E-05	2.91E-05	2.77E-05	5.15E-05	< 1.50E-07	4.00E-06	2.57	2.44	5.18	236	n.d.
Source Riv. Bouillante (amont)	9626	1.50E-03	3.79E-03	9.59E-04	3.31E-04	2.18E-05	2.69E-05	8.66E-05	7.52E-07	6.67E-06	3.34	3.23	3.45	317	1.67E-03
Source anse Marsolle	9627	1.16E-02	2.06E-02	3.41E-03	6.60E-03	3.28E-06	5.68E-05	3.73E-04	2.11E-05	4.67E-05	11.09	11.14	-0.45	804	1.49E-03
Source pointe à Léopard (prof. 10 m)	9628	7.11E-01	6.99E-01	6.54E-02	1.16E-01	2.24E-02	1.03E-03	5.69E-03	4.27E-04	6.67E-04	500.50	518.97	-3.62	29769	1.48E-03
Source îlet Pigeon (prof. 23m)	9629	8.37E-01	5.26E-01	1.29E-01	7.57E-02	2.24E-02	5.58E-04	3.44E-03	2.66E-04	9.48E-04	591.61	607.36	-2.63	34869	1.52E-03
Ravine des Femmes	9630	n.d.	2.03E-03	9.78E-04	< 3.00E-05	1.62E-05	1.60E-05	3.39E-05	3.01E-07	5.34E-06	2.59	2.60	-0.53	263	n.d.
Forage BO2 (eau)	9631A	6.42E-01	1.33E+00	2.26E-01	5.61E-01	8.19E-02	5.83E-02	3.45E-02	2.58E-03	7.14E-03	425.95	434.33	-1.95	25916	1.48E-03
Forage BO2 (corrigé)	9631A	4.88E-01	1.01E+00	1.71E-01	4.26E-01	6.23E-02	4.43E-02	2.62E-02	1.96E-03	5.43E-03				19696	1.48E-03
Forage BO2 (condensat vapeur)	9631B	n.d.	8.69E-04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.					n.a.
Forage BO4	9632	4.60E-01	1.02E+00	1.77E-01	3.76E-01	7.39E-02	2.08E-02	1.54E-02	1.72E-03	2.00E-03	295.54	301.06	-1.85	17755	1.53E-03

Tabl. 1 (suite) - Analyses chimiques réalisées à la suite des deux campagnes de prélèvement. Campagnes 1995 et 1995 (les concentrations des espèces sont exprimées en mmol/l).

Campagne 95

point de prélèvement	référence	T°C	³ H UT	δ ¹⁸ O ‰ vs SMOW	δD ‰ vs SMOW	δ ¹⁸ O (SO ₄) ‰ vs SMOW	δ ³⁴ S (SO ₄) ‰ vs CDT	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
<i>Bouillante</i>								
source Bain Curé	9501	39.6	<1	-2.8	-8.5	8.7	9.6	n.a.
source Riv. Bouillante (aval)	9502	47.2	<1	-3	-10.6	9.0	12.0	n.a.
source Lise	9503	35.2	<1	-2.4	-7.6	9.0	11.6	n.a.
source Cave forage BO2	9504	97.4	2	-1.1	-3	9.2	11.5	0.704783
source Dieudonné	9508	23.9	3	-2.4	-9.6	4.9	16.5	n.a.
<i>Mer</i>								
Mer	9500	31.6	2	0.2	3.8	n.a.	n.a.	n.a.
Ilet Pigeon (54 m)	9505	34.1	<1	0.7	5.4	n.a.	n.a.	n.a.
Ilet Pigeon (54 m)	9506C	31.2	2	0.6	6.6	n.a.	n.a.	n.a.
Ilet Pigeon (22 m)	9507C	n.a.	2	0.6	5.5	n.a.	n.a.	n.a.
Pointe Lézard (23 m)	9512A	30.7	<1	0.7	6.3	n.a.	n.a.	n.a.
Pointe Lézard (23 m)	9512B	30.7	<1	0.5	5.1	9.1	n.a.	n.a.
Pointe Lézard (10 m)	9513B	n.a.	2	0.6	5.2	8.8	n.a.	n.a.
<i>Soufrière</i>								
source Joséphine	9509	23.4	2	-1.9	-4.7	5.2	6.9	n.a.
source Carbet (2ème chute)	9510	43.4	2	-2.7	-6.4	6.3	4.9	n.a.
Riv. Grosse Corde	9511	37.7	2	-2.4	-5.9	10.6	9.4	n.a.
source Hab. Revel	9515	34.0	<1	-2.3	-6.2	9.1	11.4	n.a.
source Bains Jaunes	9516	27.2	<1	-2.8	-6.3	9.2	6.7	n.a.
<i>Divers</i>								
source Sofaïa	9514	29.0	2	-2.6	-7.3	12.2	9.4	n.a.
Pluie (observatoire)	9517	n.a.	n.a.	-3.5	-16.4	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. : non analysé

Campagne 96 (Région de Bouillante)

source	référence	T °C	³ H UT	δ ¹⁸ O ‰ vs SMOW	δD ‰ vs SMOW	δ ¹⁸ O (SO ₄) ‰ vs SMOW	δ ³⁴ S (SO ₄) ‰ vs CDT	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
Mer (prof. 8 m, au large de l'ilet Pigeon)	9600	28.7	n.a.	0.4	7.1	n.a.	n.a.	0.709137
Source Bain Curé	9601	39.0	n.a.	-2.8	-7.8	n.a.	n.a.	0.704066
Source Lise	9603	35.7	n.a.	-2.6	-8.2	n.a.	n.a.	n.a.
Maison Cabarrus	9617A	97.3	n.a.	2.7	-0.3	n.a.	n.a.	n.a.
Source entre ravine Blanche et BO4	9618	29.2	n.a.	-2.5	-9.9	n.a.	n.a.	0.704661
Tuyau (près Centrale)	9619	60.5	n.a.	-2.6	-9.5	n.a.	n.a.	0.704726
Source anse Thomas	9620	54.6	n.a.	-0.5	1.1	n.a.	n.a.	0.707976
Anse à la Barque								
Source ravine Renoir (aval)	9621	36.9	n.a.	-2.5	-8.6	n.a.	n.a.	0.708126
Ravine Renoir (intermédiaire)	9622	29.2	n.a.	-0.3	1.8	n.a.	n.a.	n.a.
Ravine Renoir (amont)	9623	28.7	n.a.	-2.0	-6.1	n.a.	n.a.	n.a.
<i>Plage (près BO3)</i>								
condensat fumerolle pont	9624B	n.a.	n.a.	-7.6	-35.6	n.a.	n.a.	n.a.
condensat fumerolle plage	9624C	n.a.	n.a.	9.8	38.9	n.a.	n.a.	n.a.
Rivière Bouillante	9625	26.9	n.a.	-2.6	-6.7	n.a.	n.a.	n.a.
Source Riv. Bouillante (amont)	9626	29.6	n.a.	-2.7	-8.3	n.a.	n.a.	n.a.
Source anse Marsolle	9627	44.3	n.a.	-2.6	-8.1	n.a.	n.a.	0.705170
Source pointe à Lézard (prof. 10 m)	9628	92.0	n.a.	-0.2	3.8	n.a.	n.a.	0.706668
Source îlet Pigeon (prof. 23m)	9629	52.0	n.a.	0.4	5.6	n.a.	n.a.	0.707613
Ravine des Femmes	9630	24.6	n.a.	-2.4	-6.2	n.a.	n.a.	0.704294
<i>Forage BO2 (eau)</i>								
Forage BO2 (eau)	9631A	34.4	n.a.	-0.7	1.3	n.a.	n.a.	0.704960
Forage BO2 (corrigé liq.-vap.)	9631A	34.4	n.a.	-1.5	-1.6	n.a.	n.a.	0.704960
Forage BO2 (corrigé vap.)	9631A	34.4	n.a.	-1.5	-1.5	n.a.	n.a.	0.704960
Forage BO2 (condensat vapeur)	9631B	30.2	n.a.	-4.2	-10.8	n.a.	n.a.	n.a.
Forage BO4 (condensat vapeur)	9632B	35.0	n.a.	-0.9	16.0	n.a.	n.a.	n.a.

Tabl. 2 - Analyses isotopiques réalisées à la suite des deux campagnes de prélèvement. Campagne 1995 et 1996, région de Bouillante (les concentrations des espèces sont exprimées en mmol/l).

Nous verrons qu'une exploitation appropriée des résultats analytiques obtenus, suivant le type d'élément chimique analysé, peut permettre de caractériser un ou plusieurs de ces processus.

3.1.2. Origine des eaux

Les ions chlorure et bromure, espèces très solubles, sont souvent utilisés comme indicateurs d'origine des eaux. Dans la figure 2 où sont reportées les concentrations en bromure en fonction de celle en chlorure, les eaux de salinité élevée (> 1 g/l) suivent une droite de mélange qui passe par 0 (eau douce) et par le point qui représente l'eau de mer. La pente de cette droite (rapport Br/Cl) a pour valeur $1,5 \cdot 10^{-3}$, valeur qui caractérise le rapport Br/Cl de l'eau de mer.

Les eaux qui se trouvent proches de l'origine sont des eaux douces (premier groupe). Ce groupe rassemble les eaux de la rivière Bouillante et de la ravine des Femmes ainsi que celles des sources Lise, Bain du Curé et Rivière Bouillante (aval et amont). La similitude des compositions chimiques de ces eaux (faciès bicarbonaté sodique) et leur faible minéralisation ($< 0,5$ g/l) suggèrent que les sources de ce groupe sont essentiellement alimentées par des eaux superficielles d'origine météorique. Les eaux des sources Ravine Renoir (amont) et Ravine Blanche-BO4 sont légèrement plus minéralisées (0,7 et 1 g/l, respectivement) et indiquent un faciès chimique différent (chloruré bicarbonaté sodique). Ces sources sont toutefois incorporées dans le premier groupe, car, comme les précédentes, elles sont principalement alimentées par des eaux superficielles et le rapport molaire Br/Cl de l'eau est différent de celui de l'eau de mer (tabl. 1).

Les eaux plus minéralisées (deuxième groupe), issues à l'origine d'un mélange eau de mer-eau douce, sont représentées par les eaux des forages BO2 et BO4, ainsi que par celles des sources Cave du forage BO2, Thomas, Plage (près du forage BO3), îlet Pigeon, Pointe Lézard, Tuyau et Ravine Renoir (intermédiaire et aval). L'eau de la source Marsolle, bien que très diluée par des apports d'eau douce (minéralisation de 0,8 g/l), conserve, néanmoins un faciès chloruré sodique et un rapport Br/Cl semblable à celui de l'eau de mer (tabl. 1). Elle est donc intégrée dans ce deuxième groupe.

Pour une espèce A et un mélange M composé de deux fluides F1 et F2, en utilisant l'équation de conservation de la masse, il vient :

$$x [A]F1 + y [A]F2 = [A]M$$

$$x + y = 1$$

Les crochets désignent les concentrations. En résolvant ce système de deux équations, on peut calculer les proportions x et y de chaque fluide.

Br (mmol/l)

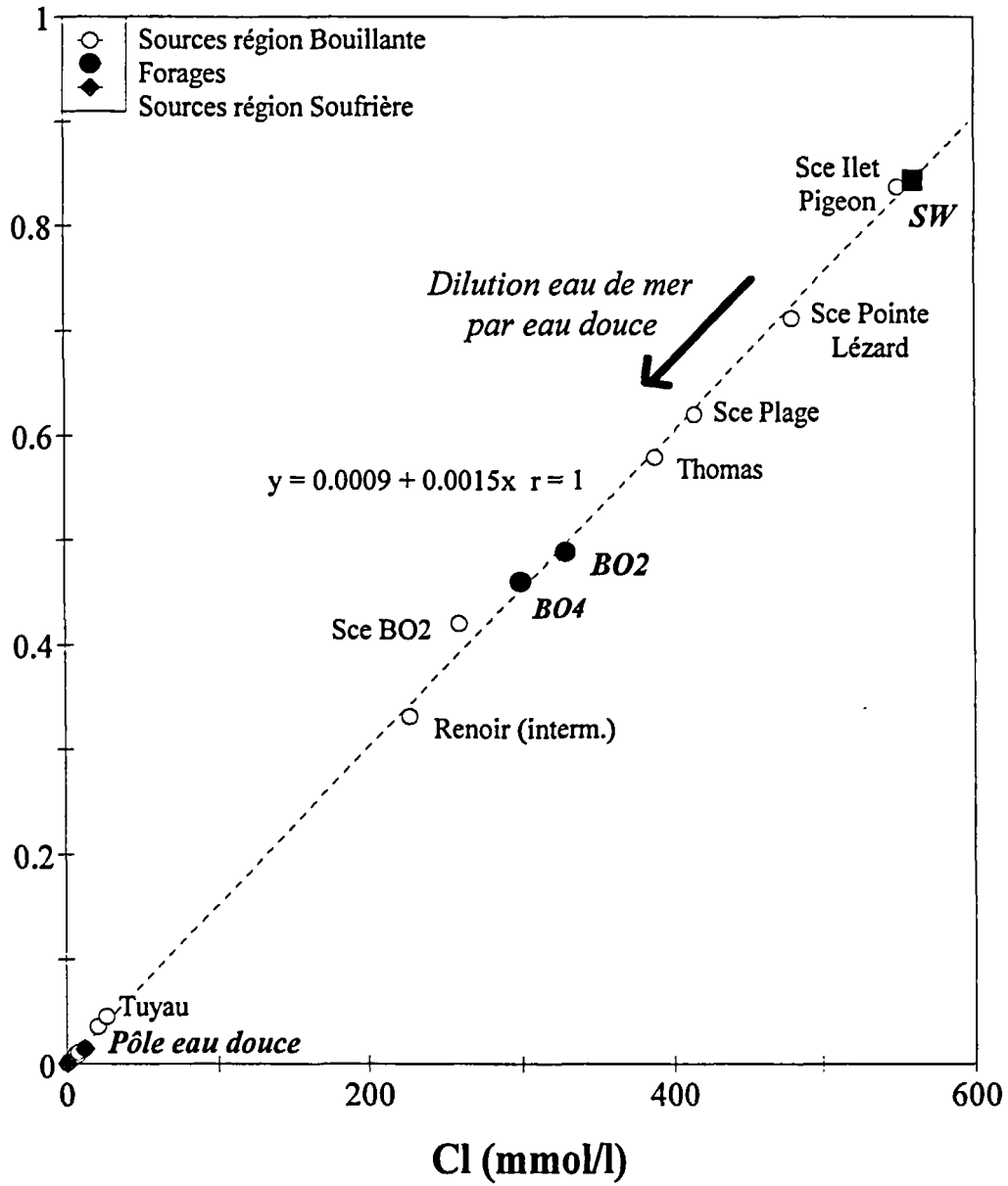


Fig. 2 - Diagramme Br - Cl.

Les équations de mélange appliquées aux concentrations en chlorure et en bromure des fluides des forages BO2 et BO4 donnent :

$x_{\text{eau douce}} = 42 \%$ et $x_{\text{mer}} = 58 \%$ pour le fluide du forage BO2 ;

$x_{\text{eau douce}} = 46 \%$ et $x_{\text{mer}} = 54 \%$ pour le fluide du forage BO4.

Pour les eaux des sources, ces équations n'ont pas été appliquées, car nous allons voir que l'examen des concentrations d'autres éléments met en évidence, dans la plupart des cas, la présence d'un autre pôle de mélange.

Les teneurs isotopiques en deutérium et en oxygène 18 sont souvent utilisées comme indicateurs d'origine de l'eau. Pour les eaux thermales, les teneurs isotopiques en deutérium, élément en très faible proportion dans les roches, sont souvent moins perturbées que celles de l'oxygène-18, qui peuvent être modifiées par interaction avec la roche. Dans ce cas, un enrichissement en isotope lourd (^{18}O) peut être observé.

La figure 3, qui représente les teneurs isotopiques de deutérium en fonction de celles d'oxygène-18, confirme les résultats observés précédents. Elle montre que les eaux douces du premier groupe sont bien constituées essentiellement d'eaux superficielles d'origine météorique. Elles sont situées entre les droites représentant les eaux météoriques mondiales (DEMM ; Craig, 1961) et locales (DEML ; Iundt et Ouzounian, 1984a). Elles ont à peu près la même signature isotopique et proviennent donc de la même aire de recharge, qui est très probablement le versant ouest des Pitons de Bouillante. Le prélèvement de pluie, qui a été réalisé à l'observatoire de la Soufrière, a une signature légèrement différente. Les très faibles teneurs en tritium des eaux des sources Bain du Curé et Lise (tabl. 2) indiquent des temps de résidence relativement long (au moins supérieurs à 40 ans).

Pour les eaux du deuxième groupe, le pôle d'eau douce du mélange, mis en évidence dans la figure 2, semble être constitué d'eaux superficielles semblables à celles du premier groupe (fig. 3). Cependant, dans ce pôle, une contribution partielle de condensat de vapeur, provenant d'un réservoir plus profond et ayant une signature similaire au condensat du forage BO2, ne peut être totalement écarté. Les teneurs isotopiques en δD et $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer sont légèrement supérieures à 0, mais ces valeurs sont caractéristiques des mers fermées (mer des Caraïbes), qui subissent une évaporation sensiblement plus importante que les océans. Il apparaît que le fluide des forages est bien alimenté par de l'eau de mer et non pas par une saumure, qui proviendrait de l'évaporation de l'eau de mer. Si tel était le cas, les points représentant ces fluides suivraient un autre segment de droite dont le pôle constitué par la saumure aurait des valeurs de δD et $\delta^{18}\text{O}$ très différentes de 0.

Le condensat de vapeur provenant du forage BO2, ainsi que celui prélevé dans la fumerolle située près du pont sur la ravine Blanche (BO9624B), indiquent un appauvrissement en isotopes lourds par rapport aux fluides, ce qui est caractéristique d'un processus de vaporisation à des températures inférieures à 220°C.

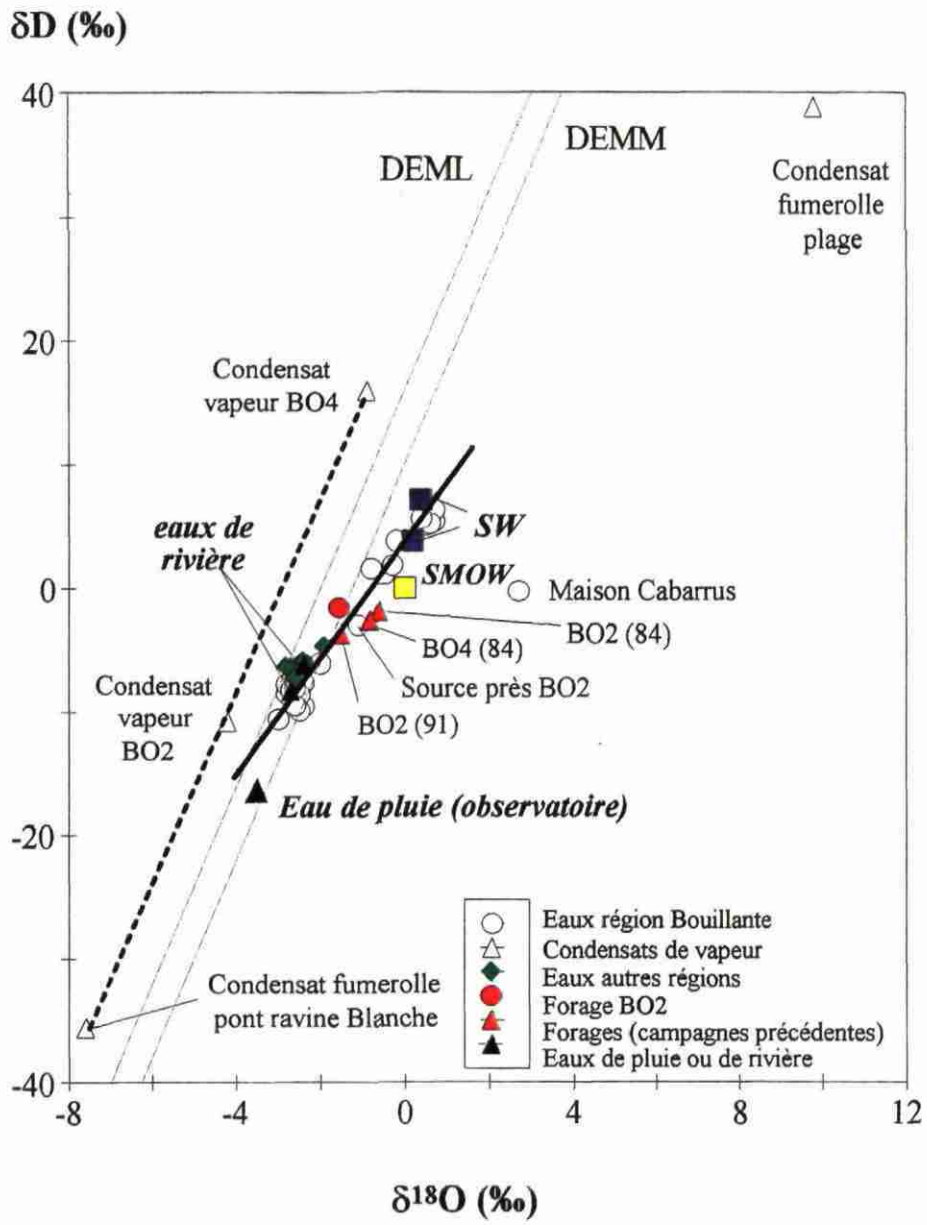


Fig. 3 - Diagramme deutérium - oxygène-18.

Le condensat provenant du forage BO4 montre un appauvrissement en isotopes lourds de l'oxygène, mais un enrichissement en ce qui concerne l'hydrogène. Ceci est en accord avec les valeurs des coefficients de fractionnement entre liquide et vapeur si la température de séparation est supérieure à 220°C. En effet, au-delà de cette température, le coefficient de fractionnement de l'oxygène reste toujours supérieur à 1 alors que pour l'hydrogène, il devient inférieur à 1 (Arnason, 1977). L'alignement de ces trois condensats suivant une droite parallèle aux droites des eaux météoriques locales et mondiales est, par conséquent, probablement causé par des différences de température au cours de la séparation liquide-vapeur d'un même type de fluide, la température de séparation la plus élevée correspondant au forage BO4 (prélèvement de fond) et la plus basse à la fumerolle située près du pont (autour de 100°C). Cette fumerolle pourrait donc être un indice de la présence d'un fluide semblable à celui du forage BO2.

Le condensat d'une fumerolle située près du cimetière et de la plage (BO9624C) semble provenir d'une eau de mer fortement évaporée. Néanmoins, cet échantillon a été prélevé dans des conditions particulières (la vapeur d'eau se condensait sur une roche et était prélevée goutte à goutte dans un flacon situé en dessous de la roche). Par conséquent, ces résultats doivent être considérés avec prudence.

Les valeurs de δD et $\delta^{18}O$ reconstituées pour le fluide du forage BO2 sont légèrement erronées, car les mesures de δD et $\delta^{18}O$ réalisées sur la phase vapeur correspondent à une séparation de 20 % vapeur-80 % liquide (séparateur) et celles effectuées sur l'eau à une séparation de 24 % vapeur-76 % liquide (4 % de fuite de vapeur dans les tuyaux de prélèvement). Les calculs de reconstitution, réalisés avec 24 % de vapeur, ne prennent pas en compte l'effet des 4% de fuite sur les mesures de δD et $\delta^{18}O$ concernant la phase vapeur. Toutefois, l'erreur semble peu importante car les valeurs reconstituées (tabl. 2) sont très proches de celles déterminées par une autre méthode de calcul, qui fait intervenir uniquement les mesures réalisées sur la phase vapeur, ainsi que les coefficients de fractionnement α entre liquide et vapeur pris à 160°C (Arnason, 1977 ; Ferronsky et Polyakov, 1982), température à laquelle se séparent les deux phases dans le forage BO2. On a ainsi :

$$\delta D = 0,8 \delta D_l + 0,2 \delta D_v = 0,8 [\alpha_D (\delta D_v + 1000) - 1000] + 0,2 \delta D_v = -1,46 \text{ ‰}$$

avec $\alpha_D = 1,0118$ et $\delta D_v = -10,8 \text{ ‰}$

$$\delta^{18}O = 0,8 [\alpha^{18}O (\delta^{18}O_v + 1000) - 1000] + 0,2 \delta^{18}O_v = -1,49 \text{ ‰}$$

avec $\alpha^{18}O = 1,0034$ et $\delta^{18}O_v = -4,2 \text{ ‰}$.

Par rapport aux données indiquées dans les études précédentes (ann. 1 et fig. 3), ces valeurs restent comprises dans la gamme d'incertitude liée à leur estimation. Les mesures de δD et $\delta^{18}O$ effectuées sur le fluide du forage BO4 par Iundt et Ouzounian (1984a) sont également proches de ces valeurs.

L'alimentation du réservoir géothermique par un mélange d'eau de mer et d'eau de type météorique, ayant probablement comme aire de recharge les Pitons de Bouillante, semble un scénario vraisemblable et cohérent avec la fracturation tectonique locale, qui

s'exprime par de nombreuses structures majoritairement orientées N100-120° et à pendage vertical. Il est à noter que les teneurs isotopiques en ^{18}O des fluides des forages ne sont pas affectées par l'interaction avec la roche. Vu la température des fluides, ceci indique que les rapports eau-roche et/ou les vitesses de circulation des fluides en profondeur sont relativement élevés. Les faibles teneurs en tritium des eaux prélevées dans les sources sous-marines (tabl. 2) sont dues essentiellement à leurs importantes proportions en eau de mer. Pour la source Cave du forage BO2, la faible valeur mesurée, qui est également influencée par la présence d'eau de mer, suggère néanmoins un temps de résidence supérieur à 40 ans.

La figure 4, qui représente les teneurs en deutérium et en oxygène-18 en fonction des concentrations en chlorure, confirme les résultats déduits des figures 2 et 3 et est en bon accord avec les proportions de mélange calculées pour les fluides BO2 et BO4.

3.1.3. Interactions eau de mer - roches volcaniques

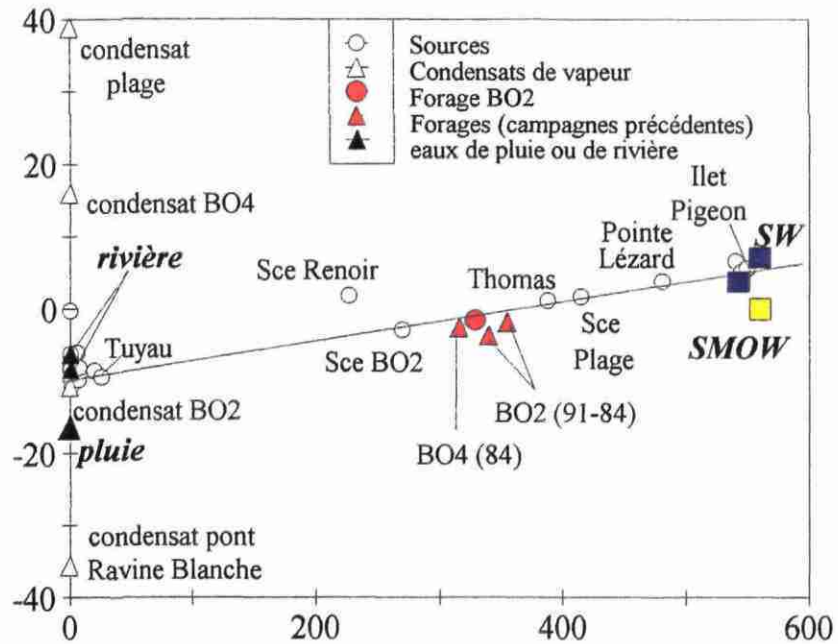
Les formations géologiques de la région de Bouillante sont essentiellement caractérisées par une série volcano-sédimentaire d'environ 2000 m de puissance, comprise entre la surface du sol et le socle. Ce socle pourrait être constitué par les mêmes basaltes océaniques qui forment le substratum de l'île de la Désirade, à l'ouest de la Guadeloupe. Les quatre forages ont traversé une série alternée de laves et de tufs, mais le forage BO4, le plus profond (2 505 m), n'a pas pu atteindre la base de cette série. Deux ensembles lithologiques bien distincts ont été différenciés :

- sur 250 m d'épaisseur environ, à partir de la surface, une formation où des coulées d'andésite sont prédominantes, a été rencontrée ;
- au-dessous de 250 m, une formation où les pyroclastites sont majoritaires a été recoupée.

Les roches de la région de Bouillante couvrent la gamme la plus étendue parmi les volcanites de Basse-Terre. Elles vont du basalte à olivine à la rhyolite vitreuse, en passant par des andésites basiques à deux pyroxènes (et olivine), des andésites acides à orthopyroxène dominant et des dacites éventuellement à quartz et amphibole (Gadalia et Westercamp, 1984). Cependant, les roches affleurant sont principalement des coulées récentes d'andésites et des dépôts de nuées ardentes. La forte proportion de matériel ponceux et pyroclastique y est, en général, remarquable.

La compréhension des réactions chimiques se produisant entre eau de mer et basalte a beaucoup progressé grâce aux études sur les sources hydrothermales sous-marines (Edmond *et al.*, 1982 ; Michard *et al.*, 1984 ; Von Damm *et al.*, 1985) ainsi que sur les sources thermales d'Islande (Tomasson *et al.*, 1972) et de Djibouti (Sanjuan *et al.*, 1990 ; Houssein *et al.*, 1993).

Deutérium



Oxygène-18

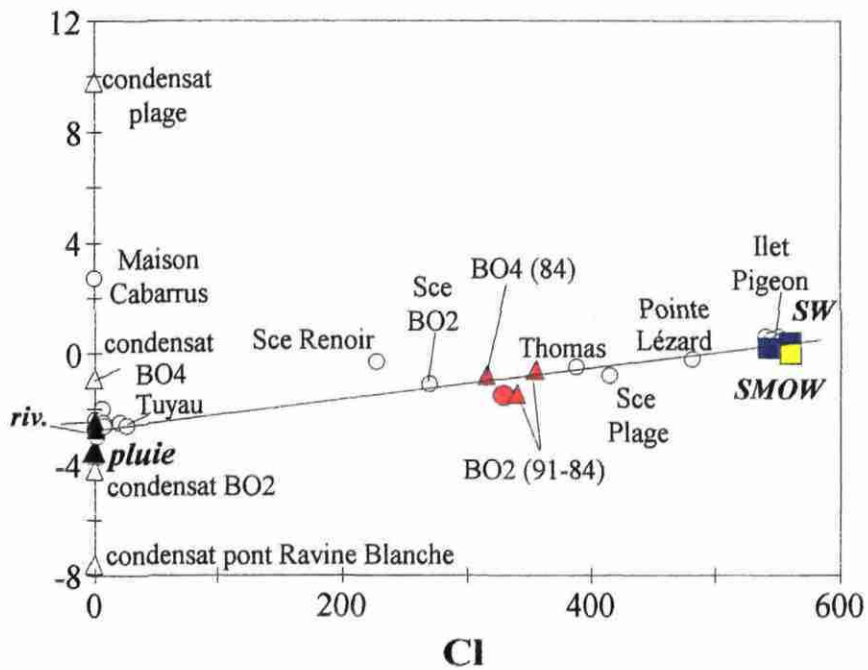


Fig. 4 - Teneurs en deutérium (‰) et en oxygène-18 (‰) en fonction des concentrations en chlorure (mmol/l).

Les expériences en laboratoire (Bischoff and Dickson, 1975) ont aussi contribué à cette progression. L'interaction et l'influence de la température sur cette interaction se traduisent par un appauvrissement complet de la solution en Mg et en SO_4 et un enrichissement en K, Ca, SiO_2 , Sr et Li. Bien que nous ne connaissions pas la nature précise des roches volcaniques qui interagissent avec les eaux thermales de la région de Bouillante, les rapports molaires B/Cl élevés font penser à une interaction dominée par des andésites, qui sont des roches beaucoup plus riches en B que les basaltes (Nicholson, 1993). Nous allons voir, cependant, que les résultats obtenus sur les zones basaltiques peuvent être dans l'ensemble appliqués à ces eaux.

Les éléments solubles et présents en quantité importante dans les roches volcaniques par rapport à leur concentration dans l'eau de mer peuvent être utilisés comme indicateurs de l'interaction eau-roches volcaniques. Le lithium est un traceur particulièrement intéressant car peu de minéraux sont susceptibles de le piéger. Un rapport tel que Li/Cl, indépendant de la dilution par des eaux de surface, peut être un très bon indicateur du degré d'avancement de l'interaction eau-roche (Sanjuan *et al.*, 1990 ; Houssein *et al.*, 1993). Le rapport isotopique du strontium a déjà été utilisé dans ce même but (Albarède *et al.*, 1981 ; Michard *et al.*, 1984). Des éléments tels que Rb, Cs et As, préférentiellement solubilisés à haute température, peuvent aussi servir d'indicateurs de l'intensité d'interaction eau-roche.

La figure 5, qui montre une bonne corrélation entre le rapport isotopique du strontium et le rapport molaire Li/Cl, indique que le lithium n'est pratiquement pas affecté par des réactions de précipitation-dissolution au cours du refroidissement. Cette corrélation rassemble la plupart des eaux du deuxième groupe décrit antérieurement. L'écart constaté pour l'eau de la source Tuyau sera commenté ultérieurement. Les eaux du premier groupe, représentées par l'eau de la ravine des Femmes et des sources Bain du Curé, Ravine Blanche-BO4, qui sont des eaux de surface peu minéralisées et d'origine essentiellement météorique, sont en dehors de la corrélation. On retrouve une corrélation semblable à celle mise en évidence par Sanjuan *et al.* (1990) pour les eaux thermales fortement minéralisées de la région d'Asal, à Djibouti. Ces auteurs ont montré que, dans ce type de diagramme, l'interaction de l'eau de mer avec un basalte suivait le trajet d'une hyperbole équilatère dont l'asymptote horizontale a pour ordonnée le rapport isotopique du basalte. Dans notre cas, le meilleur ajustement du tracé de l'hyperbole par rapport aux résultats analytiques, conduit à un rapport isotopique de la roche en contact avec les eaux thermales de 0,7045. Cette valeur est caractéristique des andésites, mais pourrait aussi appartenir à un basalte (Pilot, 1974).

L'eau n'étant pas prise en compte dans les calculs, l'hyperbole peut représenter soit une variation du degré d'avancement de la réaction roche volcanique-eau de mer, soit une variation des proportions de mélange entre eau de mer et fluide des forages, soit encore des mélanges d'eaux de degré d'avancement différents. Il sera montré, ultérieurement, que pour la majorité des eaux thermales, la deuxième hypothèse est la plus probable.

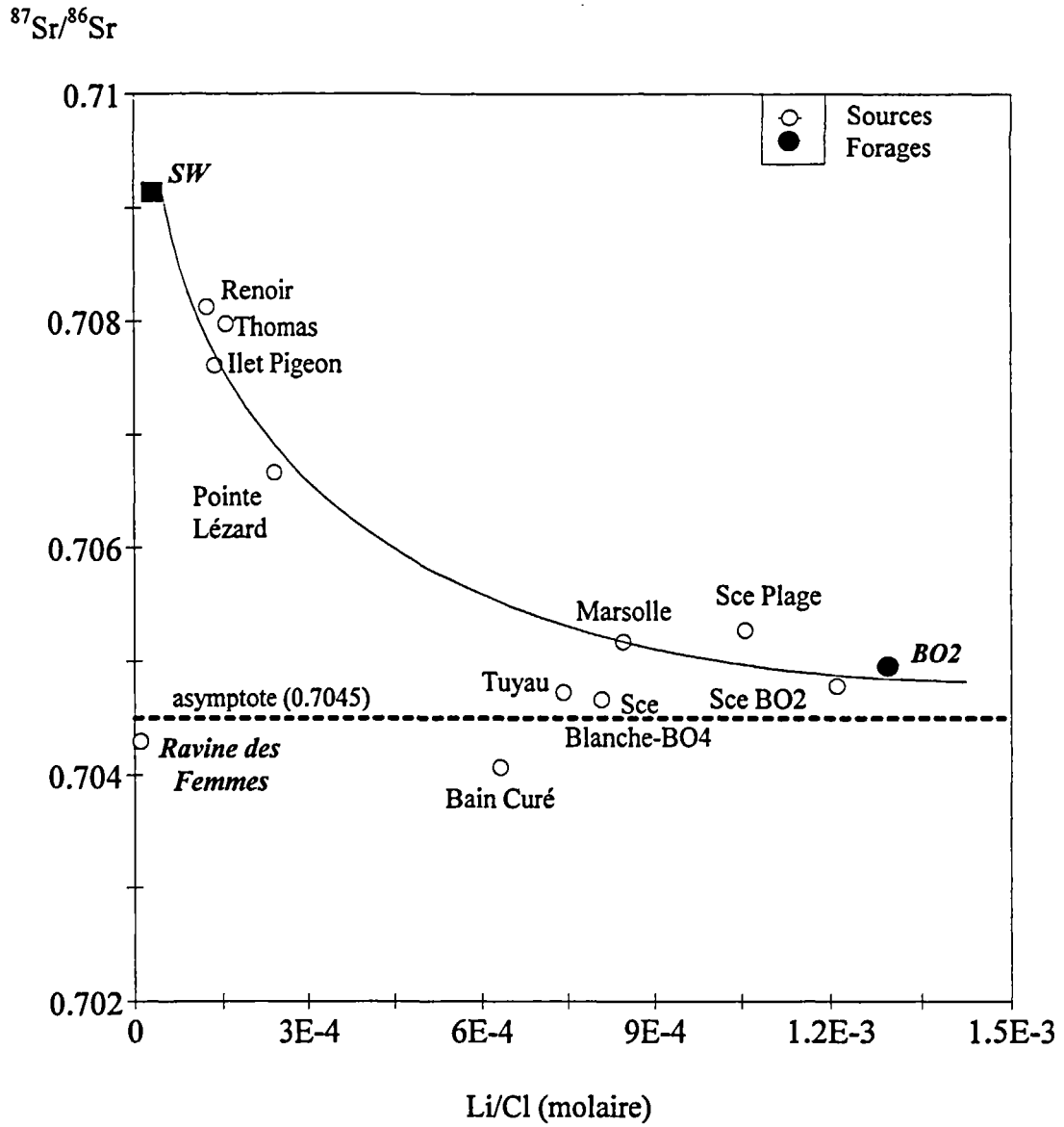


Fig. 5 - Diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - Li/Cl .

Le rapport Li/Cl est d'un emploi plus aisé que le rapport isotopique du strontium pour tester le comportement des autres éléments. La plupart des rapports molaires entre éléments majeurs et chlorure en fonction de Li/Cl (fig. 6 et 7) montrent que les eaux thermales du deuxième groupe s'alignent suivant des droites représentant l'interaction eau de mer-roches volcaniques alors que les eaux du premier groupe sont éparpillées. Comme pour la relation hyperbolique, les relations linéaires peuvent être interprétées comme une variation du degré d'avancement de l'interaction ou des mélanges de fluides de degré d'avancement différents.

Pour les eaux du deuxième groupe, on observe une augmentation régulière des rapports K/Cl, Ca/Cl et une diminution des rapports Na/Cl, Mg/Cl et SO₄/Cl avec un degré d'interaction croissant. Les fluides des forages, qui possèdent le degré d'interaction le plus élevé, sont pratiquement dépourvus de magnésium et de sulfate. On retrouve les résultats observés sur les eaux hydrothermales sous-marines (Michard *et al.*, 1984 ; Von Damm *et al.*, 1985), sur les fluides géothermaux d'Islande (Arnorsson *et al.*, 1983) et de Djibouti (Sanjuan *et al.*, 1990 ; Houssein *et al.*, 1993) ainsi que sur les expériences en laboratoire (Bischoff and Dickson, 1975). Toutes les solutions expérimentales et tous les fluides naturels qui résultent d'une interaction eau de mer-basalte à température supérieure à environ 100°C sont totalement dépourvus de magnésium et de sulfate.

Dans les diagrammes Mg/Cl et SO₄/Cl en fonction de Li/Cl (fig. 6 et 7), les équations des droites obtenues, respectivement :

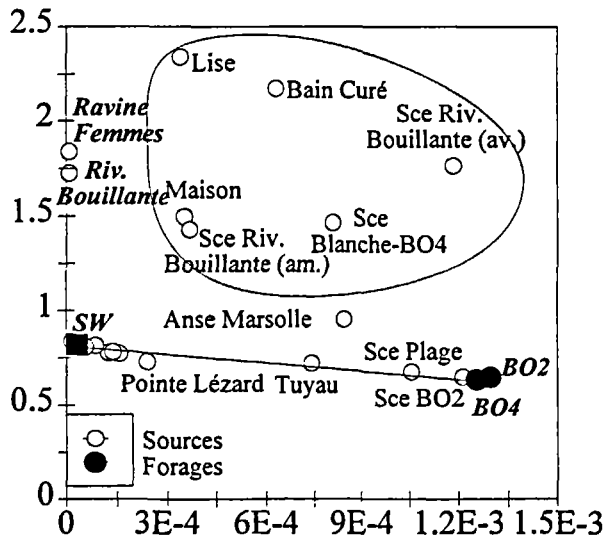
$$y = 0,115 - 90,935 x \quad (r = -0,97 \text{ sur } 11 \text{ points : Tuyau, Marsolle et Plage ont été écartées}),$$
$$y = 0,052 - 41,146 x \quad (r = -0,99 \text{ sur } 12 \text{ points : Tuyau et Marsolle ont été écartées}).$$

montrent que les rapports molaires Mg/Cl et SO₄/Cl s'annulent ($y = 0$) pour une même valeur du rapport Li/Cl ($x = 1,3 \cdot 10^{-3}$). Cette valeur correspond à celle du fluide du forage BO2 et indique ainsi que ce fluide représente, en cas de mélange, le pôle chaud dont sont issues les eaux thermales du deuxième groupe.

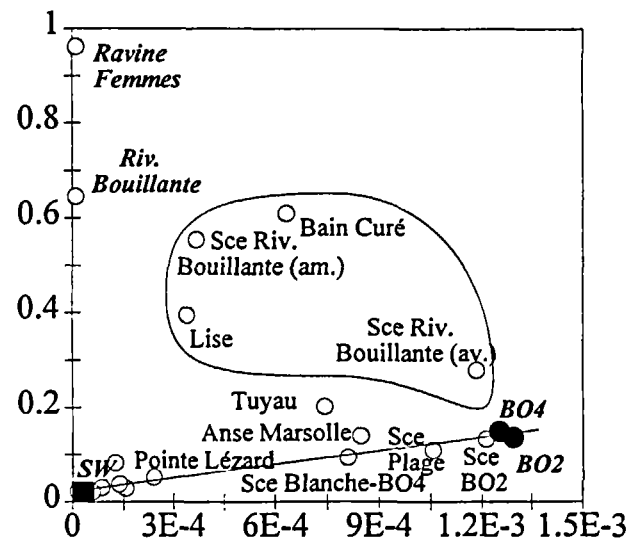
Les éléments traces B, Sr, Rb et Cs (fig. 7 et 8) suivent un comportement semblable à celui des éléments majeurs. On constate, pour les eaux du deuxième groupe, une augmentation régulière (suivant une droite) de tous les rapports éléments traces-chlorures avec un degré d'interaction croissant alors que les eaux du premier groupe sont dispersées. L'enrichissement en bore des eaux du deuxième groupe peut provenir des interactions avec la roche mais aussi de la présence d'une phase vapeur, comme cela a été évoqué par Tonani (1963). Pour les éléments Ba, Mn, As (fig. 8), de nombreuses irrégularités empêchent une corrélation significative.

Il apparaît, dans les diagrammes Ca/Cl, SO₄/Cl et Sr/Cl en fonction de Li/Cl (fig. 6 et 7), que l'eau de la source Tuyau s'écarte des relations linéaires décrites par les autres eaux thermales du deuxième groupe (enrichissement en calcium, sulfate et strontium).

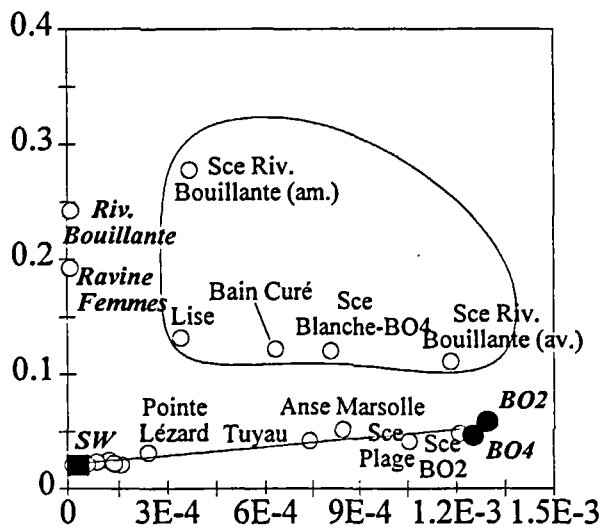
Na/Cl (molaire)



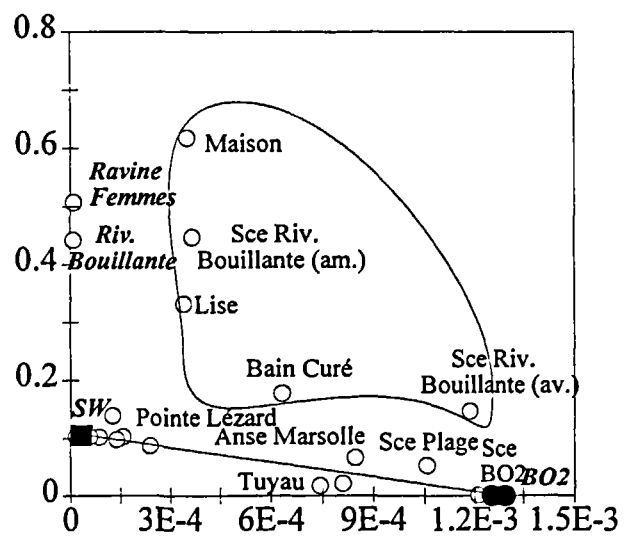
Ca/Cl (molaire)



K/Cl (molaire)



Mg/Cl (molaire)



Li/Cl (molaire)

Li/Cl (molaire)

Fig. 6 - Diagrammes Na/Cl-Li/Cl, K/Cl-Li/Cl, Ca/Cl-Li/Cl et Mg/Cl-Li/Cl.

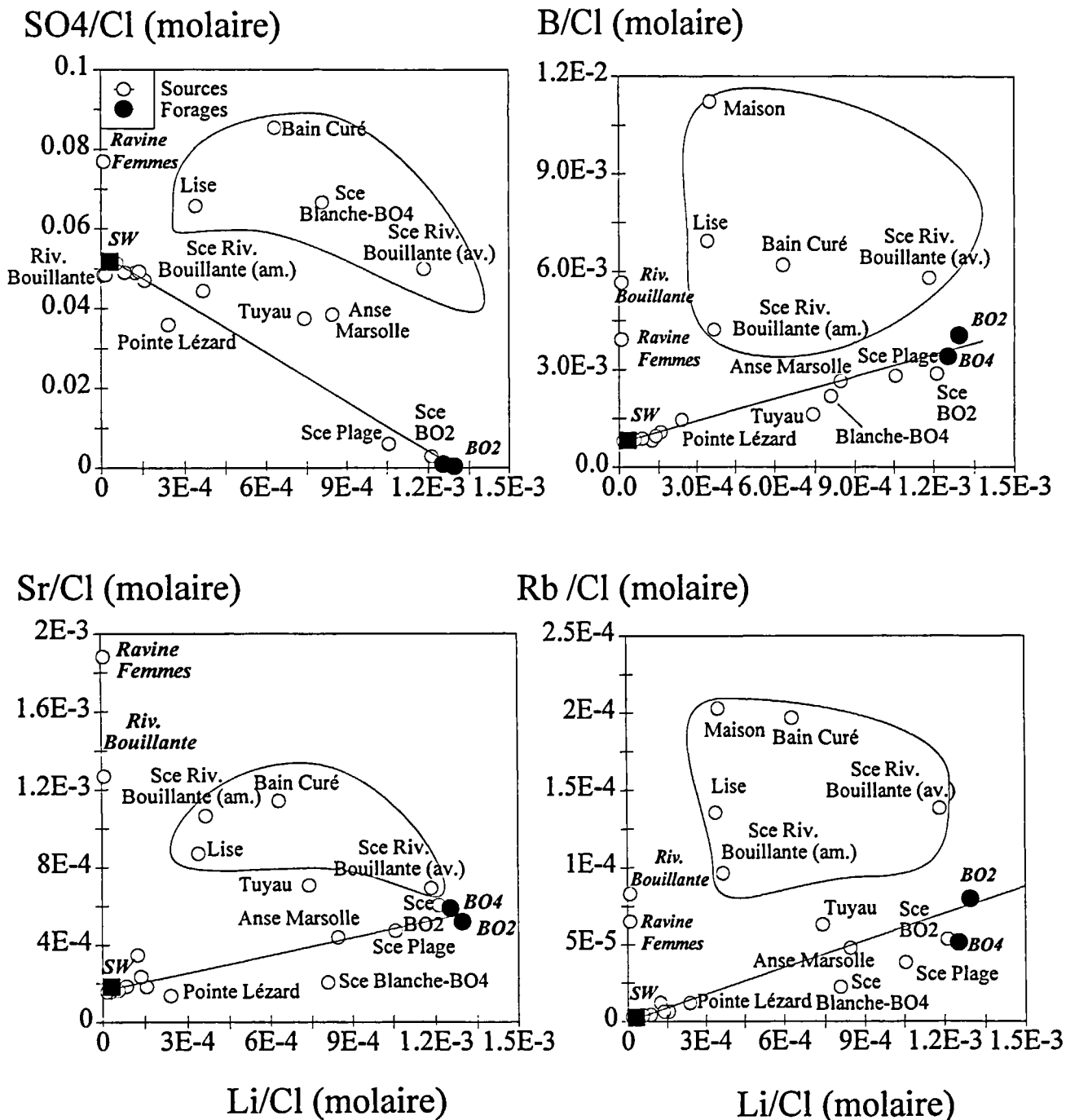
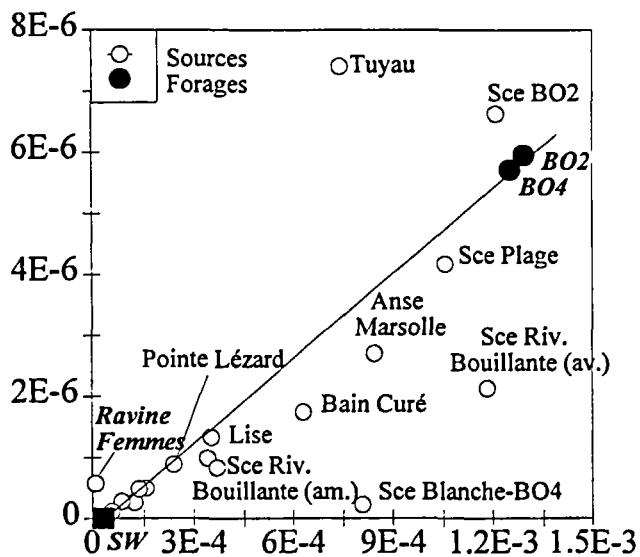
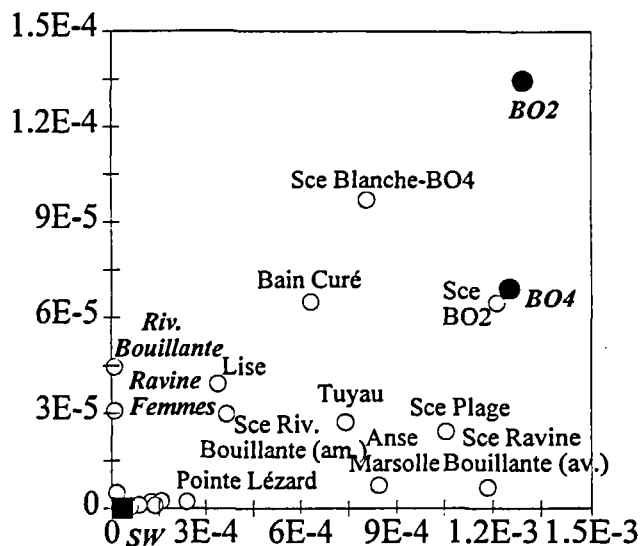


Fig. 7 - Diagrammes SO₄/Cl-Li/Cl, B/Cl-Li/Cl, Sr/Cl-Li/Cl et Rb/Cl-Li/Cl

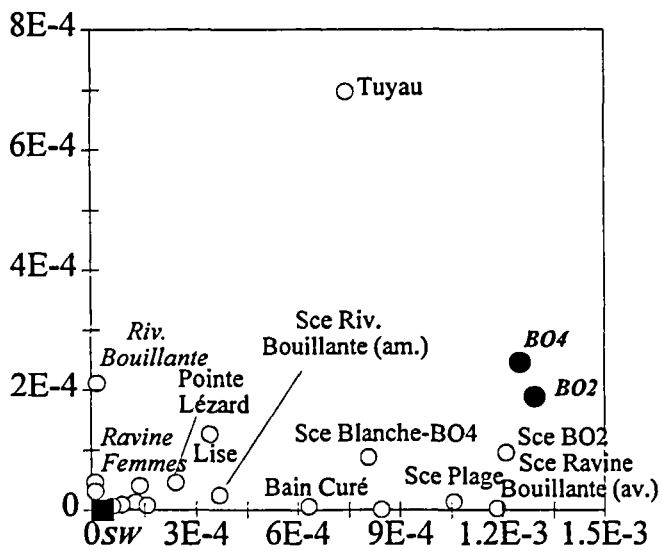
Cs/Cl (molaire)



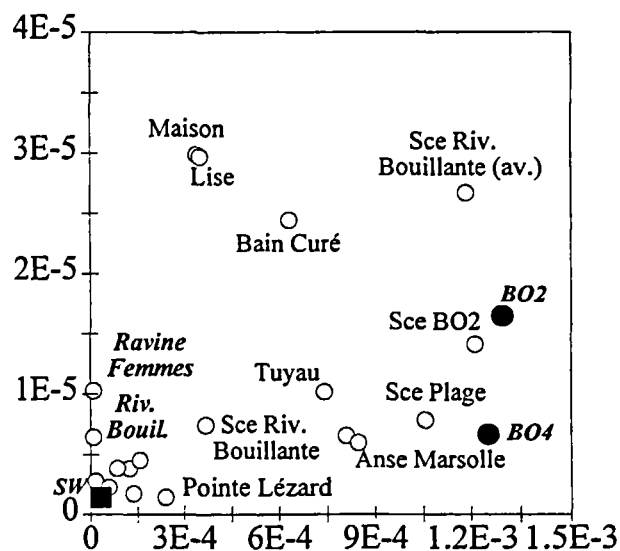
Ba/Cl (molaire)



Mn/Cl (molaire)



As/Cl (molaire)



Li/Cl (molaire)

Li/Cl (molaire)

Fig. 8 - Diagrammes Cs/Cl-Li/Cl, Ba/Cl-Li/Cl, Mn/Cl-Li/Cl et As/Cl-Li/Cl.

Ces anomalies permettent d'expliquer l'écart observé pour cette eau, vis-à-vis de la relation hyperbolique de la figure 5 (apport de strontium lié à un enrichissement en calcium extérieur à un processus d'interaction eau de mer-roches volcaniques). On constate également, pour l'eau de la source Anse Marsolle, des écarts par rapport à certaines relations linéaires (diagrammes Na/Cl et SO₄/Cl en fonction de Li/Cl notamment). Ces différences sont causées par les proportions très importantes d'eau douce de cette source, qui doit posséder des concentrations en sodium et en sulfate significatives. L'eau de la source Ravine Blanche-BO4 s'aligne avec les eaux thermales du deuxième groupe dans les diagrammes représentant les rapports molaires Ca/Cl, Mg/Cl et B/Cl en fonction de Li/Cl (fig. 6 et 7) et sa position dans la figure 5 est assez proche de la relation hyperbolique. Malgré son rapport Br/Cl légèrement différent de celui de l'eau de mer et compte tenu de son origine essentiellement météorique, il n'est pas exclu que cette eau soit composée d'une très faible proportion d'eau de mer et de fluide chaud (fluide du forage BO4 par exemple).

3.1.4. Mise en évidence des processus de mélange

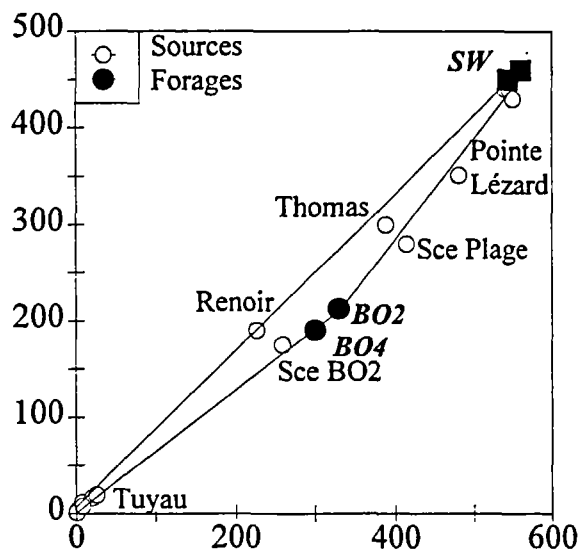
Afin de faciliter la compréhension du système hydrogéochimique, nous avons utilisé des diagrammes binaires. La concentration en chlorure n'étant pas limitée par un minéral dans le domaine étudié, cet élément est utilisé comme référence dans tous les diagrammes (axe des abscisses). L'axe des ordonnées représente les concentrations des autres éléments.

L'examen approfondi des figures 9 à 12 indique que la composition chimique de toutes les eaux du deuxième groupe résulte essentiellement de processus de mélanges entre deux ou même trois types d'eaux. Ces pôles sont :

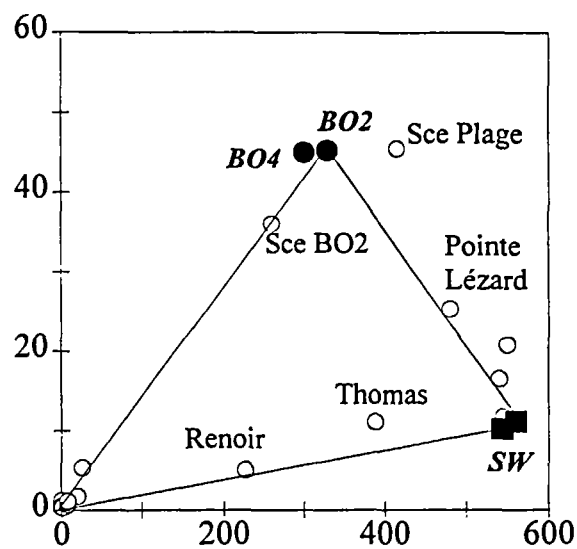
- l'eau de mer ;
- le fluide profond du forage BO2 ;
- l'eau peu minéralisée d'aquifères superficiels.

Bien qu'issu d'un mélange eau de mer-eau douce tout comme le fluide du forage BO2, le fluide du forage BO4 possède une salinité légèrement inférieure, qui témoigne d'une plus grande proportion d'eau douce (46 au lieu de 42 %). Celle-ci, révélée par les concentrations de Cl et Br, est confirmée par d'autres espèces telles que Na, Ca, Li et Cs. La diminution anormale de K, Si, B, Ba, Rb et As du fluide du forage BO4, par rapport à celui du forage BO2, suggère une contribution supplémentaire d'une eau douce superficielle (environ 4 %), qui provoquerait la précipitation ou l'adsorption de ces éléments au cours du mélange avec le fluide profond chaud et son refroidissement résultant. La similitude des compositions chimiques entre les fluides des forages BO2 et BO4 pourrait provenir de leur appartenance commune à un seul réservoir.

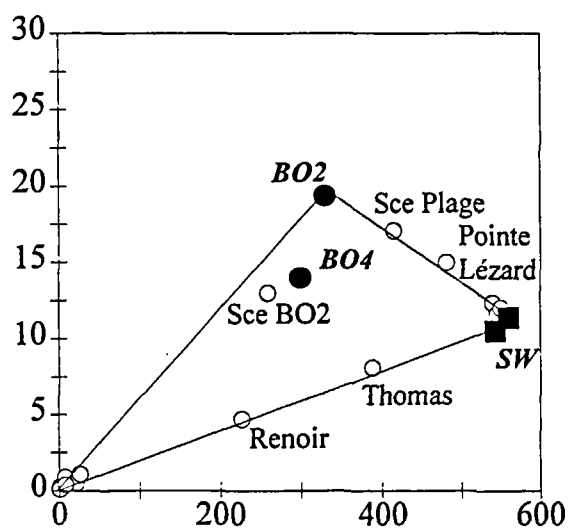
Na (mmol/l)



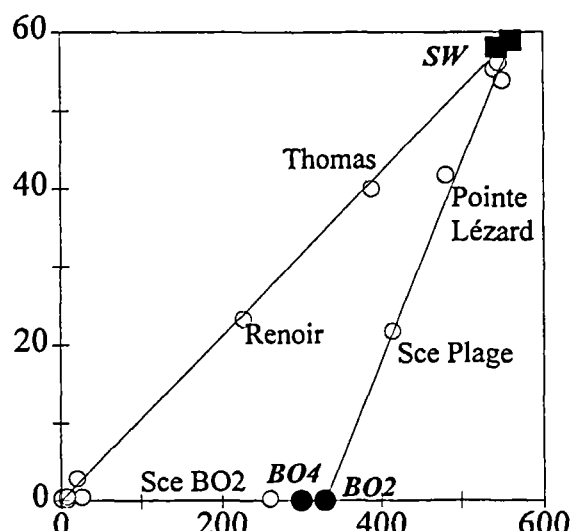
Ca (mmol/l)



K (mmol/l)



Mg (mmol/l)



Cl (mmol/l)

Cl (mmol/l)

Fig. 9 - Diagrammes Na-Cl, K-Cl, Ca-Cl et Mg-Cl.

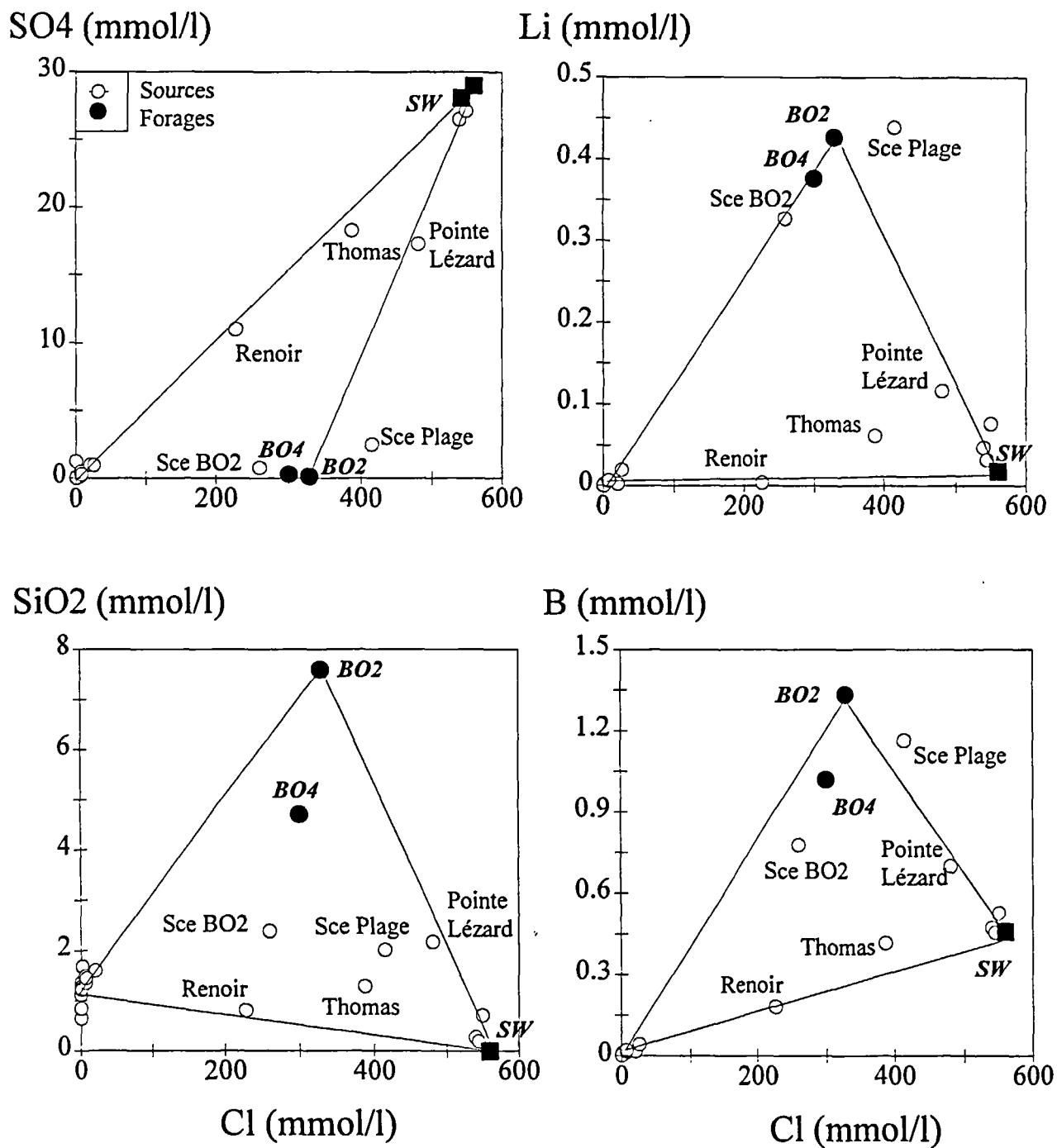
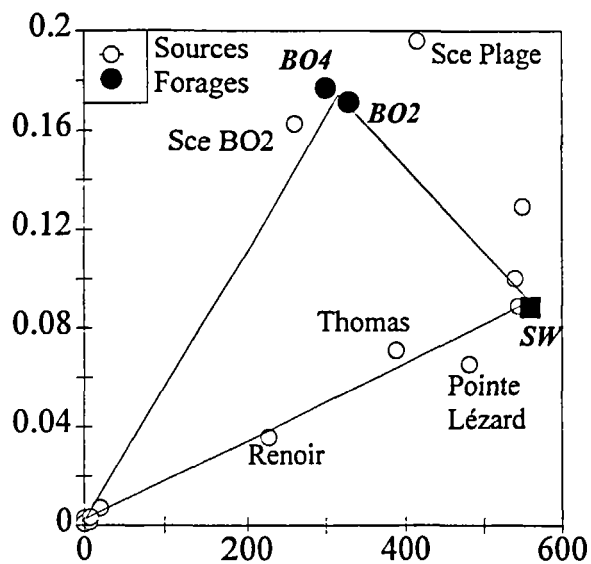
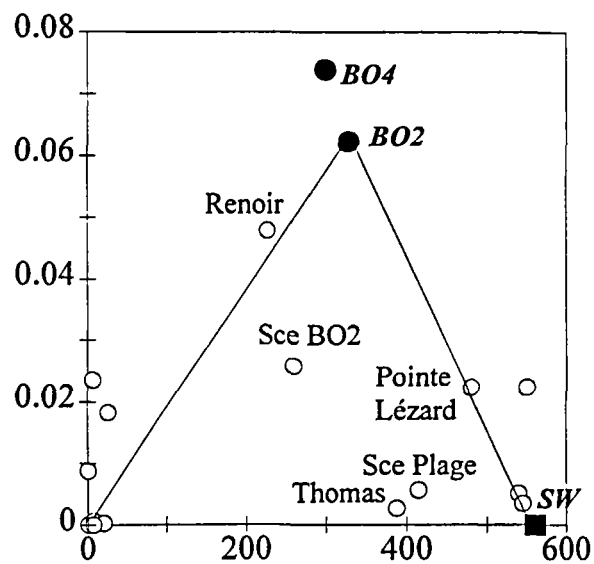


Fig. 10 - Diagrammes SO₄-Cl, SiO₂-Cl, Li-Cl et B-Cl.

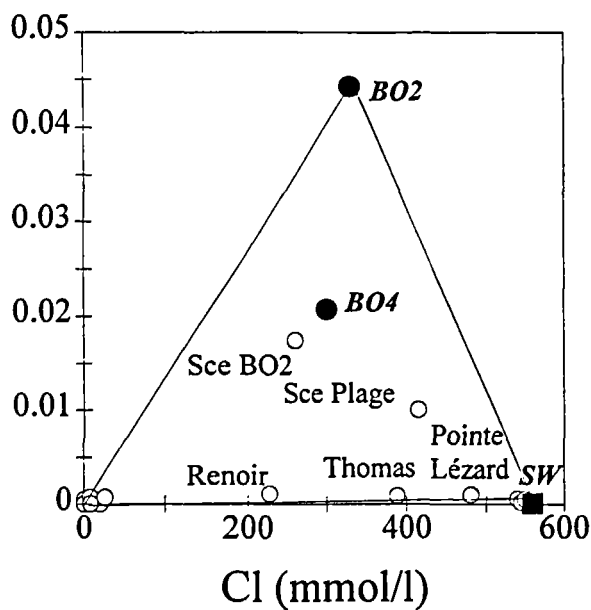
Sr (mmol/l)



Mn (mmol/l)



Ba (mmol/l)



As (mmol/l)

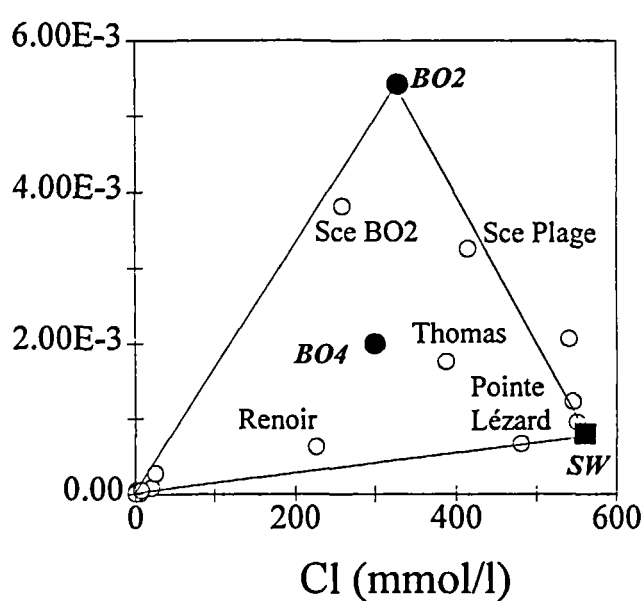


Fig. 11 - Diagrammes Sr-Cl, Ba-Cl, Mn-Cl et As-Cl.

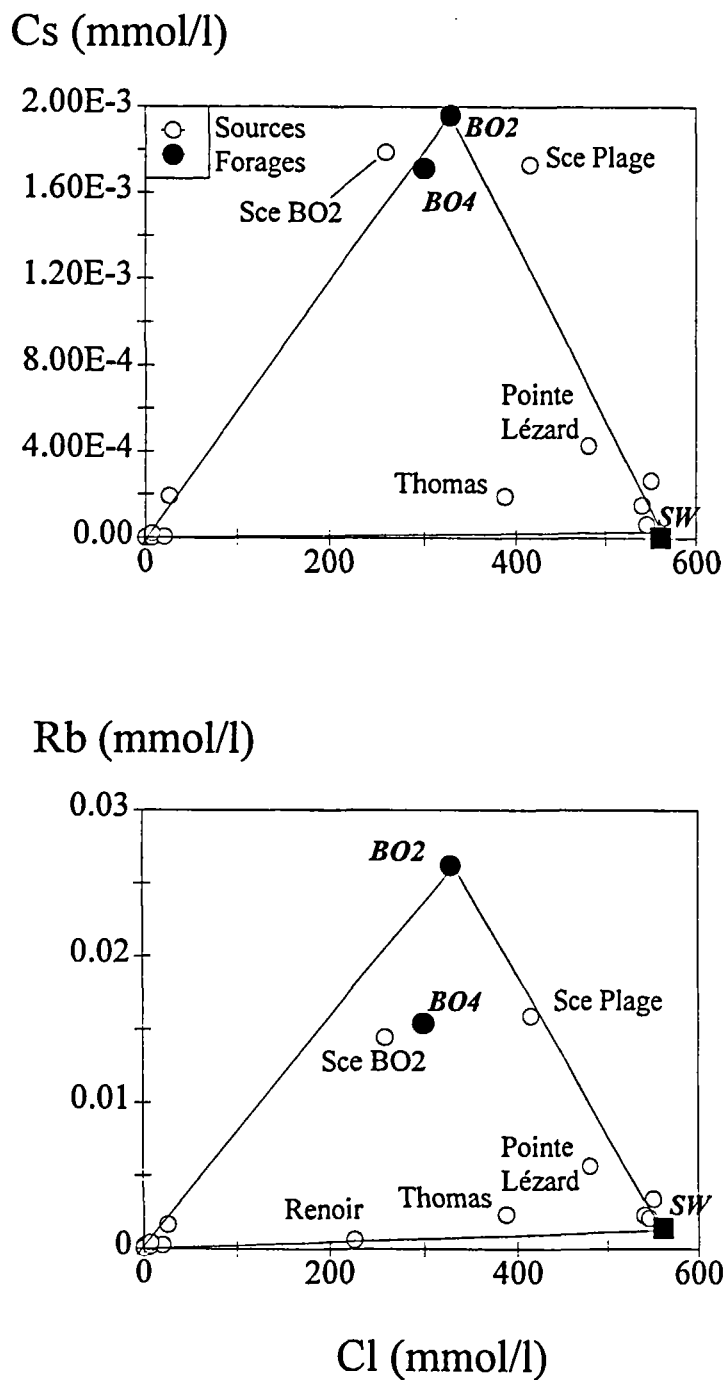


Fig. 12 - Diagrammes Rb-Cl et Cs-Cl.

a) Eaux du premier groupe

La composition chimique de la plupart de ces eaux est proche de celle des eaux superficielles (rivière Bouillante et ravine des Femmes). Pour l'eau de la source Ravine Renoir (amont), la présence d'une très faible proportion d'eau de mer (environ 1 %), qui expliquerait ses concentrations plus élevées en sodium et en chlorure, ne peut être écartée. Quant à l'eau de la source Ravine Blanche-BO4, il n'est pas exclu qu'elle soit constituée d'une très faible quantité d'eau de mer et de fluide chaud (< 2 %).

b) Eaux du deuxième groupe

Suivant la nature et les proportions du mélange, les eaux thermales du deuxième groupe peuvent avoir des compositions chimiques assez différentes.

Pour obtenir les proportions d'un mélange de deux fluides en considérant une espèce A, il suffit d'appliquer les équations de mélange utilisées antérieurement pour les concentrations de chlorure et de bromure. Afin d'avoir une meilleure estimation de ces proportions, on peut résoudre le système d'équations pour plusieurs éléments.

Pour un mélange de trois fluides F1, F2 et F3, il est nécessaire d'utiliser deux espèces A et B pour trouver les proportions x, y et z de chaque fluide (système de trois équations à trois inconnues).

On a alors :

$$\begin{aligned}x [A]_{F1} + y [A]_{F2} + z [A]_{F3} &= [A]M \\x [B]_{F1} + y [B]_{F2} + z [B]_{F3} &= [B]M \\x + y + z &= 1.\end{aligned}$$

• Sources sous-marines (Ilet Pigeon, Pointe Lézard)

Etant donné la localisation de ces sources, la présence d'eau de mer dans le fluide est inévitable. La position des eaux de ces sources sur le segment de droite reliant le pôle eau de mer et le pôle fluide du forage BO2 dans la plupart des diagrammes (fig. 9 à 12) montre qu'elles résultent d'un mélange entre ces deux pôles. Les proportions de chacun des fluides ont été calculées pour les échantillons BO9628 et BO9629, en appliquant les équations de mélange à cinq ou six espèces (tabl. 3), puis en prenant la moyenne des valeurs trouvées. On remarque que l'eau de la source îlet du Pigeon contient une quantité beaucoup plus grande d'eau de mer (93 %) que celle de la source Pointe Lézard (62 %). Si on suppose qu'il n'y a ni perte, ni apport de chaleur, on peut évaluer la température de l'eau à l'émergence de chaque source, à partir de l'équation de mélange correspondante. Une température de 30°C pour l'eau de mer et de 242°C pour le fluide profond a été choisie. On trouve alors une température de 45°C pour l'eau de la source îlet de Pigeon et de 111°C pour l'eau de la source Pointe Lézard.

source	référence	T émerg. (°C)	espèces utilisées pour les calculs	mer (%)	eau douce (%)	fluide BO2 (%)	T calc. (°C)
Pointe Lézard	BO9628	92.0	Cl, Br, Na, K, Ca, Mg	62	0	38	111
Ilet Pigeon	BO9629	52.0	Cl, Br, Na, K, Mg	93	0	7	45
Plage	BO9624A	81.0	Cl, Br, Na, K, Mg	34	0	66	170
Cave BO2	BO9504	97.4	Cl, Br, Na, Ca	0	18	82	204
Anse Thomas	BO9620	54.6	Cl, Br, Ca, SO ₄ , SiO ₂ , Li, Rb	64	26	10	51
Tuyau	BO9619	60.5	Cl, Br, Na, K, Li	2.0	93.5	4.5	40
Anse Marsolle	BO9627	44.3	Cl, Br, Sr, B, Li	0.3	97.8	1.9	34
Renoir aval	BO9621	36.9	Cl, Br, Na, K, Mg, SO ₄ , B	4	96	0	-
Renoir interm.	BO9622	29.2	Cl, Br, Na, K, Mg, SO ₄ , Sr, B	40	60	0	-

Tabl. 3 - Proportions estimées d'eau de mer, d'eau douce et de fluide chaud dans les eaux des sources thermales de la région de Bouillante (les concentrations des espèces sont exprimées en mmol/l).

Ces valeurs, bien que très approximatives et données à titre indicatif, car on ne peut exclure des pertes ou des gains de chaleur, sont proches de celles qui ont été mesurées (tabl. 3).

Dans les diagrammes faisant intervenir Sr, Ba et As (fig. 11), on constate un appauvrissement de ces éléments surtout dans l'eau de la source Pointe Léopard, qui ne se trouve plus sur la droite de mélange forage BO2-eau de mer. Cet appauvrissement peut s'expliquer par la précipitation de ces éléments sous forme de sulfates (célestite, barytine, arséniate de sulfate), au cours du mélange entre le fluide chaud et enrichi en ces éléments, et l'eau de mer abondante en sulfate.

• *Source Plage*

De même que pour les sources sous-marines, la localisation de cette source laissait prévoir une contribution d'eau de mer dans sa composition chimique. Cette proportion, calculée à partir des équations de mélange pour cinq espèces (tabl. 3), est en moyenne de 34 % alors que celle du fluide du forage BO2 est de 66 %.

L'eau de cette source ne suit pas la droite de mélange fluide BO2-eau de mer dans les diagrammes Ca-Cl, SO₄-Cl, SiO₂-Cl, Li-Cl, Sr-Cl, Mn-Cl et Cs-Cl (fig. 9 à 12). Elle est enrichie en Ca, Sr, Li et Cs alors qu'elle est appauvrie en SO₄, SiO₂ et Mn. Les enrichissements en Ca, Sr, Li et Cs proviennent probablement de la dissolution de carbonates en surface. L'appauvrissement en silice doit être reliée à la précipitation d'une phase siliceuse qui pourrait être de la calcédoine. Celui en sulfate est peut-être à associer à une précipitation de gypse causée par un apport important de Ca provenant de la dissolution des carbonates en surface.

• *Source Cave forage BO2*

Comme indiqué dans le tableau 3, l'eau de cette source est composée essentiellement de fluide du forage BO2 (82 %) et d'un peu d'eau douce provenant d'un aquifère superficiel (18 %). Les concentrations des éléments tels que K, Si, B, Ba, Mn et Rb sont plus basses que celles calculées à partir du mélange des deux pôles d'eaux (fig. 9 à 12) et suggèrent, tout comme pour le fluide du forage BO4, une incorporation de ces éléments dans des minéraux par précipitation ou adsorption. Ces processus ont probablement lieu pendant le refroidissement du fluide BO2 au contact de l'eau d'un aquifère superficiel.

• *Source Anse Thomas*

D'après les figures 9 à 12, la composition chimique de l'eau de cette source peut être expliquée par un mélange entre le fluide du forage BO2, une eau douce superficielle et de l'eau de mer. La présence d'eau de mer dans le mélange est inévitable en raison de la localisation de la source. Le report des analyses chimiques des campagnes précédentes sur les diagrammes binaires permettrait de constater que les proportions d'eau de mer

sont variables, alors que celles des deux autres pôles demeurent relativement constantes. Ces variations sont dues aux plus ou moins bonnes conditions de prélèvement.

Le meilleur prélèvement correspond à la quantité d'eau de mer la plus faible et par conséquent, aux concentrations de chlorure, sodium, magnésium et sulfate les plus basses dans l'eau de la source. Ce prélèvement (environ 50 % d'eau de mer) fut réalisé par Iundt et Ouzounian (1984a) et est suivi de celui effectué au cours de cette étude, qui indique une proportion d'eau de mer de 64 %. Les proportions de fluide du forage BO2 et d'eau superficielle correspondantes sont alors respectivement de 10 et 26 % (tabl. 3). Ces estimations ont été réalisées à partir du système d'équations décrit précédemment pour un mélange à trois fluides et en considérant sept espèces (tabl. 3). Ce sont des valeurs moyennes.

En utilisant les proportions estimées dans l'équation de mélange concernant la température et en adoptant les mêmes hypothèses que dans les calculs précédents, on aboutit à une température d'émergence de 51°C pour cette source, si on prend une température de 30°C pour l'eau superficielle. Cette valeur est proche de celle qui a été mesurée à l'émergence (tabl. 3), mais serait identique si on choisissait une température de 40°C pour l'eau superficielle (au lieu de 30°C). Cette température est proche de celle mesurée à l'émergence de la source Renoir (aval), qui est essentiellement constituée d'eau superficielle.

Le schéma déjà proposé par Iundt et Ouzounian (1984b) et Fabriol et Ouzounian (1985), suivant lequel le fluide d'un réservoir intermédiaire composé d'eau chaude profonde et d'eau superficielle se mélange avec de l'eau de mer en surface, semble le plus probable. Dans ce cas, le fluide du réservoir intermédiaire serait constitué d'environ 30-40 % d'eau chaude profonde et de 60-70 % d'eau superficielle, en excluant toute participation d'eau de mer dans ce réservoir. A partir de l'équation de mélange et en supposant aucune perte ni apport de chaleur, la température estimée serait alors de 90-120°C.

• *Sources Tuyau et Anse Marsolle*

D'après les figures 6 et 7, les caractéristiques chimiques de l'eau de la source Tuyau résultent essentiellement de l'interaction d'une eau de mer avec des roches volcaniques à un certain degré d'avancement ou bien d'un mélange entre une eau de mer et un fluide chaud semblable à celui du forage BO2. La faible minéralisation de cette eau implique, dans tous les cas, un mélange avec une proportion importante d'eau superficielle. Les diagrammes Na-Cl, K-Cl et Li-Cl (fig. 9 et 10) suggèrent que cette eau est plutôt issue d'un mélange entre eau de mer, fluide du forage BO2 et eau douce. Les calculs de mélange, appliqués aux espèces Cl, Na, K, Br, Li, indiquent alors que les proportions respectives de chaque pôle sont approximativement : 2, 4,5 et 93,5 %. Si comme pour la source Thomas, on applique l'équation de mélange pour évaluer la température à l'émergence, on trouve une température de 40°C pour l'eau de cette source. Cette valeur est inférieure à celle qui a été mesurée (tabl. 3). Une température de 40°C pour l'eau superficielle permettrait de trouver une valeur de 49°C, qui est plus proche de la mesure.

En adoptant le même type de calculs pour l'eau de la source Marsolle, dans le cas d'un mélange eau de mer, fluide du forage BO2 et eau douce, qui semble l'hypothèse la plus probable, on constate que cette eau est pratiquement constituée d'eau superficielle (97,8 %). Elle ne posséderait que 1,9 % de fluide chaud et 0,3 % d'eau de mer. La température calculée à partir de l'équation de mélange est alors de 34°C. Là encore, cette valeur est inférieure à celle qui a été mesurée (tabl. 3) et une température proche de 40°C pour l'eau superficielle aboutirait à la valeur mesurée.

• **Sources Renoir (intermédiaire et aval)**

Pour la plupart des espèces, l'eau de la source Renoir (intermédiaire), dont la salinité est importante, apparaît comme un mélange d'eau de mer et d'eau douce superficielle dans les proportions 40-60 %. Ceci est en bon accord avec la valeur de température mesurée à l'émergence (tabl. 3). Cependant, les proportions estimées sont légèrement erronées. En effet, comme l'indiquent les figures 3 et 4 (légère augmentation des valeurs de δD et $\delta^{18}O$), un faible processus d'évaporation, qui n'a pas été pris en compte dans les calculs, semble affecter cette eau. Ce processus d'évaporation est tout à fait envisageable vu que le prélèvement a été réalisé dans une mare d'eau relativement stagnante.

Pour l'eau de l'autre source (aval), les proportions moyennes d'eau de mer et d'eau douce, calculées à partir de la plupart des espèces, sont d'environ 4 et 96 %, respectivement (tabl. 3). L'élévation de température à l'émergence (37°C) est probablement le résultat d'un échange thermique rapide, à faible profondeur, qui n'affecte pratiquement pas la composition chimique de l'eau de cette source.

3.1.5. Géothermométrie

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé la plupart des géothermomètres chimiques et isotopiques connus (Michard, 1989 ; Nicholson, 1993 ; ann. 2). Les résultats sont reportés dans le tableau 4.

a) *Eaux du premier groupe*

Pour les eaux thermales des sources Bain Curé, Lise, Riv. Bouillante aval et amont, Dieudonné ainsi que Rav. Renoir (amont), seules les températures données par les géothermomètres à silice (calcédoine), Na-K-Ca ($\beta = 4/3$), K-Mg et Na-Li ($Cl < 0,3 M$) sont concordantes (tabl. 4) et comprises entre 60 et 80°C. Les valeurs de température supérieures à 200°C, trouvées avec le géothermomètre Na-K, sont bien sûr dénuées de signification. L'application de ce géothermomètre sur les eaux de surface en terrain granitique ou basaltique est connue depuis longtemps pour ses mauvais résultats (Michard, 1979). Ni Na ni K ne sont contrôlés par les feldspaths et le géothermomètre Na-K conduit alors à des températures très élevées. L'ensemble de ces résultats semble indiquer un réchauffement rapide de ces eaux et est en accord avec leurs rapports molaires Mg/Cl élevés. Les fortes concentrations de Mg témoignent d'eaux superficielles relativement froides.

Nom	réf.	T mes.	TQz	TCd	TSia	TNa-K(M)	TNa-K(F)	TNa-K(G)	TNa-K-Ca($\beta=1/3$)	TNa-K-Ca ($\beta=4/3$)	TNa-K-Ca (Mg)
<i>Bouillante</i>											
source Bain Curé	9501	39.6	123	63	4	237	247	261	174	73	77
source Bain Curé	9601	39.0	126	66	7	192	212	228	154	59	81
source Riv. Bouillante (aval)	9502	47.2	138	77	18	204	222	238	169	87	52
source Lise	9503	35.2	123	63	4	189	210	226	157	70	30
Source Lise	9603	35.7	123	63	5	192	212	229	158	69	28
source Cave forage BO2	9504	97.4	159	96	36	223	237	252	214	209	206
source Dieudonné	9508	23.9	121	61	2	296	292	302	185	57	39
Maison Cabarrus	9617A	97.3	90	33	-24	223	237	251	145	18	89
Source ravine Blanche-BO4	9618	29.2	126	66	7	235	246	260	204	156	133
Tuyau (près Centrale)	9619	60.5	151	89	29	196	215	231	176	114	150
Source anse Thomas	9620	54.6	124	64	5	127	158	177	177	241	2
Source ravine Renoir (aval)	9621	36.9	135	74	15	138	167	186	151	111	8
Ravine Renoir (amont)	9623	28.7	131	71	12	197	216	232	179	123	27
Plage (près BO3)	9624A	81.0	148	87	27	201	220	235	209	226	63
Rivière Bouillante	9625	26.9	102	44	-14	311	304	313	195	71	40
Source Riv. Bouillante (amont)	9626	29.6	122	62	3	370	345	350	216	85	37
Source anse Marsolle	9627	44.3	130	69	10	188	209	225	169	103	58
Ravine des Femmes	9630	24.6	116	56	-2	267	271	283	175	53	48
Forage BO2 (corrigé)	9631A	35.0	244	179	120	248	257	270	229	229	250
Forage BO4	9632	35.0	205	141	81	222	236	251	213	206	252
<i>Soufrière et autres</i>											
source Joséphine	9509	23.4	98	40	-17	293	291	300	177	43	42
source Carbet (2ème chute)	9510	43.4	137	76	17	337	322	329	209	86	35
Riv. Grosse Corde	9511	37.7	132	71	12	311	304	312	202	85	43
source Sofaïa	9514	29.0	21	-30	-80	273	275	286	178	57	30
source Hab. Revel	9515	34.0	119	59	0	219	233	248	165	64	61
source Bains Jaunes	9516	27.2	129	68	9	211	227	242	146	27	60

Nom	réf.	TCa-K	TK-Mg	TNa-Li (Cl>0.3M)	TNa-Li (Cl<0.3M)	TNa-Li (Kh)	TMg-Li	TK-Sr	T ¹⁸ O(H ₂ O-SO ₄)
<i>Bouillante</i>									
source Bain Curé	9501	125	65						157
source Bain Curé	9601	105	57	78	-18	54	-4	109	
source Riv. Bouillante (aval)	9502	137	66	120	8	81	12	140	150
source Lise	9503	116	52						158
Source Lise	9603	116	51	49	-36	35	-18	118	
source Cave forage BO2	9504	273	196	187	49	120	125	281	174
source Dieudonné	9508	112	52						229
Maison Cabarrus	9617A	62	36	68	-24	48	-24	53	
Source ravine Blanche-BO4	9618	217	110	109	2	74	35	246	
Tuyau (près Centrale)	9619	165	101	145	24	96	47	162	
Source anse Thomas	9620	283	95	62	-28	44	27	274	
Source ravine Renoir (aval)	9621	153	59	53	-34	38	-3	142	
Ravine Renoir (amont)	9623	175	74					176	
Plage (près BO3)	9624A	287	125	174	41	112	73	301	
Rivière Bouillante	9625	129	59					136	
Source Rivière Bouillante (amont)	9626	149	66	72	-21	51	-17	162	
Source anse Marsolle	9627	153	74	136	18	91	26	152	
Ravine des Femmes	9630	105	51					108	
Forage BO2 (corrigé)	9631A	299	259	192	52	123	165	325	
Forage BO4	9632	270	243	191	51	122	161	284	
<i>Soufrière et autres</i>									
source Joséphine	9509	95	45						234
source Carbet (2ème chute)	9510	148	67						196
Riv. Grosse Corde	9511	145	68						137
source Sofaïa	9514	110	48						117
source Hab. Revel	9515	113	57						158
source Bains Jaunes	9516	72	37						150

Tabl. 4 - Géothermomètres chimiques appliqués aux échantillons prélevés pendant les campagnes de 1995-1996 (températures données en °C, les formules correspondant à chaque géothermomètre sont reportées dans l'annexe 2).

Leur signature isotopique caractéristique d'une origine météorique suggère un réchauffement des eaux par conduction et non pas une condensation de vapeur, qui se traduirait par un appauvrissement en isotopes lourds des teneurs en oxygène-18 et en deutérium.

L'eau de la source Ravine Blanche-BO4 se démarque des autres eaux de ce groupe. En effet, les géothermomètres chimiques appliqués à cette eau n'indiquent pas de température convergente. De plus, son rapport Mg/Cl, beaucoup plus bas, respecte la relation linéaire décrite par les eaux thermales du deuxième groupe. Comme cela a été évoqué, cette eau pourrait être issue d'un mélange constitué d'eau essentiellement météorique mais aussi d'eau de mer et d'un fluide chaud (fluide du forage BO4 par exemple).

b) Fluides des forages

Les principaux géothermomètres chimiques (Quartz, Na-K (F), Na-K-Ca ($\beta = 1/3$), K-Mg), appliqués au fluide du forage BO2, donnent des températures convergentes comprises entre 230 et 260°C (tabl. 4). Ces valeurs encadrent bien la température mesurée au fond du forage (242°C) et mettent en évidence l'existence d'un équilibre entre le fluide du forage BO2 et une association minéralogique à cette température.

Des calculs de saturation du fluide vis-à-vis des principaux minéraux rencontrés dans les milieux naturels, réalisés au moyen du code géochimique EQ3NR (Wolery, 1992), à 242°C, ont permis d'avoir une idée sur la nature de cette association.

Compte tenu de l'impossibilité de mesurer le pH directement à cette température et les difficultés à déterminer des concentrations d'aluminium représentatives du fluide, on a dû supposer, au préalable, que ces paramètres étaient contrôlés, respectivement, par la calcite et le feldspath potassique, minéraux très probablement présents dans l'association minéralogique. La valeur de pH, ainsi estimée, est alors de 5,6-5,7 et est proche de celles proposées par Abou Akar *et al.* (1992), à partir de simulations géochimiques. La valeur de pression partielle de CO₂ qui découle de cette valeur de pH et de l'alcalinité mesurée est de 0,3-0,4 atm. D'après les calculs de saturation, il s'avère qu'en plus de la calcite et du feldspath potassique, le fluide est à saturation à 242°C vis-à-vis de l'albite, l'anhydrite, le quartz, certaines argiles (montmorillonites Na-Mg, beidellite-Ca, muscovite), le talc et certaines zéolites (laumontite, wairakite, heulandite). Ces résultats sont en excellent accord avec les analyses minéralogiques des dépôts hydrothermaux associés aux sources qui indiquent des fuites de fluide profond (Traineau *et al.*, 1997). Dans ces dépôts, la présence de smectites et de zéolites a été mise en évidence. Or, on sait, s'agissant de minéraux alumino-silicatés, que le refroidissement d'un fluide à l'équilibre à 242°C vis-à-vis de tels minéraux est un processus très favorable à leur précipitation à plus basse température.

L'application des principaux géothermomètres chimiques au fluide du forage BO4 donnent des températures légèrement plus basses (205-243°C), qui semblent confirmer l'existence d'un léger mélange entre un fluide profond similaire à celui de BO2 et une

eau superficielle, qui aurait pour principal effet de refroidir le système. Ce refroidissement aurait tendance à faire précipiter de la silice et du potassium dissous, qui sont des espèces connues pour leur importante réactivité. Le fluide se rééquilibrerait, à la nouvelle température, vis-à-vis du quartz.

c) Autres eaux du second groupe

Pour les autres eaux du second groupe, qui sont issues de processus de mélange et qui pour la plupart, contiennent de l'eau de mer, les géothermomètres chimiques ne peuvent pas être utilisés. Il faut rappeler que les géothermomètres chimiques Na-K et Na-K-Ca appliqués à l'eau de mer donnent des températures aberrantes de l'ordre de 150-175°C.

3.1.6. Origine des gaz

Compte tenu de la difficulté des prélèvements, des émanations diffuses des fumerolles (sous de gros blocs de pierres) et de la localisation de certaines sources, les résultats des analyses chimiques (ann. 3) révèlent, pour de nombreux échantillons, une importante contamination par l'air ambiant qui a pu avoir lieu soit lors de la remontée des fluides, soit lors de leur prélèvement (proportions azote, oxygène et argon de l'air souvent retrouvées de façon significative). La plupart des échantillons de gaz, y compris ceux du forage BO2, indique un rapport volumique N₂/Ar proche de celui de l'air (84). Pour les échantillons provenant du forage BO2, qui montrent de faibles teneurs en oxygène, à l'exception des prélèvements réalisés en 1970 et 1982, les valeurs de ce rapport ne peuvent résulter que de la présence d'azote et d'argon d'origine atmosphérique en profondeur. La teneur en argon mesurée dans le forage BO2 en 1970, qui est très supérieure aux autres mesures réalisées dans ce même forage, semble erronée.

La quantité de gaz incondensables associés aux fluides des forages est mal connue et n'a pas été mesurée au cours de cette étude. D'après Demians d'Archimbaud et Munier-Jolain (1976), pour le forage BO2, cette quantité correspondrait à 0,4 % en poids de la vapeur, au cours d'une séparation du fluide en surface, à 5 bars, fournissant 20 % de vapeur et 80 % d'eau. Pour une production de 30 t/h de vapeur, il se libérerait, donc, environ 0,12 t/h de gaz incondensables (essentiellement du CO₂).

Par rapport à l'air ambiant, on peut constater, dans la plupart des échantillons, une abondance anormale de CO₂ qui est le gaz prédominant (80 à 95%) dans le forage BO2 (ann. 3). L'analyse isotopique en carbone-13, réalisée pour la première fois sur le CO₂ d'un échantillon de gaz prélevé dans le forage BO2, indique une valeur de -2,6 ‰ (vs PDB), qui s'écarte des valeurs caractéristiques des magmas basaltiques (proches de -7 ‰). Cette valeur est plutôt en accord avec une origine sédimentaire du CO₂, produit par des réactions métamorphiques à profondeur et température élevées (Aqater, 1989). Néanmoins, elle pourrait également résulter d'une origine mixte du CO₂ (à la fois sédimentaire, magmatique et atmosphérique). Cette hypothèse semble la plus probable car les géothermomètres CO₂-H₂S-H₂-CH₄ (Amore (d') et Panichi, 1980), CO₂-H₂-CH₄ (Marini, 1987) et H₂-Ar (Giggenbach et Goguel, 1989), appliqués aux échantillons de

gaz provenant du forage BO2, donnent des valeurs de température comprises entre 160 et 220°C (ann. 3), qui sont toutes inférieures à celles mesurées dans le réservoir (240-250°C). Ceci implique qu'à cette température, l'équilibre thermodynamique n'est pas atteint entre les différentes phases gazeuses.

Pour des échantillons de gaz provenant de la source de la cave du forage BO2 et émanant des sources sous-marines (BO9512 et BO9513), on constate un enrichissement en hélium plus important que pour ceux prélevés dans le forage BO2, qui indiquent déjà des rapports volumiques He/Ar (ann. 3) très supérieurs au rapport atmosphérique ($5,7 \cdot 10^{-4}$). Ces anomalies demandent à être confirmées. D'après P. Allard (communication personnelle, 1996), une partie importante de l'hélium dans cette zone faillée jusqu'aux environs de l'îlet Pigeon a une origine mantellique, qui serait liée à la remontée de fluides profonds à travers des drains tectoniques (rapports $^3\text{He}/^4\text{He}$ mesurés dans le forage BO4 et dans certaines sources approximativement 4 à 4,5 fois supérieurs au rapport atmosphérique). Il s'agirait de fuites gazeuses (et thermiques) contrôlées par la tectonique régionale plutôt que par une intrusion magmatique, d'extension limitée. Néanmoins, les valeurs de $^3\text{He}/^4\text{He}$ sont plus faibles que celles mesurées au sommet de la Soufrière et le long de la faille Ty, qui indiquent des valeurs 8 fois supérieures au rapport atmosphérique et sont typiques des MORB. Cela implique, par conséquent, une dilution par de l'hélium crustal soit au niveau du système hydrothermal du bassin de Bouillante, soit plus profondément au niveau d'une source magmatique intra- ou sub-crustale.

3.1.7. Modèle hydrogéochimique de champ

Le modèle géochimique proposé par Iundt et Ouzounian (1984b) et par Fabriol et Ouzounian (1985) pour la région de Bouillante, à savoir :

- l'alimentation du réservoir géothermique par de l'eau de mer et de l'eau superficielle, dont le mélange atteint un état d'équilibre avec la roche à une température de 240-250°C ;
- la présence d'eaux superficielles réchauffées très probablement par conduction et celle d'un phénomène de self sealing, qui diminue la probabilité de trouver des indices de fuite de fluide chaud profond en surface ;
- l'existence d'une fuite de fluide chaud observée dans la source Thomas,

semble le plus probable. L'alimentation mixte du réservoir géothermique est cohérente avec la fracturation tectonique N100-120°, qui permet à la fois une recharge en eau de mer et en eau d'origine météorique. On peut raisonnablement penser que l'eau d'origine météorique provienne des infiltrations d'eaux de pluies sur le flanc occidental des Pitons de Bouillante.

Au cours de cette étude, de nouvelles fuites de fluide chaud du réservoir ont été mises en évidence dans des sources sous-marines (Ilet Pigeon, Pointe Léopard), la source Plage, la source cave forage BO2, et probablement les sources Tuyau et Marsolle. Malgré un

rapport Br/Cl différent de celui de l'eau de mer, l'eau de la source Ravine Blanche-BO4 pourrait également être constituée d'une très faible proportion de fluide du réservoir. Il est à noter que toutes ces sources, ainsi que la source Thomas, sont situées en mer ou en bordure de mer (points les plus bas servant d'exutoire). La découverte de ces fuites, qui sont associées à des accidents tectoniques majeurs, implique une meilleure définition, en surface, de futures zones d'exploration et d'exploitation du champ géothermique de Bouillante. Même si ces fuites ne permettent pas de localiser le réservoir géothermique principal, elles inspirent l'existence d'un réservoir assez vaste. L'évolution irrégulière des profils de température en fonction de la profondeur réalisés dans les forages BO3 et BO4, l'absence de dégazage important dans les forages, la nature chimique des fluides (chlorurée sodique et non sulfatée acide) et des dépôts hydrothermaux suggèrent un écoulement plutôt latéral du fluide géothermal.

3.2. SOURCES DES AUTRES REGIONS (ESSENTIELLEMENT AUTOUR DE LA SOUFRIERE)

Les résultats trouvés au cours des études précédentes (Tonani, 1963 ; Fabriol et Ouzounian, 1985) sont confirmés. Les eaux de toutes ces sources sont peu minéralisées (TDS < 1,5 g/l), ont des valeurs de pH relativement faibles (comprises entre 3,5 et 6,53) et ne forment pas un ensemble homogène. Ces eaux peuvent être classées en plusieurs groupes :

- eaux chlorurées calco-sodiques telles que les eaux des sources Carbet et Riv. Grosse Corde, dont la salinité est la plus élevée ;
- eau chlorurée bicarbonatée sodique (source Joséphine) ;
- eau bicarbonatée sodique (source Habitation Revel) ,
- eau sulfatée calcique (source Bains Jaunes) ;
- eau chlorurée sulfatée sodique (source Sofaïa), qui indique la plus faible valeur de pH (3,5).

Toutes ces eaux ont des caractéristiques d'eaux superficielles dont la recharge est d'origine météorique. Dans un diagramme $\delta D - \delta^{18}O$ (cf. fig. 3), elles se situent légèrement au-dessus des eaux superficielles de la région de Bouillante entre la droite des eaux météoriques locales et celle des eaux météoriques mondiales. Leurs faibles teneurs en tritium (cf. tabl. 2) suggèrent un temps de résidence relativement important (> 40 ans).

Il apparaît sans ambiguïté qu'il n'y a pas de modification due à une interaction des eaux avec la roche à haute température. Aucun indice de fuite d'un fluide similaire à celui du forage BO2 n'a été mis en évidence. Les concentrations en magnésium relativement élevées sont un indice d'eaux superficielles peu chaudes. Comme pour les eaux superficielles de Bouillante, les températures élevées (> 200°C) données par le géothermomètre chimique Na-K n'ont aucune signification. Pour la plupart de ces eaux, l'application des géothermomètres à silice (calcédoine), Na-K-Ca ($\beta = 4/3$) et K-Mg

aboutit à des valeurs de température concordantes comprises entre 40°C (source Joséphine) et 80°C (source du Carbet). Le géothermomètre isotopique $\delta^{18}\text{O}$ ($\text{H}_2\text{O}-\text{SO}_4$) donne des températures dont les valeurs sont surestimées et montre ainsi que l'équilibre isotopique représenté par ce géothermomètre n'est pas atteint. Les faibles températures mesurées à l'émergence des sources ($T < 45^\circ\text{C}$) et les caractéristiques chimiques et isotopiques de toutes ces eaux semblent témoigner d'un réchauffement superficiel. Aucune anomalie chimique ne permet de prévoir l'existence d'un réservoir plus profond et plus chaud. Cependant, l'eau de la source Sofaïa, qui indique de basses valeurs de pH, Eh et une quantité importante de radon, est vraisemblablement réchauffée par des émanations gazeuses de H_2S profondes qui sont peut-être accompagnées de vapeur d'eau.



4. Test de traçage

Ce test a été réalisé entre les forages BO4 et BO2, qui sont situés approximativement à 400 m l'un de l'autre. Le traceur principal, l'acide isophtalique, a été injecté à partir du forage BO4, en utilisant de l'eau de mer et en présence de deux autres traceurs :

- du naphthionate de sodium, qui donne une coloration violette à l'eau ;
- du nitrate de potassium, les nitrates étant quasi-inexistants dans l'eau de mer et le fluide du forage BO2.

Ces derniers traceurs ont été utilisés afin de confirmer les résultats en cas de détection de l'acide isophtalique dans le fluide du forage BO2. Les quantités de traceurs injectées, estimées par calcul hydrodynamique, et les conditions d'injection sont décrites par Herbrich (1996). Le suivi des traceurs a été réalisé pendant une période d'une trentaine de jours dans le fluide du forage BO2 en production. Malheureusement, au début de ce test, un arrêt de la centrale géothermique de trois à quatre jours a eu lieu pour des raisons techniques. Une collecte systématique d'un échantillon toutes les deux heures a été réalisée les deux premiers jours après l'injection des traceurs. Les prélèvements ont ensuite été espacés progressivement dans le temps : un toutes les six heures les cinq jours suivants, puis un deux fois par jour et en fin de test, un échantillonnage journalier. Les échantillons prélevés ont été filtrés à 0,45 µm puis collectés dans deux flacons :

- un flacon en verre borosilicaté pour les analyses prévues ;
- un flacon de 100 ml en polyéthylène pour des analyses complémentaires, si nécessaire.

L'acide isophtalique a été analysé par HPLC/UV à barettes de diodes dans les laboratoires centraux d'Orléans sur un sur deux des prélèvements effectués. Il a été remarqué une diminution de la sensibilité de la méthode d'environ un facteur 5 sur des échantillons du fluide du forage BO2, dopés en acide isophtalique. Des calculs de modélisation hydrodynamique ont montré que, malgré ce problème, la quantité injectée d'acide isophtalique, devait aboutir à une détection de ce traceur, pendant la période du test, si les forages étaient connectés directement entre eux. Or, toutes les analyses ont donné des résultats inférieurs au seuil de détection, qui est de 50 ppb. Par conséquent, les résultats obtenus suggèrent une absence de connexion hydraulique directe entre les deux forages. Néanmoins, des tests supplémentaires d'une plus longue durée et l'installation d'un capteur de pression dans le forage BO4 pour le suivi continu de ce paramètre doivent être entrepris pour confirmer et valider ces premiers résultats.



Conclusion

En conclusion, les résultats des analyses chimiques et isotopiques réalisées sur les eaux des sources thermales de la région de Bouillante, ainsi que sur les fluides des forages BO2 et BO4, ont permis de confirmer et affiner le modèle géochimique suggéré dans des études précédentes, à savoir :

- l'alimentation du réservoir géothermique à la fois par de l'eau de mer et de l'eau superficielle, dont le mélange atteint un état d'équilibre avec la roche encaissante à une température de 240-250°C ;
- la présence d'eaux superficielles bicarbonatées sodiques, peu minéralisées (< 0,5 g/l) et réchauffées très probablement par conduction ainsi que l'existence d'un phénomène de self sealing, qui diminue la probabilité de trouver des indices de fuite de fluide chaud en surface.

L'alimentation mixte du réservoir géothermique (environ 60 % d'eau de mer et 40 % d'eau douce) est cohérente avec la fracturation tectonique N100-120°, qui permet une recharge en eau de mer et en eau d'origine météorique. On peut raisonnablement penser que l'alimentation en eau météorique provienne du flanc occidental des Pitons de Bouillante. La similitude de la composition chimique et isotopique des fluides BO2 et BO4, malgré la présence d'une proportion d'eau douce légèrement plus importante dans le dernier fluide, suggère leur appartenance commune à un seul réservoir. L'absence d'enrichissement en isotopes lourds de l'oxygène, à haute température, dans ces fluides implique des rapports eau-roche et/ou des vitesses de circulation relativement élevés. Le test de traçage à l'acide isophtalique semble indiquer l'absence d'une connexion hydraulique directe entre les forages BO2 et BO4 mais d'autres opérations de ce type doivent être réalisées dans le futur pour confirmer et valider ces premiers résultats.

Les résultats des analyses de gaz associés à certaines sources et au fluide du forage BO2 ainsi que les valeurs des rapports $^3\text{He}/^4\text{He}$ indiquent une origine mixte de ces gaz (contribution à la fois mantellique, crustale et atmosphérique). La valeur de la teneur en carbone-13 du dioxyde de carbone associé au fluide du forage BO2, mesurée pour la première fois, est en accord avec ces résultats. Les fuites de gaz d'origine mantellique seraient liées à la tectonique régionale plutôt qu'à la présence d'une intrusion magmatique, d'une extension plus limitée. Il est à noter l'absence de dégazage important dans les forages.

Au cours de cette étude, la découverte de nouvelles fuites de fluide chaud du réservoir en mer ou en bordure de mer (sources sous-marines îlet du Pigeon et Pointe Lézard, source Plage, fumerolle près pont ravine Blanche) en plus de celle de la source Thomas, déjà connue, suggère l'existence d'un réservoir relativement important, même si pour l'instant il reste encore très mal caractérisé. La connaissance de ces fuites, associées à des accidents tectoniques majeurs, devrait permettre de mieux définir, en surface, les futures zones d'exploration et d'exploitation du champ géothermique de Bouillante.

Remerciements

Nous tenons à remercier vivement J. Cairo (CFG Bouillante) dont l'aide et la connaissance de l'emplacement des sources thermales ont contribué à la bonne réalisation de cette étude.

Références bibliographiques

- Abou Akar A., Matray J.M., Brach M. (1992) - Etude géochimique du fluide géothermal du puits BO2 (centrale EDF) et des sources thermales de la région de Bouillante (Guadeloupe). Rapport BRGM R 36203, 41 p.
- Albarède F., Michard A., Minster J.F., Michard G. (1981) - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in hydrothermal waters and deposits from the East Pacific Rise at 21°N. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 55, 229 p.
- Amore F. (d'), Panichi C. (1980) - Evaluation of deep temperatures of hydrothermal systems by a new gas-geothermometer. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44, pp. 549-556.
- Aquater (1989) - Djibouti geothermal exploration project. Republic of Djibouti. Section 4 : Geochemistry and fluid analyses. Aquater final report, 101-138.
- Arnason B. (1977) - The hydrogen-water isotope thermometer applied to geothermal areas in Iceland. *Geothermics*, 5, pp. 75-80.
- Arnorsson S., Gunlaugsson E., Svavarsson H. (1983) - The geochemistry of geothermal waters in Iceland. II. Mineral equilibria and independent variables controlling water composition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, pp. 547-566.
- Bischoff J.L., 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, pp. 385-397.
- Craig H. (1961) - Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, pp. 1702-1703.
- Demians d'Archimbaud J., Munier-Jolain J.P. (1971) - Les progrès de l'exploration géothermique à Bouillante en Guadeloupe. "Tiré à part", pp. 101-104.
- Demians d'Archimbaud J., Surcin J. (1972) - Recherches géothermiques en Guadeloupe. *Rev. géogr. phys. géol. dynam.*, (2), vol. XIV, fasc. 3, pp. 211-228.
- Edmond J.M., Von Damm K.L., McDuff R.E., Measures C.J. (1982) - Chemistry of hot springs on the East Pacific Rise and their effluent dispersal. *Nature*, 297, pp. 187-191.
- Fabriol R., Ouzounian G. (1985) - Prospection géothermique des zones de Bouillante et de la Soufrière (Guadeloupe), Modèle hydrogéochimique. Rapport BRGM 85 SGN 433 GTH, 29 p.

- Ferronsky V., Polyakov V.A. (1982) - Environmental isotopes in the hydrosphere. A Wiley-Interscience Publication, 466 p.
- Fouillac C., Michard G. (1981) - Sodium/lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. *Geothermics*, 10, pp. 55-70.
- Fouillac C., Ouzounian G. (1976) - Cité dans Iundt et Ouzounian (1984a) mais référence non indiquée.
- Fournier R.O. (1979) - A revised equation for the Na/K geothermometer. *Geoth. Res. Council Trans.*, 3, pp. 221-224.
- Fournier R.O., Potter R.W. (1979) - Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, pp. 1543-1550.
- Fournier R.O., 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- 685-697.
- Fournier R.O., Truesdell A.H. (1973) - An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, pp. 1255-1275.
- Gadalia A., Westercamp D. (1984) - Prospection géothermique de la région de Bouillante - Vieux Habitants (Guadeloupe), Rapport géologique. Rapport BRGM 84 SGN 063 GTH, 52 p.
- Giggenbach W.F., Goguel R.L. (1989) - Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges. Fourth Edition. Report CD2401, Chemistry Division, DSIR, New Zealand.
- Giggenbach W.F. (1988) - Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, pp. 2749-2765.
- Herbrich B. (1996) - Mesures dans le puits de Bouillante BO4, Injections de traceurs géochimiques. Rapport 96 CFG 57, 11 p.
- Houssein I., Sanjuan B., 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, pp. 771-776.
- Iundt F., Ouzounian G. (1984a) - Prospection géothermique de la région de Bouillante - Vieux Habitants (Guadeloupe), Rapport hydrogéochimique. Rapport BRGM 84 SGN 063 GTH, 20 p.

- Iundt F., Ouzounian G. (1984b) - Comparaison entre les eaux thermales et les fluides de forages géothermiques dans la région de Bouillante (Guadeloupe). Rapport BRGM 84 SGN 351 GTH, 13 p.
- Kharaka Y.K., Lico M.S., Lax L.M. (1982) - Chemical geothermometers applied to formation waters, Gulf of Mexico and California basins. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 66, 588 p.
- Kharaka Y.K., 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, pp. 99-117.
- Marini L. (1987) - Geochemistry of North Ghoubbat-Asal Region. *Doc. Geothermica Italiana*, 28 p.
- Michard G. (1979) - Géothermomètres chimiques. *Bull. BRGM*, (2), III, n°2, pp. 183-189.
- Michard G. (1989) - Equilibres chimiques dans les eaux naturelles. *Publisud*, 357 p.
- Michard G. (1990) - Behaviour of major elements and some trace elements (Li, Rb, Cs, Fe, Mn, W, F) in deep hot waters from granitic areas. *Chem. Geol.*, 89, pp. 117-134.
- Michard G., Albarède F., Michard A., Minster J.F., Charlou J.L., Tan N. (1984) - Chemistry of solutions from the 13° East Pacific Rise hydrothermal site. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 67, pp. 297-307.
- Mizutani Y., Rafter T.A. (1969) - Oxygen isotopic composition of sulphates, 3. Oxygen isotopic fractionation in the bisulfate ion-water system. *N. Z. J. Sci.*, 12, pp. 54-59.
- Nicholson K. (1993) - *Geothermal fluids. Chemistry and Exploration Techniques*. Springer, 261 p.
- Pilot J. (1974) - *Les isotopes en Géologie (Méthodes et applications)*. Doin, Editeur, 174 p.
- Sanjuan B., Michard G., 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. and Geotherm. Research*, 43, pp. 333-352.
- Tomasson J., Kristmannsdottir H. (1972) - High temperature alteration minerals and thermal brines, Reykjanes, Iceland. *Contr. Miner. and Petrol.*, 36, pp. 123-307.
- Tonani F. (1963) - Cité dans Iundt et Ouzounian (1984a) mais référence non indiquée.

- Traineau H., Sanjuan B., Beaufort D., Brach M., Castaing C., Correia H., Genter A., Herbrich B. (1997) - The Bouillante geothermal field (F.W.I.) revisited : New data on the fractured geothermal reservoir in light of a future stimulation experiment in a low productive well. Proceedings, Twenty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, January 27-29, 7 p.
- Von Damm K.L., Edmond J., Grant B., Measures C.J., Walden B., Weiss R.F. (1985) - Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21°N, East Pacific Rise. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, pp. 2197-2220.
- White D.E., Muffler L.P.J., Truesdell A.H. (1971) - Vapour-dominated hydrothermal systems compared with hot-water systems. *Econ. Geol.*, 66, pp. 75-97.
- 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) UCRL-MA-110662-PT-I, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, 246 p.

ANNEXE 1

**Analyses chimiques et isotopiques
des échantillons prélevés
dans les études antérieures**



Tableau 1 - Analyses chimiques et isotopiques (les concentrations des espèces sont exprimées en mmol/l).																	
Source	n°	T°C	cond.	pH	Eh	δD	$\delta^{18}O$	Na	K	Ca	Mg	SiO ₂	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	NH ₄
		°C	mS/cm		mV	‰	‰										
Bouillante																	
Ravine	E52	50.0	0.44	7.60	n.d.	n.d.	n.d.	3.10	0.26	0.65	0.18	2.00	3.00	1.50	0.08	n.d.	n.d.
	I23	50.0	n.d.	7.68	n.d.	-8.1	-2.3	3.36	0.25	0.57	0.21	1.73	3.15	1.76	0.68	n.d.	n.d.
Sce Ravine	G3	48.5	0.81	7.42	n.d.	-10.3	-2.6	n.d.	0.24	0.56	0.20	1.76	3.17	1.89	0.07	0.90	n.d.
	A2	48.5	0.50	7.24	n.d.	-9.7	-3.0	3.26	0.23	0.58	0.22	1.91	3.22	1.41	0.09	0.0194	<0.0055
Dispensaire	E53	50.0	0.49	7.55	n.d.	n.d.	n.d.	3.60	0.24	0.65	0.42	1.90	4.20	2.00	0.12	n.d.	0.027
	I21	50.0	n.d.	7.35	n.d.	-9.6	-2.8	3.30	0.25	0.66	0.33	1.56	3.31	1.93	0.10	n.d.	n.d.
	G5	38.3	n.d.	8.27	n.d.	-7.7	-2.2	3.04	0.23	0.57	0.29	1.83	3.19	2.23	0.08	n.d.	n.d.
Terrain football	E56	99.0	0.21	6.55	n.d.	n.d.	n.d.	0.59	0.19	0.70	0.08	1.30	1.00	0.13	0.65	n.d.	0.07
Tonton	E74	38.0	n.d.	7.60	n.d.	n.d.	n.d.	0.51	0.2	0.33	0.12	1.20	1.50	0.19	0.03	n.d.	n.d.
Bourceau	E12	25.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.00	0.07	0.36	0.24	0.26	1.96	0.60	0.02	n.d.	n.d.
Dieudonné	E13	23.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.76	0.03	0.32	0.20	n.d.	1.10	0.74	0.05	n.d.	n.d.
Curé	E60	40.0	0.30	7.30	190	n.d.	n.d.	1.60	0.14	0.50	0.12	1.70	2.30	0.78	0.06	n.d.	n.d.
	I6	42.0	n.d.	7.72	n.d.	-6.0	-2.2	1.92	0.16	0.50	0.11	1.41	2.28	0.91	0.08	n.d.	n.d.
	G1	40.2	n.d.	7.43	n.d.	-7.3	-2.5	1.85	0.15	0.49	0.10	1.40	2.25	0.99	0.06	n.d.	n.d.
	A1	39.5	0.33	7.33	n.d.	-7.7	-2.7	1.91	0.14	0.50	0.12	1.50	2.32	0.66	0.07	0.0065	<0.0055
Lise	E61	35.0	0.28	7.15	240	n.d.	n.d.	1.70	0.12	0.34	0.22	1.40	2.20	0.68	0.03	n.d.	n.d.
	I7	32.0	n.d.	7.60	n.d.	-5.0	-1.5	1.95	0.11	0.34	0.20	1.20	2.21	0.67	0.08	n.d.	n.d.
	G2	35.3	n.d.	7.58	n.d.	-7.2	-2.6	1.88	0.10	0.32	0.19	1.51	2.16	0.90	0.04	n.d.	n.d.
	A3	35.9	0.30	7.40	n.d.	-5.0	-2.3	1.84	0.10	0.34	0.21	1.42	2.19	0.58	<0.001	0.086	<0.0055
Plateau	E58	38.0	1.0	7.35	n.d.	n.d.	n.d.	8.70	0.34	1.45	0.17	1.80	4.30	6.70	0.39	n.d.	n.d.
	I22	38.0	n.d.	7.36	n.d.	-8.9	-2.4	8.90	0.26	1.54	0.34	1.45	4.34	7.74	0.48	n.d.	n.d.
Anse Marsolle	E59	47.0	0.66	7.15	n.d.	n.d.	n.d.	5.50	0.47	1.10	0.30	1.40	3.30	5.10	0.11	n.d.	n.d.
	I5	45.0	n.d.	7.40	n.d.	-5.8	-2.1	16.5	0.57	1.36	1.56	1.42	2.73	18.70	0.80	n.d.	n.d.
	G4	43.8	n.d.	7.19	n.d.	-8.0	-2.4	5.44	0.34	1.13	0.26	1.39	2.86	5.30	0.18	n.d.	n.d.
Anse à la barque	G7	33.0	2.14	7.77	n.d.	-8.5	-2.5	10.5	0.40	1.10	1.22	1.74	3.06	11.5	0.46	n.d.	n.d.
Source Pigeon	G17	30.9	2.08	7.16	n.d.	n.d.	n.d.	13.4	0.32	0.69	0.79	2.17	3.45	10.9	0.56	0.30	n.d.
Tuyau	E54	55.0	1.6	7.55	n.d.	n.d.	n.d.	12.0	0.80	2.25	0.50	2.60	5.70	12.0	0.19	n.d.	n.d.
	I20	55.0	n.d.	6.75	n.d.	-9.0	-2.1	13.6	0.75	2.66	0.42	2.13	5.95	14.1	0.19	n.d.	n.d.
Ravine BO4	G10	33.0	n.d.	7.16	n.d.	-11.2	-2.8	32.0	0.58	2.11	0.47	1.59	4.58	30.4	0.59	n.d.	n.d.
NE-Terrain foot.	E55	59.0	4.2	6.10	n.d.	n.d.	n.d.	32.0	2.10	7.00	0.70	2.60	1.80	42.0	1.50	n.d.	0.07
	I8	51.0	n.d.	6.10	n.d.	-1.7	-0.8	48.0	1.60	12.2	0.90	2.30	1.69	69.7	1.28	n.d.	n.d.
Anse à Thomas	I24	n.d.	n.d.	7.52	n.d.	2.6	0.1	366	8.40	12.9	37.3	0.71	2.63	445	19.5	n.d.	<0.1
	G15	60.1	n.d.	7.09	n.d.	-2.4	-1.0	275	6.75	13.8	25.1	2.14	1.73	313	13.3	n.d.	<0.1
	GO6	82.2	67	7.53	242	n.d.	n.d.	356	7.67	15.8	35.0	1.61	1.86	441	19.8	n.d.	<0.1
	A4	33.1	46.9	7.98	n.d.	2.9	0.2	454	8.44	10.9	52.5	0.46	2.08	497	16.4	<0.008	<0.0055

Source	n°	T°C	cond.	pH	Eh	δD	δ ¹⁸ O	Na	K	Ca	Mg	SiO ₂	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	NH ₄
		°C	mS/cm		mV	‰	‰										
Anse Monchy	GO2	46.8	27.6	7.58	381	n.d.	n.d.	279	6.14	6.17	27.8	0.95	3.54	338	18.8	n.d.	n.d.
Mer Monchy	GO3	29.0	58.5	8.19	300	n.d.	n.d.	500	10.7	10.5	57.6	0.05	2.43	601	29.2	n.d.	n.d.
Anse Monchy	GO5	45.0	40.0	7.47	280	-2.6	-0.8	287	5.88	7.50	32.9	1.52	3.38	340	17.1	n.d.	n.d.
Bord de mer	E57	63.0	15	6.55	n.d.	n.d.	n.d.	130	7.20	18.5	2.20	1.10	1.40	170	2.90	n.d.	0.07
Prél. Mer	?	28.6	n.d.	8.21	n.d.	5.2	0.5	539	10.9	10.9	53.1	0.125	2.00	568	32.3	n.d.	n.d.
Prél. Mer	A6	31.3	49	8.12	n.d.	1.4	-0.3	456	8.82	9.61	55.4	0.125	2.21	500	19.8	<0.008	<0.0055
Mer	E62	23.0	52	8.55	n.d.	n.d.	n.d.	470	11.0	11.5	55.0	n.d.	2.50	570	22.0	n.d.	n.d.
Soufrière																	
Bains jaunes	E36	27.0	1.3	5.15	310	n.d.	n.d.	2.20	0.19	3.85	1.65	1.80	0.22	3.30	4.30	n.d.	n.d.
	GO7	26.4	1.32	5.12	461	n.d.	n.d.	2.30	0.18	4.00	1.88	2.65	0.24	4.26	4.69	n.d.	n.d.
Matouba (Eaux vives)	E45	59.0	1.3	5.95	-295	n.d.	n.d.	1.60	0.29	6.00	0.75	0.53	0.44	0.47	6.50	n.d.	n.d.
	GO13	59.0	2.20	5.90	-62	n.d.	n.d.	1.43	0.21	6.62	0.51	0.56	0.34	0.54	7.50	n.d.	n.d.
Gallion	E51	24.0	1.2	4.30	n.d.	n.d.	n.d.	1.70	0.15	3.95	1.65	2.60	n.d.	1.30	6.00	n.d.	n.d.
	GO8	43.1	n.d.	4.71	375	-7.5	-2.2	5.39	0.81	7.25	5.02	4.06	0.26	12.50	9.38	n.d.	n.d.
Echelle	E76	82.0	n.d.	3.00	n.d.	n.d.	n.d.	0.29	0.04	0.65	1.35	1.90	n.d.	5.20	5.50	n.d.	n.d.
Carbet	E77	45.0	0.79	6.50	250	n.d.	n.d.	2.50	0.44	1.50	1.70	1.30	2.80	3.60	1.90	n.d.	n.d.
	GO1	45.2	2.00	6.73	316	-7.5	-2.8	3.59	0.58	2.80	2.10	1.83	2.49	7.50	1.93	n.d.	n.d.
Habitat. Revel	GO9	34.5	0.41	7.35	445	n.d.	n.d.	1.43	0.11	0.60	0.27	1.40	2.26	0.25	0.28	n.d.	n.d.
Grosse Corde	GO12	35.9	3.03	6.46	475	-5.1	-1.9	5.04	0.60	5.55	3.95	1.52	1.88	20.00	1.00	n.d.	n.d.
Moscou	GO14	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.21	0.01	0.03	0.03	0.10	0.09	0.22	0.04	n.d.	n.d.
Moscou (Bassin Bleu)	GO15	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	-5.0	-2.3	0.87	0.09	1.30	0.74	1.06	0.51	1.38	1.65	n.d.	n.d.
Gourbeyre																	
Dolé	E2	31.0	0.56	6.50	n.d.	n.d.	n.d.	1.30	0.23	1.30	0.85	2.00	3.70	0.78	0.90	n.d.	n.d.
(usine)	GO10	30.6	0.73	6.47	518	n.d.	n.d.	1.43	0.17	1.52	1.03	1.35	2.93	1.64	0.96	n.d.	n.d.
(ravine)	GO11	32.5	0.85	6.73	508	n.d.	n.d.	1.61	0.21	1.65	1.12	1.48	3.30	1.82	1.04	n.d.	n.d.
Capes	E64	32.0	0.63	6.60	180	n.d.	n.d.	1.70	0.28	1.40	0.90	1.40	3.60	0.95	0.90	n.d.	n.d.
St-Charles	E65	23.0	0.38	6.10	-340	n.d.	n.d.	1.10	0.22	1.00	0.48	1.20	1.00	0.88	1.15	n.d.	0.1
	GO4	24.9	0.51	6.22	-74	n.d.	n.d.	1.56	0.26	1.10	0.56	1.53	1.82	1.33	1.87	n.d.	n.d.
Divers																	
Sofaïa	E31	29.0	0.19	3.45	10	n.d.	n.d.	0.40	0.022	0.08	0.07	0.69	n.d.	0.45	0.35	n.d.	n.d.
Ravine chaude	E66	33.0	0.20	6.50	130	n.d.	n.d.	1.20	0.088	0.33	0.23	1.20	1.80	0.35	0.02	n.d.	n.d.
Ravine Bourceau	G14	25.2	0.035	7.87	n.d.	-8.4	-2.9	0.49	0.026	0.27	0.13	0.83	0.99	0.62	<0.01	0.30	n.d.
Rivière Ravine	I52	20.0	n.d.	7.40	n.d.	-7.0	-2.6	1.55	0.075	0.50	n.d.	2.01	2.28	0.83	n.d.	n.d.	n.d.
	G13	24.5	n.d.	7.82	n.d.	-9.8	-2.5	1.09	0.051	0.374	0.25	1.13	1.82	0.76	0.021	n.d.	n.d.
Rivière Bois Malher	G20	23.4	0.17	7.35	n.d.	-5.8	-2.6	0.66	0.043	0.25	0.17	0.73	0.55	0.87	0.25	0.20	n.d.
Rivière Beaugendre	G21	23.3	0.22	7.71	n.d.	-6.1	-2.2	0.64	0.015	0.50	0.16	n.d.	1.58	0.51	0.02	0.80	n.d.
Pluie	I51	20.0	n.d.	5.70	n.d.	1.6	-1.1	0.18	0.0055	0.012	0.021	n.d.	0.068	0.152	0.0016	n.d.	n.d.
	A7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	-30.3	-4.6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.101	n.d.	n.d.	n.d.

Source	n°	T°C	cond.	pH	Eh	δD	δ ¹⁸ O	Na	K	Ca	Mg	SiO ₂	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	NH ₄
		°C	mS/cm		mV	‰	‰										
Forage BO2																	
20/11/70	ApSe	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	291	25.7	55.6	0.025	n.d.	n.d.	412	n.d.	n.d.	n.d.
(corrigé : 80% liq.)	ApSe	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	233	20.6	44.5	0.020	n.d.	n.d.	330	n.d.	n.d.	n.d.
BRGM (7/82, TP)	G6	48.5	47.6	5.58	n.d.	-1.9	-0.6	252	22.7	48.4	0.24	10.95	1.74	355	0.30	n.d.	0.211
reconstitué 1988	A5b	n.d.	n.d.	4.93	n.d.	-0.2	-0.2	225	20.8	48.0	0.04	8.75	0.52	335	0.18	n.d.	n.d.
reconstitué 1991	A5	164.5	31.5	5.32	n.d.	-1.4	-0.8	238	19.1	46.2	0.049	8.80	0.35	340	0.12	0.001	0.078
Forage BO3																	
	G11	80.3	62.5	4.89	n.d.	-2.1	n.d.	212	18.4	40.2	0.095	9.83	0.635	301	0.125	n.d.	0.115
	?	85.0	n.d.	6.12	n.d.	5.8	0.3	243	20.6	44.1	0.081	6.74	0.55	348	0.13	n.d.	n.d.
Forage BO4																	
?	?	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	291	24.0	56.8	0.095	11.15	0.39	440	0.125	n.d.	n.d.
éch. manomètre	G8	36.6	n.d.	5.52	n.d.	-2.6	-0.8	224	15.7	45.3	0.243	7.33	1.03	316	0.32	n.d.	0.089
?	?	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.3	-0.2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
n.d. : non déterminé																	
T : Tonani (1963)																	
I : lundt et Ouzounian (1984a)																	
G : lundt et Ouzounian (1984b)																	
GO : Fabriol et Ouzounian (1986)																	
A : Abou Akar et al. (1992)																	

Source	Li	Rb	Cs	Sr	Ba	Br	B	F	Al	Fe	Mn	As
Bouillante												
Ravine	n.d. 0.004	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	0.009 <0.01	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.
Sce Ravine	<0.0015 0.0033	<0.0012 2.5E-04	6.0E-06 <7.0E-07	<0.0114 0.0011	n.d. <5.0E-06	n.d. 0.0013	n.d. 0.010	0.01 0.0105	<0.002 4.1E-04	<0.002 <0.0004	<0.002 <0.00009	2.5E-05 <2.6E-05
Dispensaire	n.d. 0.004 <0.0015	n.d. n.d. <0.0012	n.d. n.d. 3.0E-06	n.d. n.d. <0.0011	n.d. n.d. n.d.	n.d. n.d. n.d.	0.047 n.d. n.d.	0.002 n.d. <0.005	n.d. n.d. n.d.	n.d. n.d. <0.002	n.d. n.d. <0.0002	n.d. n.d. 2.3E-05
Terrain football												
Tonton	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.037	0.003	n.d.	n.d.	n.d.
Bourceau	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.001	n.d.	n.d.	n.d.
Dieudonné	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Curé	n.d. n.d. <0.0015	n.d. n.d. <0.0012	n.d. n.d. 3.0E-06	n.d. n.d. <0.0011	n.d. n.d. n.d.	n.d. n.d. n.d.	n.d. n.d. n.d.	0.019 n.d. <0.005	n.d. n.d. n.d.	n.d. n.d. <0.002	n.d. n.d. <0.0002	n.d. n.d. 1.9E-05
Lise	0.00072 n.d. n.d. <0.0015	1.3E-04 n.d. n.d. <0.0012	<7.0E-07 n.d. n.d. 1.1E-06	0.001 n.d. n.d. <0.0011	4.5E-05 n.d. n.d. n.d.	<0.0013 n.d. n.d. n.d.	0.0056 0.037 n.d. n.d.	0.0053 0.005 n.d. <0.005	1.9E-04 n.d. n.d. n.d.	<0.0004 n.d. n.d. <0.002	<0.00009 n.d. n.d. <0.0002	7.0E-05 n.d. n.d. 1.70E-05
Plateau	0.00058 n.d. 0.004	1.10E-04 n.d. n.d.	<7.0E-07 n.d. n.d.	0.0008 n.d. n.d.	3.0E-05 n.d. n.d.	<0.0013 n.d. n.d.	0.0046 n.d. n.d.	0.0053 n.d. n.d.	1.5E-04 n.d. n.d.	<0.0004 n.d. n.d.	<0.00009 n.d. n.d.	<2.6E-05 n.d. n.d.
Anse Marsolle	n.d. 0.009	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	0.032 n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.
Anse à la barque	0.00865 0.0029	<0.0012 <0.0012	2.4E-05 5.00E-06	0.0029 0.058	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. <0.009	<0.005 <0.005	n.d. n.d.	<0.002 <0.002	<0.0002 <0.002	1.7E-05 2.5E-05
Source Pigeon	<0.0015	<0.0012	n.d.	<0.0171	n.d.	n.d.	<0.009	0.010	n.d.	<0.002	n.d.	n.d.
Tuyau	n.d. 0.036	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. <0.01	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.
Ravine BO4	0.039	<0.0012	1.1E-06	0.0043	n.d.	n.d.	0.14	<0.005	n.d.	<0.002	<0.0002	2.00E-05
NE-Terrain foot.	n.d. 0.102	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	0.11 n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.
Anse à Thomas	0.085 0.111	n.d. 0.0034	n.d. 6.8E-06	n.d. 0.0076	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. n.d.	n.d. 0.26	n.d. 0.016	n.d. n.d.	n.d. <0.002	n.d. 0.0063
	0.123	5.0E-05	<1.0E-06	0.0856	n.d.	n.d.	0.46	0.026	0.0253	0.00222	n.d.	<1.0E-05
	0.043	0.0016	3.0E-05	0.089	4.90E-04	0.59	0.38	0.037	0.0013	<0.0004	0.0018	0.0011

Source	Li	Rb	Cs	Sr	Ba	Br	B	F	Al	Fe	Mn	As
Anse Monchy	0.017	2.0E-05	<1.0E-06	0.039	n.d.	n.d.	0.26	0.016	0.0043	2.6E-04	n.d.	<1.0E-05
Mer Monchy	0.020	n.d.	n.d.	0.074	n.d.	n.d.	0.43	0.032	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Anse Monchy	0.016	3.0E-05	<1.0E-06	0.046	n.d.	n.d.	0.21	0.011	0.010	6.10E-04	n.d.	<1.0E-05
Bord de mer	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.41	0.013	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Prél. Mer	0.025	0.00138	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.53	0.047	n.d.	n.d.	n.d.	3.5E-05
Prél. Mer	0.029	0.0365	0.00272	0.0833	5.60E-04	0.61	0.37	0.042	0.00282	<0.0004	0.001	0.0186
Mer	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.53	0.047	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Soufrière												
Bains jaunes	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.072	0.023	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	<0.003	1.2E-04	3.0E-06	0.0023	n.d.	n.d.	0.032	0.021	0.0151	3.4E-04	n.d.	<1.0E-05
Matouba (Eaux vives)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.092	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	<0.003	4.0E-05	<1.0E-06	0.0068	n.d.	n.d.	0.0065	0.095	0.00719	0.00376	n.d.	<1.0E-05
Gallion	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.024	0.02	n.d.	0.10	n.d.	n.d.
	<0.003	4.3E-04	8.0E-06	0.0014	n.d.	n.d.	0.110	0.042	0.0231	0.242	n.d.	<1.0E-05
Echelle	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.027	n.d.	n.d.	0.9	n.d.	n.d.
Carbet	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.030	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	<0.003	1.7E-04	9.0E-06	0.0046	n.d.	n.d.	0.023	0.01	0.00157	3.0E-05	n.d.	<1.0E-05
Habitat. Revel	<0.003	6.0E-05	5.0E-06	0.0011	n.d.	n.d.	0.0046	0.005	7.3E-04	0.00693	n.d.	<1.0E-05
Grosse Corde	<0.003	4.1E-04	2.3E-05	0.010	n.d.	n.d.	0.037	0.005	0.01	0.00242	n.d.	<1.0E-05
Moscou	<0.003	n.d.	n.d.	0.0009	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Moscou (Bassin Bleu)	<0.003	2.1E-04	<1.0E-06	0.0009	n.d.	n.d.	0.011	0.011	0.00119	9.00E-05	n.d.	<1.0E-05
Gourbeyre												
Dolé	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.016	0.007	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
(usine)	<0.003	1.5E-04	1.7E-05	0.0023	n.d.	n.d.	0.0083	0.005	0.00107	4.2E-04	n.d.	<1.0E-05
(ravine)	<0.003	1.3E-04	7.0E-06	0.0026	n.d.	n.d.	0.0092	0.011	0.00125	7.8E-04	n.d.	<1.0E-05
Capes	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.090	0.007	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
St-Charles	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.013	0.024	n.d.	0.003	n.d.	n.d.
	<0.003	1.1E-04	<1.0E-06	0.0012	n.d.	n.d.	0.011	0.037	0.00548	0.00172	n.d.	<1.0E-05
Divers												
Sofaïa	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.018	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ravine chaude	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.022	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ravine Bourceau	<0.0015	<0.0012	n.d.	<0.0114	n.d.	n.d.	<0.009	<0.005	<0.002	<0.002	<0.002	n.d.
Rivière Ravine	n.d.	<0.0012	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	<0.0015	<0.0012	n.d.	<0.001	n.d.	n.d.	0.009	<0.005	n.d.	<0.002	<0.0002	n.d.
Rivière Bois Malher	<0.0015	<0.0012	n.d.	<0.0114	n.d.	n.d.	<0.009	<0.005	<0.002	<0.002	<0.002	n.d.
Rivière Beaugendre	<0.0015	<0.0012	n.d.	<0.0114	n.d.	n.d.	<0.009	<0.005	<0.002	<0.002	<0.002	n.d.
Pluie	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Source	Li	Rb	Cs	Sr	Ba	Br	B	F	Al	Fe	Mn	As
Forage BO2												
20/11/70	n.d.	n.d.	n.d.	0.21	0.25	n.d.	2.31	0.066	< 0.01	0.036	0.073	n.d.
(corrigé : 80% liq.)	n.d.	n.d.	n.d.	0.17	0.20	n.d.	1.85	0.053	< 0.008	0.029	0.058	n.d.
BRGM (7/82, TP)	0.63	0.0246	3.4E-05	0.18	n.d.	n.d.	0.63	0.027	n.d.	0.066	0.21	0.00412
reconstitué 1988	0.43	n.d.	n.d.	<0.04	n.d.	0.51	1.08	0.06	n.d.	n.d.	n.d.	0.07
reconstitué 1991	0.62	0.0015	8.4E-05	0.20	0.049	0.42	1.18	0.067	3.9E-04	0.0025	0.07	0.00174
Forage BO3												
	0.58	0.02339	5.5E-05	0.16	n.d.	n.d.	0.82	0.021	0.0838	n.d.	0.084	0.00185
	0.62	n.d.	5.3E-05	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.24	n.d.	n.d.	n.d.	0.00185
Forage BO4												
?	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.089	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
éch. manomètre	0.58	0.01754	6.1E-05	0.18	n.d.	n.d.	0.74	0.016	0.4827	0.093	0.48	0.00369
?	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
n.d. : non déterminé												
T : Tonani (1963)												
I : lundt et Ouzounian (1984a)												
G : lundt et Ouzounian (1984b)												
GO : Fabriol et Ouzounian (1986)												
A : Abou Akar et al. (1992)												

ANNEXE 2

Géothermomètres chimiques utilisés

Application sur les échantillons analysés dans les études antérieures



*** Géothermomètre Na/K (M), (F) et (G)**

Les concentrations de Na et K sont exprimées en mol/l.

(M)	$t(^{\circ}\text{C}) = (908/[0.7 + \log(\text{Na}/\text{K})]) - 273.15$	Michard (1979)
(F)	$t(^{\circ}\text{C}) = (1217/[1.256 + \log(\text{Na}/\text{K})]) - 273.15$	Fournier (1979)
(G)	$t(^{\circ}\text{C}) = (1390/[1.52 + \log(\text{Na}/\text{K})]) - 273.15$	Giggenbach (1988)

*** Géothermomètre Na/K/Ca**

Les concentrations de Na, K, Ca et Mg sont exprimées en mol/l.

$$t(^{\circ}\text{C}) = (1647/[\log(\text{Na}/\text{K}) + \beta \log(\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) + 2.24]) - 273.15$$

$$\beta = \frac{4}{3} \text{ si } t < 100^{\circ}\text{C}, \beta = \frac{1}{3} \text{ si } t > 100^{\circ}\text{C} \quad \text{Fournier and Truesdell (1973)}$$

Correction avec les concentrations en Mg (Fournier and Potter, 1979)

Calculer la température avec le géothermomètre Na/K/Ca.

Si $t < 70^{\circ}\text{C}$, aucune correction ne doit être faite.

Si $t > 70^{\circ}\text{C}$, calculer $R = (2\text{Mg}/(\text{K} + 2\text{Ca} + 2\text{Mg})) \times 100$.

Si $R > 50$, ignorer la température calculée avec le géothermomètre Na/K/Ca et supposer que la température de l'eau en profondeur est semblable à celle mesurée à l'émergence.

Si $5 \leq R \leq 50$, calculer la correction à partir de l'équation suivante :

$$\Delta t_{\text{Mg}} = 10.66 - 4.7415R + 325.87(\log R)^2 - 1.032 \times 10^5(\log R)^2/T - 1.968 \times 10^7(\log R)^2/T^2 + 1.605 \times 10^7(\log R)^3/T^2.$$

Si $0.5 < R < 5$, calculer la correction à partir de l'équation :

$$\Delta t_{\text{Mg}} = -1.03 + 59.971 \log R + 145.05(\log R)^2 - 36711(\log R)^2/T - 1.67 \times 10^7 \log R/T^2.$$

Si la valeur calculée pour Δt_{Mg} est négative ou < 1.5 , ne pas appliquer la correction.

Soustraire la valeur de Δt_{Mg} à la température calculée avec le géothermomètre Na/K/Ca.

*** Géothermomètre Ca/K**

Les concentrations de Ca et K sont exprimées en mol/l.

$$t(^{\circ}\text{C}) = (1460/[-1.51 + \log(\sqrt{\text{Ca/K}})]) - 273.15 \quad \text{Michard (1990)}$$

*** Géothermomètre K/Mg**

Les concentrations de K et Mg sont exprimées en ppm.

$$t(^{\circ}\text{C}) = (4410/[14.0 - \log(\text{K}^2/\text{Mg})]) - 273.15 \quad \text{Giggenbach (1988)}$$

*** Géothermomètre à silice (Fournier and Rowe, 1966)**

La concentration de SiO_2 est exprimée en mol/l.

Quartz	$t(^{\circ}\text{C}) = (1309/[0.41 - \log(\text{SiO}_2)]) - 273.15$
--------	---

Quartz avec perte de vapeur maximale à 100°C	$t(^{\circ}\text{C}) = (1522/[0.97 - \log(\text{SiO}_2)]) - 273.15$
--	---

Calcédoine	$t(^{\circ}\text{C}) = (1015/[0.125 - \log(\text{SiO}_2)]) - 273.15$
------------	--

Silice amorphe	$t(^{\circ}\text{C}) = (-731/[0.26 + \log(\text{SiO}_2)]) - 273.15$
----------------	---

*** Géothermomètre Na/Li**

Les concentrations de Na/Li sont exprimées en mol/l.

Si $[\text{Cl}] < 0.3 \text{ M}$,

$$t(^{\circ}\text{C}) = (1000/[0.38 + \log(\text{Na/Li})]) - 273.15 \quad \text{Fouillac et Michard (1981)}$$

Si $[\text{Cl}] \geq 0.3 \text{ M}$,

$$t(^{\circ}\text{C}) = (1195/[-0.13 + \log(\text{Na/Li})]) - 273.15 \quad \text{Fouillac et Michard (1981)}$$

Les concentrations de Na/Li sont exprimées en ppm.

$$t(^{\circ}\text{C}) = (1590/[0.799 + \log(\text{Na/Li})]) - 273.15 \quad \text{Kharaka et al. (1982)}$$

*** Géothermomètre Mg-Li**

Les concentrations de Mg et Li sont exprimées en ppm.

$$t(^{\circ}\text{C}) = (2200/[5.470 + \log(\sqrt{\text{Mg/Li}})]) - 273.15 \quad \text{Kharaka and Mariner (1989)}$$

*** Géothermomètre K-Sr**

Les concentrations de K et Sr sont exprimées en mol/l.

$$t(^{\circ}\text{C}) = (1225/[2.22 + \log(\sqrt{\text{Sr/K}})]) - 273.15 \quad \text{Michard (1990)}$$

*** Géothermomètre $\delta^{18}\text{O}$ ($\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$)**

Les δ sont exprimés en ‰ par rapport au SMOW.

$$\delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4) - \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}) = 2.88 (10^6/T^2) - 4.1 \quad (\text{T en } ^{\circ}\text{K}) \quad \text{Mizutani and Rafter (1969)}$$

Tableau 2 - Géothermomètres chimiques appliqués aux échantillons analysés dans les études précédentes																				
Source	n°	T°C	Qz	Qzv	Cd	Sia	Na-K	Na-K	Na-K	Na-K-Ca	Na-K-Ca	Na-K-Ca	K-Ca	K-Mg	Na-Li (F)	Na-Li (F)	Na-Li	Mg-Li	K-Sr	
		°C					(M)	(F)	(G)	$\beta=4/3$	$\beta=1/3$	corr. Mg			Cl<0.3M	Cl>0.3M	(Kh)			
Bouillante																				
Ravine	E52	50	148	142	86	27	238	249	262	90	182	91	144	76						
	I23	50	140	135	78	19	223	237	252	93	178	79	145	73	29	155	102	25		
Scé Ravine	G3	49	141	135	79	20							144	73						
	A2	49	145	139	84	24	217	232	247	89	174	81	140	71	23	144	95	21	152	
Dispensaire	E53	50	145	139	83	24	211	227	242	89	172	78	140	64						
	I21	50	134	130	73	14	226	239	253	89	177	53	141	68	30	156	102	21		
	G5	38	143	137	81	22	225	239	253	88	177	65	141	68						
Terrain football	E56	99	124	122	64	5	489	423	418	61	229		126	78						
Tonton	E74	38	120	118	60	2	547	459	448	76	247	88	148	75						
Bourceau	E12	25	55	61	0	-53	216	232	246	50	158		97	44						
Dieudonné	E13	23					158	184	202	28	128		68	30						
Curé	E60	40	139	134	78	18	243	253	266	68	174		120	66						
	I6	42	128	125	68	9	237	248	262	74	175	102	126	70						
	G1	40	128	125	68	9	234	245	259	72	173	105	124	70						
	A1	40	132	128	71	12	222	236	250	70	168	100	120	66	-10	90	62	2	125	
Lise	E61	35	128	125	68	9	217	232	247	72	168	60	122	56						
	I7	32	120	118	60	2	193	213	229	71	159	64	118	55						
	G2	35	132	128	71	12	187	208	224	69	156		115	54						
	A3	36	129	126	68	9	189	210	226	67	156		114	53	-16	81	57	-5	113	
Plateau	E58	38	142	137	81	21	158	184	202	93	153	114	137	83						
	I22	38	130	126	69	10	133	163	182	82	140	98	123	69	-5	98	68	21		
Anse Marsolle	E59	47	128	125	68	9	240	250	264	106	188	97	162	84						
	I5	45	129	126	68	9	147	175	193	122	158	18	166	69	1	108	74	22		
	G4	44	128	125	67	8	203	221	237	93	171	96	143	78	41	175	113	37	146	
Anse à la barque	G7	33	140	135	79	19	155	182	200	108	157	19	153	64	-19	75	53	5	77	
Source Pigeon	G17	31	153	146	91	31	118	150	169	114	143	20	153	64						
Tuyau	E54	55	164	155	101	41	211	227	242	118	182	107	172	91						
	I20	55	152	145	90	30	190	211	227	113	173	122	163	92	65	215	135	61		
Ravine BO4	G10	33	135	131	74	15	99	133	153	120	135	96	155	84	30	156	102	62	169	
NE-Terrain foot.	E55	59	164	155	101	41	209	226	241	141	189	153	196	114						

Source	n°	T°C	Qz	Qzv	Cd	Sia	Na-K	Na-K	Na-K	Na-K-Ca	Na-K-Ca	Na-K-Ca	K-Ca	K-Mg	Na-Li (F)	Na-Li (F)	Na-Li	Mg-Li	K-Sr
		°C					(M)	(F)	(G)	$\beta=4/3$	$\beta=1/3$	corr. Mg			Cl<0.3M	Cl>0.3M	(Kh)		
	I8	51	156	149	94	34	144	172	191	119	156	144	163	102	54	197	125	77	
Anse à Thomas	I24	n.d.	95	96	37	-20	115	147	167	241	171	n.d.	280	97	-24	68	48	33	
	G15	60	152	145	90	30	120	151	171	217	169	60	258	96	-8	93	64	42	396
	GO6	82	136	131	75	15	111	143	163	225	165	82	263	95	-13	86	59	41	259
	A4	33	76	80	20	-36	100	134	154	255	165	33	288	92	-46	34	24	18	267
Anse Monchy	GO2	47	108	108	49	-9	112	145	164	247	170	47	285	92	-55	20	15	9	277
Mer Monchy	GO3	29	5	16	-44	-92	110	143	163	277	174	29	313	97	-64	7	5	5	303
Anse Monchy	GO5	45	132	129	72	13	107	140	160	236	165	45	272	89	-58	16	12	6	264
Bord de mer	E57	63	115	114	56	-2	191	211	227	194	197	150	251	134					
Prél. Mer	?	29	30	39	-21	-72	106	139	159	279	172	29	313	99	-61	11	8	9	
Prél. Mer	A6	31	30	39	-21	-72	103	137	157	264	168	31	298	93	-55	20	15	11	275
Mer	E62	23					116	148	168	273	177	23	311	99					
Soufrière																			
Bains jaunes	E36	27	142	137	81	21	242	251	265	41	162		90	45					
	GO7	26	165	156	103	42	229	242	256	40	157		87	43					116
Matouba (Eaux vives)	E45	59	82	85	25	-31	357	336	341	42	192		98	62					
	GO13	59	84	87	27	-29	319	309	318	31	177		83	59					96
Gallion	E51	24	164	155	101	41	244	254	267	33	158		80	40					
	GO8	43	194	180	130	70	323	312	320	80	202	49	140	64					241
Echelle	E76	82	145	139	83	24	313	305	313	17	168	82	66	19					
Carbet	E77	45	124	122	64	5	351	332	338	86	213	32	149	62					
	GO1	45	143	137	81	22	336	321	328	86	208	45	148	66					166
Habitat. Revel	GO9	35	128	125	68	9	227	240	255	56	164		105	52					110
Grosse Corde	GO12	36	132	129	72	13	286	285	296	76	190	50	132	60					143
Moscou	GO14	n.d.	24	33	-27	-78	176	199	216	29	135		70	27					19
Moscou (Bassin Bleu)	GO15	n.d.	114	113	54	-4	266	270	282	33	164		82	38					105
Gourbeyre																			
Dolé	E2	31	148	142	86	27	352	333	339	62	201		121	56					
(usine)	GO10	31	126	123	66	7	286	285	295	51	179		104	48					113
(ravine)	GO11	33	131	127	70	11	300	295	305	57	185		111	51					121
Capes	E64	32	128	125	68	9	339	324	330	69	201		128	59					

Source	n°	T°C	Qz	Qzv	Cd	Sia	Na-K (M)	Na-K (F)	Na-K (G)	Na-K-Ca $\beta=4/3$	Na-K-Ca $\beta=1/3$	Na-K-Ca corr. Mg	K-Ca	K-Mg	Na-Li (F) Cl<0.3M	Na-Li (F) Cl>0.3M	Na-Li (Kh)	Mg-Li	K-Sr
St-Charles	E65	23	120	118	60	2	376	349	353	64	208		125	61					
	GO4	25	133	129	72	13	341	325	332	71	203	69	131	63					157
Divers																			
Sofaïa	E31	29	93	95	36	-21	190	211	227	38	144		81	34					
Ravine chaude	E66	33	120	118	60	2	222	236	250	60	164		109	49					
Ravine Bourceau	G14	25	102	103	43	-14	187	208	224	24	136		66	31					
Rivière Ravine	I52	20	148	142	87	27	177	200	217	50	145		93						
	G13	25	117	115	57	-1	174	197	215	41	140		84	38					
Rivière Bois Malher	G20	23	96	97	38	-19	208	225	241	40	151		85	38					
Rivière Beaugendre	G21	23					117	149	168	5	102		39	20					
Pluie	I51	20					139	168	187	28	121	20	66	20					
	A7																		
Forage BO2																			
20/11/70	ApSe						245	254	267	246	232		317	294					348
corrigé (80% liq.)	ApSe						245	254	267	229	236		306	287					333
BRGM (7/82, TP)	G6	49	279	246	214	157	247	256	269	240	231	219	312	224	62	211	133	149	341
reconstitué 1988	A5b	n.d.	257	229	192	133	251	258	271	232	231	261	303	267	50	188	121	168	
reconstitué 1991	A5	165	258	230	192	134	232	244	258	229	223	247	297	256	64	214	134	178	313
Forage BO3																			
	G11	80	268	238	203	145	242	252	265	231	227	220	300	237	67	218	136	163	321
	?	85	234	211	169	109	239	250	263	237	227	226	307	247	64	213	134	169	
Forage BO4																			
?	?																		
éch. manomètre	G8	37	281	248	215	159	236	247	261	240	227	228	309	251					
?	?		241	217	176	117	216	231	246	216	213	204	279	206	64	213	134	146	297
T : Tonani (1970)																			
I : Iundt et Ouzounian (1984a)																			
G : Iundt et Ouzounian (1984b)																			
GO : Fabriol et Ouzounian (1985)																			
A : Abou Akar et al. (1992)																			

ANNEXE 3

**Composition chimique des échantillons de gaz
prélevés sur certaines sources et fumerolles
ainsi que dans le forage BO2**

Application des géothermomètres à gaz



Géothermomètres à gaz

Les concentrations des gaz sont exprimées en % volumique.

* Géothermomètre CO₂-H₂S-H₂-CH₄ (D'Amore and Panichi, 1980) :

Si CO ₂ < 75%	P _{CO2} = 0.1 atm.
Si CO ₂ > 75%	P _{CO2} = 1 atm.
Si CO ₂ > 75% et CH ₄ >2H ₂ et H ₂ S>2H ₂	P _{CO2} = 10 atm.

$$t(^{\circ}\text{C}) = (24775/[2 \log(\text{CH}_4/\text{CO}_2) - 6 \log(\text{H}_2/\text{CO}_2) - 3 \log(\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2) + 7 \log P_{\text{CO}_2} + 36.05]) - 273.15$$

* Géothermomètre CO₂-H₂-CH₄ (Marini, 1987) :

$$t(^{\circ}\text{C}) = (4255/[9.31 - \log(\text{H}_2/\text{CH}_4) - \log P_{\text{CO}_2}]) - 273.15$$

* Géothermomètre H₂-Ar (Giggenbach and Goguel, 1989) :

$$t(^{\circ}\text{C}) = 70 [2.5 + \log(\text{H}_2/\text{Ar})]$$

Tableau 3 - Composition chimique des gaz associés à certaines sources et aux zones fumerolliennes de la région de Bouillante ainsi qu'au fluide du forage BO2. Application des géothermomètres à gaz

sources ou fumerolles	n° échant. ou date	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	N ₂ (%)	Ar (%)	He (%)	H ₂ (%)	H ₂ S (%)	CH ₄ (%)	C ₂ H ₆ (%)	C ₃ H ₈ (%)	N ₂ /Ar (vol.)	He/Ar (vol.)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)
source Cave BO2	BO9504	20.1	15.9	61.6	0.76	0.077	< 0.005	< 0.005	0.33	0.0053	0.0005	81	0.101	n.d.	n.d.	n.d.
source sous-marine	BO9512	0.15	20.5	78.9	0.95	0.046	< 0.005	< 0.005	0.0019	< 0.0002	< 0.0002	83	0.048	n.d.	n.d.	n.d.
source sous-marine	BO9513	34.8	5.25	55.7	0.69	0.077	< 0.005	< 0.005	3.30	0.037	< 0.0002	81	0.112	n.d.	n.d.	n.d.
fumerolle pont	BO9624B	3.0	21.8	75.2	0.86	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.02	< 0.0002	< 0.0002	87	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
fumerolle plage	BO9624C	0.071	20.4	78.0	0.90	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.0015	< 0.0002	< 0.0002	87	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
forage BO2	1996	94.8	< 0.005	4.8	< 0.005	< 0.005	0.11	0.45	0.044	< 0.0002	< 0.0002	n.d.	n.d.	211	184	n.d.
forage BO2	1988	93.7	0.0015	3.6	0.046	0.0035	0.13	2.0	0.5	n.a.	n.a.	78	0.076	189	157	207
forage BO2	1983	82.2	0.4	5.4	0.07	0.0034	0.3	1.2	0.6	n.a.	n.a.	77	0.049	204	170	219
forage BO2	1982	82.6	3.0	12.6	0.2	0.0035	0.3	0.8	0.6	n.a.	n.a.	63	0.018	199	170	187
forage BO2	1970	91.5	1.4	12.6	4.8	n.a.	0.8	0.8	0.5	n.a.	n.a.	2.6	n.d.	222	194	121

T1 : température calculée à partir du géothermomètre CO₂/H₂S/H₂/CH₄ (D'Amore and Panichi, 1980) en fixant pCO₂ = 1 atm

T2 : température calculée à partir du géothermomètre CO₂/H₂/CH₄ (Marini, 1987) en fixant pCO₂ = 1 atm

T3 : température calculée à partir du géothermomètre H₂/Ar (Giggenbach and Goguel, 1989)

n.a. : non analysé

n.d. : non déterminé

Les rapports volumiques N₂/Ar et He/Ar atmosphériques sont respectivement 84 et 5.7.10⁻⁴

Un rapport volumique He/Ar de 0.1 est généralement caractéristique d'une origine magmatique

BRGM
Service Reprographie
Impression et façonnage

BRGM
SERVICE MINIER NATIONAL
Département Procédés, Etudes et Analyses
B.P. 6009 - 45060 ORLEANS cedex 02 - Tél. 02.38.64.34.34 - Fax : 02.38.64.35.18