

Etat des connaissances du potentiel géothermique de Mayotte

Rapport final

BRGM/RP-54700-FR
mai 2006

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2005 06ENEB07

H. Traineau, B. Sanjuan, M. Brach, J.-C. Audru

Vérificateur :

Nom : DESPLAN Alain

Date : 05/06/2006

Original signé par

Approbateur :

Nom : ROUBICHOU Philippe

Date : 08/06/2006

Original signé par

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

COLLECTIVITE DEPARTEMENTALE DE MAYOTTE



Mots clés : Mayotte, Potentiel géothermique, Volcanisme, Géologie structurale, Faille, Hydrogéologie, Géothermomètre, Analyse chimique, Analyse isotopique, Lac de cratère, Gaz magmatiques, Lagon, Barrière corallienne

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

Traineau H., Sanjuan B., Brach M., Audru J.-C. (2006) – Etat des connaissances du potentiel géothermique de Mayotte. BRGM/RP-54700-FR, 81 p., 31 ill., 2 ann.

Synthèse

Cadre et objet de l'étude

Actuellement, la production d'électricité à Mayotte est assurée exclusivement par une centrale thermique, située sur Petite Terre, et fonctionnant au gasoil. Aussi et afin de diversifier ses sources d'approvisionnement, le Conseil Général a mis en place un vaste programme ayant pour objectif la valorisation des énergies renouvelables. L'évaluation du potentiel géothermique de Mayotte fait partie de ce programme.

Cette étude s'inscrit dans la programmation 2005 des missions de service public du BRGM (projet 06ENEB07). Elle a été cofinancée par la Collectivité Départementale de Mayotte et le BRGM.

Son objectif était d'évaluer le potentiel géothermique de l'île de Mayotte. Elle a donné lieu à une campagne de terrain qui s'est déroulée du 16 au 24 novembre 2005, combinant une reconnaissance géologique et géochimique. L'approche géologique a abordé les aspects classiques de l'exploration géothermique en contexte volcanique : géologie du volcanisme, géologie structurale, cartographie des manifestations hydrothermales actuelles et fossiles, hydrogéologie. La reconnaissance géochimique a consisté à échantillonner des eaux de surface, de puits et de forages d'alimentation en eau, l'eau de mer, ainsi que des émanations de gaz sous-marines. Des mesures sur site ont également été menées. Les analyses chimiques et isotopiques des fluides prélevés ont été réalisées dans les laboratoires du BRGM.

Mayotte est une île d'origine volcanique. L'essentiel de son édification s'est déroulé entre 8 et 1,5 Ma. Seules la région de Mamoudzou au NE de Grande Terre et l'île de Petite Terre sont d'un âge relativement récent, égal ou inférieur à 0,5 Ma. C'est la raison pour laquelle les travaux de reconnaissance ont considéré l'ensemble de Mayotte avec un accent sur ces deux dernières régions.

Reconnaissance de Grande Terre et bilan

La région de Mamoudzou et plus généralement Grande Terre ne présente aucun indice de l'existence d'une ressource géothermale. Aucune source thermique n'a été répertoriée. Aucune anomalie thermique n'a été décelée dans les nappes superficielles exploitées par les forages d'alimentation en eau disséminés sur Grande Terre. Aucune trace de contamination des eaux superficielles par des fluides géothermaux profonds n'a été détectée dans les deux échantillons analysés provenant de la Rivière Majimbini et du forage Kaouéni 1.

Les dégagements ténus d'hydrogène sulfuré (H_2S) relatés sur l'îlot sableux de Mtsanga Maji, à proximité de l'îlot Mtsamboro, ont été confirmés par voie chimique. Ils ne semblent, toutefois, pas être en relation avec une activité hydrothermale et sont plutôt attribués à un phénomène de dégradation de matières organiques en milieu anaérobie.

L'île de Grande Terre, en accord avec l'âge ancien de son volcanisme, apparaît donc dépourvue de ressource géothermale.

Reconnaissance géologique de Petite Terre

L'âge du volcanisme trachytique, qui a édifié Petite Terre sur la barrière récifale au Nord-Est de Grande Terre, a été précisé récemment entre 4 000 et 7 000 ans BP. Les deux appareils volcaniques du Dziani Dzaha et de La Vigie ont émis un magma trachytique similaire provenant très probablement d'une même chambre magmatique située à l'aplomb de Petite Terre. Leurs dépôts rythmiques de cendres et ponces constituent l'essentiel de l'île, complétés par quelques cônes basaltiques stromboliens associés ou non avec des coulées de laves. Son âge récent ainsi que les caractéristiques de ce volcanisme trachytique apparaissent a priori favorables à l'existence d'une ressource géothermale à l'aplomb de l'île.

Le relevé de la fissuration a permis de définir quatre familles directionnelles, qui reflètent des directions de fracturation connues régionalement : N30-40°, N80-90°, N130-140° (la direction des Comores), N170-180°. La direction N170° apparaît comme la direction de fracturation profonde, qui aurait contrôlé la remontée du magma trachytique vers la surface.

Comme sur Grande Terre, aucune source thermale n'a été répertoriée sur Petite Terre. Les mesures de température dans les puits et forages d'alimentation en eau de Pamandzi et l'Abattoir ne montrent aucune anomalie. Des phénomènes de dégagements gazeux ont été relatés il y a quelques années sur le fond du lac Dziani Dzaha à la faveur d'une baisse du niveau d'eau. D'autres phénomènes de dégagements gazeux mentionnés lors de travaux antérieurs ont été observés sur la plage située à l'est de l'aéroport et se prolongeant dans le lagon (ill. a). L'intensité du dégazage y est spectaculaire. La superficie de la zone intéressée est de 300 x 200 m au minimum. Le flux de gaz y est particulièrement élevé, comme en témoigne la baisse importante du pH mesuré dans l'eau de mer du lagon (de 8,2 jusqu'à 5,85) en réponse à l'acidification causée par l'interaction avec le gaz carbonique (CO₂). La pression partielle des émanations de CO₂, estimée à 0,83 atm à partir de la valeur mesurée de pH la plus basse (5,85), est environ 2 300 fois plus élevée que la pression partielle de CO₂ atmosphérique moyenne (3,6.10⁻⁴ atm). Aucune anomalie thermique n'a été détectée en lien avec ces dégagements gazeux.

Géochimie des fluides

Les analyses des eaux superficielles de Petite Terre prélevées en surface et dans un puits à l'Abattoir ne révèlent aucun indice de contamination par des fluides géothermaux profonds. Elles montrent seulement des mélanges entre eau météorique et eau de mer. Une étude antérieure avait mis en évidence des teneurs élevées en fluorures dans les eaux de Petite Terre, attribuables à des percolations de gaz et fluides volcaniques ou au lessivage des cendres et ponces trachytiques riches en fluor.

L'eau du Lac Dziani Dzaha est très basique avec un pH de 9,2. Elle est issue de processus d'évaporation d'eau de mer, ainsi que de lessivage de carbonates et des cendres trachytiques environnantes, riches en sodium. Même si cela n'a pas pu être démontré à partir de la composition chimique de l'eau, on sait que ce lac est également alimenté par des eaux de surface d'origine météorique, qui viennent se mélanger à l'eau de mer et subissent, donc, les mêmes processus d'évaporation que cette dernière.

Ces eaux ne montrent pas d'interaction avec des gaz acides comme le gaz carbonique ou l'hydrogène sulfuré, qui aurait eu pour conséquence leur acidification. Les phénomènes de dégagements gazeux au fond du lac doivent donc être relativement limités, mais pourraient être à l'origine de la formation des (ou d'une partie des) carbonates, qui sont lessivés.

Les gaz prélevés sur la plage de l'aéroport et dans le lagon sont d'origine magmatique et constitués essentiellement de gaz carbonique (98% CO₂), avec un peu de méthane (0,4% CH₄) et d'hélium (0,02% He). L'hydrogène sulfuré (H₂S) est absent. Leur composition chimique et les valeurs isotopiques de δ¹³C du CO₂ sont proches de celles des gaz rencontrés sur des volcans actifs de points chauds (hot spots) comme la Réunion ou Hawaï. La présence de ces gaz est reliée à l'activité volcanique récente de Petite Terre. Ils proviendraient du dégazage du magma trachytique stocké dans la chambre magmatique et sous forme d'intrusions hypovolcaniques dans les conduits d'alimentation à l'aplomb des deux appareils du Dziani Dzaha et de La Vigie (ill. b). L'hypothèse d'une intrusion magmatique n'ayant pas atteint la surface à l'aplomb de la zone de dégazage sur la plage de l'aéroport est envisagée.

Implications sur le potentiel géothermique de Petite Terre

La présence de ces gaz magmatiques a des implications sur l'évaluation du potentiel géothermique de Petite Terre. En effet, au cours de leur remontée vers la surface, ces gaz magmatiques à haute température sont à même, si les conditions de perméabilité le permettent, de réchauffer des fluides superficiels (eaux météoriques, eau de mer) infiltrés à quelques kilomètres de profondeur et développer ainsi un système géothermal. C'est un modèle classique de développement de réservoir géothermique haute température en contexte volcanique. La présence de gaz magmatiques peut donc être considérée comme un indice de conditions propices au développement d'un réservoir géothermal.

A Petite Terre, les gaz magmatiques sont bien présents tandis que les indices de fluides géothermaux profonds sont absents. Il est, cependant, difficile de conclure définitivement à l'absence de ressources géothermales en raison de la configuration de Petite Terre inhabituelle en prospection géothermique. Petite Terre est posée sur la barrière récifale entre le lagon et la mer ouverte (ill. b). L'épaisseur des formations carbonatées récifales est estimée à environ 150 m. Ces formations, qui ont été décrites comme étant karstiques, sont probablement envahies par l'eau de mer. Cet écran marin est susceptible de masquer d'éventuelles remontées de fluides géothermaux, à l'exception des gaz.

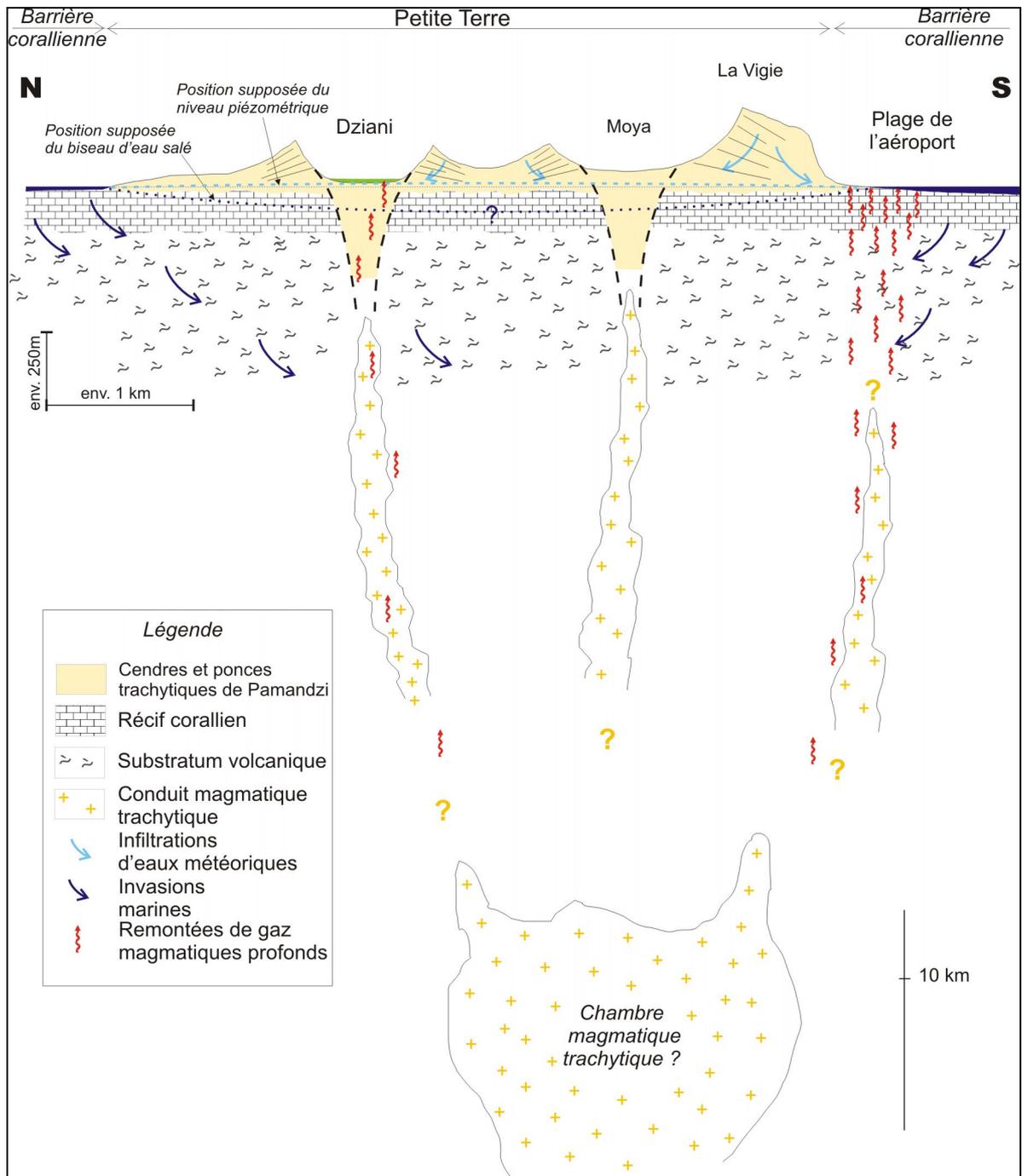


Illustration b - Section verticale interprétative orientée N-S à travers l'île de Petite Terre et montrant la géologie du substratum et les liens entre dégagements gazeux et activité magmatique récente. Les formations carbonatées récifales sur lesquelles reposent les formations volcaniques récentes de Petite Terre sont probablement envahies par l'eau de mer et peuvent constituer un écran aux remontées d'éventuels fluides géothermaux profonds.

Donc, bien qu'aucun indice probant n'ait été observé, il subsiste un doute sur l'existence ou non d'une ressource géothermale à l'aplomb de Petite Terre en raison de sa configuration inhabituelle en prospection géothermique.

Perspectives

Des travaux complémentaires pourraient permettre de lever le doute sur la présence ou non d'une ressource géothermale à l'aplomb de Petite Terre. En particulier, une campagne d'exploration plus détaillée du site de dégazage situé sur la plage et dans le lagon à l'est de l'aéroport, avec des moyens d'observations et de prélèvements sur le fond du lagon, permettraient de mieux délimiter et caractériser ce site de dégagements gazeux. A la lumière des résultats acquis ici, il serait également important de pouvoir localiser, prélever et analyser les gaz émis au fond du lac Dziani Dzaha pour vérifier leur parenté géochimique avec ceux émis sur la plage de l'aéroport.

La réalisation d'un lever gravimétrique sur le site de la plage et dans le lagon permettrait de vérifier l'hypothèse de l'intrusion hypovolcanique sous la zone de dégagements gazeux. La mise en place d'un réseau de capteurs sismiques appropriés permettrait peut être de détecter une éventuelle micro-sismicité liée au dégazage et de localiser l'origine des gaz en profondeur.

En fonction des résultats complémentaires obtenus, la réalisation de un ou plusieurs sondages de reconnaissance pourrait être éventuellement envisagée dans une phase ultérieure, afin de confirmer ou infirmer une anomalie thermique au sein du substratum volcanique sous les formations récifales. La profondeur de ces sondages devra être de l'ordre de quelques centaines de mètres au minimum afin de s'affranchir de l'écran marin.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Résumé de l’histoire volcanique de Mayotte	15
3. Reconnaissance de Grande Terre.....	17
3.1. DONNEES RECUEILLIES SUR LA REGION DE MAMOUDZOU.....	17
3.2. DONNEES RECUEILLIES SUR LES DEGAGEMENTS GAZEUX DE L’ILOT MTSANGA MAJI 20	
3.3. AUTRES DONNEES RECUEILLIES SUR GRANDE TERRE	21
4. Reconnaissance de Petite Terre.....	23
4.1. L’HISTOIRE VOLCANIQUE DE PETITE TERRE	23
4.2. LA FRACTURATION TECTONIQUE OBSERVEE SUR PETITE TERRE	26
4.2.1. Plage de Moya	26
4.2.2. Plages des Badamiers et de Papani.....	28
4.2.3. Plage de l’aéroport.....	28
4.2.4. Synthèse de la fracturation observée sur Petite Terre	30
4.3. DONNEES HYDROGEOLOGIQUES RECUEILLIES SUR PETITE TERRE	32
4.4. LE LAC DZIANI DZAHA.....	33
4.5. LES INDICES HYDROTHERMAUX ET MANIFESTATIONS PARTICULIERES	35
4.6. SYNTHESE DES OBSERVATIONS GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES SUR PETITE TERRE.....	45
5. Géochimie des fluides	47
5.1. PRELEVEMENTS D’ECHANTILLONS D’EAU, DE GAZ INCONDENSABLES ET MESURES SUR SITE	47
5.2. ANALYSES CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES DES ECHANTILLONS D’EAU ET DE GAZ INCONDENSABLES.....	49
5.2.1. Analyses chimiques des eaux.....	49
5.2.2. Analyses isotopiques des eaux.....	49
5.2.3. Analyses chimiques des gaz.....	49
5.2.4. Analyses isotopiques des gaz.....	52
5.3. INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS EN GEOCHIMIE DES EAUX.....	52

5.3.1. Origine des eaux	52
5.3.2. Nature des eaux et processus d'interaction eau - roches volcaniques	54
5.4. INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS EN GEOCHIMIE DES GAZ.....	60
6. Synthèse et perspectives	63
6.1. SYNTHÈSE DES TRAVAUX ET CONCLUSIONS.....	63
6.1.1. Région de Mamoudzou et Grande Terre.....	63
6.1.2. Petite Terre	63
6.2. PERSPECTIVES	68
6.2.1. Le potentiel géothermique de Petite Terre	68
6.2.2. Implications sur l'activité volcanique de Petite Terre	68
7. Bibliographie.....	69

Liste des illustrations

Illustration 1 - Schéma volcano-structural de l'île de Mayotte (d'après Stieltjes, 1988).	16
Illustration 2 - Panorama de la zone industrielle et commerciale de Kaouéni installée dans une vaste cuvette à fond plat, correspondant à un cratère phréato-magmatique daté aux alentours de 0,5 Ma.	17
Illustration 3 - Extrait de la carte géologique au 1/50 000 de Mayotte (Stieltjes, 1988) montrant la position des appareils phréatomagmatiques de Kaouéni et de Kavani et l'extension des dépôts pyroclastiques (en brun orangé) datés vers 0,5 Ma. Les appareils stromboliens ponctuels (points bleus sur fond blanc) sont contemporains ou postérieurs.....	18
Illustration 4 - Localisation sur la carte topographique au 1/25 000 de l'IGN du forage d'eau Kaouéni 1 et de la Rivière Majimbini, où des prélèvements d'eau ont été effectués.....	19
Illustration 5 - Caractéristiques et mesures de température dans deux forages d'eau localisé dans la région de Mamoudzou, Grande Terre (tiré de Mauroux, 1992).	19
Illustration 6 - L'îlot sableux de Mtsanga Maji (à gauche) et une illustration de la différence de teinte du sable en surface (beige) et du sable sous la surface (gris) auquel est liée l'odeur d'hydrogène sulfuré (H ₂ S).	20
Illustration 7 - Mesures de température dans des sondages d'alimentation en eau disséminés sur Grande Terre (tiré de Mauroux, 1992).....	21

Illustration 8 - Extrait de la carte géologique de Mayotte au 1/50 000 (Stieltjes, 1988) montrant la géologie de Petite Terre. Les dépôts de cendres et ponces trachytiques des appareils du Dziani Dzaha et de La Vigie sont représentés en brun foncé et clair. Les appareils stromboliens ponctuels (points bleus sur fond blanc) sont contemporains ou antérieurs. La barrière corallienne est représentée en rose clair.....	24
Illustration 9 - L'appareil phréato-magmatique récent du Dziani Dzaha sur Petite Terre, avec son lac de cratère et sa morphologie bien conservée qui indique un âge récent, estimé indirectement entre 4 000 et 7 000 ans BP.	25
Illustration 10 - Empilement des dépôts rythmiques de retombées et déferlantes de l'appareil volcanique du Dziani Dzaha dans la falaise de la plage de Papani.	25
Illustration 11 - Rosaces directionnelles des fissures relevées dans différents secteurs de Petite Terre durant la campagne de reconnaissance géothermique.	27
Illustration 12 - Illustrations de la fissuration observée sur l'île de Petite Terre.....	29
Illustration 13 - Localisation des observations remarquables et des points de prélèvements réalisés durant la campagne de reconnaissance de Petite Terre.	31
Illustration 14 - Caractéristiques et mesures de température dans deux forages d'eau localisés sur Petite Terre (tiré de Mauroux, 1992), et d'un puits à l'Abattoir (M. Husein ALI), visité au cours de la campagne de reconnaissance.	32
Illustration 15 - Prélèvement de l'eau du lac Dziani à partir de la berge (haut) et illustration des monticules de larves d'insectes sur la berge sud-ouest du lac. La teinte vert jade de l'eau est naturelle.....	34
Illustration 16 - Détail des prélèvements effectués dans la zone de dégagements gazeux.	37
Illustration 17 - Photographies illustrant les dégagements gazeux sur la plage et dans le lagon situés à l'est de l'aéroport de Pamandzi.....	38
Illustration 18a - Localisation et intensité des dégagements gazeux sur la plage et dans le lagon situés à l'Est de l'aéroport de Pamandzi. Les limites nord et sud de la zone de dégagements gazeux ont été approximativement tracées. Les limites est et ouest n'ont pas été définies.....	39
Illustration 19 - Prélèvements d'échantillons d'eau et de gaz incondensables, mesures sur site, effectués au cours de cette étude.	48
Illustration 20 - Résultats des analyses chimiques (espèces majeures et traces) et des analyses isotopiques, effectuées sur les échantillons d'eau prélevés au cours de cette étude.	50
Illustration 21 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques effectuées sur les échantillons de gaz prélevés au cours de cette étude (la composition chimique et la valeur isotopique en carbone-13 de l'air atmosphérique sont également reportées dans ce tableau).	51
Illustration 22 - Diagramme $\delta^{18}\text{O}$ - δD pour les échantillons d'eau étudiés.....	53
Illustration 23 - Diagramme δD - concentrations de Cl pour les échantillons d'eau étudiés.	53

Illustration 24 - Diagramme $\delta^{18}\text{O}$ - concentrations de Cl pour les échantillons d'eau étudiés.....	53
Illustration 25 - Positionnement des échantillons d'eau analysés au cours de cette étude, dans le diagramme ternaire Cl-HCO ₃ -SO ₄ de Giggenbach (1988).....	55
Illustration 26 - Application des géothermomètres chimiques aux différents échantillons d'eau analysés au cours de cette étude.	58
Illustration 27 - Positionnement des échantillons d'eau, analysés au cours de cette étude, dans le diagramme ternaire Na-K-Mg de Giggenbach (1988).....	59
Illustration 28 - Diagramme de Marty et Giggenbach (1990) indiquant les concentrations relatives de N ₂ , He et Ar pour trois des échantillons de gaz analysés au cours de cette étude (à comparer aux concentrations des échantillons de gaz provenant de La Réunion et d'Hawaï).	61
Illustration 29 - Diagramme de Marty et Giggenbach (1990) indiquant les concentrations relatives de N ₂ , CO ₂ et Ar pour trois des échantillons de gaz analysés au cours de cette étude (à comparer aux concentrations des échantillons de gaz provenant de La Réunion et d'Hawaï).	61
Illustration 30 - Section verticale interprétative entre Mamoudzou et Petite Terre selon un profil orienté WNW-ESE, montrant la géologie et les écoulements de fluides supposés dans le substratum (l'échelle verticale est triplée par rapport à l'échelle horizontale pour mieux visualiser les reliefs).	65
Illustration 31 - Section verticale interprétative selon un profil orientée N-S à travers l'île de Petite Terre, montrant la géologie du substratum et les liens probables entre dégagements gazeux et activité magmatique récente.	66

Liste des annexes

Annexe 1 Liste des points de mesures réalisés dans la zone de dégagement gazeux sur la plage de l'aéroport	73
Annexe 2 Liste des prélèvements de fluides.....	79

1. Introduction

Actuellement, la production d'électricité à Mayotte est assurée exclusivement par une centrale thermique, située sur Petite Terre, et fonctionnant au gasoil. Aussi et afin de diversifier ses sources d'approvisionnement, le Conseil Général a mis en place un vaste programme ayant pour objectif la valorisation des énergies renouvelables. L'évaluation du potentiel géothermique de Mayotte fait partie de ce programme.

Cette étude s'inscrit dans la programmation 2005 des missions de service public du BRGM (projet 06ENEB07). Elle a été cofinancée par la Collectivité Départementale de Mayotte et le BRGM.

La reconnaissance du potentiel géothermique de Mayotte a fait l'objet d'une courte campagne de terrain du 16 au 24 novembre focalisée sur la géologie et la géochimie des fluides. En géologie, la reconnaissance de terrain a abordé les aspects classiques de l'exploration géothermique :

- géologie du volcanisme ;
- fracturation ;
- cartographie des manifestations hydrothermales actuelles et fossiles ;
- hydrogéologie.

Les observations de terrain ont été complétées par des données sur les forages d'alimentation en eau et piézomètres disponibles dans les rapports du BRGM, des données de la récente campagne bathymétrique BATHYMAY, des informations sur le lac Dziani parues dans les revues locales.

En géochimie, les mesures sur site et prélèvements ont porté sur des fluides (eaux et gaz) rencontrés dans différents sites de Petite Terre et Grande Terre, en relation étroite avec la reconnaissance géologique. Les analyses chimiques et isotopiques de ces échantillons ont ensuite été réalisées dans les laboratoires du BRGM, à Orléans.

L'accent de cette campagne de reconnaissance géothermique a porté sur les zones de volcanisme récent (moins de 1 Ma) susceptibles de receler une source de chaleur potentielle pour le développement d'un système géothermal. Elle a donc concerné en priorité :

- la région de Mamoudzou sur Grande Terre ;
- l'ensemble de Petite Terre.

2. Résumé de l'histoire volcanique de Mayotte

L'histoire volcanique de Mayotte a été retracée par Stieltjes (1988), lors de l'établissement de la carte géologique au 1/50 000. Elle est synthétisée sur le schéma volcano-structural proposé par Stieltjes (1988 ; ill. 1). Mayotte appartient à la Chaîne Volcanique des Comores située dans l'Océan Indien au Nord-Ouest de Madagascar. Elle est considérée comme l'île la plus ancienne de la Chaîne. La Grande Comore, qui se trouve à l'autre extrémité de la Chaîne, est la plus récente avec le volcan actif du Kartala.

Selon Stieltjes (1988), l'essentiel de l'édification de Grande Terre s'est déroulé entre 8 Ma et 2 Ma. Elle s'est formée par la coalescence de plusieurs grands volcans d'âge Miocène-Pliocène qui ont émis des laves sous-saturées (basanites, ankaramites, néphélinites), avec :

- un édifice volcanique méridional autour de la Baie de Bouéni et incluant le Chirongui, le Benara et la Presqu'île Sud ;
- un édifice septentrional avec des extrusions phonolitiques formant des reliefs tels que le Ochoungui, Mlima Mapouéra,... ;
- un édifice au nord-est de l'île effondré en mer et dont l'îlot de Mtsamboro serait un témoin.

Plus récemment, au Pléistocène (1,5 à 2 Ma), le volcanisme se concentre au Nord de Grande Terre et édifie l'imposant massif du Mlima Msaperé, où dominent les phonolites.

Vers 0,5 Ma, l'activité volcanique reprend au Nord-Est de Grande Terre avec des éruptions explosives très violentes qui donnent naissance aux anneaux de tufs pyroclastiques trachytiques de Kavani et Kaouéni. L'activité volcanique va se poursuivre de façon sporadique entre Mamoudzou et Petite Terre jusqu'à une époque très récente. Une dizaine de cônes de scories basaltiques s'édifient dans le lagon (Dzaoudzi, Zissioua M'Tsanga, Sisoa Bouzi,...). Enfin deux volcans coalescents (La Vigie et Dziani Dzaha) vont émettre des magmas différenciés trachytiques sous forme explosive (cendres, ponces) et édifier l'île de Petite Terre reposant sur la barrière récifale. Ces deux volcans ont des morphologies très bien conservées, qui suggèrent un âge très récent.

Une confirmation indirecte de cet âge récent a été apportée par des sondages carottés, réalisés sur la barrière corallienne de Mayotte. Plusieurs carottes mettent en évidence des niveaux de cendres et ponces volcaniques de composition trachytique intercalés entre des niveaux coralliens datés entre 4 000 et 7 000 ans BP (Zinke *et al.*, 2001, 2003). Ces ponces trachytiques sont assimilées aux ponces trachytiques émises par les appareils du Dziani Dzaha et de La Vigie sur Petite Terre.

Il existe donc un volcanisme récent à Petite Terre qui a émis des magmas trachytiques. Il reste à évaluer si ce volcanisme a pu causer un impact thermique à

quelques kilomètres de profondeur, avec par exemple la mise en place d'intrusions hypovolcaniques, suffisant pour permettre le développement d'un système géothermal.

Grande Terre, en lien avec son âge plus ancien, est caractérisée par une érosion et une altération intenses des formations volcaniques. De plus, l'île est affectée par un phénomène de subsidence qui se traduit par une morphologie littorale très découpée et le développement d'une barrière récifale qui entoure l'île et délimite un vaste lagon ; barrière récifale qui a été traversée par les dernières manifestations volcaniques de Petite Terre.

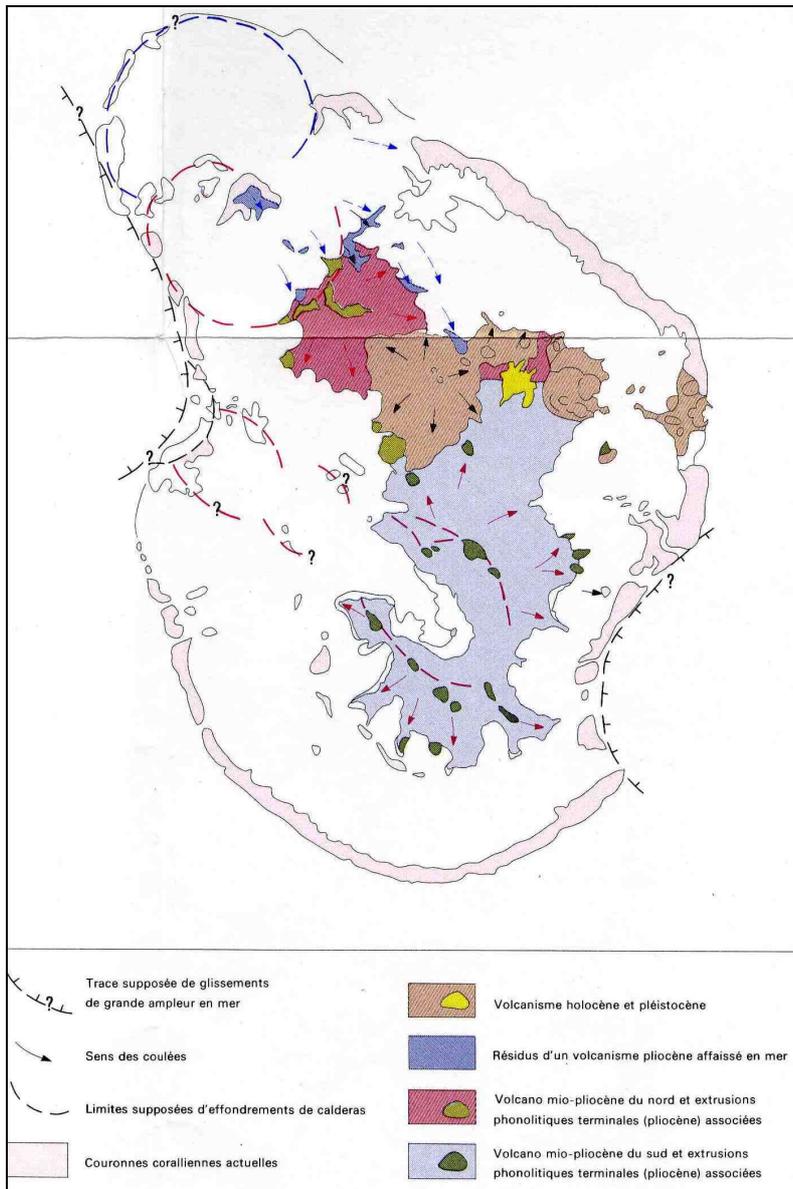


Illustration 1 - Schéma volcano-structural de l'île de Mayotte (d'après Stieltjes, 1988).

3. Reconnaissance de Grande Terre

3.1. DONNEES RECUEILLIES SUR LA REGION DE MAMOUDZOU

La zone industrielle et commerciale de Kaouéni occupe le fond plat d'un vaste cratère phréatomagmatique (ill. 2) dont l'âge est estimé autour de 0,5 Ma (Stieltjes, 1988). L'extrait de la carte géologique au 1/50 000 (ill. 3) permet de localiser les appareils volcaniques attribués à cette phase volcanique. La reconnaissance de la zone de Kaouéni et de la zone contiguë de Kavani n'a permis de déceler aucun indice de l'existence d'une ressource géothermale en profondeur. Il n'a pas été observé de source thermo-minérale, sol chaud, dégagement de gaz, ..., ou autre manifestation hydrothermale de surface actuelle ou fossile (dépôt de travertin, par exemple). La fracturation tectonique dans les dépôts volcaniques récents est absente à l'exception d'une structure reconnue lors de travaux du BRGM Mayotte.

Les mesures de température faites dans les forages d'eau de Kavani 1 et Kaouéni 1 ne montrent aucune anomalie thermique avec des valeurs de 28 à 29°C (ill. 5).

Deux prélèvements d'eau ont été effectués dans le forage Kaouéni 1 et la Rivière Majimbini (ill. 4). Les résultats des analyses géochimiques (discutés dans le chapitre consacré à la géochimie des fluides) ne montrent aucune minéralisation particulière pouvant laisser suspecter une contamination de ces eaux de surface par des fluides géothermaux profonds minéralisés.

En conclusion, la région de Mamoudzou ne présente aucun indice géologique ou géochimique de surface pouvant indiquer l'existence d'une ressource géothermale à son aplomb.



Illustration 2 - Panorama de la zone industrielle et commerciale de Kaouéni installée dans une vaste cuvette à fond plat, correspondant à un cratère phréato-magmatique daté aux alentours de 0,5 Ma.

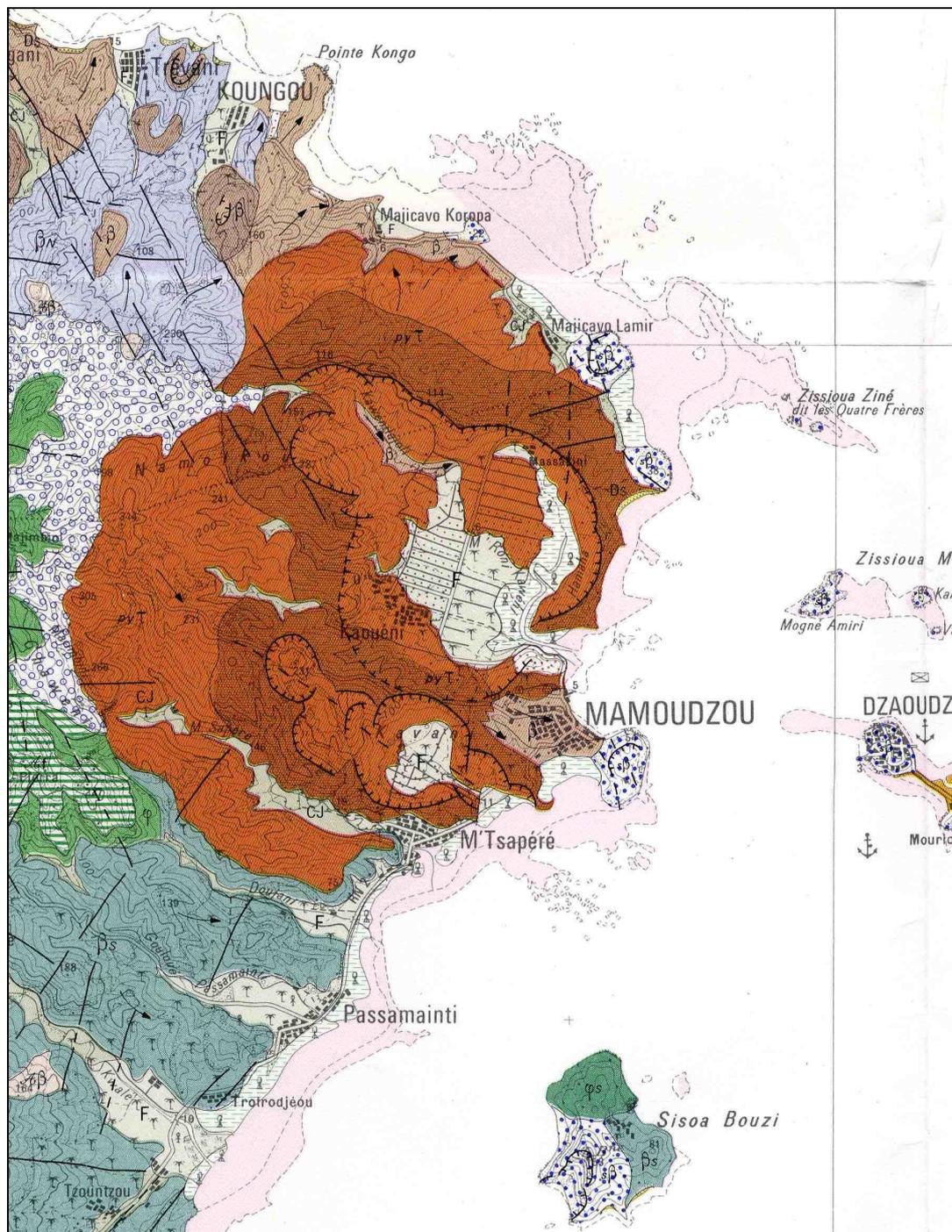


Illustration 3 - Extrait de la carte géologique au 1/50 000 de Mayotte (Stieltjes, 1988) montrant la position des appareils phréatomagmatiques de Kaouéni et de Kavani et l'extension des dépôts pyroclastiques (en brun orangé) datés vers 0,5 Ma. Les appareils stromboliens ponctuels (points bleus sur fond blanc) sont contemporains ou postérieurs.

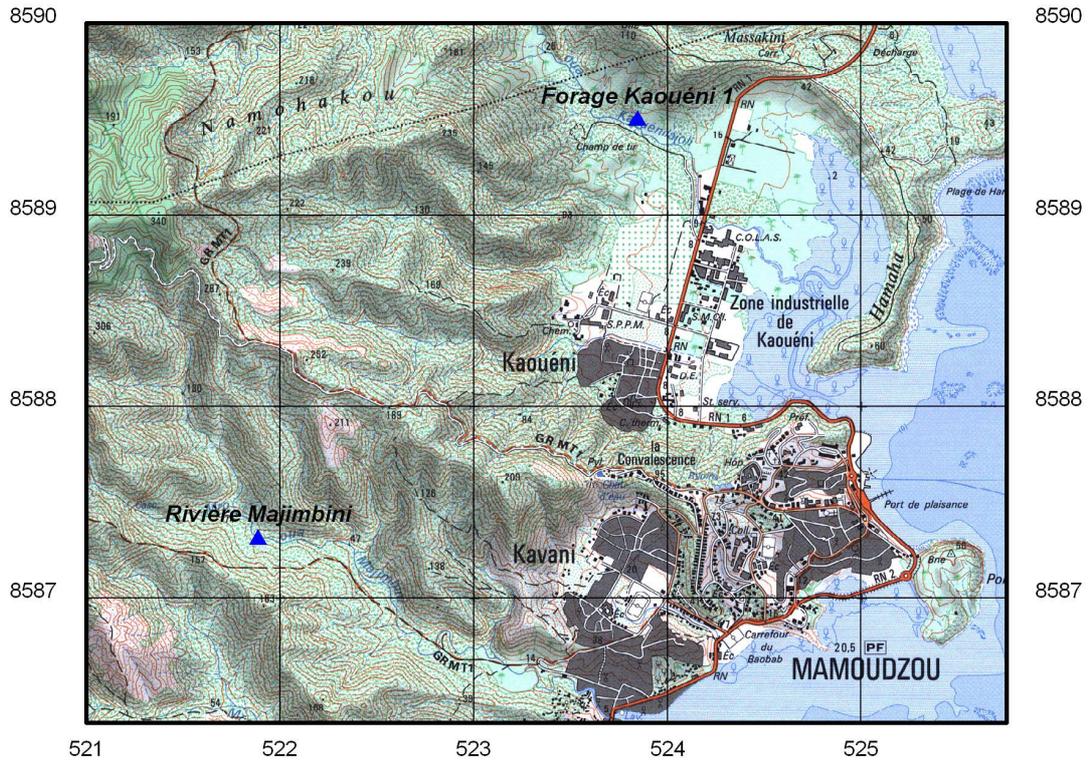


Illustration 4 - Localisation sur la carte topographique au 1/25 000 de l'IGN du forage d'eau Kaouéni 1 et de la Rivière Majimbini, où des prélèvements d'eau ont été effectués.

Nom du forage	Kavani 1	Kaouéni 1
Coordonnées IGN X	523,825	524,070
Y	8588,750	8589,240
Z NGM	13,40	11
Profondeur finale (m)	50	46,8
Niveau statique (m)	4,4	4,8
Niveau statique (m NGM)	9	6
Lithologie	Limon Altérites Basaltes altérés Alluvions	Sables Limons Basalte scoriacé
Perméabilité	bonne	
Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$)	300 - 350	380 - 400
Date de mesure	8 mars 1991	durant forage
Température ($^{\circ}\text{C}$)	29,9 (à 30 m)	28,2

Illustration 5 - Caractéristiques et mesures de température dans deux forages d'eau localisés dans la région de Mamoudzou, Grande Terre (tiré de Mauroux, 1992).

3.2. DONNEES RECUEILLIES SUR LES DEGAGEMENTS GAZEUX DE L'ÎLOT MTSANGA MAJI

L'îlot sableux de Mtsanga Maji, situé à proximité de l'îlot Mtsamboro au NE de Grande Terre, nous avait été indiqué comme étant le siège d'odeurs sulfurées ("œufs pourris"). Il était donc important de vérifier la véracité de ces observations dans la mesure où les dégagements de gaz H₂S (hydrogène sulfuré) responsables de ce type d'odeur sont fréquemment associés aux fumerolles et sources chaudes des champs géothermiques et des zones volcaniques actives.

Cet îlot émerge à marée basse seulement (ill. 6). Il a une superficie de 200 x 100 m environ. En surface, le sable grossier constitué de débris coquilliers est de couleur beige et ne présente pas d'odeur particulière. En creusant à 10-15 cm de profondeur (c'est-à-dire sous le niveau de l'eau), le sable acquiert une teinte grise (ill. 6) et dégage effectivement une odeur ténue d'œufs pourris. Le test à l'acétate de cadmium qui permet de révéler la présence d'hydrogène sulfuré dissous dans l'eau, s'est révélé positif.

La température du sable saturé d'eau ne montre aucune anomalie particulière avec une valeur mesurée de 28,7°C, qui est la température de l'eau de mer. En l'absence d'anomalie thermique, il ne semble donc pas que cette présence d'hydrogène sulfuré puisse être mise en relation avec un phénomène hydrothermal. Elle est plutôt attribuée à un phénomène de décomposition de matières organiques en condition anaérobie dans le sable sous le niveau de la mer, analogue au processus observé dans les marais ou vasières en bord de mer.



Illustration 6 - L'îlot sableux de Mtsanga Maji (à gauche) et une illustration de la différence de teinte du sable en surface (beige) et du sable sous la surface (gris) auquel est liée l'odeur d'hydrogène sulfuré (H₂S).

3.3. AUTRES DONNEES RECUEILLIES SUR GRANDE TERRE

Excepté la région de Mamoudzou présentée ci-avant, l'âge du volcanisme de Grande Terre (8 à 2 Ma) est peu compatible avec l'existence d'un système géothermal actuel lié à ce volcanisme. Un travail de recherche d'indices a néanmoins été mené. Les conclusions sont les suivantes :

- aucune source thermo-minérale ou autre manifestation hydrothermale de surface actuelle n'est répertoriée sur l'île ;
- les températures mesurées dans les différents forages d'alimentation en eau disséminés sur l'île ne montrent aucune anomalie (ill. 7). Elles oscillent entre 25°C et 28°C.

Ces observations amènent à conclure que, en accord avec l'âge ancien de son volcanisme, l'île de Grande Terre apparaît dépourvue de ressource géothermique.

<i>Nom du forage</i>	<i>Profondeur (m)</i>	<i>Date de la mesure</i>	<i>Température (°C)</i>
Combani 1	41,5	7 mars 1991	26,1
Combani 2	45	"	26,1
Kahani 1	45	"	26,3
Kahani 2	40	"	25,3
Dembéni 1	47	8 mars 1991	27,6
Hanjangua	29	7 mars 1991	27,6
Kani Kéli	28	"	27,3
N'Ronabéja	54,5	"	27,3
Dzoumogné	46	"	27
Tsangamouji	41,5	"	26,7
Tsingoni	49	"	25,9
Tsararano	49	8 mars 1991	28,2
Poroani	58,5	7 mars 1991	27,9
N'Réréni	60	"	27,5

Illustration 7 - Mesures de température dans des sondages d'alimentation en eau disséminés sur Grande Terre (tiré de Mauroux, 1992).

4. Reconnaissance de Petite Terre

La reconnaissance de Petite Terre a permis de collecter des informations géologiques et hydrogéologiques variées, qui présentent un intérêt dans l'évaluation de son potentiel géothermique. Elles sont présentées dans l'ordre suivant :

- l'histoire volcanique de Petite Terre ;
- la fracturation tectonique observée sur Petite Terre ;
- les données hydrogéologiques collectées sur Petite Terre ;
- le lac Dziani Dzaha ;
- les indices hydrothermaux et manifestations particulières.

Les résultats des analyses géochimiques de fluides (eaux, gaz) prélevés sur Petite Terre sont discutés dans le chapitre suivant consacré à la géochimie des fluides.

4.1. L'HISTOIRE VOLCANIQUE DE PETITE TERRE

Dans l'histoire volcanique de Mayotte, Petite Terre et les îlots situés dans le lagon entre Mamoudzou et Dzaoudzi représentent le jalon le plus récent. La géologie de cette zone est résumée sur l'extrait de la carte géologique au 1/50 000 de Stieltjes (1988) fourni sur l'illustration 8.

Suite à l'activité volcanique reconnue autour de Mamoudzou et datée vers 0,5 Ma, le volcanisme va migrer et se poursuivre de façon sporadique entre Mamoudzou et Petite Terre. Des appareils stromboliens vont d'abord édifier une dizaine de cônes de scories basaltiques dans le lagon et sur la barrière récifale et émettre quelques coulées de laves. Puis, à une époque très récente, deux appareils volcaniques coalescents (Dziani Dzaha et La Vigie) de type maar ou anneaux de tuf, localisés sur la barrière récifale, vont émettre des magmas trachytiques sous forme d'explosions phréato-magmatiques très violentes. Les empilements de dépôts rythmiques de cendres et ponces vont édifier l'île de Petite Terre.

L'appareil volcanique le mieux conservé morphologiquement est celui du Dziani.Dzaha C'est un anneau de tufs avec un cratère de taille importante (1 km de diamètre) occupé aujourd'hui par un lac (ill. 9). Ses dépôts rythmiques de retombées et déferlantes pyroclastiques sont bien visibles dans la falaise de la plage de Papani, où ils forment un empilement de 100 mètres d'épaisseur (ill. 10).

Dziani Dzaha avait été précédé par un autre appareil volcanique du même type culminant à 203 mètres (La Vigie) et avec un cratère ouvert sur le lagon (plages de Moya). La succession des dépôts visibles dans les falaises en bord de mer suggère plusieurs phases d'activité et il semble que de petits maars soient emboîtés au sein d'un cratère principal.

Une confirmation indirecte de l'âge récent de Petite Terre a été apportée par des sondages carottés réalisés sur la barrière corallienne de Mayotte. Plusieurs carottes mettent en évidence des niveaux de cendres volcaniques et ponces de composition trachytique intercalés entre des niveaux coralliens datés entre 4,000 et 7,000 ans BP (Zinkle et al, 2001, 2003). Ces cendres et ponces trachytiques sont assimilées aux ponces trachytiques émises par les appareils du Dziani Dzaha et de La Vigie sur Petite Terre.

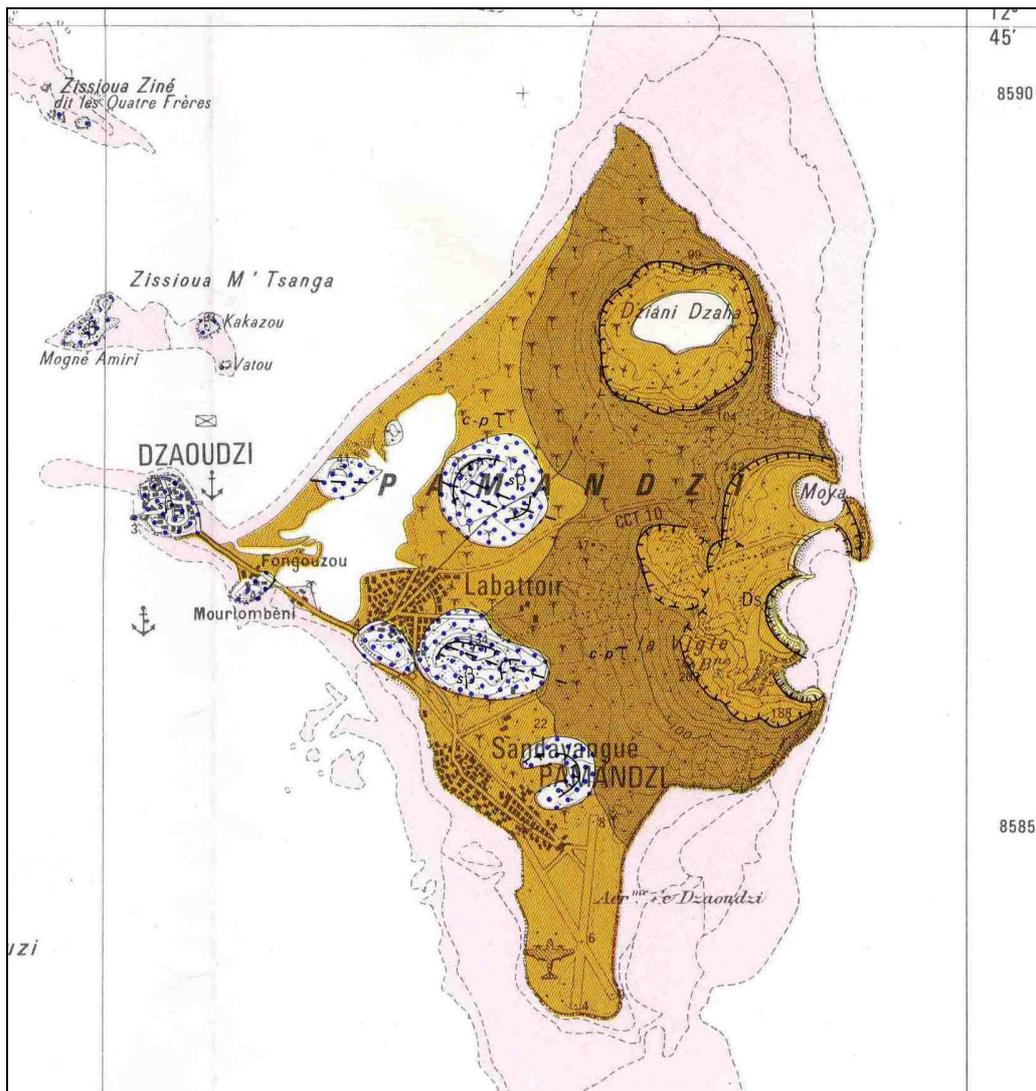


Illustration 8 - Extrait de la carte géologique de Mayotte au 1/50 000 (Stieltjes, 1988) montrant la géologie de Petite Terre. Les dépôts de cendres et ponces trachytiques des appareils du Dziani Dzaha et de La Vigie sont représentés en brun foncé et clair. Les appareils stromboliens ponctuels (points bleus sur fond blanc) sont contemporains ou antérieurs. La barrière corallienne est représentée en rose clair.



Illustration 9 - L'appareil phréato-magmatique récent du Dziani Dzaha sur Petite Terre, avec son lac de cratère et sa morphologie bien conservée qui indique un âge récent, estimé indirectement entre 4 000 et 7 000 ans BP.



Illustration 10 - Empilement des dépôts rythmiques de retombées et déferlantes de l'appareil volcanique du Dziani Dzaha dans la falaise de la plage de Papani.

Le dynamisme explosif de ces appareils a sans nul doute été favorisé par l'interaction omniprésente entre la colonne magmatique ascendante et l'eau de mer abondante puisque ces appareils se sont édifiés sur la barrière récifale.

Le fait que les deux appareils aient émis des magmas trachytiques identiques plaide pour leur origine commune à partir d'une même chambre magmatique installée à l'aplomb de Petite Terre. Il est possible que ce magma trachytique soit issu de la différenciation du magma basaltique émis auparavant dans cette même zone sous forme de cônes stromboliens et de coulées de laves. Dans cette hypothèse, la chambre magmatique serait donc installée depuis relativement longtemps sous Petite Terre. La relative viscosité de ces magmas trachytiques en fait de bons candidats pour former des intrusions sub-volcaniques qui représenteraient des stocks de chaleur éminemment favorables au développement de systèmes géothermaux.

Une autre observation importante est l'alignement des deux appareils selon une direction N170° (ill. 8). Cet alignement reflète probablement la direction de la faille profonde ayant permis la remontée du magma vers la surface. La direction de fracturation N170° est bien présente à Mayotte et aux Comores. Elle serait reliée au système de failles transformantes de la Ride de Davie, située entre Madagascar et le continent africain.

4.2. LA FRACTURATION TECTONIQUE OBSERVEE SUR PETITE TERRE

La fracturation s'exprime de façon diffuse sur Petite Terre avec de nombreuses fissures dont l'origine (tectonique, volcano-tectonique, gravitaire ou mixte ?) n'est pas toujours évidente à déterminer dans la mesure où elles s'observent principalement sur les plages et dans les falaises en bord de mer. Le fait que ces fissures affectent les dépôts récents de cendres et ponces trachytiques émis par les appareils du Dziani Dzaha et de la Vigie soulignent qu'elles sont récentes et qu'elles reflètent probablement le champ de contrainte tectonique actuel.

Aucune structure avec un déplacement visible (faille) n'a été observée sur le terrain. Quelques couloirs de fissuration dense pourraient cependant refléter l'existence ou la proximité de failles. Une seule fissure colmatée par des carbonates a été rencontrée sur la plage de Moya. La coïncidence entre dégagements de gaz et fissuration a été observée plusieurs fois, mais il s'agissait d'air atmosphérique piégé dans les fissures à marée montante.

Les données structurales relevées ont été traitées par secteurs d'affleurements (ill. 11). Pour tenir compte de la valeur de la déclinaison magnétique à Mayotte, les directions mesurées à la boussole sur le terrain ont été majorées de 7° afin de les traiter dans le référentiel géographique.

4.2.1. Plage de Moya

Des réseaux de fissures sont bien visibles dans les falaises bordant les plages de Moya. Elles affectent des dépôts stratifiés et indurés de cendres et ponces

trachytiques. Elles ont une extension de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Elles sont le plus souvent verticales à sub-verticales.

31 structures ont été mesurées. Les fissures s'organisent en deux familles directionnelles dominantes (N30-40° et N130-140°) et une famille secondaire N170-180° (ill. 11).

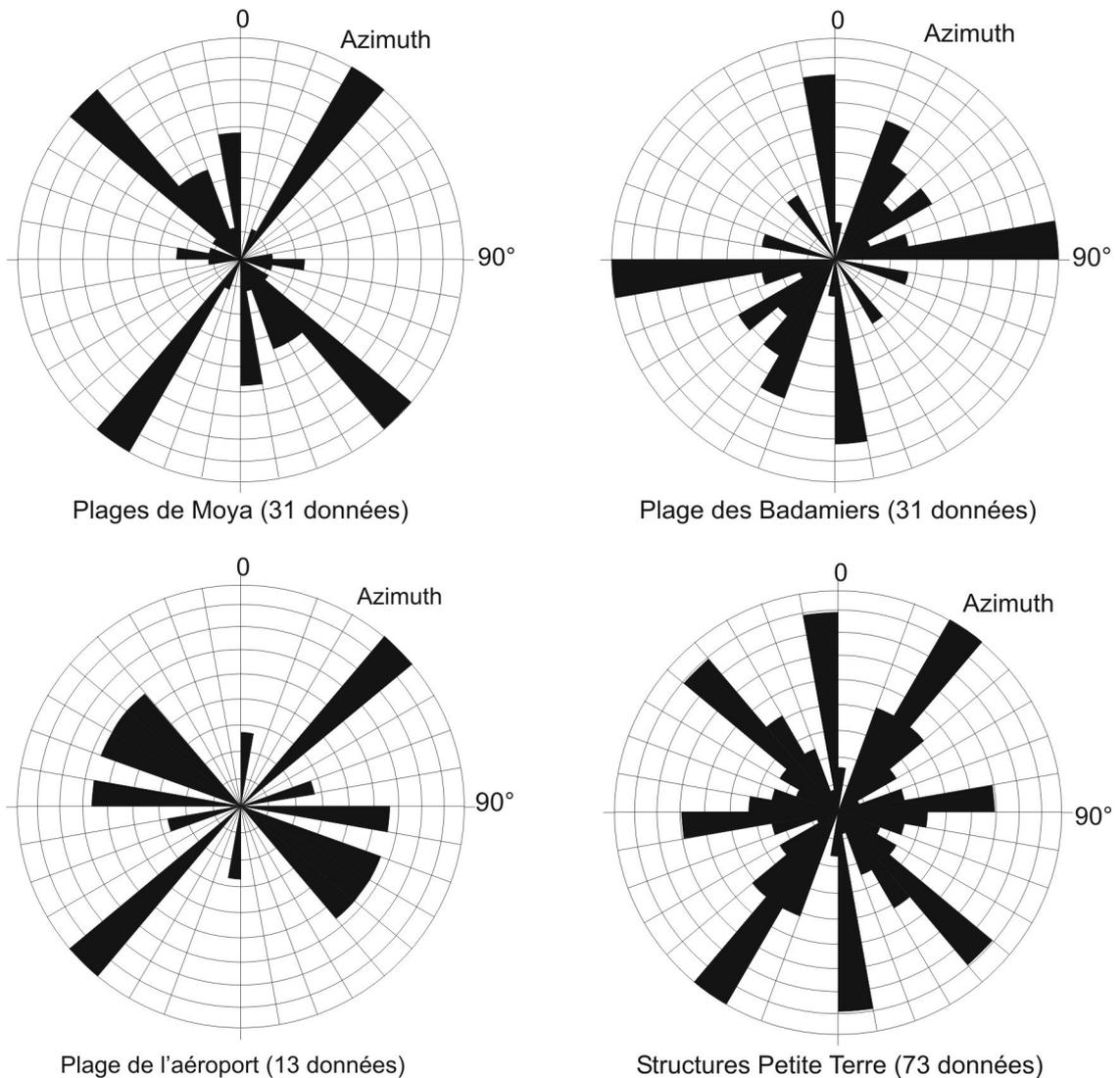


Illustration 11 - Rosaces directionnelles des fissures relevées dans différents secteurs de Petite Terre durant la campagne de reconnaissance géothermique.

Une seule fissure est apparue colmatée par des dépôts de carbonates. Des suintements d'eau froide ont été observés le long d'une longue fissure orientée N160-170° dans la falaise bordant la plage centrale de Moya (xGPS : 531,952 ; yGPS :

8586,172). Ces suintements ont donné lieu à des dépôts de carbonates en placage sur la paroi de la falaise. Une autre fissure à l'extrémité sud de la plage centrale orientée N170° montre également des suintements d'eau froide donnant lieu à des incrustations d'hydroxydes de fer (xGPS : 532,066 ; yGPS : 8586,040 ; ill. 12a). Cette eau froide a été prélevée et les résultats des analyses montrent qu'il s'agit d'un mélange entre une eau météorique et une eau de mer dans les proportions de 65% et 35%.

4.2.2. Plages des Badamiers et de Papani

La plage et les falaises de part et d'autre de l'extrémité Nord de Petite Terre sont elles aussi affectées par une fissuration diffuse. 31 structures ont été relevées et elles s'organisent en trois familles directionnelles d'égale importance (ill. 11) : N20-30°, N80-90°, N170-180°. On y retrouve donc les familles NE-SW et N-S déjà observées sur les plages de Moya, accompagnées d'une nouvelle famille E-W.

Un couloir fissuré remarquable comportant plusieurs fissures rectilignes N170-180° de plusieurs dizaines de mètres de longueur, recoupées par des fissures orientées N30°, est visible sur la plage et dans la falaise côtière à proximité de la Pointe des Badamiers (xGPS : 530,786 ; yGPS : 8589,394 ; ill. 12b). La linéarité et la densité des fissures en font une structure tectonique notable, même si aucune évidence de déplacement n'est visible. De plus, elle est située dans le prolongement de l'alignement des appareils volcaniques du Dziani Dzaha et de La Vigie (ill. 8). Des dégagements de gaz ont été observés le long d'une de ces fissures. Le prélèvement et l'analyse du gaz montrent qu'il s'agit d'air atmosphérique probablement piégé dans la fissure à marée montante.

Un autre couloir de fissuration dense orienté N70-90° a été observé sur la plage de Papani (xGPS : 531,075 ; yGPS : 8589,394 ; ill. 12c). Il affecte les dépôts de cendres et ponces du cratère du Dziani Dzaha situé à proximité. Quelques fissures montrent des ouvertures de quelques centimètres et des remplissages par du matériel superficiel. Cette direction de fissuration N70-90° est aussi présente sur la plage des Badamiers, notamment en contrebas du parking proche de la centrale électrique.

4.2.3. Plage de l'aéroport

Il s'agit de la plage qui est située à l'est de l'aéroport de Pamandzi et qui est bordée par les falaises constituées d'empilements de niveaux de cendres et ponces trachytiques formant le flanc sud de l'appareil de la Vigie. Cette zone est caractérisée par des phénomènes de dégagements de gaz spectaculaires qui seront décrits plus loin.



a) Suintements d'eau froide avec incrustation d'hydroxydes de fer le long d'une fissure orientée N170° à l'extrémité sud de la plage centrale de Moya.

xGPS : 532,066
yGPS : 8586,040

(Prélèvement d'eau)



b) Couloir de fissuration dense orienté N170-180° sur la plage des Badamiers, à proximité de la Pointe des Badamiers. La linéarité et la continuité des fissures en font une structure tectonique notable même en l'absence de déplacement visible

xGPS : 530,786
yGPS : 8589,394

(Prélèvement de gaz)



c) Couloir de fissuration dense orienté N80-90° sur la plage de Papani, à proximité du cratère Dziani.

xGPS : 531,075
yGPS : 8589,394

Illustration 12 - Illustrations de la fissuration observée sur l'île de Petite Terre.

La fissuration sur la plage et dans les falaises y est plutôt moins développée que dans les deux zones précédentes. 13 structures seulement ont été relevées. Il s'agit là encore de fissures dépourvues de remplissage. Elles s'organisent en une famille directionnelle dominante N30-40° et deux autres familles N90-100° et N110-140° (ill. 11). La famille N170-180° est absente mais cela peut tenir de la faible densité des structures. Il n'a pas été observé de relation entre la fissuration et les dégagements de gaz dans la mesure où les points de sortie des gaz sont principalement localisés sur des fonds sableux.

4.2.4. Synthèse de la fracturation observée sur Petite Terre

La fracturation existe sur Petite Terre, même si elle n'est pas spectaculaire. En premier lieu, l'alignement des deux appareils du Dziani Dzaha et de La Vigie selon la direction N170° reflète probablement une direction de fracturation profonde, qui a permis la remontée du magma trachytique vers la surface. Cette direction est d'ailleurs bien présente au niveau de la fissuration sous la forme d'une famille N170-180°. Elle correspond à un bel exemple de couloir fissuré au niveau de la plage des Badamiers (ill. 12b). Cette direction de fracturation N170° est bien présente à Mayotte, aux Comores et à Madagascar. Elle serait reliée au système de failles transformantes de la Ride de Davie.

Les trois autres familles directionnelles relevées sur Petite Terre sont orientées N30-40°, N80-90° et N130-140° (ill. 11). Elles ne sont pas non plus sans signification. Elles correspondent à des directions de fracturation reconnues sur Grande Terre et plus largement à l'échelle régionale :

- la direction N30-40°, peu présente à Grande Terre, correspond à la direction transformante du bassin de Somalie ;
- la direction N80-90° ou E-W est très présente à Grande Terre où elle détermine la formation de horsts et de grabens. Elle pourrait être l'expression de l'ouverture de la ride océanique du bassin de Somalie selon Stieltjes (1988) ;
- la direction N130-140° est la grande direction des Comores. Elle est présente à Grande Terre où elle est notamment l'axe d'effondrement de la Baie de Bouéni (Stieltjes, 1988). Ce dernier lui attribue aussi le contrôle des appareils stromboliens récents autour de Mamoudzou et entre Mamoudzou et Dzaoudzi.

En conclusion, il existe une fracturation tectonique diffuse mais réelle au niveau de Petite Terre qui a été à même de contrôler la remontée du magma trachytique vers la surface, et qui peut être à même de contrôler des circulations de fluides hydrothermaux en profondeur à l'aplomb de Petite Terre.

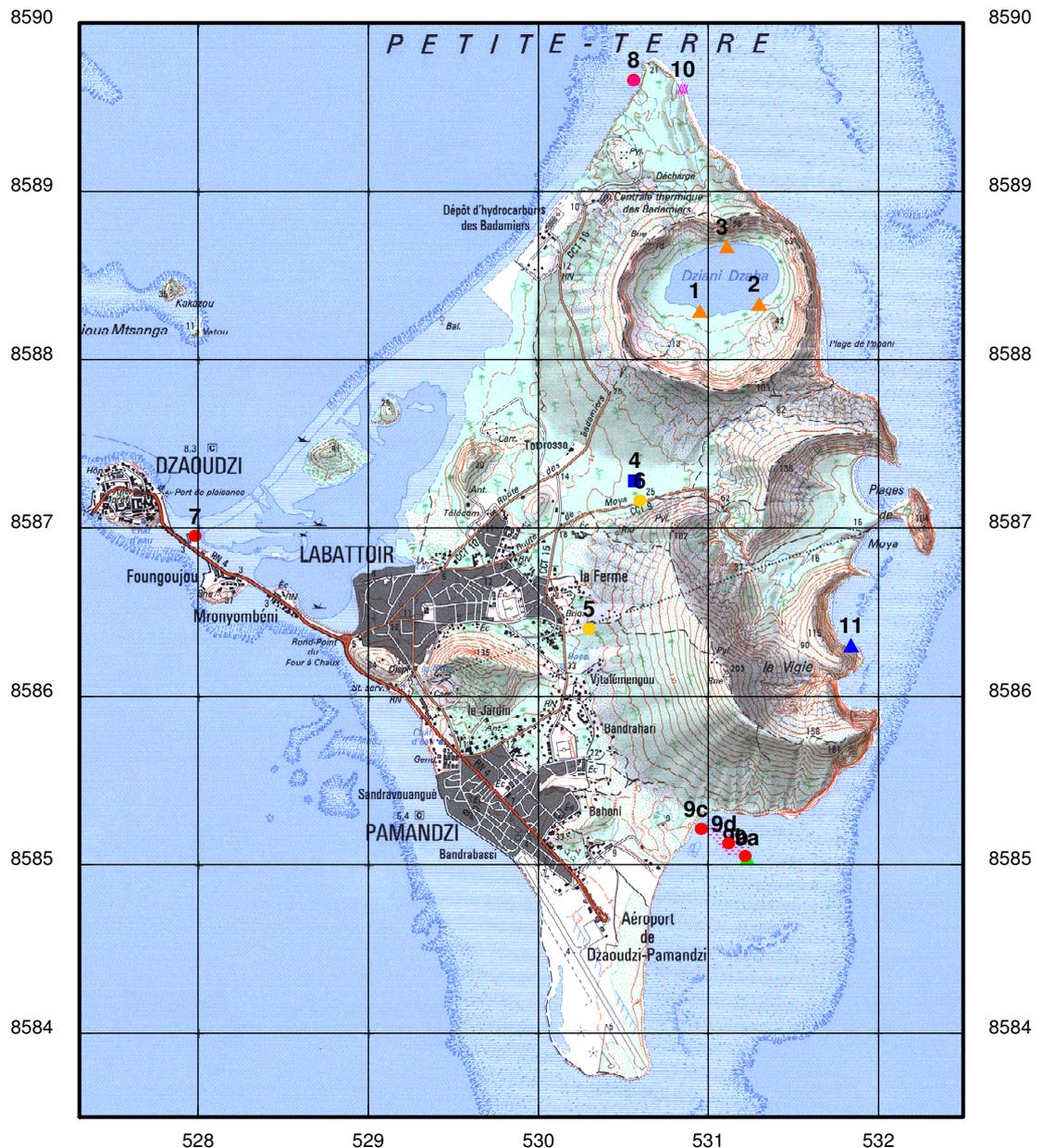


Illustration 13 - Localisation des observations remarquables et des points de prélèvements réalisés durant la campagne de reconnaissance de Petite Terre.

- Sites 1,2,3 : points de mesures et prélèvement d'eau au bord du Lac Dziani Dzaha ;
- Site 4 : puits de M. Hussein ALI, L'Abattoir, et prélèvement d'eau ;
- Sites 5 et 6 : forages d'eau de Pamandzi 1 et 2 ;
- Sites 7 et 8 : dégagements de gaz observés et prélevés (air atmosphérique) ;
- Site 9 : zone de dégagements gazeux et de prélèvements (eau, gaz) de la plage et du lagon à l'est de l'aéroport ;
- Sites 8 et 10 : couloirs de fissuration dense (plage des Badamiers et de Papani) ;
- Site 11 : suintements d'eau froide sur la plage de Moya et prélèvement d'eau.

4.3. DONNEES HYDROGEOLOGIQUES RECUEILLIES SUR PETITE TERRE

Il n'y a pas de cours d'eau pérenne sur Petite Terre. Les données hydrogéologiques proviennent de deux sondages de recherche d'eau (Pamandzi 1 et 2) et de nombreux puits, dont un puits à l'Abattoir (M. Hussein ALI) visité et échantillonné, au cours de la mission (ill. 13 et 14). Le niveau piézométrique est situé entre un et quelques mètres seulement au dessus du niveau de la mer. Les valeurs de conductivité indiquent qu'il s'agit d'eaux météoriques plus ou moins contaminées par l'eau de mer.

Les températures relevées dans ces ouvrages sont de l'ordre de 27,5 à 28,5°C et ne montrent donc aucune anomalie thermique. L'analyse de l'échantillon d'eau prélevé dans le puits à l'Abattoir révèle qu'il s'agit d'eau météorique mélangée avec une faible quantité d'eau de mer, sans aucune évidence de contamination par un fluide géothermal profond minéralisé.

Eberschweiler (1986) mentionnait des teneurs en fluorures élevées dans les eaux de Petite Terre, qu'il reliait à des percolations de gaz et fluides d'origine volcanique. Il est possible également que ces eaux s'enrichissent en fluorures, alcalins et silice, par lessivage des verres ponces trachytiques. L'origine de ces teneurs élevées en fluorures est donc ambiguë.

En conclusion, les données hydrogéologiques recueillies sur Petite Terre ne témoignent pas de l'existence d'une ressource géothermale profonde à l'aplomb de l'île. Mais il est vrai que le soubassement de l'île est constitué de formations coralliennes karstiques envahies par l'eau de mer, qui peuvent faire écran à toute remontée éventuelle de fluides profonds, à l'exception des gaz.

Nom du forage	Pamandzi 1	Pamandzi 2	Puits L'Abattoir
Coordonnées X	530,30	530,60	530,794
Y	8586,40	8587,16	8587,015
Z NGM	42,50	22,75	Env. 20m
Profondeur finale (m)	65	50	± 22
Niveau statique (m)	37,80	21,53	± 20
Niveau statique (m NGM)	4,70	1,22	Env. 0
Lithologie	Cendres et ponces trachytiques	Cendres et ponces trachytiques	
Perméabilité	faible	bonne	
Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$)	470 à 38 m 440 à 60 m 510 à 65 m	325 à 21 m 4160 à 50 m	1366 à 20 m
Date de mesure	8 mars 1991	8 mars 1991	19 nov. 2005
Température (°C)	28,4 (à 49 m)	28,6 (à 49 m)	27,5

Illustration 14 - Caractéristiques et mesures de température dans deux forages d'eau localisés sur Petite Terre (tiré de Mauroux, 1992), et d'un puits à l'Abattoir (M. Hussein ALI), visité au cours de la campagne de reconnaissance.

4.4. LE LAC DZIANI DZAHA

Le lac Dziani Dzaha constituait un objectif important de cette campagne de reconnaissance dans la mesure où le pH de ses eaux et des témoignages d'émissions gazeuses pouvaient représenter des indices de l'existence d'un système géothermal.

Le lac Dziani Dzaha est un lac de cratère au fond d'un large maar subcirculaire de 1 km de diamètre environ (ill. 9). Sa profondeur maximale est de 5 à 6 m. Il a été visité le samedi 19 novembre 2005 pour y effectuer des observations et prélèvements de fluides (ills. 13 & 14). Le niveau du lac était 20 à 30 cm en dessous de son niveau maximum à en juger par les marques de hautes eaux. L'eau y était de couleur vert jade. Sa température en surface était de l'ordre de 32°C et sa valeur de pH de 9,18. Les larves d'insectes forment des monticules en plusieurs endroits (ill. 15).

Bien que proche de la mer, le niveau du lac ne varie pas avec les marées. Par contre, il varie avec les saisons en fonction de la pluviométrie (Gozlan et Lapegue, 1993 ; Lapegue, 1999). En 1993, Gozlan et Lapegue mentionnent dans l'eau du lac une parasitologie importante (leptospores et flagellés) et une bactériologie avec abondance de colibacilles : pseudomonas, sarcine et Clostridium sulfito-réducteurs. Ils mentionnent également des sites d'émissions de gaz sulfuré (mais sans les analyser) sur les berges sud et ouest du lac. En 1999, le niveau de l'eau était inhabituellement bas en raison d'un déficit de pluie. Ceci avait permis de dégager des points d'émission de gaz en forme de cheminées, et soulignés par des développements de colonies bactériennes de couleur rouge (rapporté et photographié par Bouttemy, 2003). L'auteur ne fait pas mention de gaz sulfuré comme en 1993.

Lors de notre visite et bien qu'informé de l'existence de ces émissions gazeuses, nous n'avons observé aucun indice de dégazage ou autre manifestation hydrothermale à la surface du lac, en particulier le long des berges sud et ouest. Il faut donc en conclure que le dégazage n'est pas permanent et/ou que son intensité est très faible et ne lui permet pas de s'exprimer en surface, lorsque le niveau du lac est haut.

Les conclusions quant au chimisme de l'eau du lac et l'origine de son pH basique sont présentées dans le chapitre consacré à la géochimie des fluides. On peut cependant indiquer, dès maintenant, qu'il s'agit d'une eau chloruro-bicarbonatée-sodique, issue de processus d'évaporation d'eau de mer et de dissolution de carbonates et de matériaux volcaniques, riches en sodium comme le sont les cendres et ponces trachytiques du maar de Dziani. Les carbonates pourraient avoir été apportés par des émanations localisées de gaz CO₂, comme décrites par le passé mais non observées, ou diffuses au fond du lac. Des arrivées d'eau de surface d'origine météorique viennent se mélanger à l'eau de mer, qui alimente ce lac et s'évapore.

En conclusion, les informations recueillies sur le Lac Dziani ne montrent aucune évidence de l'existence d'un système géothermal à l'aplomb du lac. Seuls les témoignages de dégagement gazeux dont la nature n'est pas vérifiée (CO₂, H₂S ?) sont à retenir.



Illustration 15 - Prélèvement de l'eau du lac Dziani à partir de la berge (haut) et illustration des monticules de larves d'insectes sur la berge sud-ouest du lac. La teinte vert jade de l'eau est naturelle.

4.5. LES INDICES HYDROTHERMAUX ET MANIFESTATIONS PARTICULIERES

Comme on l'a vu précédemment, Petite Terre ne présente aucun des indices habituels de l'existence d'une ressource géothermale tels que sources thermo-minérales, sols chauds, dépôts de travertins, anomalies thermiques dans les puits et les aquifères superficiels. Par contre, Petite Terre présente des phénomènes de dégagements gazeux, qui ont été mis en relation avec son activité volcanique récente et qui pourraient témoigner de conditions propices au développement d'un réservoir géothermique à l'aplomb de l'Île.

Les données et témoignages existants sur ces phénomènes de dégagements gazeux sont les suivants :

- des témoignages oraux de plongeurs sur des dégagements de gaz dans le lagon, difficiles à localiser et à quantifier ;
- deux rapports décrivant en 1993 et 1999 des points d'émissions de gaz sur le fond du lac Dziani et visibles lorsque le niveau de l'eau est bas (Gozlan et Lapegue, 1993 ; Lapegue, 1999, Bouttemy, 2003) ;
- le compte-rendu d'une équipe scientifique franco-allemande en 1998 annonçant qu'elle avait découvert un petit cratère dans le lagon siège d'un dégazage actif (Prof. Thomassin, CNRS Marseille);
- l'anomalie en fluorures dans les eaux de Petite Terre attribuée à des percolations de gaz et fluides volcaniques par Eberschweiler (1986).

Lors de cette campagne de reconnaissance, des phénomènes de dégagements gazeux ont été observés sur trois sites côtiers. Deux de ces sites (Marina de Dzaoudzi et plage des Badamiers) présentaient des dégagements de gaz diffus et intermittents. L'analyse des gaz prélevés a montré qu'il s'agissait d'air atmosphérique, probablement piégé dans le réseau de fissures à marée haute (voir le chapitre consacré à la géochimie des fluides).

Le troisième site est beaucoup plus spectaculaire. Il a fait l'objet d'un examen plus poussé à marée basse. Il se situe sur la plage située à l'est de l'aéroport de Pamandzi et se prolonge dans le lagon (ills. 13, 17 & 18a). Il correspond probablement au site de dégazage rapporté par l'équipe scientifique franco-allemande en 1998. Les observations et mesures effectuées sur ce site (hauteur de la tranche d'eau, température du fond, pH et conductivité de l'eau de mer) sont reportées sur des cartes (ills. 18a à f) et présentées ci-après.

Superficie

La zone de dégazage a été délimitée approximativement à pied depuis la plage vers le lagon jusqu'à une hauteur de tranche d'eau de 1,5 m (ill. 18a). Elle se prolonge vers la barrière récifale comme le montre un prélèvement de gaz effectué par un plongeur à 5 m de profondeur. Ses dimensions sont, au minimum, de 300 m sur 200 m.

Hauteur de la tranche d'eau

La hauteur de la tranche d'eau dans la zone de dégazage reconnue à pied variait entre 0 et 1,5 m (ill. 18b). Les mesures de température, de pH et de conductivité à proximité du fond ont été possibles seulement lorsque la tranche d'eau était inférieure à 1 m.

Intensité du dégazage

Les photos de l'illustration 17 illustrent l'importance du dégazage. Des centaines, voire des milliers de points d'émissions, sont répartis sur la zone intéressée. Des points d'émission très actifs et permanents sont disséminés au milieu de points d'émission plus mineurs (ill. 18a). Dans certains cas, le dégagement de gaz est tel qu'il provoque des remous dans l'eau et entraîne le sable jusqu'à la surface (ill. 17b), laissant au fond des cheminées de dégazage de plusieurs dizaines de centimètres de diamètre.

Température de l'eau de mer

Dans la zone de dégazage découverte par la marée basse, la température du sable humide était de l'ordre de 32-33 °C (en plein soleil durant l'après-midi). Dans la zone de dégazage recouverte par l'eau, la température au niveau du fond sableux variait entre 32-33 °C et 28,5 °C en relation avec la hauteur de la tranche d'eau qui variait de 0 à 1 m (ill. 18c). Aucune anomalie thermique n'a été observée, même au niveau des points d'émission les plus actifs.

Conductivité de l'eau de mer

La conductivité de l'eau de mer en dehors de la zone de dégazage était de l'ordre de 51,5 à 52,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dans la zone de dégazage, la conductivité de l'eau au niveau du fond sableux à découvert ou recouvert par l'eau était similaire et variait entre 51 et 52,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ill. 18d). Un seul point de sortie de gaz très actif présente une valeur de conductivité significativement inférieure avec 43,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ce point de sortie se caractérise par des incrustations d'hydroxydes de fer dans le sable autour de l'émergence.

pH de l'eau de mer

Le pH de l'eau de mer en dehors de la zone de dégazage était de l'ordre de 8,1 à 8,2. Dans la zone de dégazage, le pH au niveau du fond sableux était significativement plus faible et variait entre 5,85 et 8,0 (ill. 18e). La valeur minimale mesurée (5,85) correspond au point d'émission très actif mentionné ci-dessus pour sa conductivité inférieure à la normale. Cette baisse du pH semble donc bien reliée au phénomène de dégazage.

Nature des fluides (eau, gaz)

Les prélèvements effectués au sein de la zone de dégazage sont localisés sur l'illustration 18f, et résumés dans le tableau ci-après (ill. 16).

La nature des fluides prélevés est présentée et discutée dans le prochain chapitre consacré à la géochimie des fluides.

<i>Site de prélèvement</i>	<i>X GPS</i>	<i>Y GPS</i>	<i>Prof. (m)</i>	<i>Prélèvements</i>
Zone de dégazage diffus dans le lagon, prélevé par plongeur (n°1)	531,453	8584,774	5	gaz
Zone de dégazage diffus dans le lagon, prélevé par plongeur (n°2)	531,443	8584,784	5	gaz, eau
Point d'émission très actif avec incrustations d'hydroxydes de fer	531,183	8584,948	0	gaz, eau
Point d'émission très actif sous un mètre d'eau.	531,346	8584,861	1	gaz, eau

Illustration 16 - Détail des prélèvements effectués dans la zone de dégagements gazeux.

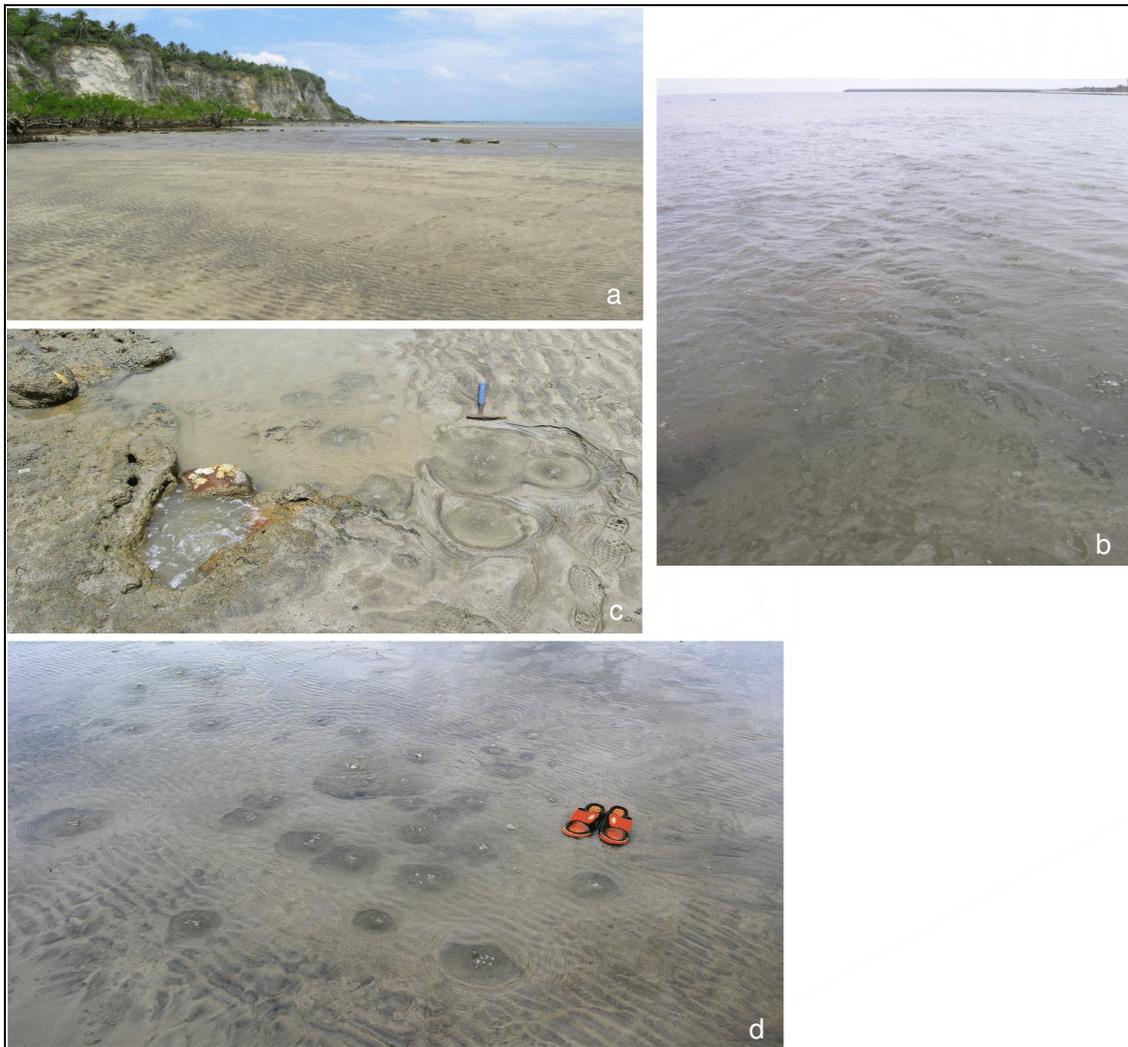


Illustration 17 - Photographies illustrant les dégagements gazeux sur la plage et dans le lagon situés à l'est de l'aéroport de Pamandzi

- a) vue de la zone de dégazage à marée basse ;*
- b) remous provoqués par le dégazage vigoureux dans une hauteur d'eau de 1m (site de prélèvement "plage aéroport 2") ;*
- c) points de sortie de gaz particulièrement actifs (site de prélèvement "plage aéroport") ;*
- d) points de sortie épars sur le fond sableux.*

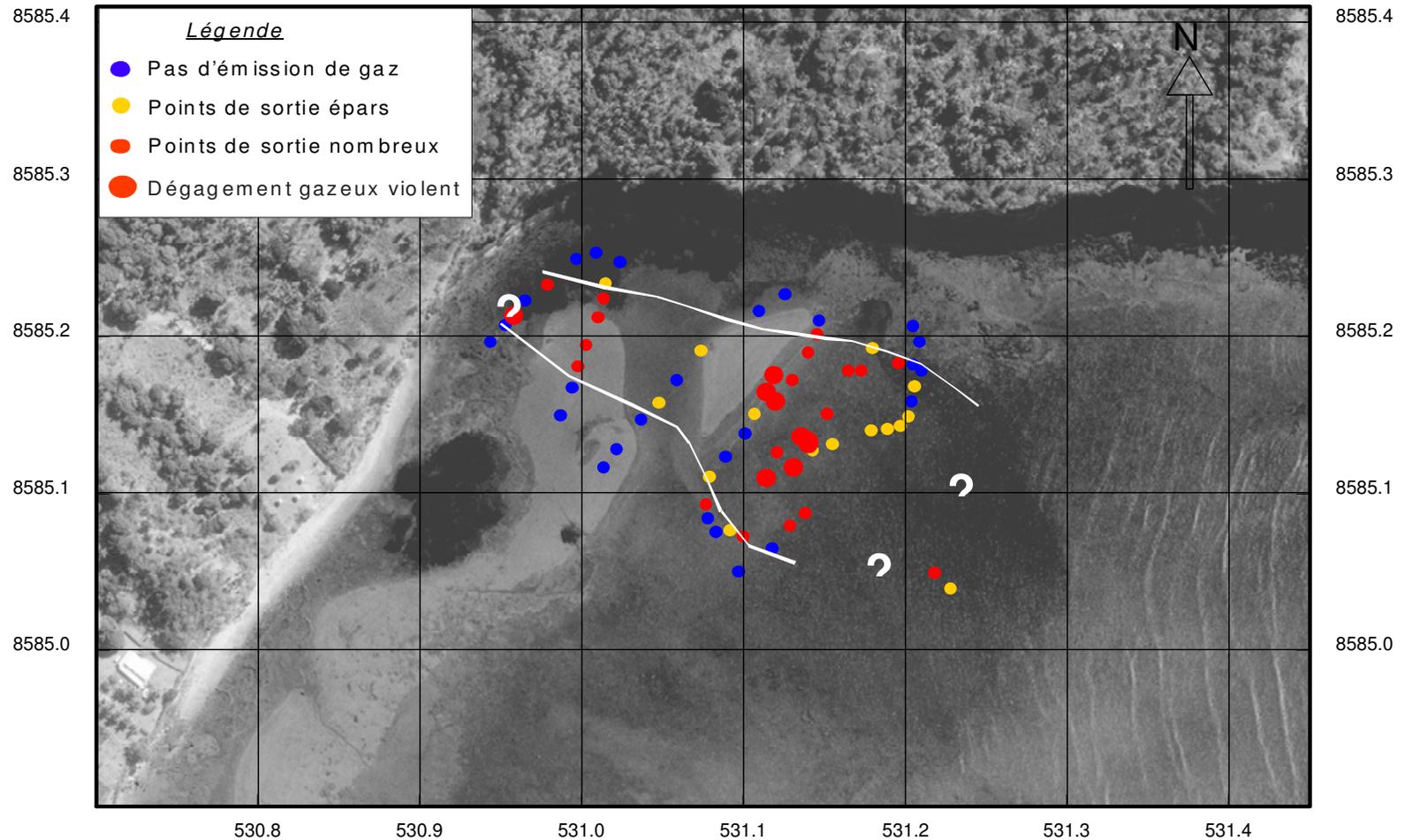


Illustration 18a - Localisation et intensité des dégagements gazeux sur la plage et dans le lagon situés à l'Est de l'aéroport de Pamandzi. Les limites nord et sud de la zone de dégagements gazeux ont été approximativement tracées. Les limites est et ouest n'ont pas été définies.

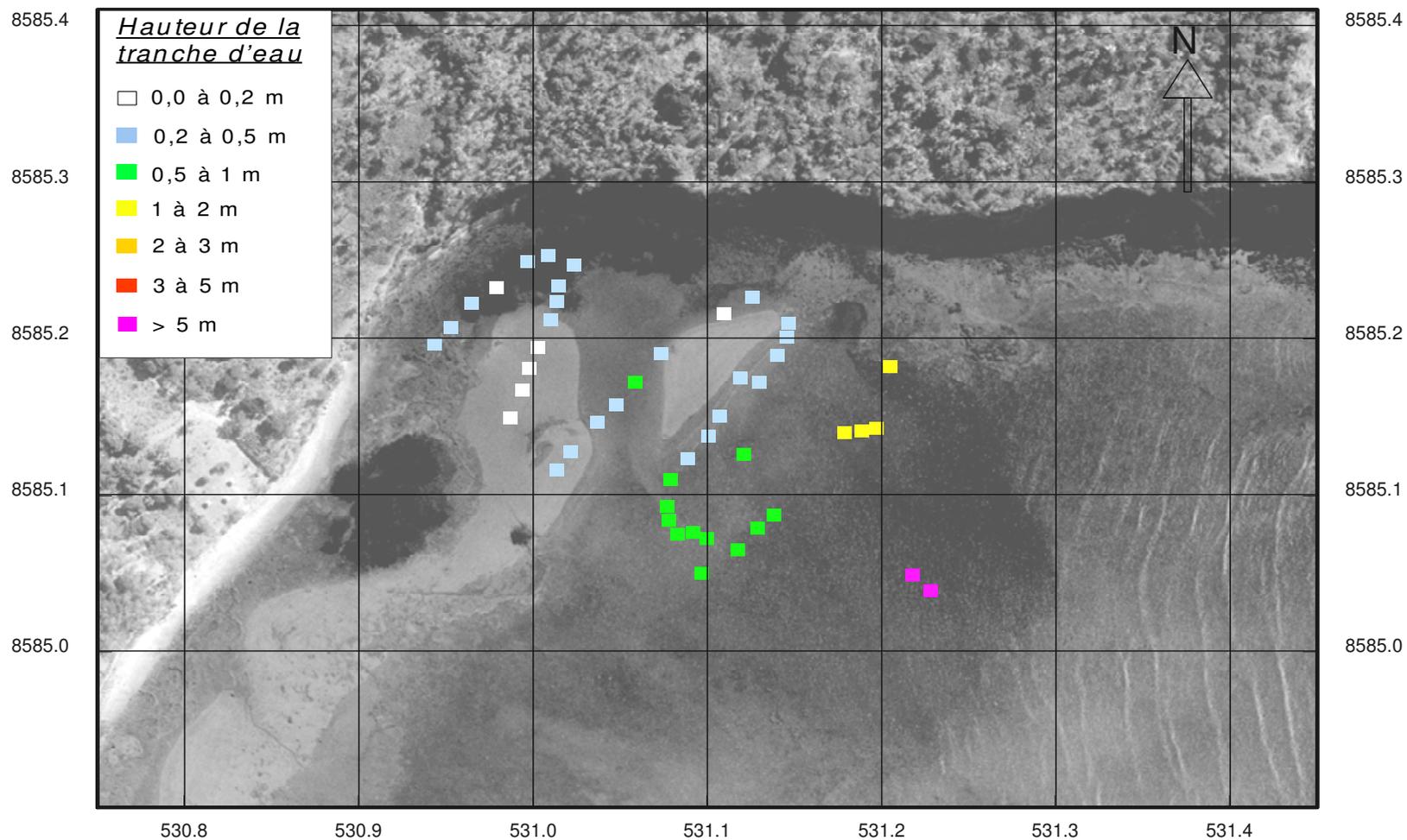


Illustration 18b - Hauteur de la tranche d'eau à marée basse dans le lagon durant les mesures dans la zone de dégagement gazeux.

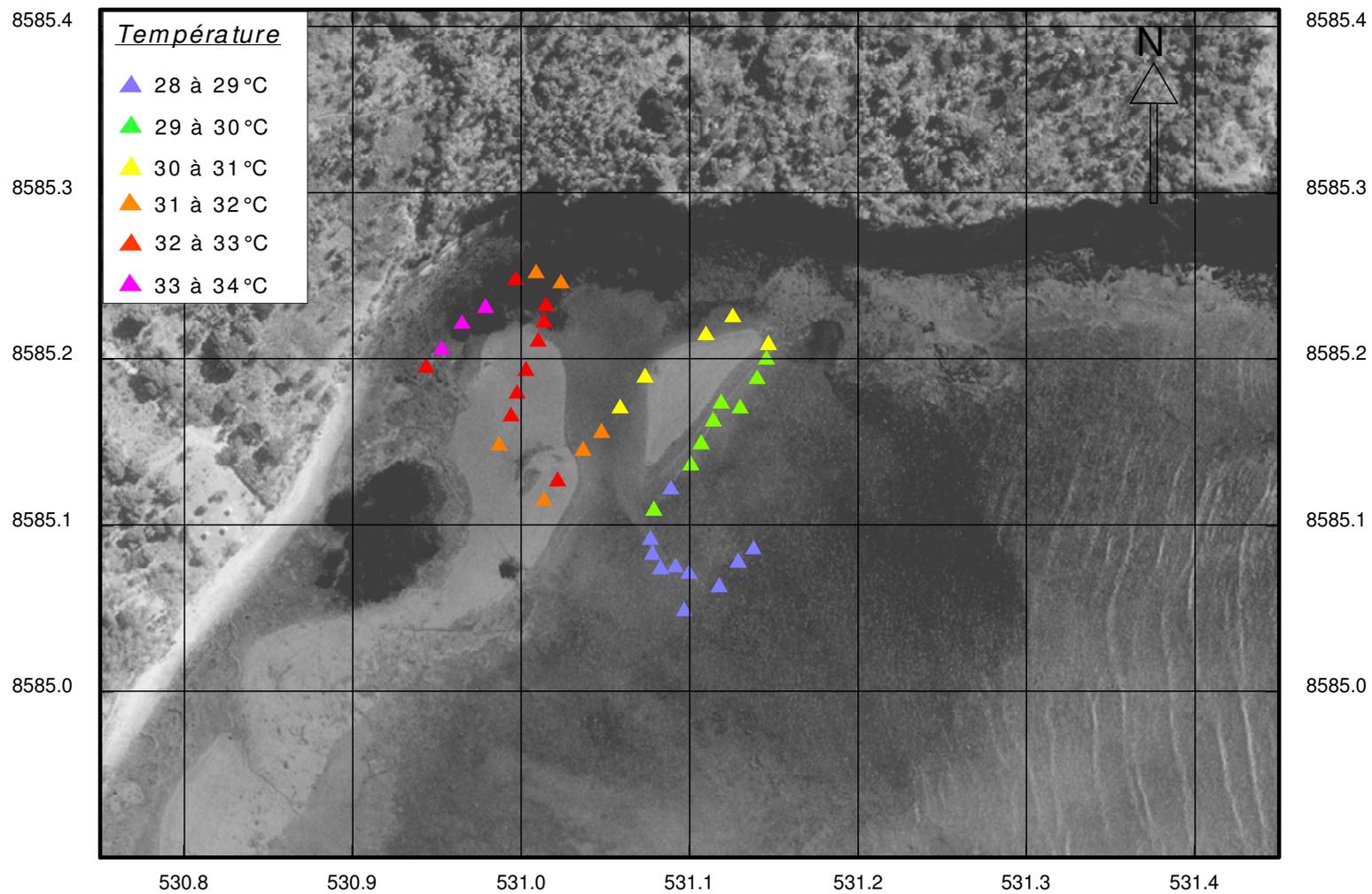


Illustration 18c - Valeurs de température mesurées sur le fond sableux dans la zone de dégazage. Les variations de température se corrént avec la hauteur de la tranche d'eau (voir ill. 18b)

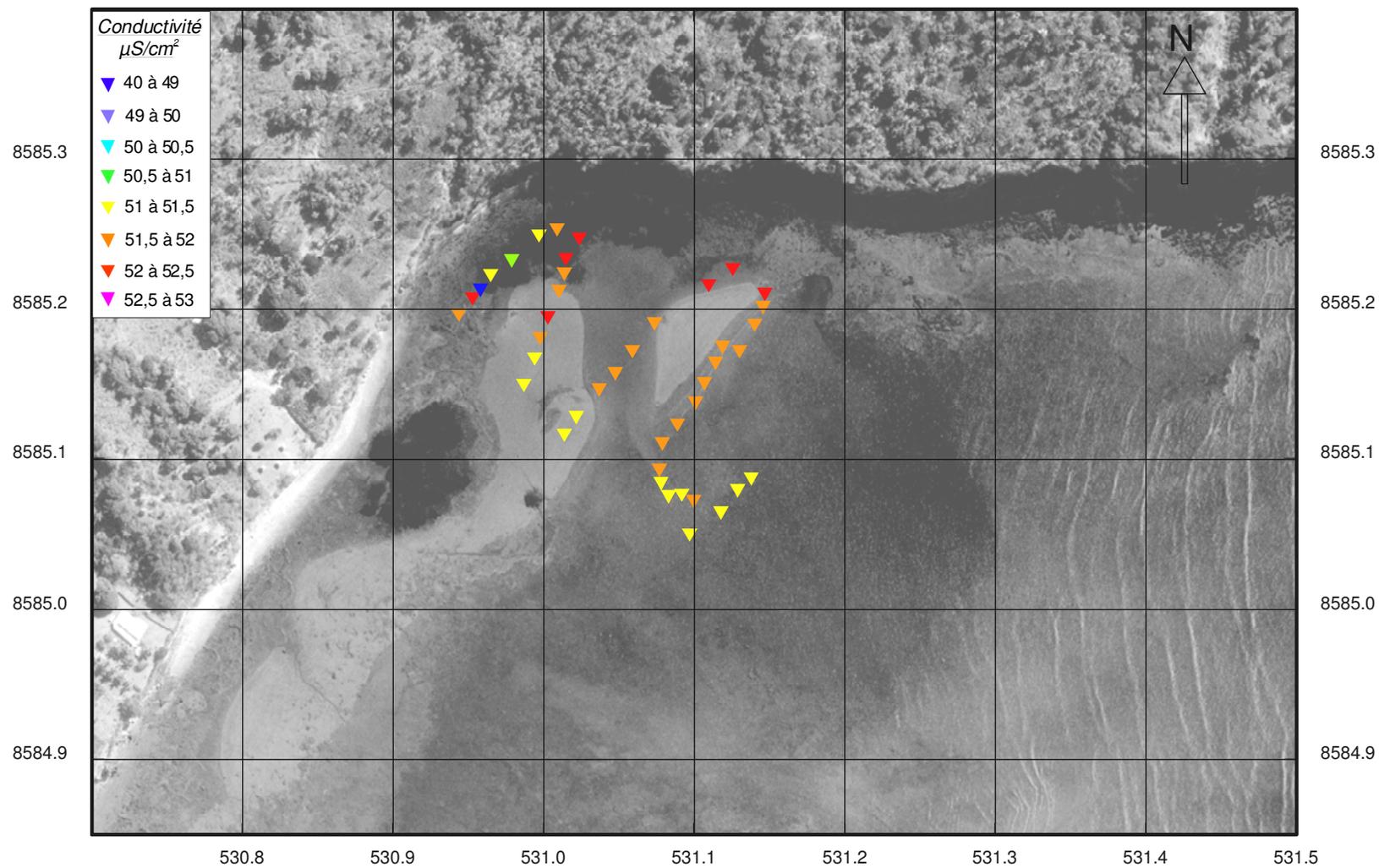


Illustration 18d - Valeurs de conductivité mesurées sur le fond sableux dans la zone de dégazage.

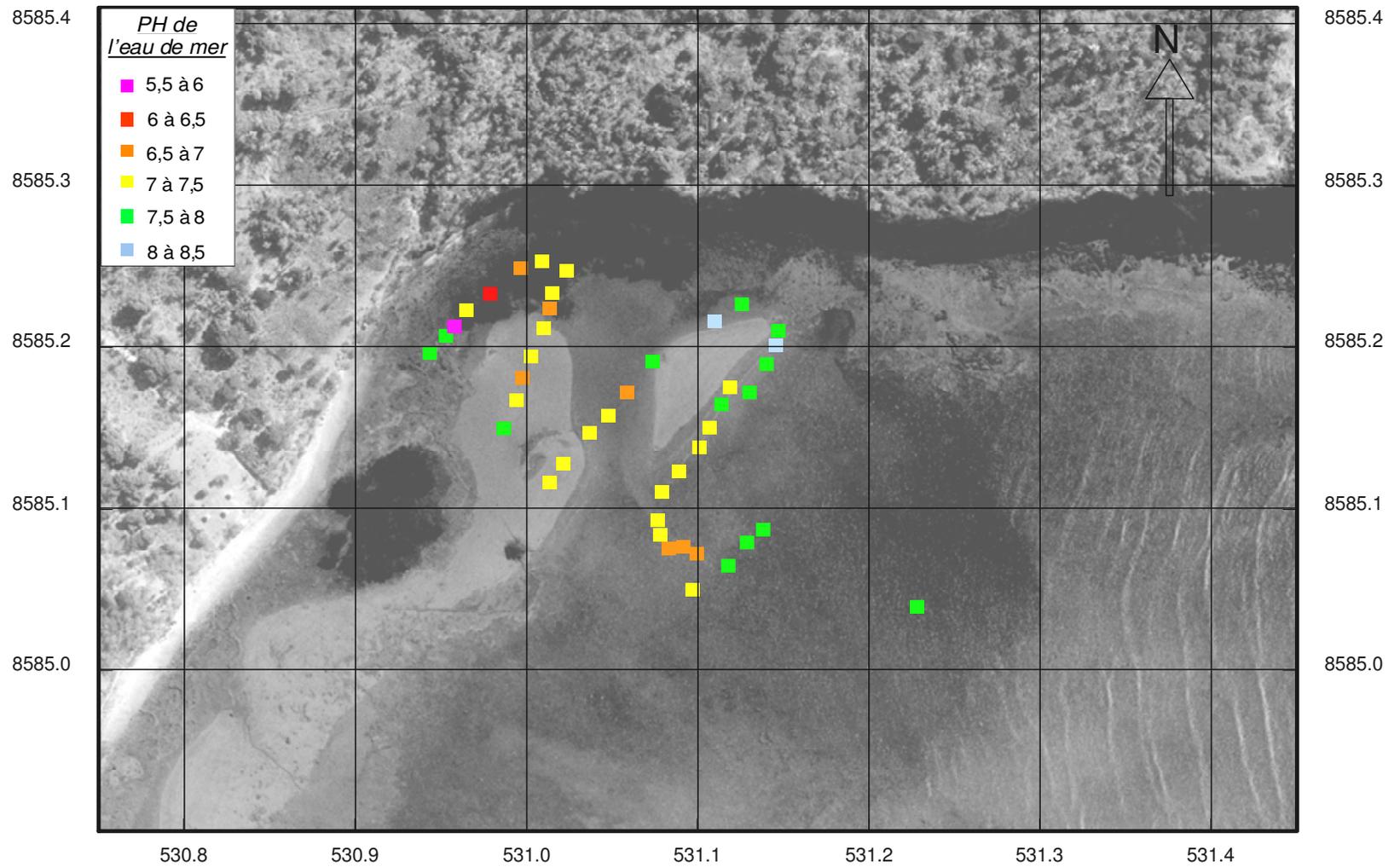


Illustration 18e - Valeurs de pH mesurées sur le fond sableux dans la zone de dégazage.

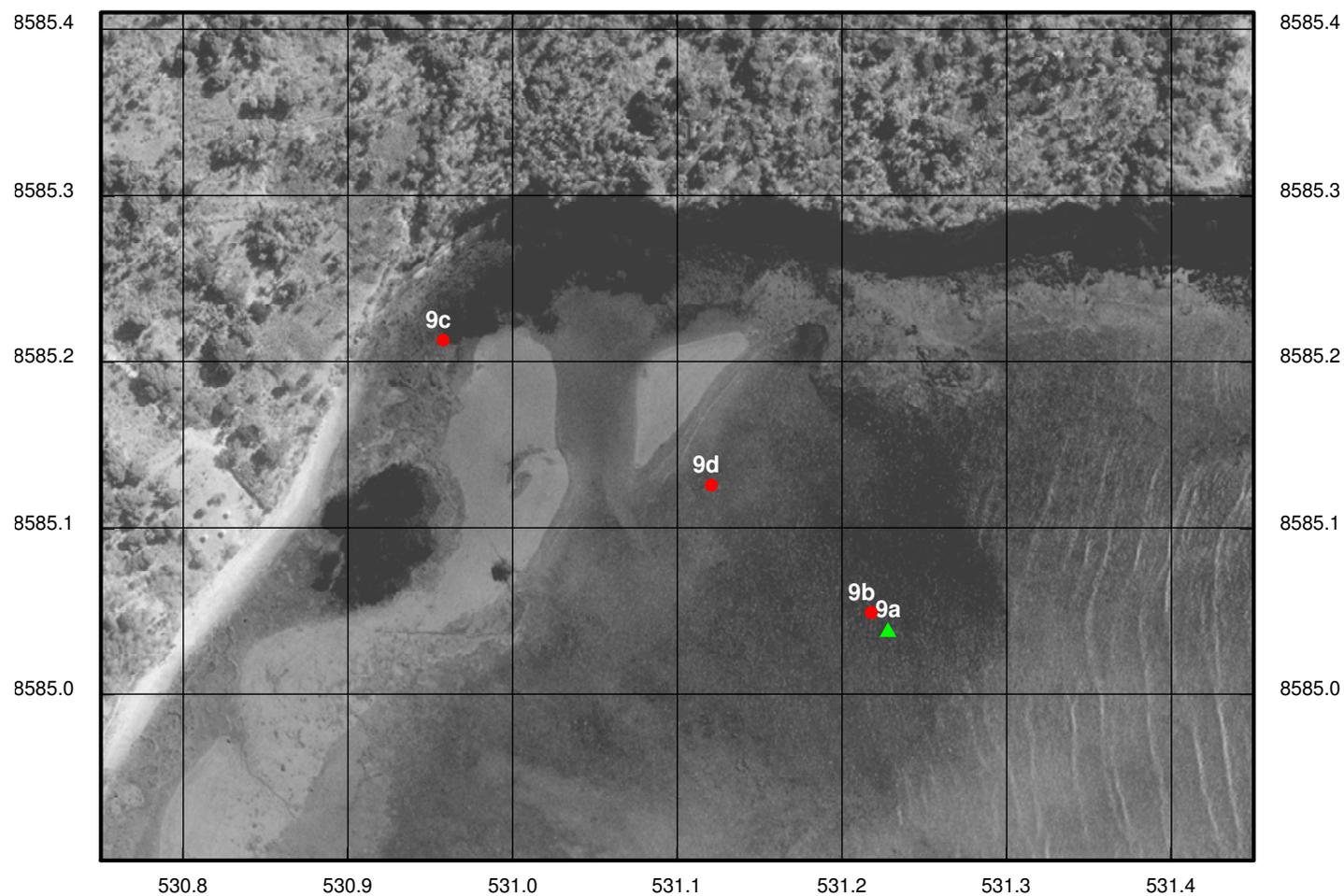


Illustration 18f - Localisation des prélèvements effectués dans la zone de dégagements gazeux.

- (9a) : prélèvement de gaz dans une zone de dégagement gazeux diffus dans le lagon à 5 m de profondeur ;
- (9b) : prélèvements de gaz et eau de mer dans une zone de dégagement gazeux diffus à 5 m de profondeur ;
- (9c) : prélèvements de gaz et eau de mer en bord de plage dans une zone de dégagement gazeux très actif ;
- (9d) : prélèvements de gaz et eau de mer dans le lagon (prof. : 1 m) dans une zone de dégagement très actif.

4.6. SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES SUR PETITE TERRE

L'illustration 13 localise les observations remarquables et les points de prélèvement réalisés durant la campagne de reconnaissance sur Petite Terre.

Petite Terre présente les caractéristiques suivantes, qui pourraient être favorables à l'existence d'une ressource géothermale :

- un volcanisme très récent ayant émis des magmas basaltiques puis trachytiques témoignant de la pérennité d'une chambre magmatique en profondeur à l'aplomb de l'île, et de la possibilité d'avoir des intrusions magmatiques entre cette chambre profonde et la surface qui pourraient être des sources potentielles de chaleur ;
- une fracturation tectonique reflétée par une fissuration diffuse à l'échelle de l'île et par un alignement des deux appareils éruptifs du Dziani Dzaha et de La Vigie selon une direction N170°, pouvant favoriser des circulations de fluides en profondeur.

Cependant, Petite Terre ne présente aucun des indices habituels de l'existence d'une ressource géothermale tels que sources thermo-minérales, sols chauds, dépôts de travertins, anomalies thermiques dans les puits et les aquifères superficiels.

Toutefois, il faut considérer que Petite Terre est dans une situation inhabituelle en prospection géothermique. C'est un îlot volcanique posé sur la barrière corallienne envahie par l'eau de mer et cet écran marin ne facilite certainement pas l'arrivée en surface d'éventuels fluides géothermaux profonds, à l'exception des gaz.

Petite Terre présente justement des phénomènes de dégagement gazeux observés dans deux sites au moins dont l'un spectaculaire. L'origine de ces phénomènes et leur signification éventuelle en termes de ressource géothermale seront discutées plus en détail à la lumière des résultats des analyses géochimiques présentés dans le chapitre suivant.

5. Géochimie des fluides

5.1. PRELEVEMENTS D'ÉCHANTILLONS D'EAU, DE GAZ INCONDENSABLES ET MESURES SUR SITE

La campagne de prélèvements d'échantillons d'eau, de gaz incondensables et de mesures sur site s'est déroulée du 16 au 24 novembre 2005.

Pendant cette campagne, les mesures sur site ont concerné des paramètres tels que la température, la conductivité, le pH, le potentiel d'oxydo-réduction Eh, l'oxygène dissous et l'alcalinité des eaux. Des tests à l'acétate de cadmium ont été effectués pour détecter la présence d'hydrogène sulfuré (H₂S) dissous dans l'eau.

A l'exception de l'alcalinité, qui a été déterminée sur échantillon filtré à 0,45 µm, les autres mesures ont été effectuées sur échantillon brut. Toutes ces mesures ont été réalisées avec des techniques couramment utilisées en analyse des eaux (conductimétrie, pH-métrie, potentiométrie, titration, colorimétrie). Les incertitudes analytiques, suivant les paramètres mesurés et les gammes de valeurs rencontrées, varient de 5 à 10%.

Les eaux prélevées ont été conditionnées suivant les procédures que requièrent les analyses chimiques et isotopiques effectuées :

- filtration à 0,45 µm pour l'analyse des anions majeurs (Cl, SO₄, NO₃), de la silice dissoute (SiO₂) et de certaines traces (F, Br, NH₄) ;
- filtration à 0,45 µm et acidification à l'acide nitrique Suprapur pour les cations majeurs (Na, K, Ca, Mg) et le reste des traces (B, Li, Sr, Ba, Mn, Fe, Al, Cs, Rb, Ge, As, Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) ;
- échantillon brut pour les analyses isotopiques de deutérium (δD), oxygène-18 (δ¹⁸O) et carbone-13 (δ¹³C).

Les gaz incondensables ont été prélevés dans des ampoules en verre de 250 ml à circulation pour analyses chimiques complètes et isotopiques (δ¹³C du CO₂).

Les différents prélèvements d'échantillons d'eau, de gaz incondensables ainsi que les résultats des mesures sur site sont reportés dans l'illustration 19.

La localisation des prélèvements de fluides est reportée sur l'illustration 4 pour Grande Terre, l'illustration 13 pour Petite Terre et l'illustration 18f pour la zone de dégagements gazeux sur la plage de l'aéroport et dans le lagon.

Les coordonnées des points de prélèvements sont données dans l'Annexe 2.

Date	Point de prélèvement	T °C	pH	Eh		Cond. 25 °C mS/cm	O ₂ %	Alc. méq/l	Observations	Prélèvements
				mV	mV NHE					
17/11/2005	Marina Dzaoudzi									1 ampoule GL
18/11/2005	Lagon Aéroport	27,7	7,60			50,1				"
"	Eau de mer, extérieur barrière récifale	26,8	8,06			50,6				100cc 180/D
"	Eau de mer, à coté de l'îlot de Mtsamboro	29,1	8,19	20	223	51,5	102			
"	Ilot de Mtsamboro	28,7	7,76	-267	-63	51,5	22	3,26	Test AcCd positif	A, C, 180/D
19/11/2005	Lac Dziani Point 1	31,5	9,19	79	280	76,5	118	240	Test AcCd négatif	"
"	Lac Dziani Point 2	32,3	9,18	88	289	76,0	121		"	
"	Lac Dziani Point 3	31,8	9,18	99	300	75,8	128		"	
"	Suintements Sud plage de Moya	34,9	8,86			28,3		2,65	Suintements non affectés par la marée	A, C, 180/D
"	Puits de l'Abattoir ou Puits PetiteTerre	27,6	8,09	92	296	1,366	6	12,14		"
"	Plage des Badamiers									Gl
20/11/2005	Plage Aéroport	30,0	5,85	5	207	43,6	38	16,11	Test AcCd négatif	Gl, A, C, 180/D
21/11/2005	Rivière Majimbini	25,2	7,24	121	327	0,257	54	3,43	"	"
22/11/2005	Forage Kaouéni 1	28,0	7,01	121	325	0,385	60	3,57	"	
23/11/2005	Lagon Aéroport 2									Gl

Illustration 19 - Prélèvements d'échantillons d'eau et de gaz incondensables, mesures sur site, effectués au cours de cette étude.

5.2. ANALYSES CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES DES ECHANTILLONS D'EAU ET DE GAZ INCONDENSABLES

5.2.1. Analyses chimiques des eaux

Les prélèvements d'échantillons d'eau ont été destinés aux analyses chimiques des espèces majeures et traces suivantes : Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, NO₃, SiO₂, Br, F, B, NH₄, Li, Sr, Ba, Mn, Fe, Al, Cs, Rb, Ge, As, Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn. Ces analyses ont été réalisées dans les laboratoires du BRGM, à Orléans.

Les techniques analytiques utilisées ont été la chromatographie ionique, le plasma inductif (ICP) ou le plasma inductif couplé à la spectrométrie de masse (ICP/MS), l'absorption atomique flamme (absorption et émission), la colorimétrie, la potentiométrie et l'électrochimie (électrode spécifique). Pour la détermination des espèces majeures, l'incertitude analytique relative est de l'ordre de 5 %. Pour l'analyse des éléments traces, elle est de l'ordre de 10 à 15 %.

Tous les résultats obtenus au cours de cette étude sont présentés dans l'illustration 20. Les valeurs de balance ionique inférieures à 5 % pour tous les échantillons étudiés suggèrent une bonne qualité des analyses des espèces majeures.

5.2.2. Analyses isotopiques des eaux

Les analyses isotopiques effectuées sur certains des échantillons d'eau prélevés au cours de cette étude concernent les valeurs de δD et de $\delta^{18}O$ de l'eau et de $\delta^{13}C$ du carbone dissous dans l'eau. Ces analyses ont été effectuées par spectrométrie de masse dans les laboratoires du BRGM, à Orléans.

Pour les analyses de deutérium et d'oxygène-18, l'incertitude absolue sur les valeurs de δD et $\delta^{18}O$ est de 0,8 ‰ et 0,1 ‰, respectivement. Pour celles de $\delta^{13}C$ du carbone dissous, elle est de 0,1 ‰.

Tous les résultats obtenus au cours de cette étude sont reportés dans l'illustration 20.

5.2.3. Analyses chimiques des gaz

Les analyses chimiques de gaz ont été effectuées par chromatographie en phase gazeuse dans les laboratoires du BRGM, à Orléans, sur quelques échantillons prélevés, au cours de cette étude.

L'incertitude analytique relative est de 3 % pour l'analyse de CO₂, Ar, O₂, N₂, CH₄, C₂H₆, C₃H₈ et les autres dérivés. Elle est de 5 % pour la détermination de He, H₂ et H₂S.

Tous les résultats obtenus au cours de cette étude sont présentés dans l'illustration 21.

Potentiel géothermique de Mayotte

Point de prélèvement	Date	Temp. °C	pH	Eh		Cond. 25°C mS/cm	O ₂ %	H ₂ S	δD ‰	δ ¹⁸ O ‰	δ ¹³ C ‰	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Alc. mg/l HCO ₃	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	NO ₃ mg/l	SiO ₂ mg/l	Cl/Br poids	TDS g/l	B.I. %
				mV	mV NHE																		
Lac Dziani	19/11/2005	31,5	9,19	79	280	76,5	118	non	26,6	5,3	n.a.	22100	1349	< 5	80	14619	28500	298	< 5	5,9	312	67,0	-4,62
Ilot de Mtsamboro	18/11/2005	28,7	7,76	-267	-63	51,5	22	oui	n.a.	n.a.	n.a.	11000	403	444	1260	199	19600	2730	< 5	3,5	303	35,6	0,27
Plage Aéroport	20/11/2005	30,0	5,85	5	207	43,6	38	non	1,0	-0,3	3,5	9100	348	542	1063	983	16100	2260	< 5	37,7	304	30,4	0,38
Lagon Aéroport 2	23/11/2005	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-0,4	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Suintements Sud plage de Moya	19/11/2005	34,9	8,86	n.a.	n.a.	28,3	n.a.	non	-0,9	-0,3	n.a.	4040	152	144	388	162	6850	1400	< 5	10,0	196	13,1	-2,83
Forage Kaouéni 1	22/11/2005	28,0	7,01	121	325	0,385	60	non	-18,5	-3,7	n.a.	51,5	6,1	24,9	12,2	218	33,6	4,3	3,4	76,4	336	0,427	0,76
Rivière Majimbini	21/11/2005	25,2	7,24	121	327	0,257	54	non	-16,0	-3,5	n.a.	25,8	4,3	24,9	20,1	209	21,8	0,5	< 0,5	51,2	218	0,358	1,79
Puits Abattoir - PetiteTerre	19/11/2005	27,6	8,09	92	296	1,366	6	non	n.a.	n.a.	n.a.	294	18,6	12,0	13,3	741	122	5,7	< 0,5	47,7	610	1,254	-4,84

Point de prélèvement	Date	Br mg/l	F mg/l	B µg/l	NH ₄ mg/l	Li µg/l	Sr µg/l	Mn µg/l	Ba µg/l	Fe mg/l	Al µg/l	Rb µg/l	Cs µg/l	Ge µg/l	As µg/l
Lac Dziani	19/11/2005	91,4	< 0,4	10797	0,1	128	33	14	< 10	< 0,1	< 10	1887	< 5	< 5	< 5
Ilot de Mtsamboro	18/11/2005	64,7	< 0,4	4177	1,5	154	6801	< 5	< 10	< 0,1	< 10	111	< 5	< 5	23
Plage Aéroport	20/11/2005	53,0	< 0,4	3620	0,6	142	6935	1178	< 10	7,6	87	125	< 5	< 5	12
Lagon Aéroport 2	23/11/2005	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Suintements Sud plage de Moya	19/11/2005	35,0	n.a.	n.a.	2,1	67	n.a.								
Forage Kaouéni 1	22/11/2005	0,10	0,4	24	0,4	< 10	295	< 5	13	< 0,02	< 10	16	< 5	< 5	< 10
Rivière Majimbini	21/11/2005	0,10	0,2	21	< 0,1	< 10	285	58	16	0,07	< 10	29	< 5	< 5	< 10
Puits Abattoir - PetiteTerre	19/11/2005	0,20	n.a.	n.a.	8,8	13	n.a.								

Point de prélèvement	Date	Ag µg/l	Cd µg/l	Co µg/l	Cr µg/l	Cu µg/l	Ni µg/l	Pb µg/l	Zn µg/l
Lac Dziani	19/11/2005	< 10	< 4	< 4	< 10	< 4	< 10	< 10	23
Ilot de Mtsamboro	18/11/2005	< 10	< 4	< 4	< 10	< 4	< 10	< 10	< 10
Plage Aéroport	20/11/2005	< 10	< 4	< 4	< 10	< 4	< 10	< 10	14
Lagon Aéroport 2	23/11/2005	n.a.							
Suintements Sud plage de Moya	19/11/2005	n.a.							
Forage Kaouéni 1	22/11/2005	< 5	< 2	< 2	< 5	< 2	< 5	< 2	5
Rivière Majimbini	21/11/2005	< 5	< 2	< 2	< 5	< 2	< 5	< 2	< 5
Puits Abattoir - PetiteTerre	19/11/2005	n.a.							

n.a. : non analysé

Illustration 20 - Résultats des analyses chimiques (espèces majeures et traces) et des analyses isotopiques, effectuées sur les échantillons d'eau prélevés au cours de cette étude.

Point de prélèvement	Date	CO ₂ (% vol.)	CH ₄ (% vol.)	N ₂ (% vol.)	O ₂ (% vol.)	Ar (% vol.)	H ₂ (% vol.)	He (% vol.)	H ₂ S (% vol.)	N ₂ /Ar (vol.)	He/Ar (vol.)	δ ¹³ C (‰)
Marina Dzaoudzi	18/11/2005	0,05	< 0,005	78,1	20,9	0,9	< 0,005	< 0,005	< 0,005	87	< 0,002	n.a.
Lagon Aéroport	18/11/2005	87,7	1,13	9,94	2,69	0,07	< 0,005	0,034	< 0,005	142	0,49	n.a.
Plage des Badamiers	19/11/2005	0,4	< 0,005	76,8	20,9	0,9	< 0,005	< 0,005	< 0,005	85	< 0,002	n.a.
Plage Aéroport	20/11/2005	97,1	0,19	0,6	0,15	0,01	< 0,005	0,013	< 0,005	60	1,30	-4,3
Lagon Aéroport 2	23/11/2005	98,4	0,37	1,16	0,53	0,03	< 0,005	0,013	< 0,005	39	0,43	-3,2
Atmosphère terrestre		0,03	0,00014	78,0	20,9	0,9		0,0005		87	0,00058	-7,5

Point de prélèvement	Date	Ethane (% vol.)	Iso butane (% vol.)	N butane (% vol.)	Propane (% vol.)	SOMME C4 (% vol.)	SOMME C5 (% vol.)	SOMME C6 (% vol.)
Marina Dzaoudzi	18/11/2005	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0004	< 0,0002	< 0,0002
Lagon Aéroport	18/11/2005	0,002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0004	< 0,0002	< 0,0002
Plage des Badamiers	19/11/2005	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0004	< 0,0002	< 0,0002
Plage Aéroport	20/11/2005	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0004	< 0,0002	< 0,0002
Lagon Aéroport 2	23/11/2005	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0004	< 0,0002	< 0,0002

n.a. : non analysé

Illustration 21 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques effectuées sur les échantillons de gaz prélevés au cours de cette étude (la composition chimique et la valeur isotopique en carbone-13 de l'air atmosphérique sont également reportées dans ce tableau).

5.2.4. Analyses isotopiques des gaz

Les analyses de $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 ont été effectuées sur deux échantillons de gaz incondensables par spectrométrie de masse en phase gazeuse et après séparation du CO_2 . L'incertitude absolue sur les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ est de 0,1 ‰. Les résultats obtenus au cours de cette étude sont reportés dans l'illustration 21.

5.3. INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS EN GEOCHIMIE DES EAUX

5.3.1. Origine des eaux

L'échantillon d'eau prélevé au niveau de l'îlot de Mtsamboro indique une composition chimique (ill. 20) proche de celle de l'eau de mer (Fouillac, 1981 ; Michard, 2002) et peut être utilisé comme eau de mer locale de référence.

Comme l'indiquent leurs compositions chimiques (ill. 20), les deux échantillons d'eau « Plage Aéroport » et « Suintements Sud Plage Moya » sont issus d'un mélange entre de l'eau de mer et de l'eau douce peu minéralisée. Les concentrations de nombreuses espèces, et notamment celles des chlorures (Cl), permettent d'estimer une proportion d'environ 82% d'eau de mer et 18% d'eau douce pour le premier échantillon, de 35% d'eau de mer et 65% d'eau douce pour le second. Le rapport Cl/Br du premier échantillon est proche de celui de l'eau de mer tandis que pour le second échantillon, on observe un rapport plus faible (ill. 20), qui s'explique, très probablement, par un enrichissement en bromures

Les valeurs de δD et $\delta^{18}\text{O}$ de ces deux échantillons (ill. 22) sont voisines de celles du SMOW (Standard Mean Ocean Water ; $\delta\text{D} = 0$ ‰ et $\delta^{18}\text{O} = 0$ ‰). Dans la mesure où les mers chaudes subissent des phénomènes d'évaporation, qui ont tendance à faire légèrement augmenter leurs valeurs de δD de 0 jusqu'à 10 ‰, ces deux échantillons possèdent des valeurs de δD et $\delta^{18}\text{O}$ compatibles avec les processus de mélange entre l'eau de mer et l'eau douce décrits antérieurement (ills. 23 et 24). La valeur de δD la plus adaptée pour le pôle pur eau de mer du mélange (qui n'a pas été analysée sur l'échantillon de Mtsamboro) serait environ 2 ‰. D'après les illustrations 22 et 24, il est fort probable que ces eaux aient été légèrement enrichies en oxygène-18. Cet enrichissement est, sans doute, lié à la présence d'émanations gazeuses en CO_2 importantes qui, comme nous le verrons ultérieurement, sont essentiellement d'origine magmatique, et dont une partie se dissout dans l'eau.

Les illustrations 23 et 24 montrent que l'eau douce qui vient se mélanger à l'eau de mer, caractérisée par une concentration de chlorures proche de zéro, possède des valeurs de δD et $\delta^{18}\text{O}$ supérieures à celles des échantillons d'eau de la rivière Majimbini et du forage Kaouéni 1 (ou Kaweni 1), surtout pour la valeur de δD . Aucune de ces deux eaux ne constitue donc le pôle pur eau douce du mélange. Par contre, de telles valeurs de δD et $\delta^{18}\text{O}$, pour ce pôle, ont été observées sur des échantillons d'eau de pluie prélevés à La Réunion (Nicolini *et al.*, 1991).

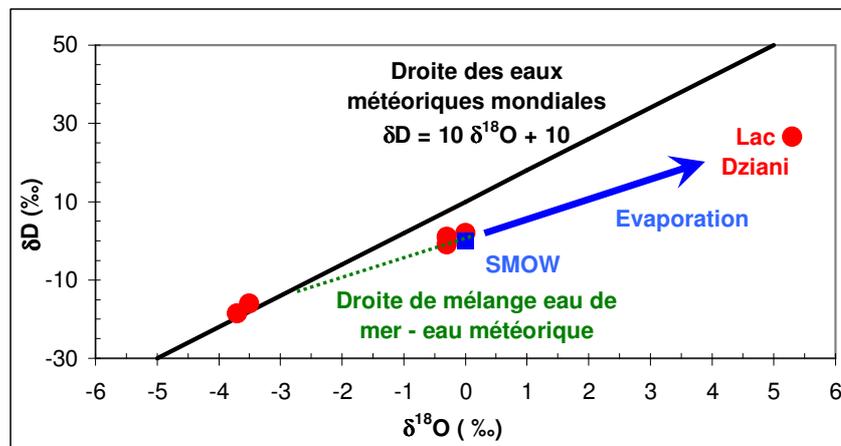


Illustration 22 - Diagramme $\delta^{18}\text{O}$ - δD pour les échantillons d'eau étudiés.

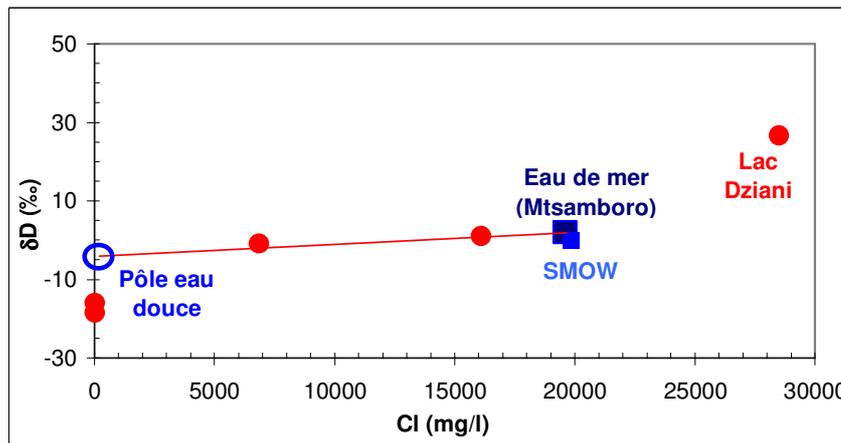


Illustration 23 - Diagramme δD - concentrations de Cl pour les échantillons d'eau étudiés.

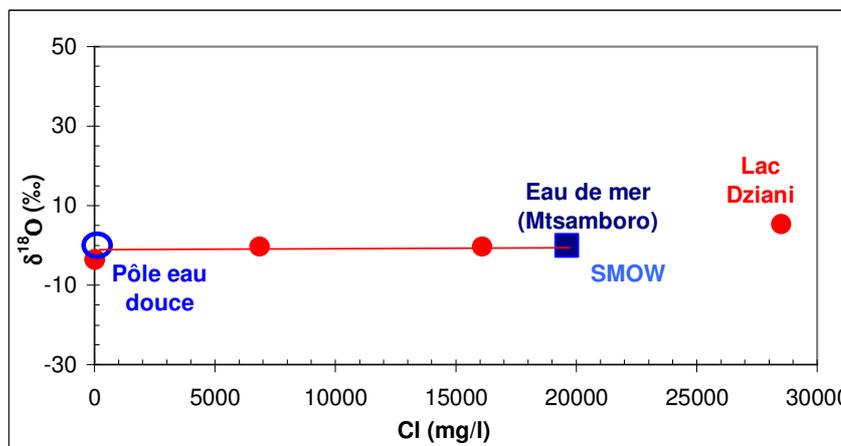


Illustration 24 - Diagramme $\delta^{18}\text{O}$ - concentrations de Cl pour les échantillons d'eau étudiés.

L'eau du lac Dziani Dzaha a une salinité (TDS, ill. 20) environ deux fois supérieure à celle de l'eau de mer. Comme suggéré par sa composition chimique, son rapport Cl/Br (ill. 20) et ses valeurs de δD et $\delta^{18}O$ (ills. 22, 23 et 24), cette eau a pour origine une eau de mer, qui subit des processus d'évaporation. Néanmoins, même si cela n'a pas pu être démontré à partir de la composition chimique de l'eau, on sait aussi que des arrivées d'eau de surface d'origine météorique viennent se mélanger à l'eau de mer, qui alimente le lac et s'évapore. Les proportions de chaque pôle de ce mélange, qui est compatible avec la signature isotopique en δD et $\delta^{18}O$ de l'eau du lac (ill. 22), varient, très probablement, en fonction des périodes de pluviosité et de sécheresse, ce qui doit être à l'origine de nombreux cycles d'évaporation - dilution. Comme les apports en eau douce du lac ne sont pas connus, il n'est pas possible de déterminer le degré maximum d'évaporation atteint par l'eau de ce lac.

Par ses valeurs isotopiques en δD et $\delta^{18}O$ et sa composition chimique, l'eau du forage Kaouéni 1 (ou Kaweni 1) est proche de celle de l'eau de la rivière Majimbini. Comme le montre l'illustration 22, ces eaux ont une origine météorique. Leurs valeurs isotopiques de δD et $\delta^{18}O$ sont proches de valeurs moyennes mesurées sur des eaux de pluie prélevées à une altitude de 860 m, dans l'île de La Réunion (Nicolini *et al.*, 1991). Bien que ses valeurs isotopiques de δD et $\delta^{18}O$ n'aient pas été analysées et que sa salinité soit plus élevée que celle des échantillons précédents, l'eau de l'échantillon du puits de l'Abattoir (désigné aussi échantillon "Puits Petite Terre") est constituée, en grande partie, d'eau d'origine météorique. Il n'est pas exclu, cependant, que la concentration relativement élevée en chlorures soit le résultat de la présence d'une très faible proportion d'eau de mer.

5.3.2. Nature des eaux et processus d'interaction eau - roches volcaniques

A l'exception de l'échantillon d'eau "Plage Aéroport", qui indique une valeur de pH de 5,85, l'ion bicarbonate (HCO_3) est l'espèce prédominante en solution pour tous les autres échantillons d'eau, étudiés au cours de cette étude. Les concentrations de carbonate total (CO_2 dissous + HCO_3 + CO_3) en solution sont alors proches de celles des bicarbonates dissous, qui peuvent être assimilées aux valeurs d'alcalinité. Pour l'échantillon "Plage Aéroport", l'espèce prédominante est plutôt sous forme de CO_2 dissous dans l'eau. La concentration de carbonate total en solution est alors supérieure à celle des bicarbonates, représentée par la valeur d'alcalinité.

Les eaux analysées peuvent être regroupées en trois catégories d'eau (ill. 25) :

- les eaux chlorurées sodiques ayant une proportion d'eau de mer relativement importante (échantillons "Mtsamboro", "Plage Aéroport", "Suintements Plage Moya") et donc, des salinités élevées ;
- les eaux chloruro-bicarbonatées sodiques (échantillon du lac Dziani Dzaha) issues de l'évaporation de l'eau de mer et d'apports en carbonates. Les salinités de ces eaux sont également élevées ;

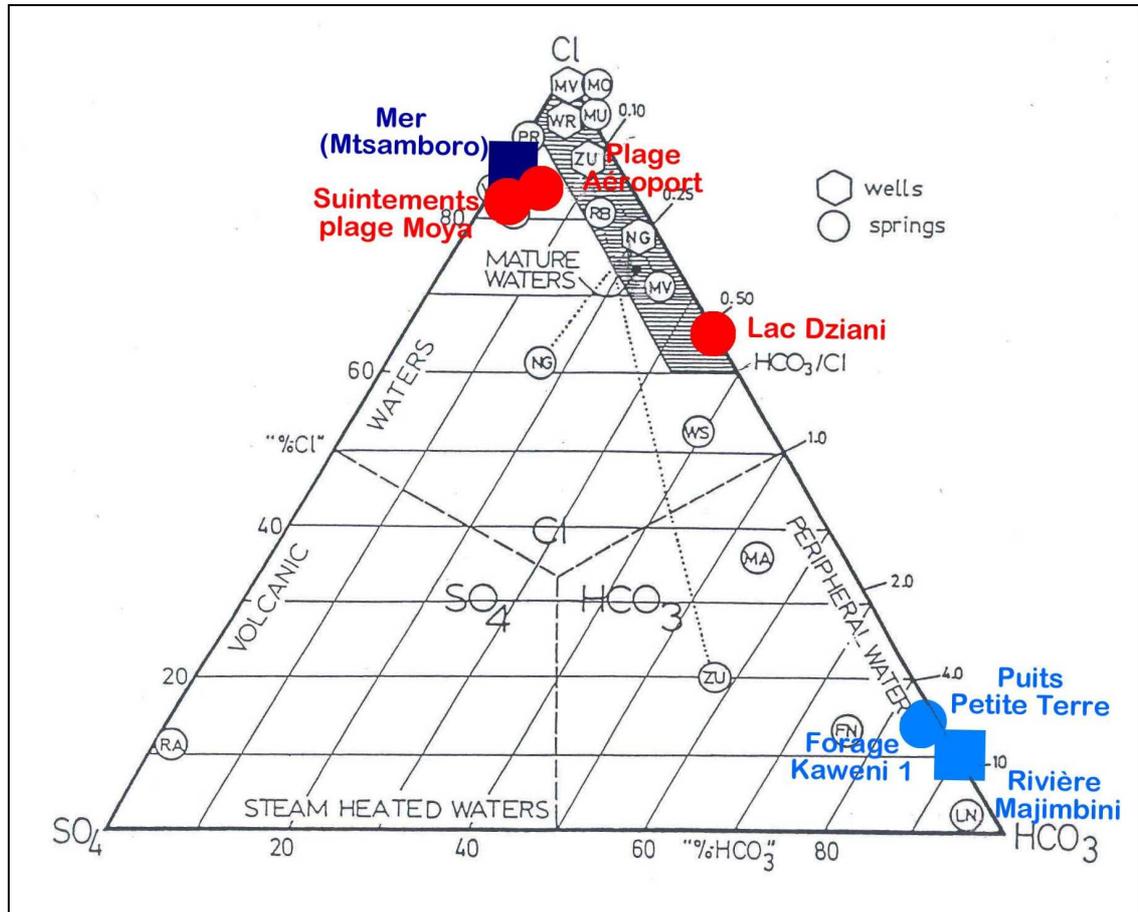


Illustration 25 - Positionnement des échantillons d'eau analysés au cours de cette étude, dans le diagramme ternaire Cl-HCO₃-SO₄ de Giggenbach (1988).

- les eaux douces bicarbonatées calco-sodiques superficielles, dont les salinités sont plutôt faibles.

a) Groupe des eaux chlorurées sodiques

En ce qui concerne le premier groupe d'eau, on constate que la présence d'abondantes émanations gazeuses, essentiellement constituées de CO₂ (gaz acide), au contact de ces eaux, peut jouer un rôle important sur les valeurs de pH, qui diminuent alors de façon significative (ills. 19 et 20). Ainsi, on a mesuré un pH de 5,85 dans l'échantillon d'eau "Plage Aéroport". A partir de cette valeur et de la composition chimique de l'eau de cet échantillon (ill. 20), on peut estimer la pression partielle de CO₂ à l'équilibre avec cette eau, en utilisant le code de calcul géochimique EQ3NR (Wolery, 1995). L'estimation obtenue est de 0,83 atm et est, par conséquent, environ 2 300 fois supérieure à la pression partielle de CO₂ moyenne de l'atmosphère (3,6.10⁻⁴

atm ; Michard, 2002), ce qui montre l'importance de ces émanations gazeuses. La concentration de CO₂ dissous dans l'eau de cet échantillon est proche de 1 g/l.

Pour cet échantillon d'eau, on voit que la baisse de pH, essentiellement due à la présence des émanations gazeuses de CO₂ et au processus de dilution provenant du mélange entre l'eau de mer et l'eau douce, a provoqué une légère dissolution de carbonates de calcium (concentrations de calcium et de bicarbonates en solution plus élevées que pour l'eau de mer). D'ailleurs, les calculs de saturation effectués au moyen du code géochimique EQ3NR montrent que l'eau de cet échantillon est sous-saturée vis-à-vis de la calcite.

Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ mesurées sur les échantillons "Plage Aéroport" et "Lagon Aéroport 2" (ill. 20) résultent d'une origine mixte du carbone dissous dans l'eau : origine à la fois marine (eau de mer + dissolution de carbonates marins), et magmatique, issue de la dissolution du CO₂ apporté par les émanations gazeuses observées en surface. Comme nous le verrons ultérieurement, les analyses isotopiques de $\delta^{13}\text{C}$ de ce CO₂ indiquent qu'il est essentiellement d'origine magmatique.

Si l'on s'affranchit des perturbations causées par la présence de CO₂, mais surtout de l'effet de dilution dû au mélange entre l'eau de mer et l'eau douce, qui abaisse les concentrations des espèces en solution, on s'aperçoit que la composition chimique de ces eaux est relativement peu affectée, notamment par des processus d'interaction eau - roches volcaniques. Pour ce groupe d'eaux, le rapport entre les concentrations de nombreux éléments et de celles des chlorures, qui est une espèce peu réactive, reste plutôt constant (rapports Li/Cl, SO₄/Cl, Mg/Cl, Sr/Cl, Rb/Cl...). Les concentrations de silice dissoute sont également faibles.

Comme les géothermomètres chimiques Na/K et Na/K/Ca donnent des valeurs de températures erronées pour l'eau de mer (150 et 175°C ; ill. 26 et 27), ils ne peuvent pas être appliqués pour ce groupe d'eaux qui, par ailleurs, indiquent un très faible degré d'interaction avec les roches. Ce faible degré d'interaction est confirmé par les valeurs basses de température, estimées au moyen des géothermomètres calcédoine, Na/Li, Mg/Li et Mn/K (ill. 26).

b) Eau du lac Dziani Dzaha

La composition chimique de l'eau du lac Dziani Dzaha ainsi que sa salinité et son pH élevés résultent non seulement d'apports d'eau de mer et d'eaux de surface d'origine météorique, qui s'évaporent, mais aussi de processus d'interaction avec les roches, telle que peut l'être la dissolution de minéraux carbonatés et de cendres et ponces trachytiques environnantes, riches en sodium. Même si pendant cette campagne de reconnaissance, aucune manifestation de ce type n'a été observée, la présence des émanations gazeuses de CO₂ du fond du lac, évoquées par le passé, pourraient être à l'origine de la formation de ces (ou d'une partie de ces) minéraux carbonatés en période sèche.

Les faibles concentrations actuelles de calcium, magnésium, sulfates et silice, par rapport à une eau de mer évaporée au même stade que celui de l'eau de ce lac,

suggèrent également des processus de précipitation de minéraux carbonatés, sulfatés et alumino-silicatés.

En raison de son origine marine et de la concentration de calcium non détectée, les géothermomètres chimiques Na/K et Na/K/Ca ne peuvent pas, non plus, être appliqués à l'échantillon d'eau du lac Dziani.

La plupart des autres géothermomètres donne des valeurs de température erronées (ills. 26 et 27). Néanmoins, les faibles valeurs de température obtenues avec les géothermomètres Calcédoine, Na/Li et Mg/Li suggèrent que cette eau ou une partie de cette eau n'a pas été portée à de hautes températures.

c) Groupe des eaux bicarbonatées calco-sodiques superficielles

Dans l'ensemble, ces eaux d'origine essentiellement météorique ont acquis leur composition chimique et leur salinité par interaction relativement modérée avec les roches. Les salinités sont plutôt faibles et leur pH est proche de la neutralité.

L'eau de l'échantillon du puits de l'Abattoir, désigné aussi échantillon "Puits Petite Terre", indique une salinité et un pH plus élevés. Pour cette eau, une très faible contribution d'eau de mer, qui expliquerait les concentrations en chlorure et en sodium plus importantes, n'est pas à exclure. La minéralisation de cette eau est dominée par la présence de sodium et de bicarbonates. Les bicarbonates pourraient provenir de la dissolution de carbonates de calcium. Etant donné les faibles concentrations de calcium en solution, cet élément a pu être substitué par du sodium au travers de processus d'échange d'ions entre l'eau de cet échantillon et des minéraux argileux.

Pour ces eaux de surface non équilibrées avec les roches, de nombreux géothermomètres chimiques (notamment Na/K) donnent des températures erronées. L'application de certains de ces géothermomètres, dont les résultats obtenus peuvent être calés par rapport à l'eau de rivière pour laquelle on connaît la température (25,2°C), montre qu'aucune de ces eaux n'a été portée à des températures élevées (ills. 26 et 27).

Point de prélèvement	Date	T _{émerg.} °C	T _{Qz} °C	T _{Calcéd.} °C	T _{SiO2am.} °C	T _{Na/K (1)} °C	T _{Na/K (2)} °C	T _{Na/K/Ca (β=4/3)} °C	T _{Na/K/Ca (β=1/3)} °C	T _{Na/K/Ca (corr. Mg)} °C
Lac Dziani	19/11/2005	31,5	23	-28	-78	177	150	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
Ilot de Mtsamboro (mer)	18/11/2005	28,7	9	-40	-89	143	111	270	174	1
Plage Aéroport	20/11/2005	30,0	89	32	-25	146	114	245	171	2
Suintements Sud plage de Moya	19/11/2005	34,9	39	-13	-65	145	112	230	167	2
Forage Kaouéni 1	22/11/2005	28,0	123	63	4	231	216	71	167	29
Rivière Majimbini	21/11/2005	25,2	103	45	-13	264	258	53	172	11
Puits Abattoir - PetiteTerre	19/11/2005	27,6	100	42	-16	180	153	155	170	16

Point de prélèvement	Date	T _{K/Mg} °C	T _{Na/Li (1)} °C	T _{Na/Li (2)} °C	T _{Mg/Li} °C	T _{K/Sr} °C	T _{FK} °C	T _{Mn/K} °C	T _{estimée} °C
Lac Dziani	19/11/2005	184	-13	-9	28	349	<i>n.d.</i>	140	31,5
Ilot de Mtsamboro (mer)	18/11/2005	98	11	9	8	62	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	28,7
Plage Aéroport	20/11/2005	96	14	12	8	56	<i>n.d.</i>	13	30,0
Suintements Sud plage de Moya	19/11/2005	88	16	13	4	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	34,9
Forage Kaouéni 1	22/11/2005	53	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	-17	51	<i>n.d.</i>	28-50
Rivière Majimbini	21/11/2005	41	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	-25	30	27	25
Puits Abattoir - PetiteTerre	19/11/2005	77	-36	37	5	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	28-40

n.d. : non déterminé

T_{Qz}, T_{SiO2am.} : Fournier and Rowe (1966) ; T_{Calcéd.} : Truesdell (1975).

T_{Na/K (1)} : Fournier (1979) ; T_{Na/K (2)} : Michard (1979).

T_{Na/K/Ca} : Fournier and Truesdell (1973). Correction avec Mg (Fournier and Potter, 1979).

T_{K/Mg} : Giggenbach (1988).

T_{K/Sr}, T_{FK} and T_{Mn/K} : Michard (1990).

T_{Na/Li (1)} : Fouillac et Michard (1981) ; T_{Na/Li (2)} : Kharaka *et al.* (1982)

T_{Mg/Li} : Kharaka and Mariner (1989).

Illustration 26 - Application des géothermomètres chimiques aux différents échantillons d'eau analysés au cours de cette étude.

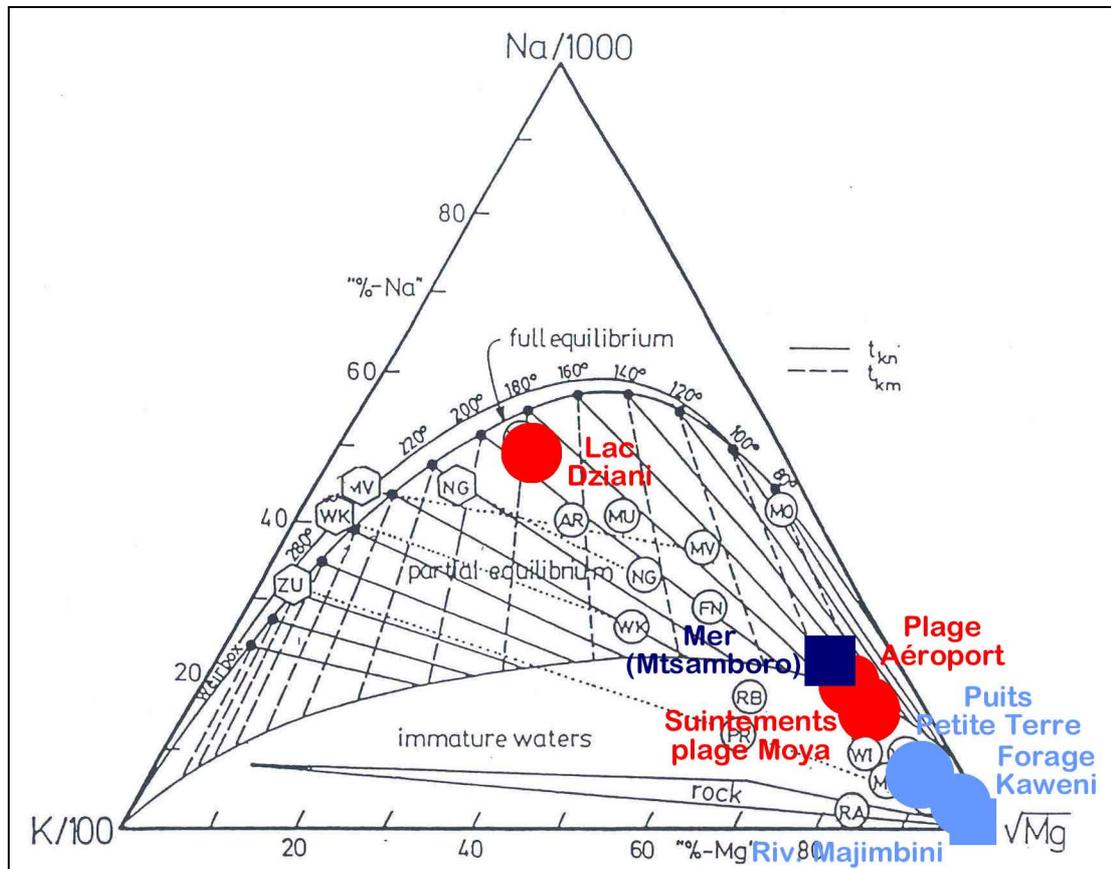


Illustration 27 - Positionnement des échantillons d'eau, analysés au cours de cette étude, dans le diagramme ternaire Na-K-Mg de Giggenbach (1988).

En conclusion, les résultats des analyses des eaux prélevées en mer ou en bordure de mer indiquent surtout la présence d'un processus de dilution avec une plus ou moins grande contribution d'eau douce, ainsi que l'existence d'interactions relativement importantes avec les émanations gazeuses de CO_2 , lorsque celles-ci sont abondantes (leurs pressions partielles peuvent atteindre des valeurs de 0,83 atm, soit environ 2 300 fois la valeur de la pression partielle de CO_2 atmosphérique moyenne). Ceci a pour effet d'enrichir légèrement en oxygène-18 la signature isotopique de ces eaux, mais surtout d'abaisser significativement leur pH et parfois même, de provoquer la dissolution de minéraux carbonatés.

L'eau du lac Dziani Dzaha résulte d'apports d'eau de mer et d'eaux de surface d'origine météorique, qui s'évaporent, ainsi que de processus de dissolution de laves riches en sodium et de carbonates de calcium formés en partie, très probablement, grâce à la présence d'émanations gazeuses de CO_2 , au fond du lac. Des réactions de précipitation de minéraux carbonatés, sulfatés et alumino-silicatés sont également soupçonnées.

Les autres échantillons représentent des eaux douces superficielles ayant modérément réagi avec les roches. Aucun indice d'eau géothermale portée à haute température n'a pu être mis en évidence, au cours de cette étude.

5.4. INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS EN GEOCHIMIE DES GAZ

Les résultats des analyses chimiques des gaz incondensables indiquent que les échantillons "Marina de Dzaoudzi" et "Plage des Badamiers" sont essentiellement constitués d'air atmosphérique (ill. 21). On retrouve pratiquement la composition chimique de l'atmosphère avec 78 % d'azote (N₂), 20,9 % d'oxygène (O₂) et 0,9 % d'argon (Ar).

Les trois autres échantillons de gaz, prélevés en mer ou en bordure de mer, sont principalement constitués de CO₂. Si l'échantillon "Lagon Aéroport" contient environ 12-13 % d'air atmosphérique, les deux autres en sont quasiment dépourvus. Par rapport à la composition chimique atmosphérique, on peut remarquer que les concentrations en méthane (CH₄) et en hélium (He) de ces trois échantillons sont loin d'être négligeables (ill. 21). Par contre, les gaz hydrogène (H₂) et hydrogène sulfuré (H₂S) n'y ont pas été détectés.

Les compositions chimiques de ces trois échantillons, reportées sur les illustrations 28 et 29, suggèrent que ces gaz sont d'origine magmatique. Surtout sur l'illustration 28, ces compositions sont assez proches de celles observées sur les gaz provenant des chambres magmatiques du volcan Piton des Neiges, à La Réunion, et du volcan Kilauea, à Hawaï (Giggenbach, 1992).

Cette origine magmatique est confirmée par les concentrations importantes en hélium, les rapports Ar/He qui sont proches ou supérieurs à 0,1, mais surtout par les signatures isotopiques en carbone-13 du CO₂ (ill. 21), qui sont voisines de celles observées dans les zones de Hot Spot (Points Chauds), comme le sont La Réunion, Hawaï ou Hengill, en Islande (moyenne de $-4 \pm 1,5$ ‰ ; Marty *et al.*, 1993). Rappelons que la signature en carbone-13 des MORB (Mid-Ocean Ridge Basalt) est comprise entre 9 et 5 ‰ (Pineau and Javoy, 1983) et que des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ allant de 8,6 à 2,3 ‰ peuvent être compatibles avec une origine magmatique des gaz (Marty *et al.*, 1991 ; Pedroni *et al.*, 1999). D'après Marty *et al.* (1991), les zones de Hot Spot sont caractérisées par des compositions relativement homogènes en carbone et en hélium.

Les résultats obtenus au cours de cette étude, qui mériteraient d'être complétés par des mesures isotopiques en ³He/⁴He, suggèrent l'existence d'un dégazage actif d'une chambre magmatique, dans une zone de Hot Spot.

L'absence de détection de H₂ et H₂S ne permet pas d'utiliser directement les nombreuses relations géothermométriques basées sur des réactions d'équilibre impliquant ces gaz (Giggenbach, 1991).

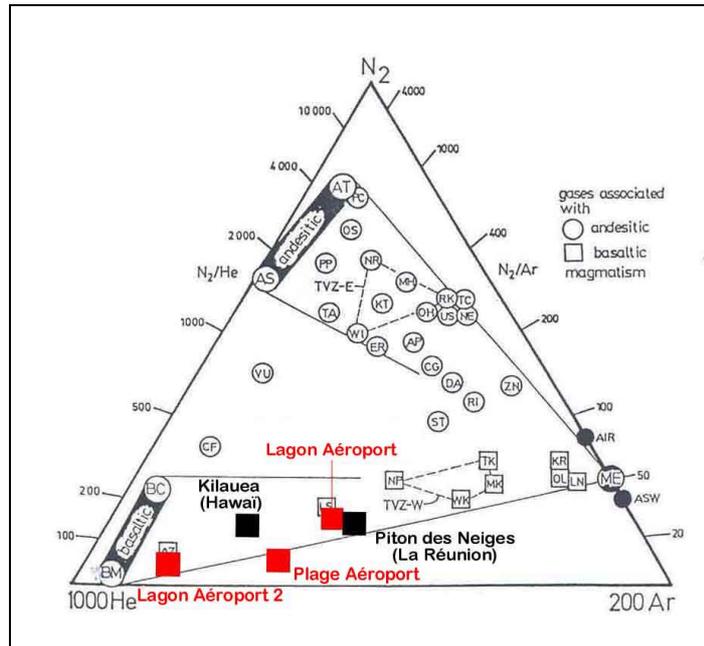


Illustration 28 - Diagramme de Marty et Giggenbach (1990) indiquant les concentrations relatives de N_2 , He et Ar pour trois des échantillons de gaz analysés au cours de cette étude (à comparer aux concentrations des échantillons de gaz provenant de La Réunion et d'Hawaï).

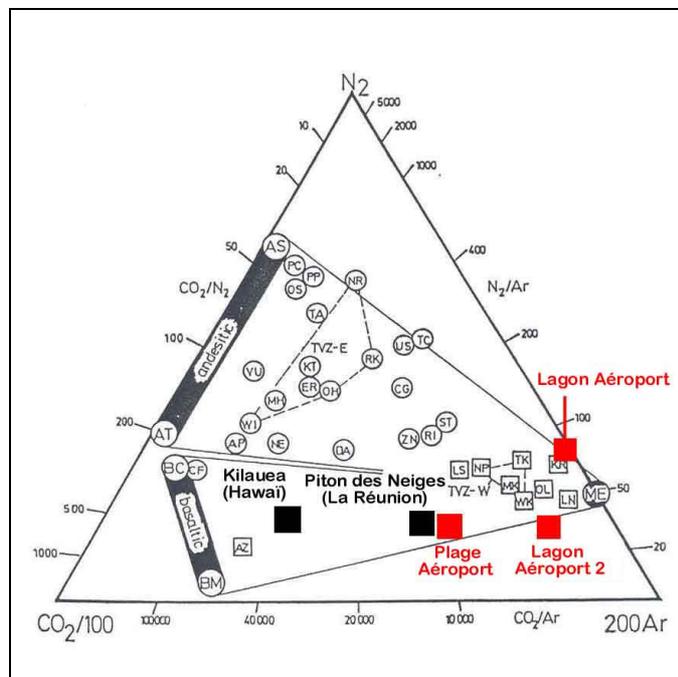


Illustration 29 - Diagramme de Marty et Giggenbach (1990) indiquant les concentrations relatives de N_2 , CO_2 et Ar pour trois des échantillons de gaz analysés au cours de cette étude (à comparer aux concentrations des échantillons de gaz provenant de La Réunion et d'Hawaï).

Néanmoins, en considérant les valeurs de seuil de détection analytiques de ces deux gaz comme les valeurs maximales de leurs concentrations dans les trois échantillons étudiés, les relations géothermométriques $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2/\text{CH}_4$ (D'Amore and Panichi, 1980), $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{-CH}_4$ (Marini, 1987) et H_2/Ar (Giggenbach and Goguel, 1989) convergent vers des températures comprises entre 80 et 120 °C. Ces valeurs seraient inférieures si des concentrations en H_2 et H_2S plus basses avaient été considérées.

L'utilisation des deux géothermomètres à gaz CO_2/CH_4 et CO_2/Ar (Giggenbach, 1991) aboutit à l'estimation des températures suivantes :

- 270 et 235 °C pour l'échantillon de gaz "Lagon Aéroport" ;
- 328 et 280 °C pour l'échantillon de gaz "Plage Aéroport" ;
- 307 et 260 °C pour l'échantillon de gaz "Lagon Aéroport 2" (ill. 21).

L'inconvénient majeur de ce type d'outils est que l'on ignore si l'analyse des gaz faite en surface est représentative de leur composition chimique, dans les conditions d'équilibre en profondeur. Etant donné l'absence de concordance entre les résultats obtenus à partir des différents géothermomètres, l'incertitude de ces méthodes et la vitesse à laquelle le CO_2 peut être impliqué dans des processus de rééquilibration, ces estimations de température sont à considérer avec beaucoup de précautions.

En conclusion, la plupart des caractéristiques chimiques et isotopiques des émanations gazeuses observées en mer ou en bordure de mer, essentiellement constituées de CO_2 et indiquant des concentrations en He relativement élevées, témoigne d'un dégazage actif d'une chambre magmatique dans une zone de Hot Spot, comme à La Réunion ou à Hawaï.

6. Synthèse et perspectives

6.1. SYNTHÈSE DES TRAVAUX ET CONCLUSIONS

Cette campagne de reconnaissance géothermique de Mayotte a permis de collecter des données géologiques, hydrogéologiques et géochimiques dans le but d'établir un état des connaissances sur le potentiel géothermique de Mayotte.

L'ensemble de Mayotte a été considéré. L'accent a cependant été mis sur les deux zones présentant une activité volcanique âgée de moins de 1 Ma :

- la région de Mamoudzou sur Grande Terre ;
- l'ensemble de Petite Terre

Les illustrations 30 et 31 présentent des sections interprétatives du substratum de Petite Terre et de la région de Mamoudzou sur lesquelles a été focalisée la campagne de reconnaissance.

6.1.1. Région de Mamoudzou et Grande Terre

La région de Mamoudzou ne présente aucun indice de l'existence d'une ressource géothermale. La dernière activité volcanique datée autour de 0,5 Ma n'a visiblement pas eu un impact thermique suffisant pour permettre le développement d'un système géothermal.

L'illustration 30 permet de visualiser le substratum entre Mamoudzou et Petite Terre selon un profil WNW-ESE. L'appareil phréato-magmatique de Kaouéni apparaît situé en position côtière et il recoupe le substratum volcanique. D'un point de vue hydrogéologique, cette zone côtière est marquée à la fois par des circulations d'eaux météoriques et des infiltrations d'eau de mer en provenance du lagon. Cependant, la présence d'un réservoir géothermal à l'aplomb de cette zone se serait sans nul doute traduite par des remontées de fluides géothermaux vers la surface.

Le reste de Grande Terre est également dépourvu d'indice. Il est vrai que l'essentiel du volcanisme y est relativement ancien et daté entre 8 et 1,5 Ma.

Ces observations amènent à conclure que l'île de Grande Terre apparaît dépourvue de ressource géothermique.

6.1.2. Petite Terre

Petite Terre se révèle être une île volcanique très récente dont l'âge des dernières manifestations serait compris entre 4 000 et 7 000 ans BP seulement, avec la mise en place des volcans de La Vigie et du Dziani Dzaha. Les caractéristiques de cette activité

volcanique récente apparaissent plutôt favorables au développement d'un système géothermique. De plus, la fissuration diffuse observée sur l'île reflète une fracturation qui est à même de favoriser les circulations de fluides en profondeur.

Cependant, Petite Terre ne présente aucun des indices habituels et probants d'une ressource géothermale à son aplomb, tels que sources thermo-minérales, anomalies thermiques dans les puits ou aquifères superficiels, De par sa composition chimique et isotopique, sa salinité et son pH basique, l'eau du lac Dziani Dzaha est issue d'apports d'eau de mer et d'eaux de surface, d'origine météorique, qui subissent des processus d'évaporation et interagissent avec les roches (lessivage de carbonates et des cendres et ponces trachytiques environnantes, riches en sodium; précipitation de sulfates, d'alumino-silicates, etc.). Les suintements d'eau froide le long d'une fissure orientée N170° sur la plage de Moya sont un mélange d'eau météorique et d'eau de mer dans les proportions de 65 % et 35 %. L'eau du puits de l'Abattoir est une eau météorique légèrement contaminée par de l'eau de mer. L'analyse de ces différents fluides n'a révélé aucune trace de contamination par des fluides géothermaux profonds.

Par contre, cette campagne de reconnaissance a permis d'observer des phénomènes de dégagements gazeux dont un site particulièrement spectaculaire sur la plage située à l'est de l'aéroport et se prolongeant dans le lagon. L'analyse des trois échantillons de gaz prélevés montre qu'ils sont constitués essentiellement de gaz carbonique (CO₂), accompagné de faibles quantités de méthane (CH₄) et d'hélium (He). Il s'agit de gaz d'origine magmatique, de composition assez proche de celles rencontrées sur des volcans de points chauds (hot spots) comme la Réunion ou Hawaï. Même s'il n'a pas pu être quantifié en raison de la taille importante de la zone de dégazage et du fait qu'une partie se situe sous l'eau, le flux de gaz est particulièrement élevé et reflète une source de dégazage importante. La baisse significative du pH jusqu'à 5,85 de l'eau de mer dans le lagon, en réponse à l'acidification causée par l'interaction avec le gaz carbonique, ainsi que l'estimation partielle de CO₂, qui en est déduite (0,83 atm ; environ 2 300 fois supérieure à la valeur de la pression partielle de CO₂ atmosphérique) en témoignent.

L'existence de ces phénomènes de dégagements gazeux avait déjà été mentionnée par différents auteurs au niveau du Lac Dziani (Gozlan et Lapegue, 1993 ; Lapegue, 1999, Bouttemy, 2003) et au niveau de la barrière récifale (travaux du Prof. Thomassin, CNRS Marseille, 1998). Les prélèvements effectués au cours de cette campagne de reconnaissance géothermique ont permis de les analyser pour la première fois et de confirmer qu'il s'agissait de gaz d'origine magmatique.

La présence de ces gaz magmatiques sur l'île de Petite Terre n'est pas fortuite. Elle est reliée à son activité volcanique très récente. Les appareils du Dziani Dzaha et de la Vigie ont émis un magma trachytique similaire provenant d'une même chambre magmatique située à l'aplomb de Petite Terre. Cette chambre magmatique semble avoir évolué depuis une composition basaltique vers une composition trachytique, comme en témoignent les cônes stromboliens basaltiques disséminés entre Grande Terre et Petite Terre.

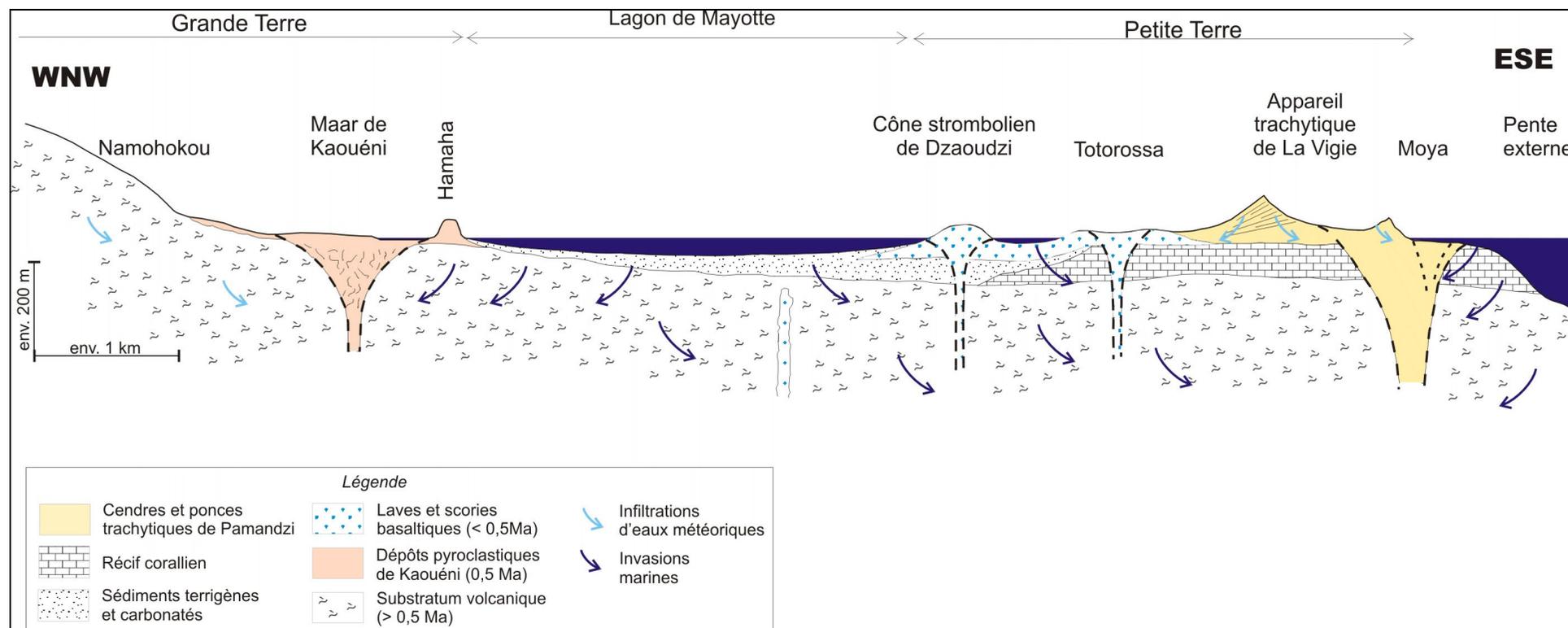


Illustration 30 - Section verticale interprétative entre Mamoudzou et Petite Terre selon un profil orienté WNW-ESE, montrant la géologie et les écoulements de fluides supposés dans le substratum (l'échelle verticale est triplée par rapport à l'échelle horizontale pour mieux visualiser les reliefs).

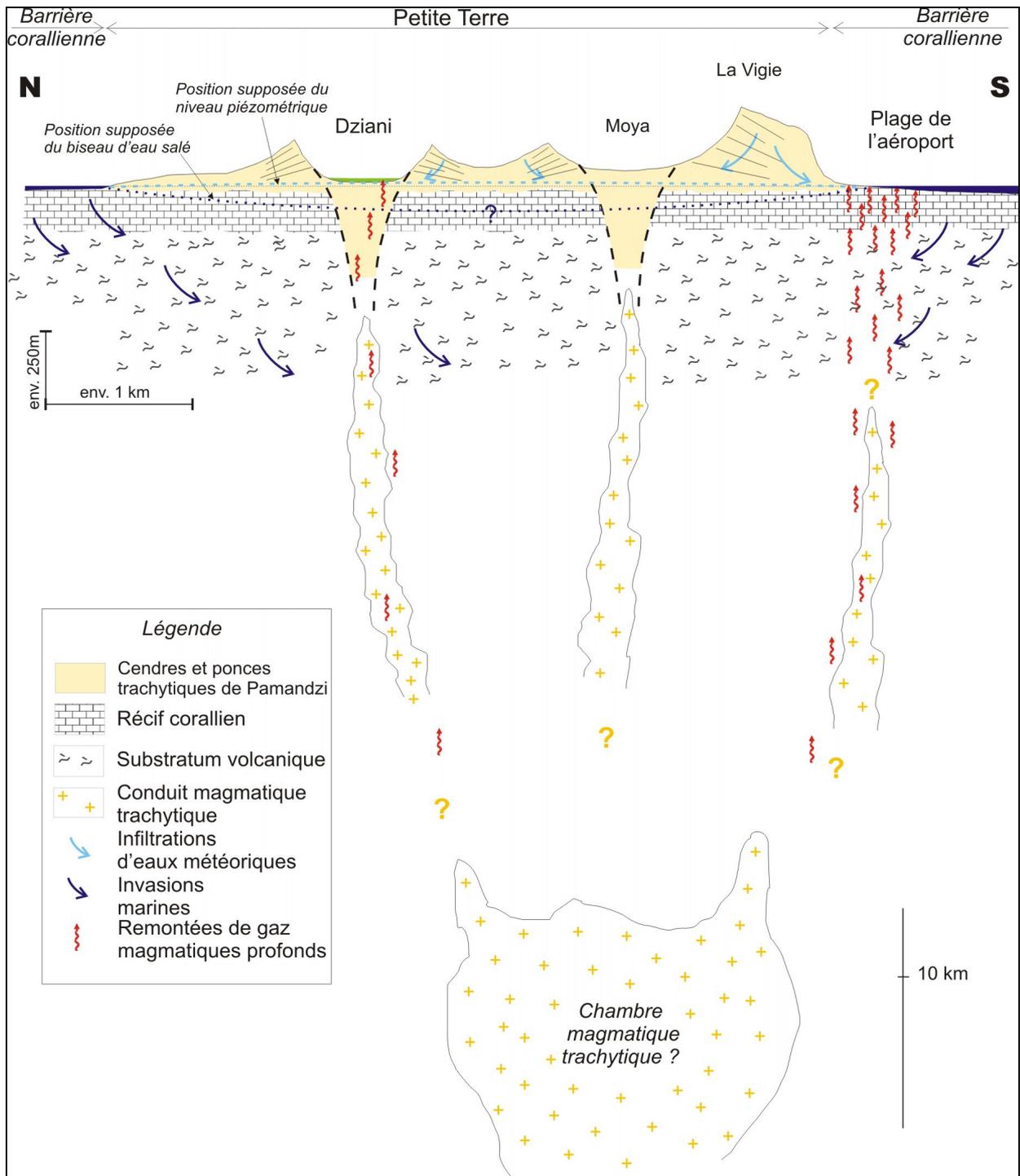


Illustration 31 - Section verticale interprétative selon un profil orientée N-S à travers l'île de Petite Terre, montrant la géologie du substratum et les liens probables entre dégagements gazeux et activité magmatique récente.

L'illustration 31 est une coupe orientée N-S à travers Petite Terre. Elle montre la structure supposée du substratum de l'île avec les deux conduits d'alimentation des appareils volcaniques du Dziani Dzaha et de La Vigie ayant permis la remontée du magma trachytique depuis la chambre magmatique dont la profondeur est estimée être de l'ordre de 10 km.

Les gaz observés en surface proviennent probablement du dégazage du magma stocké dans cette chambre magmatique profonde et sous forme d'intrusions hypovolcaniques dans les conduits d'alimentation des deux appareils volcaniques. Les zones de dégazage observées en surface (Lac Dziani Dzaha, plage de l'aéroport) ont été situées sur le profil N-S (ill. 31). Il est plausible d'imaginer que les gaz émis au fond du Lac Dziani Dzaha (non analysés à ce jour) remontent à la faveur du conduit d'alimentation de l'appareil volcanique du Dziani Dzaha. En ce qui concerne le site de la plage de l'aéroport, l'hypothèse envisagée est celle d'une remontée de gaz à l'aplomb d'une intrusion hypovolcanique n'ayant pas atteint la surface. Cette intrusion peut être contemporaine de la mise en place de l'un ou l'autre des deux appareils trachytiques, ou indépendante (antérieure ou postérieure ?). Elle a probablement utilisé la même faille profonde orientée N170°.

La présence de ces gaz magmatiques a des implications sur l'évaluation du potentiel géothermique de Petite Terre. En effet, au cours de leur remontée vers la surface, ces gaz magmatiques à haute température sont à même, si les conditions de perméabilité le permettent, de réchauffer des fluides superficiels (eaux météoriques, eau de mer) infiltrés à quelques kilomètres de profondeur et développer ainsi un système géothermal. C'est un modèle classique de développement de réservoir géothermique haute température en contexte volcanique. La présence de gaz magmatiques peut donc être considérée comme un indice de conditions propices au développement d'un réservoir géothermal.

A Petite Terre, les gaz magmatiques sont bien présents tandis que les indices de fluides géothermaux profonds sont absents. Il est cependant difficile de conclure définitivement à l'absence de ressources géothermales en raison de la configuration de Petite Terre inhabituelle en prospection géothermique. Les illustrations 30 et 31 permettent de visualiser la position particulière de Petite Terre posée sur la barrière récifale entre le lagon et la mer ouverte. L'épaisseur des formations carbonatées récifales est estimée à environ 150 m (Coudray *et al.*, 1989). Ces formations, qui ont été décrites comme étant karstiques, sont probablement envahies par l'eau de mer. Cet écran marin est susceptible de masquer d'éventuelles remontées de fluides géothermaux, à l'exception des gaz.

Donc, bien qu'aucun indice probant n'ait été observé, il subsiste un doute sur l'existence ou non d'une ressource géothermale à l'aplomb de Petite Terre en raison de sa configuration inhabituelle en prospection géothermique.

6.2. PERSPECTIVES

6.2.1. Le potentiel géothermique de Petite Terre

Des travaux complémentaires pourraient permettre de lever le doute sur la présence ou non d'une ressource géothermale à l'aplomb de Petite Terre. En particulier, une campagne d'exploration plus détaillée du site de dégazage situé sur la plage et dans le lagon à l'est de l'aéroport, avec des moyens d'observations et de prélèvements sur le fond du lagon, permettraient de mieux délimiter et caractériser ce site de dégagements gazeux. A la lumière des résultats acquis ici, il serait également important de pouvoir localiser, prélever et analyser les gaz émis au fond du lac Dziani Dzaha pour vérifier leur parenté géochimique avec ceux émis sur la plage de l'aéroport.

La réalisation d'un lever gravimétrique sur le site de la plage et dans le lagon permettrait de vérifier l'hypothèse de l'intrusion hypovolcanique sous la zone de dégagements gazeux. La mise en place d'un réseau de capteurs sismiques appropriés permettrait peut être de détecter une éventuelle micro-sismicité liée au dégazage et de localiser l'origine des gaz en profondeur.

En fonction des résultats complémentaires obtenus, la réalisation de un ou plusieurs sondages de reconnaissance pourrait être éventuellement envisagée dans une phase ultérieure, afin de confirmer ou infirmer une anomalie thermique au sein du substratum volcanique sous les formations récifales. La profondeur de ces sondages devra être de l'ordre de quelques centaines de mètres au minimum afin de s'affranchir de l'écran marin.

6.2.2. Implications sur l'activité volcanique de Petite Terre

Les dégagements gazeux observés à Petite Terre doivent être considérés comme une manifestation de son volcanisme très récent. Les analyses de gaz réalisées dans le cadre de cette étude ont apporté des informations utiles pour l'évaluation du potentiel géothermique de Petite Terre. Des analyses complémentaires, notamment les rapports isotopiques He^3/He^4 , permettraient de mieux cerner leur origine et leur lien avec l'activité volcanique récente de Petite Terre.

7. Bibliographie

- Bouttemy F.** (2003) - Le Lac Dziani. *Bull. Nat., Hist. & Géo. Mayotte*, n°7.
- Coudray J., Froget C., Maggiorani J-M., Thomassin B.A.** (1989) - Internal sedimentary structures and buried coral growth in the lagoonal beds of Mayotte Island (SW Indian Ocean). In: Thomassin B.A. (Ed.), *Biology and geology of Quaternary and Tertiary coral reefs*. Abstract volume of the 1989 annual Meeting of ISRS, Marseille, 49-50.
- D'Amore F. and Panichi C.** (1980) - Evaluation of deep temperatures of hydrothermal systems by a new gas-geothermometer. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44, 549-556.
- Fouillac C.** (1981) - Géochimie des sources thermales. Implications géothermiques pour quelques systèmes hydrothermaux français. Thèse de doctorat Université Paris 7, 36 p.
- Fouillac C. and Michard G.** (1981) - Sodium/lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. *Geothermics*, 10, 55-70.
- Fournier R.O.** (1979) - A revised equation for the Na/K geothermometer. *Geoth. Res. Council Trans.*, 3, 221-224.
- Fournier R.O. and Rowe J.J.** (1966) - Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells. *Amer. J. Sci.*, 264-685-697.
- Fournier R.O. and Truesdell A.H.** (1973) - An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 1255-1275.
- Fournier R.O. and Potter R.W.** (1979) - Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, 1543-1550.
- Giggenbach W.F.** (1988) - Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, 2749-2765.
- Giggenbach W.F. and 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.** (1991) - Chemical techniques in geothermal exploration. In: *Applications of geochemistry in geothermal reservoir development* by F. D'Amore, 119-144.

Giggenbach W.F. (1992) - The composition of gases in geothermal and volcanic systems as a function of tectonic setting. *Water-Rock Interaction, Kharaka & Maest Eds, 1992 Balkema, Rotterdam, 873-878.*

Gozlan et Lapegue - Rapport d'activité sur le Lac Dziani, DAF, 1993

Kharaka Y.K., Lico M.S. and Lax L.M. (1982) - Chemical geothermometers applied to formation waters, Gulf of Mexico and California basins. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 66, 588.

Kharaka Y.K. and Mariner R.H. (1989) - Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. *In: Naeser, N.D. and McCulloch, T.H. (eds), Thermal history of sedimentary basins: methods and case histories.* Springer-Verlag, New York, 99-117.

Lapegue (1999) - Aspects quantitatifs et qualitatifs de la pluviométrie dans deux enjeux majeurs de la problématique de l'eau à Mayotte. Thèse Université de la Réunion.

Marini L. (1987) - Geochemistry of North Ghoubbat-Asal Region. *Doc. Geothermica Italiana*, 28 p.

Marty B. and Giggenbach W.F. (1990) - Major and rare gases at White Island volcano, New Zealand: Origin and flux of volatiles. *Geophys. Res. Lett.*, 17, 247-250.

Marty B., Meynier V., Nicolini E., Griesshaber E. and Toutain J.P. (1993) - Geochemistry of gas emanations: a case study of Réunion Hot Spot, Indian Ocean. *Appl. Geochem.*, 8, 141-152.

Mauroux B. (1992) - Programme de forages de reconnaissance des eaux souterraines à Mayotte. Rapport BRGM R35165 REU 4S, Juin 1992.

Michard G. (1979) - Géothermomètres chimiques. *Bull. BRGM (2) III*, n° 2, 183-189.

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, 117-134.

Michard G. (2002) - Chimie des eaux naturelles. Principe de géochimie des eaux. Editions Publisud, 461 p.

Nicolini E., Olive P., Coudray J. et Jusserand C. (1991) - Circulation des eaux dans le massif du piton de la Fournaise (île de la Réunion) et leur contamination par les fluides d'origine magmatique. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 312, série II, 535-542.

Pedroletti V. (2001) - Identification minéralogique de 8 échantillons en provenance de l'île de la Réunion (Salazie-Cilaos). Note technique ANA/CMI/NT/01/127, 55 p.

Pineau F. and Javoy M. (1983) - Carbon isotopes and concentration in mid-ocean ridge basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 62, 239-257.

- Stieltjes L.** (1988) - Carte géologique de Mayotte au 1/50 000 et sa notice explicative. Editions du BRGM.
- Truesdell A.H.** (1975) - Geochemical techniques in exploration, summary of Section III. *Proceedings Second United Nations Symposium on the development and use of Geothermal Resources*, San Francisco, 1, 53-79.
- Zinke J., Reijmer J.J.G., Thomassin B.A.** (2001) - Seismic architecture and sediment distribution within the Holocene barrier reef-lagoon complex of Mayotte (Comoro Archipelago, SW Indian Ocean). *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.*, 63, 275-291.
- Zinke J., Reijmer J.J.G., Thomassin B.A., Dullo W.C., Grootes P.M., Erlenkeuser H.** (2003) - Postglacial flooding history of Mayotte Lagoon (Comoro Archipelago, southwest Indian Ocean). *Marine Geol.*, 194, 181-196.
- Wolery T.J.** (1995) - EQ3NR. A computer program for geochemical aqueous speciation-solubility calculations: Theoretical manual, user's guide, and related documentation (version 7.0), 246 p.

Annexe 1

Liste des points de mesures réalisés dans la zone de dégagement gazeux sur la plage de l'aéroport

Annexe 1 : Liste des points de mesures réalisées dans la zone de dégagements gazeux sur la plage de l'aéroport, avec mention de l'intensité observée du dégagement gazeux et des valeurs de pH, température et conductivité de l'eau de mer.

n°	Description	X GPS	Y GPS	Prof. Z m	X carte	Y carte	pH	T °C	Cond. mS/cm
1	pas de bulle visible	531,169	8584,931	0,3	530,944	8585,196	7,83	32,4	51,5
2	bulle à proximité	531,178	8584,942	0,2	530,953	8585,207	7,82	33,4	52
3		531,190	8584,958	0,2	530,965	8585,223	7,15	33,3	51,3
4	au milieu d'un champ de bulles près mangrove	531,204	8584,967	0,1	530,979	8585,232	6,25	33	50,6
5	pas de bulle	531,222	8584,984	0,2	530,997	8585,249	6,83	32,5	51,3
6	dans la mangrove	531,234	8584,988	0,4	531,009	8585,253	7,44	31,1	51,7
7	pas de bulle	531,249	8584,982	0,2	531,024	8585,247	7,33	31,4	52,4
8	bulles	531,240	8584,968	0,2	531,015	8585,233	7,16	32,4	52,1
9	champ de bulles	531,239	8584,959	0,2	531,014	8585,224	6,92	32,3	51,7
10	champ de bulles	531,235	8584,947	0,2	531,01	8585,212	7,16	32,6	51,7
11	champ de bulles	531,228	8584,929	0,1	531,003	8585,194	7,1	32,5	52
12	beaucoup de bulles	531,223	8584,916	0,1	530,998	8585,181	6,79	32,6	51,9
13	pas de bulle	531,219	8584,902	0,1	530,994	8585,167	7,34	32,2	51,4
14	fin de la zone à bulles	531,212	8584,884	0,1	530,987	8585,149	7,58	31,6	51
15	pas de bulle	531,239	8584,851	0,2	531,014	8585,116	7,42	31,9	51,2
16	pas de bulle	531,247	8584,863	0,2	531,022	8585,128	7,49	32	51
17	début des bulles	531,262	8584,881	0,3	531,037	8585,146	7,47	31,9	51,7
18	quelques bulles	531,273	8584,892	0,4	531,048	8585,157	7,07	31,4	51,8
19	pas de bulle	531,284	8584,907	0,5	531,059	8585,172	6,85	30,3	51,6
20	bulles	531,299	8584,925	0,4	531,074	8585,19	7,7	30,1	51,7

21	pas de bulle	531,335	8584,951	0,1	531,11	8585,216	8	30,2	52,3
22	pas de bulle	531,351	8584,962	0,4	531,126	8585,227	7,98	30,6	52,3
23	pas de bulle	531,372	8584,945	0,2	531,147	8585,21	7,96	30,5	52,2
24	bulles assez nb	531,371	8584,936	0,3	531,146	8585,201	8,04	29,7	51,8
25	bulles assez nb	531,365	8584,924	0,3	531,14	8585,189	7,87	29,3	51,6
26	bulles assez nb	531,355	8584,907	0,3	531,13	8585,172	7,66	29,2	51,8
27	champ de bulles très actives	531,344	8584,910	0,2	531,119	8585,175	7,33	29,3	51,7
28	champ de bulles très actives	531,339	8584,899	-99	531,114	8585,164	7,66	29,3	51,7
29	peu de bulles	531,332	8584,885	0,3	531,107	8585,15	7,38	29,2	51,7
30	pas de bulle	531,326	8584,873	0,3	531,101	8585,138	7,3	29,1	51,6
31	pas de bulle	531,314	8584,858	0,3	531,089	8585,123	7,3	28,9	51,7
32	qq bulles	531,304	8584,845	0,5	531,079	8585,11	7,31	29	51,7
33	bulles assez nb	531,302	8584,828	0,5	531,077	8585,093	7,33	28,9	51,5
34	proximité de bulles	531,303	8584,819	0,6	531,078	8585,084	7,04	28,8	51,05
35	proximité de bulles	531,308	8584,810	0,6	531,083	8585,075	6,88	28,8	51,4
36	qq bulles	531,317	8584,811	0,7	531,092	8585,076	6,74	28,6	51,4
37	bq de bulles	531,325	8584,807	0,7	531,1	8585,072	6,7	28,6	51,5
38	fin des bulles (courant marin ?)	531,322	8584,785	0,8	531,097	8585,05	7,22	28,6	51,4
39	pas de bulle	531,343	8584,799	0,7	531,118	8585,064	7,81	28,6	51,4
40	bulles assez nb	531,354	8584,814	0,7	531,129	8585,079	7,64	28,7	51,4
41	bq de bulles (prélèvement n°3)	531,363	8584,822	0,7	531,138	8585,087	7,84	28,7	51,4
42	champ de bulles (prélèvement n°2)	531,346	8584,861	0,5	531,121	8585,126			
43	bulles	531,368	8584,862		531,143	8585,127			
44	bulles	531,380	8584,866		531,155	8585,131			
45	bulles	531,404	8584,875	1,5	531,179	8585,14			
46	bulles	531,414	8584,876	1,5	531,189	8585,141			
47		531,422	8584,878	1,7	531,197	8585,143			

48	bulles visibles sur 15 m vers l'est	531,427	8584,883		531,202	8585,148			
49	fin des bulles vers le Nord	531,429	8584,893		531,204	8585,158			
50		531,431	8584,903		531,206	8585,168			
51	fin des bulles vers le Nord	531,435	8584,913		531,21	8585,178			
52	début des bulles	531,430	8584,917	1,5	531,205	8585,182			
53	début des bulles, fin du sable	531,434	8584,931		531,209	8585,196			
54	début des bulles	531,430	8584,941		531,205	8585,206			
55	peu de bulles	531,405	8584,927		531,18	8585,192			
56	zone avec nb bulles dont qqunes vigoureuses	531,361	8584,871		531,136	8585,136			
57	nb points de sortie de bulles	531,377	8584,885		531,152	8585,15			
58	nb points de sortie de bulles	531,398	8584,913		531,173	8585,178			
59	nb points de sortie de bulles	531,421	8584,918		531,196	8585,183			
60	nb points de sortie de bulles	531,390	8584,913		531,165	8585,178			
61	point de sortie très actif	531,365	8584,868		531,14	8585,133			
62	point de sortie très actif	531,365	8584,866		531,14	8585,131			
63	point de sortie très actif	531,356	8584,851		531,131	8585,116			
64	point de sortie très actif	531,339	8584,844		531,114	8585,109			
65	point de sortie très actif	531,345	8584,893		531,12	8585,158			
66	un champ de bulles avec une très active	531,183	8584,948		530,958	8585,213	5,76		
67	point de sortie peu actif - 1er prélèvement bateau	531,453	8584,774	5	531,228	8585,039	7,6		
68	point de sortie actif - 2nd prélèvement bateau	531,443	8584,784	5	531,218	8585,049			

Annexe 2

Liste des prélèvements de fluides

Annexe 2 : Liste des prélèvements de fluides (eau, gaz) effectués au cours de la reconnaissance géothermique de Mayotte.

n°	TYPE	Description	Localisation	X GPS	Y GPS	X carte	Y carte
1	gaz	bulles de gaz en mer au niveau marina de Dzaoudzi	Marina de Dzaoudzi	528,205	8586,685	527,980	8586,950
2	gaz	dégagement gaz dans le lagon - 1er point de prélèvement bateau	lagon de l'aéroport	531,453	8584,774	531,228	8585,039
3	eau +gaz	dégagement gaz dans le lagon - 2nd point de prélèvement bateau	lagon de l'aéroport	531,443	8584,784	531,218	8585,049
4	gaz	dégagement de gaz le long d'une fissure	plage des Badamiers	530,786	8589,394	530,561	8589,659
5	gaz	dégagement de bulles vigoureux en bord de plage- point d'échantillonnage (MA 1K)	plage de l'aéroport	531,183	8584,948	530,958	8585,213
6	eau +gaz	dégagement de bulles vigoureux sous 1 m d'eau au centre d'une zone avec nb points de sortie	lagon de l'aéroport	531,346	8584,861	531,121	8585,126
7	eau de mer	eau de mer au niveau du sable sous la surface (odeur de soufre)	îlot sableux de Tsamboro	505,024	8601,735	504,799	8602,000
8	eau	mesures et prélèvement dans le lac Dziani Dzaha - 1ère station	lac Dziani Dzaha	531,174	8588,026	530,949	8588,291
9		mesures seules dans le lac Dziani Dzaha - 2nde station	lac Dziani dzaha	531,523	8588,066	531,298	8588,331
10		mesures seules dans le lac Dziani Dzaha - 3ème station	lac Dziani dzaha	531,335	8588,408	531,110	8588,673
11	eau	suintements multiples au pied de la falaise - 2ème plage de Moya	plage de Moya	532,066	8586,040	531,841	8586,305
12	eau	puits de M. Hussein ALI	L'Abattoir	530,794	8587,015	530,569	8587,280
13	eau	prélèvement eau de rivière	rivière Majimbini	522,111	8587,056	521,886	8587,321
14	eau	prélèvement d'eau du forage Kaouéni 1 au niveau station de traitement de Mamoudzou	forage Kaouéni 1	524,070	8589,240	523,845	8589,505



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Antenne de Mayotte

9, centre Amatoula – Z.I. de Kawéni
BP 1398
97600 – Mamoudzou - MAYOTTE
Tél. : 02 69 61 28.13