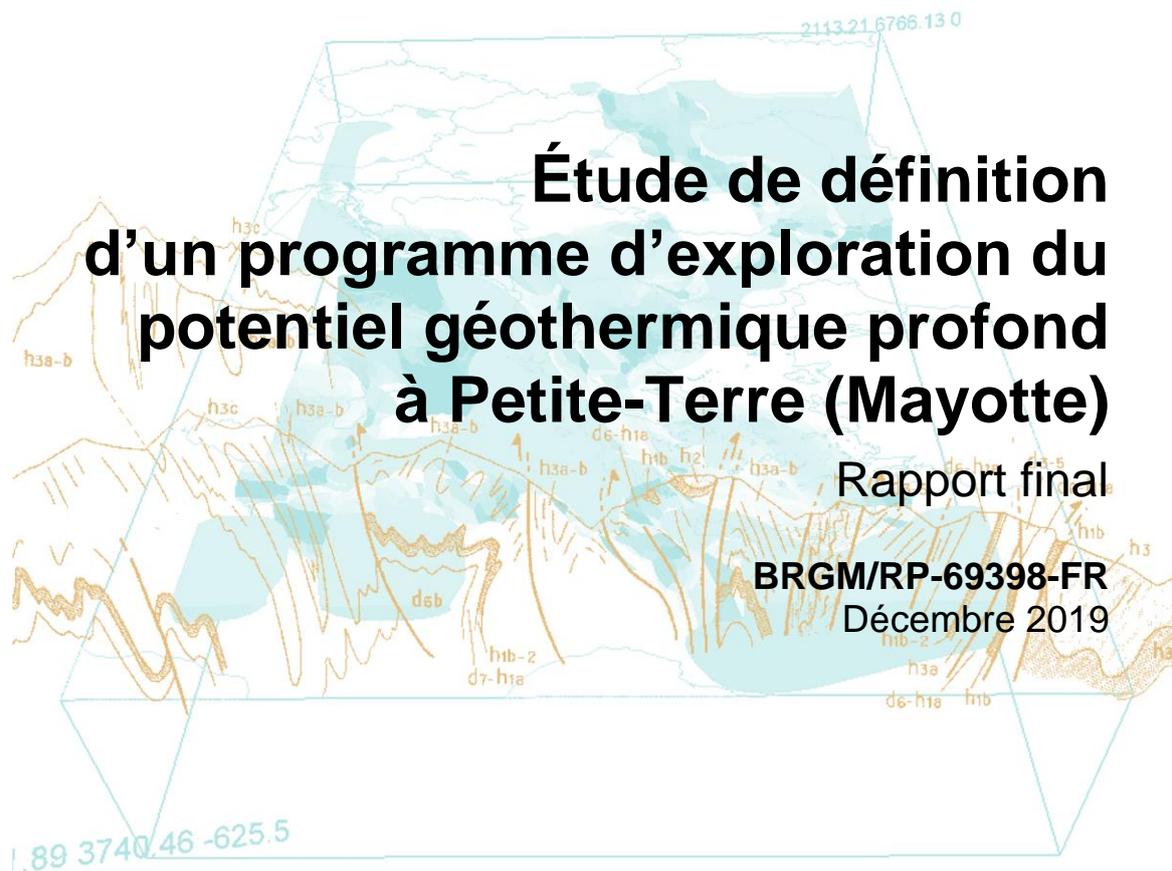


Document public



Étude de définition d'un programme d'exploration du potentiel géothermique profond à Petite-Terre (Mayotte)

Rapport final

BRGM/RP-69398-FR

Décembre 2019

Étude réalisée dans le cadre du projet d'appui aux politiques publiques du BRGM 2018
AP18MDZ044

M. Darnet, C. Dezayes, B. Sanjuan, F. Tronel

Avec la collaboration de
H. Traineau

Vérificateur :

Nom : P. Calcagno
Fonction : Géologue DGR
Date : 02/12/2019
Signature :



Approbateur :

Nom : P. Rocher
Fonction : Directeur adjoint DGR
Date : 05/12/2019
Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



Mots-clés : Géothermie haute-température, Exploration, Forages, Petite-Terre, Mayotte.

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

Darnet M., Dezayes C., Sanjuan B., Tronel F. et Traineau H. (2019) - Étude de définition d'un programme d'exploration du potentiel géothermique profond à Petite-Terre. Rapport final. BRGM/RP-69398-FR, 70 p., 36 fig., 9 tab., 1 ann.

Synthèse

Le programme d'exploration géothermique réalisé par le BRGM entre 2005 et 2008 à Mayotte a identifié la zone de Petite-Terre comme le secteur présentant des indices d'une potentielle ressource géothermale active profonde (> 1000 m) de haute température (> 200 °C) susceptible d'être utilisée pour la production d'électricité. Ces indices indiquaient par ailleurs la présence d'une chambre magmatique profonde, ce qui s'est confirmé par la suite avec la crise sismo-volcanique en cours au large de Petite-Terre.

De juin 2018 à décembre 2019, l'ADEME et le BRGM ont élaboré un programme d'exploration du potentiel géothermique profond de Petite-Terre. Dans le cadre de ce projet, de nouvelles observations géoscientifiques ont été collectées et ont permis de conclure au fort potentiel géothermique profond à Petite-Terre, mais également à la nécessité de réaliser plusieurs forages d'exploration profond (pouvant aller jusqu'à 2 000 m de profondeur) afin de :

- caractériser la nature géologique des formations situées sous Petite-Terre ;
- identifier les différentes arrivées d'eau, leur température et leurs caractéristiques physico-chimiques ;
- déterminer la perméabilité du réservoir ;
- estimer la capacité de production électrique du réservoir.

Pour y parvenir, il est recommandé de réaliser, dans un premier temps, une étude complémentaire afin de définir l'implantation des forages et d'évaluer leur probabilité de succès. Cette étude s'appuiera sur des études géoscientifiques (e.g. géologiques, géophysiques, géochimiques et hydro-thermiques) ciblées sur Petite-Terre, mais également en valorisant les données acquises par le Réseau de Surveillance Volcanologique et Sismologique de Mayotte (REVOSIMA). Elle permettra de rassembler les éléments géoscientifiques nécessaires à la prise de décision d'investir dans des forages d'exploration. Le coût d'une telle étude est estimée à 500 k€ sur une durée de deux ans.

La phase suivante consistera à réaliser les forages proprement dits (peu profonds, de gradient thermique et/ou profonds dans le réservoir géothermique) afin de confirmer la présence d'une ressource géothermale exploitable et de l'estimer quantitativement. Cette information constituera un des éléments clés à la prise de décision pour passer à la phase suivante d'exploitation de la ressource géothermale. Le coût d'un forage unique d'exploration de 1 500 m de profondeur à Petite-Terre est estimé entre 4 et 6 M€, alors que la réalisation d'un programme de trois puits de 1 500 m de profondeur est évaluée entre 10 M€ et 13 M€. La durée des travaux pour trois forages d'exploration de 1 500 m de profondeur est estimée à environ un an, depuis la préparation des plateformes jusqu'à la remise en état du site. À cela, il faut rajouter les temps nécessaires pour l'obtention des autorisations administratives (environ un an) et les temps nécessaires aux appels d'offres, sélection des entreprises et passation des marchés.

Sommaire

1. Introduction	9
2. État des connaissances sur le système hydrothermal de Petite-Terre	11
2.1. ESTIMATION DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE DE PETITE-TERRE EN 2008 (SANJUAN <i>ET AL.</i> , 2008)	11
2.1.1. Reconnaissance géologique	11
2.1.2. Reconnaissance géochimique	13
2.1.3. Reconnaissance géophysique	15
2.1.4. Conclusions sur le potentiel géothermique de Petite-Terre	18
2.2. CARTOGRAPHIE GÉOLOGIQUE DE MAYOTTE (NEHLIG <i>ET AL.</i> , 2013)	18
2.3. TESTS DE FAISABILITÉ DE SONDAGES ÉLECTROMAGNÉTIQUES TERRESTRES ET MARINS À PETITE-TERRE EN MAI 2019	20
2.3.1. Test de faisabilité de sondages MT terrestres	20
2.3.2. Test de faisabilité de sondages MT marins	23
2.4. OBSERVATIONS GÉOSCIENTIFIQUES LORS DE LA CRISE SISMO- VOLCANIQUE DE 2018-2019 (BULLETINS REVOSIMA, www.ipgp.fr/revosima)	27
2.5. SIG DE SYNTHÈSE	30
2.6. ESTIMATION ACTUALISÉE DE LA RESSOURCE GÉOTHERMALE DE PETITE-TERRE	35
2.6.1. Source de chaleur	36
2.6.2. Couverture (« caprock »)	36
2.6.3. Recharge en eau pérenne	36
2.6.4. La présence d'un milieu perméable	36
3. Programme d'exploration de la ressource géothermale profonde à Petite-Terre.....	39
3.1. OBJECTIFS DU PROGRAMME D'EXPLORATION DE LA RESSOURCE GÉOTHERMALE PROFONDE À PETITE-TERRE	39
3.2. MÉTHODOLOGIE DE SÉLECTION DES MÉTHODES D'EXPLORATION	41
3.3. CONTENU DU PROGRAMME D'EXPLORATION	44
3.3.1. Implantation et évaluation de la probabilité de succès de forages d'exploration	45
3.3.2. Forages d'exploration	51
4. Conclusions	63
5. Bibliographie	65

Liste des figures

Figure 1 : Extrait de la carte topographique à 1/25 000 de l'IGN montrant la morphologie de l'île de Petite-Terre avec les deux appareils volcaniques trachytiques récents de Dziani et de La Vigie, alignés selon une direction N170°.	12
Figure 2 : Limites de la zone de dégagement gazeux de CO ₂ , située sur une plage près et à l'est de l'aéroport. Estimations des débits de CO ₂ , analyses de radon et des valeurs isotopiques du carbone-13 et du rapport 3He/4He (Sanjuan <i>et al.</i> , 2008).	14
Figure 3 : Diagramme de Marty et Giggenbach (1990) indiquant les concentrations relatives de N ₂ , CO ₂ et Ar pour les échantillons de gaz analysés (à comparer aux échantillons de gaz provenant de La Réunion et d'Hawaï). Echantillons G2, G5 et Lagon Aéroport contaminés par l'atmosphère (Sanjuan <i>et al.</i> , 2008).	14
Figure 4 : Données géophysiques acquises lors de l'estimation du potentiel géothermique de Mayotte (2006-2008) d'après Sanjuan <i>et al.</i> , 2008.	16
Figure 5 : Section verticale interprétative orientée nord-sud à travers l'île de Petite-Terre montrant la géologie du substratum et les liens entre dégagements gazeux et activité magmatique récente.	17
Figure 6 : Coupes horizontales de résistivité (Ohm.m) obtenues par inversion des données électromagnétiques héliportées.	19
Figure 7 : Positions des deux stations magnétotelluriques déployées sur Petite-Terre lors du test de faisabilité de mai 2019.	21
Figure 8 : Position de la station magnétotellurique de référence déployée sur Grande-Terre lors du test de faisabilité de mai 2019.	21
Figure 9 : Sondages magnétotelluriques réalisés sur la plage de Moya (site 002 à gauche), le volcan Dziani (site 003 au centre) et le Mlima Combani (site REM à droite).	22
Figure 10 : Modèle de résistivité à cinq couches (à gauche) dont la réponse MT calculée (en gris à droite) explique au mieux les données MT observées sur la plage de Moya (en rouge et bleu à droite).	22
Figure 11 : Modèle de résistivité à cinq couches (à gauche) dont la réponse MT calculée (en gris à droite) explique au mieux les données MT observées sur le volcan Dziani (en rouge et bleu à droite).	23
Figure 12 : Localisation des sites MT marins déployés en mai 2019.	24
Figure 13 : Déploiement des instruments STATEM à partir de la barge STMM (a). Instrument sur le pont (b) ; en déploiement (c) et sur le fond (d).	25
Figure 14 : Sondages MT marins réalisés en mai 2019. La résistivité apparente (en haut) et phase (en bas) du tenseur MT sont représentés pour chaque site.	26
Figure 15 : Carte de localisation des épicentres (± 5 km) des séismes volcano-tectoniques avec les réseaux sismiques à terre (IPGP-IFREMER-CNRS-BRGM-BCSF-RéNaSS, IPGS) entre le 1 ^{er} et le 15 octobre 2019 (15 jours) (échelle temporelle de couleur) et coupes transverses et axiales le long de la ride montrant la localisation estimée en profondeur (précision variant entre +5 km et +15 km) des séismes en fonction de la magnitude (taille des symboles).	28
Figure 16 : Distribution spatiale des émissions de CO ₂ par le sol (méthode de la chambre d'accumulation). On remarquera la présence d'émissions d'intensité modérée sur l'alignement sud-est/nord-ouest des cônes basaltiques. Note : l'échelle d'intensité (jusqu'à deux ordres de grandeur plus élevée) sur le platier ne correspond pas à celle à terre (extrait de bulletin n° 4 REVOSIMA).	29
Figure 17 : Carte géologique de Petite-Terre et éléments de données géochimiques.	31
Figure 18 : Position des données géophysiques sur la carte géologique de Petite-Terre.	32

Figure 19 : Courbes d'isorésistivité à différentes profondeurs basées sur les acquisition EM aéroporté de 2010.....	33
Figure 20 : Occupation des sols et espaces remarquables.	34
Figure 21 : Occupation des sols et espaces naturels de protection stricte.....	34
Figure 22 : Éléments constitutifs d'un réservoir géothermique.	35
Figure 23 : Exemple de distribution de la puissance extractible d'un projet géothermique.	39
Figure 24 : Exemple d'impact sur la distribution de puissance extractible d'un projet géothermique que peut avoir un programme d'exploration.	40
Figure 25 : Arbre décisionnel pour la mise en œuvre d'une méthode d'exploration pour un projet géothermique.	43
Figure 26 : Flux de trésorerie cumulé modélisé pour une centrale géothermique de 15 MWe du type envisageable à Petite-Terre.	43
Figure 27 : Valeur Monétaire Attendue pour une centrale géothermique de 15 MWe du type envisageable à Petite-Terre en fonction du POS des forages.	44
Figure 28 : Schéma conceptuel d'exploration de la ressource géothermale profonde de Petite-Terre.....	45
Figure 29 : Campagne de mesures CSEM/MT 3D proposée pour l'optimisation de l'implantation de forages d'exploration géothermique dans la région de Petite-Terre.....	49
Figure 30 : Section verticale interprétative orientée nord-sud à travers l'île de Petite-Terre montrant la géologie du substratum et les liens possibles entre dégagements gazeux et activité magmatique récente.	52
Figure 31 : Coupe technique prévisionnelle des sondages d'exploration géothermique profonds sur l'île de Petite-Terre à Mayotte.	55
Figure 32 : Vue d'un chantier de forage mettant en œuvre le rig HH102 de Drillmec.	56
Figure 33 : Planning indicatif des travaux d'un programme de trois sondages d'exploration géothermique profonds sur l'île de Petite-Terre à Mayotte.....	60
Figure 34 : Modèle géoélectrique conceptuel d'un système géothermique typique (d'après Johnston <i>et al.</i> , 1992).	69
Figure 35 : Structure géoélectrique générale de la croûte basaltique en Islande (d'après Flovenz <i>et al.</i> , 2005).	70
Figure 36 : Résistivités électriques et teneurs en illite-smectite en fonction de la température estimée du réservoir sur différents sites géothermiques (d'après Ussher <i>et al.</i> , 2000).	70

Liste des tableaux

Tableau 1 : Coordonnées des stations MT déployées en mai 2019.....	21
Tableau 2 : Coordonnées des sites MT marins déployés en mai 2019.....	25
Tableau 3 : Analyse de sensibilité de la puissance extractible d'un projet géothermique hypothétique de type électrogène de 20 MW permettant d'établir les paramètres liés au sous-sol qui influencent la puissance extractible.	41
Tableau 4 : Méthodes d'exploration sélectionnées pour estimer le POS d'un projet géothermique haute température sur Petite-Terre et les trois paramètres clés du sous-sol : température, volume, porosité/perméabilité du réservoir.	42
Tableau 5 : Budget prévisionnel pour l'étude d'implantation et d'évaluation de la probabilité de succès de forages d'exploration à Petite-Terre.	50
Tableau 6 : Chronogramme prévisionnel pour l'étude d'implantation et d'évaluation de la probabilité de succès de forages d'exploration à Petite-Terre.	51
Tableau 7 : Programme de forage proposé pour des sondages d'exploration géothermique profonds sur l'île de Petite-Terre à Mayotte.....	54
Tableau 8 : Caractéristiques techniques du rig HH102 construit par Drillmec.....	57
Tableau 9 : Évaluation préliminaire des coûts d'un programme de sondages d'exploration géothermique profonds à Petite-Terre (coûts en k€).	61

Liste des annexes

Annexe 1. : Modèle géoélectrique des réservoirs géothermiques	67
---	----

1. Introduction

En 2017, le mix électrique du département de Mayotte était de 5 % de production photovoltaïque répartie sur plus de 70 installations sur l'île, et de 95 % de production thermique diesel assurée par les centrales des Badamiers et de Longoni exploitées par Électricité de Mayotte. Afin de diversifier ses sources d'approvisionnement en électricité, la Collectivité Départementale de Mayotte a mis en place un vaste programme, qui avait pour objectif de valoriser les énergies renouvelables. L'évaluation du potentiel géothermique de Mayotte pour produire de l'électricité fait partie de ce programme.

Le BRGM, à la demande de la Collectivité Départementale de Mayotte et avec son cofinancement, a réalisé une étude en deux phases intitulée « État des connaissances du potentiel géothermique de Mayotte ». La première phase s'est attachée, entre 2005 et 2006, à déterminer les zones de l'île pouvant présenter un potentiel de ressources géothermiques pour produire de l'électricité. Les résultats et principales conclusions sont présentés dans le rapport de Traineau *et al.* (2006). Seule Petite-Terre avait été retenue et, bien qu'aucun indice probant n'ait été observé, il subsistait un doute sur l'existence ou non d'une ressource géothermale à l'aplomb de Petite-Terre en raison de son volcanisme récent (< 0,5 Ma), de sa configuration inhabituelle en prospection géothermique et de la mise en évidence d'une zone spectaculaire de dégagements de dioxyde de carbone (CO₂) d'origine magmatique, située près et à l'est de l'aéroport (Traineau *et al.*, 2006).

La deuxième phase, entre 2007 et 2008, a donc focalisé les recherches sur Petite-Terre, en s'attachant à cette zone et à celle du lac Dziani Dzaha où la littérature avait également fait mention de dégagements gazeux. Au cours de la première étape de cette deuxième phase, des études de prospection géophysique en gravimétrie, magnétisme et panneau électrique ont été menées afin de détecter des intrusions hypo-volcaniques ou des chambres magmatiques qui pourraient être les sources de chaleur d'un éventuel système hydrothermal sous les zones de dégagements gazeux, et la présence de ce système hydrothermal. Les principaux résultats obtenus sont présentés dans Pajot *et al.* (2007).

Suite aux conclusions de ce rapport, qui indiquaient la présence d'un corps lourd et magnétique superficiel sous la zone de dégagements de CO₂ proche de l'aéroport, il avait été décidé, dans une deuxième étape, de poursuivre le déploiement du panneau électrique vers le sud afin de couvrir cette zone avec une profondeur d'investigation maximale. Cette nouvelle étude a également été l'occasion de confirmer, de compléter et d'affiner les résultats obtenus sur la caractérisation géochimique, l'origine et le flux naturel de ces gaz. Les résultats et les principales conclusions de cette étude sont présentés dans le rapport de Sanjuan *et al.* (2008). Elle conclut que la présence d'une ressource géothermale dans les premiers 1 000 mètres de profondeur est écartée et paraît peu probable jusqu'à environ 1 500 m, profondeurs qui ont été jugées économiquement intéressantes pour produire de l'électricité à partir de la géothermie. Néanmoins, étant donné le volcanisme récent de Petite-Terre, la localisation et le contexte de cette zone par rapport aux données géologiques, bathymétriques, géochimiques et géophysiques, l'existence d'une anomalie thermique ou d'un système hydrothermal à des profondeurs plus importantes n'a pu être exclue.

Afin d'établir l'existence et de localiser avec précision les zones d'intérêt géothermique à des profondeurs supérieures à 1 000 m, un programme d'exploration profonde, incluant notamment la réalisation de forages d'exploration, doit être mis en œuvre. Étant donné le coût et la complexité d'un tel programme, la première étape, qui constitue l'objectif de la présente étude réalisée par le BRGM avec le soutien financier de l'ADEME Mayotte, vise à définir et dimensionner au mieux la campagne d'exploration au vu des objectifs et incertitudes spécifiques à Petite-Terre. Pour cela, cette étude et ce rapport s'articulent selon trois axes :

1. un état des lieux actualisé des connaissances sur le système hydrothermal de Petite-Terre afin d'établir quelles composantes d'un système hydrothermal profond (> 1 000 m) restent incertaines à Petite-Terre ;
2. une sélection des méthodes d'exploration (de surface et par forages) qui permettraient de réduire au maximum les principales incertitudes identifiées dans la phase 1 et ainsi réduire l'aléa géologique avant la mise en œuvre de forages d'exploration ;
3. la définition d'un programme d'exploration profonde en intégrant un programme d'exploration de surface et un programme de forages d'exploration.

2. État des connaissances sur le système hydrothermal de Petite-Terre

Ce chapitre constitue une synthèse des connaissances actuelles sur le système hydrothermal de Petite-Terre provenant du programme d'exploration géothermique 2004-2008 (Sanjuan *et al.* 2008), de la mise à jour de la carte géologique (Nehlig *et al.*, 2013) et de la crise volcano-tectonique actuelle.

2.1. ESTIMATION DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE DE PETITE-TERRE EN 2008 (SANJUAN *ET AL.*, 2008)

2.1.1. Reconnaissance géologique

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 de Dziani 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. Par contre, des phénomènes de dégagements gazeux ont été relatés il y a quelques années sur le fond du lac Dziani 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 (Figure 1). 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 8,20 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.

2.1.2. Reconnaissance géochimique

Deux campagnes de reconnaissance géochimique de surface ont été menées par le BRGM en 2005 (Traineau *et al.*, 2006) et en 2008 (Sanjuan *et al.*, 2008). Toutes les mesures sur site et tous les résultats des analyses chimiques et isotopiques faites dans les laboratoires du BRGM et de l'IPGP (rapports $^3\text{He}/^4\text{He}$) sont consultables dans les rapports de ces derniers auteurs.

24 novembre 2005, les analyses Au cours de la première campagne de terrain menée par le BRGM, qui s'est déroulée du 16 au des eaux superficielles de Petite-Terre prélevées en surface et dans un puits à l'Abattoir n'ont révélé aucun indice de contamination par des fluides géothermaux profonds, tout comme sur Grande-Terre (Traineau *et al.*, 2006). 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 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. Les phénomènes de dégagements gazeux (CO_2 très probablement) au fond du lac pourraient être à l'origine de la formation 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 % CO_2), avec un peu de méthane (0,2-0,4 % CH_4) et d'hélium (0,02 % He). L'hydrogène sulfuré (H_2S) y est absent (Traineau *et al.*, 2006).

Au cours de la deuxième campagne de terrain menée par le BRGM entre le 14 et 18 avril 2008, qui a permis de mieux délimiter et caractériser la zone de dégagements gazeux située sur la plage de l'aéroport, la surface occupée par cette zone a été évaluée à environ 30 000 m² pour ce qui concerne les dégagements de gaz importants et à 23 000 m² pour les dégagements faibles et rares (Figure 2). Le débit moyen d'émissions naturelles de CO_2 y a été estimé à plus de 10 tonnes par jour, soit à 3 650 tonnes par an. Ces valeurs sont comparables à celles estimées sur certains champs géothermiques ou des régions situées près de volcans actifs (souvent plus basses que celles-ci). Elles sont très inférieures à celles correspondant aux émissions des volcans.

Les résultats obtenus sur la géochimie des gaz confirment ceux acquis au cours de la première campagne de reconnaissance. Leur composition chimique les classe parmi des gaz caractéristiques de magmas basaltiques de zones de Points Chauds (Hot Spots), comme le sont Hawaï ou La Réunion (Figure 3). Le carbone-13, mesuré sur le dioxyde de carbone, les rapports isotopiques de l'hélium ($R = ^3\text{He}/^4\text{He}$) exprimés en fonction du rapport de l'air actuel (R_a) et les isotopes du néon indiquent une origine mantellique marquée pour ces gaz. Les valeurs de $^3\text{He}/^4\text{He}$ mesurées (autour d'une valeur de R/R_a de 6,65) sont proches de celles trouvées sur des basaltes du volcan La Grille des Grandes Comores (6,75-7,08 ; Point Chaud à faible rapport $^3\text{He}/^4\text{He}$), légèrement inférieures à celles déterminées sur les basaltes des dorsales médio-océaniques (MORB, autour d'une valeur de R/R_a de 7 à 9), et très inférieures à celles mesurées sur des basaltes d'Hawaï, d'Islande et de la Réunion (valeur moyenne de R/R_a de 12,9 ; Point Chaud à rapport $^3\text{He}/^4\text{He}$ élevé), qui sont issus de sources mantelliques plus profondes et moins dégazées que celles des MORB. Les valeurs des rapports $\text{CO}_2/^\beta\text{He}$ ($4,6 \times 10^9$), supérieures à celles des MORB (2×10^9), et celles de $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 (de -3,7 à -3,2 ‰), suggèrent une contamination par des carbonates ou par la croûte. Suivant les interprétations retenues et si l'on considère une contribution crustale ou non (recyclage de la croûte dans le manteau, par exemple), l'origine mantellique de ces gaz peut varier de 75 à 100 %.

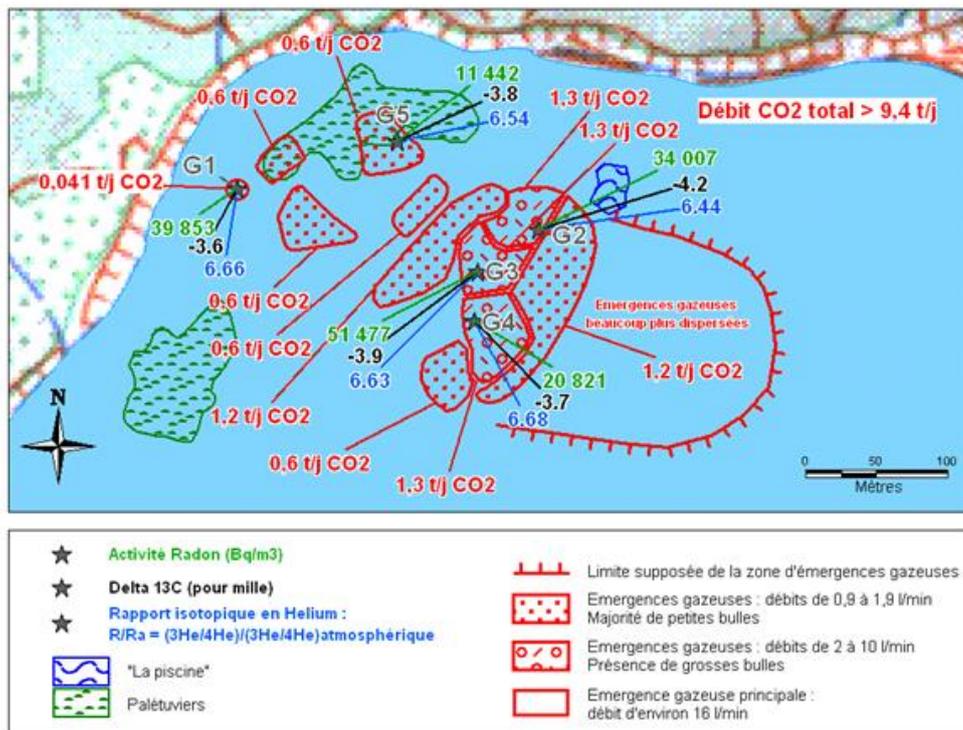


Figure 2 : Limites de la zone de dégagement gazeux de CO₂, située sur une plage près et à l'est de l'aéroport. Estimations des débits de CO₂, analyses de radon et des valeurs isotopiques du carbone-13 et du rapport 3He/4He (Sanjuan et al., 2008).

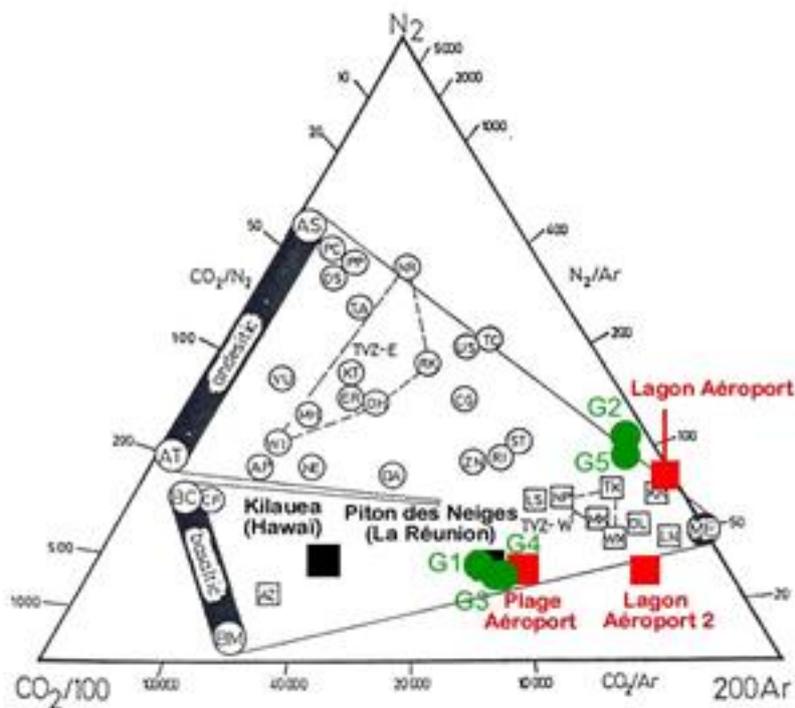


Figure 3 : Diagramme de Marty et Giggenbach (1990) indiquant les concentrations relatives de N₂, CO₂ et Ar pour les échantillons de gaz analysés (à comparer aux échantillons de gaz provenant de La Réunion et d'Hawaï). Échantillons G2, G5 et Lagon Aéroport contaminés par l'atmosphère (Sanjuan et al., 2008).

L'absence de détection de H₂ et H₂S ne permet pas d'utiliser directement les nombreuses relations thermométriques basées sur des réactions d'équilibre impliquant ces gaz (Giggenbach, 1991). L'utilisation des deux géothermomètres à gaz CO₂/CH₄ et CO₂/Ar (Giggenbach, 1991) aboutit à l'estimation de températures profondes allant de 285 à 328 °C.

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. Étant donné le faible nombre de géothermomètres qui peuvent être utilisés et l'incertitude de ces méthodes et la vitesse à laquelle le CO₂ peut être impliqué dans des processus de rééquilibration, ces estimations de température sont à considérer avec beaucoup de précautions. Elles pourraient, néanmoins, traduire la présence d'un système hydrothermal à une température proche de 300 °C, si on considère le diagramme log (CH₄/CO₂) - température, proposé par Giggenbach (1993) ou par Fiebig *et al.* (2004).

La présence de ces gaz est probablement 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 de Dziani et de La Vigie. 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 peut être envisagée.

2.1.3. Reconnaissance géophysique

La combinaison des résultats des trois techniques d'exploration géophysique employées (magnétisme, gravimétrie, panneau électrique) n'a pas mis en évidence d'anomalies permettant de conclure sur la présence d'un système hydrothermal sous le lac Dziani.

En revanche, l'anomalie gravimétrique et magnétique positive superficielle (Figure 4), mise en évidence sous le site de dégagements de CO₂ de la plage située près de l'aéroport, pourrait résulter de la présence d'une intrusion magmatique basaltique non affleurante (Figure 5, Figure 6), précédant le magmatisme trachytique mais dont l'âge pourrait être différent du premier volcanisme strombolien (indice de polarité magnétique différente). Juste au nord de cette zone, les résultats du panneau électrique S-N indiquent, clairement, la présence d'une discontinuité électrique (Figure 4) séparant le compartiment sud conducteur d'un compartiment nord résistant (cendres et ponces supérieures de La Vigie) dans les 150 premiers mètres de profondeur, sous le niveau de la mer.

Cette discontinuité pourrait se prolonger en profondeur (Figure 5, Figure 6). Elle coïncide avec le fort gradient gravimétrique qui limite, au sud, le système de La Vigie, et pourrait constituer une limite majeure entre les systèmes trachytiques récents au nord (légers), et le substrat volcanique (incluant les séries carbonatées) au sud. Suivant la carte gravimétrique, sa direction est sensiblement est-ouest et elle pourrait être un drain pour les gaz observés en surface. Le fait que les appareils de Dziani et La Vigie 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.

L'interprétation du panneau électrique complet traversant l'île de part en part, du nord au sud, en regard des résultats gravimétriques et magnétiques, de la géologie et de la bathymétrie a conduit à édifier un modèle volcanologique cohérent expliquant les émergences de gaz au niveau de la plage située près et à l'est de l'aéroport et, peut-être, du lac Dziani. Ce modèle fait intervenir un effondrement sectoriel potentiel (attesté par un large ravinement dessiné dans la bathymétrie) et un collapse d'origine volcanique, très probablement associés au volcanisme strombolien de Petite-Terre.

L'observation des dégagements gazeux sur ce tracé (sur la plage proche de l'aéroport comme à Dziani) indique que cette discontinuité majeure joue un rôle de drain. L'absence d'autres observations gazeuses est, probablement, due au fait que le reste du tracé est soit recouvert par les séries de cendres et ponces, soit par la mer. Par ailleurs, ces dégagements gazeux se trouvent à l'intersection de ce tracé avec la faille profonde de direction N170°.

Bien que la distribution des résistivités observées dans la tranche d'investigation (0-800 m) du panneau électrique soit cohérente avec un modèle typique de réservoir géothermique, le fait que des résistivités inférieures à 5 ohm.m, typiques d'un cap-rock, soient observées jusqu'à 800 m rejette l'éventualité d'un réservoir à moins de 1 000 m de profondeur. Le panneau électrique n'a donc pas permis d'imager le potentiel réservoir que d'autres considérations placent à des profondeurs plus importantes. Pour imager un tel réservoir à de plus grandes profondeurs, des sondages magnétotelluriques sont nécessaires. Trois sondages ont été réalisés lors cette étude mais la présence de fort bruit électromagnétique n'a pas permis d'obtenir de données exploitables.

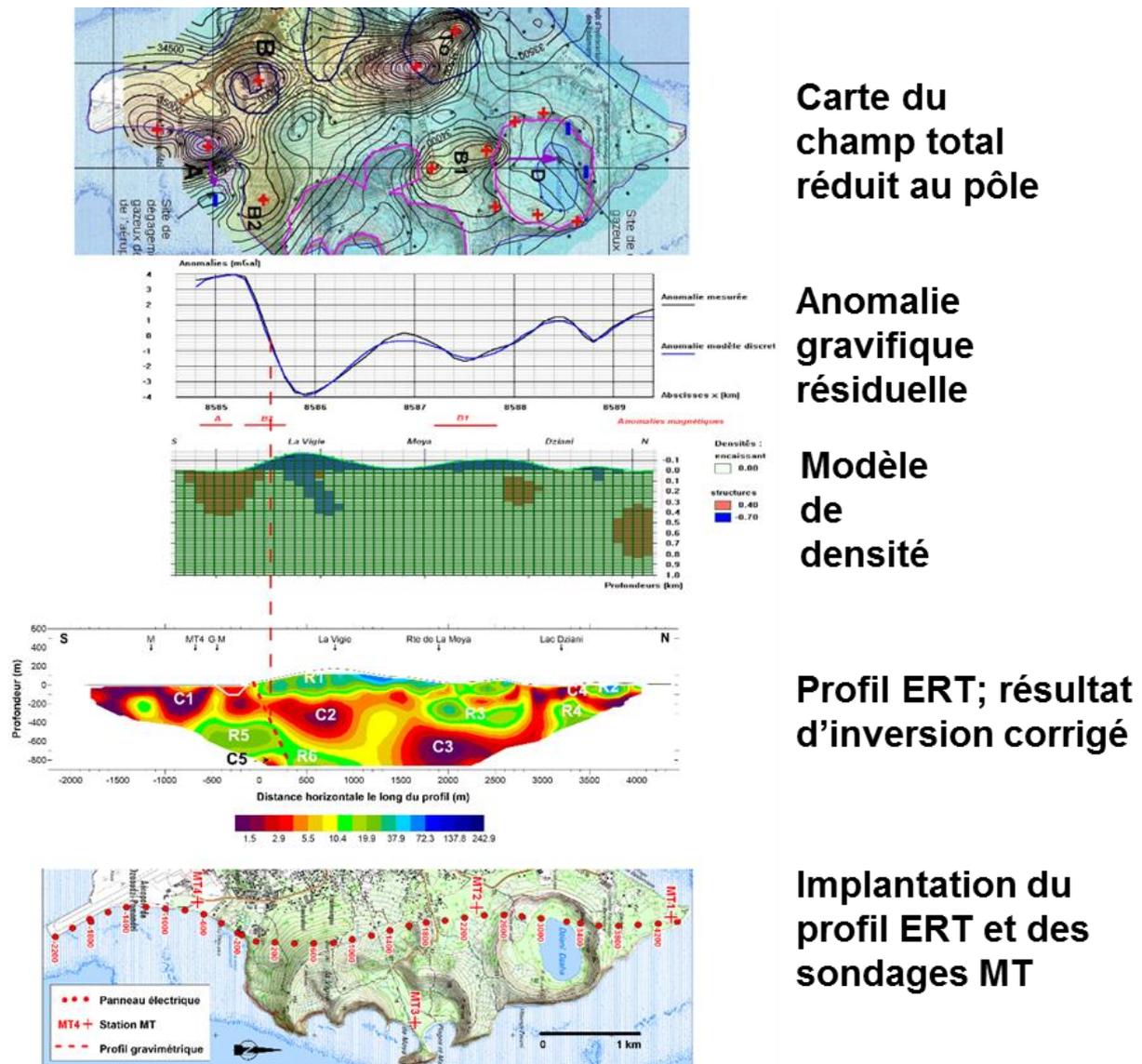


Figure 4 : Données géophysiques acquises lors de l'estimation du potentiel géothermique de Mayotte (2006-2008) d'après Sanjuan et al., 2008.

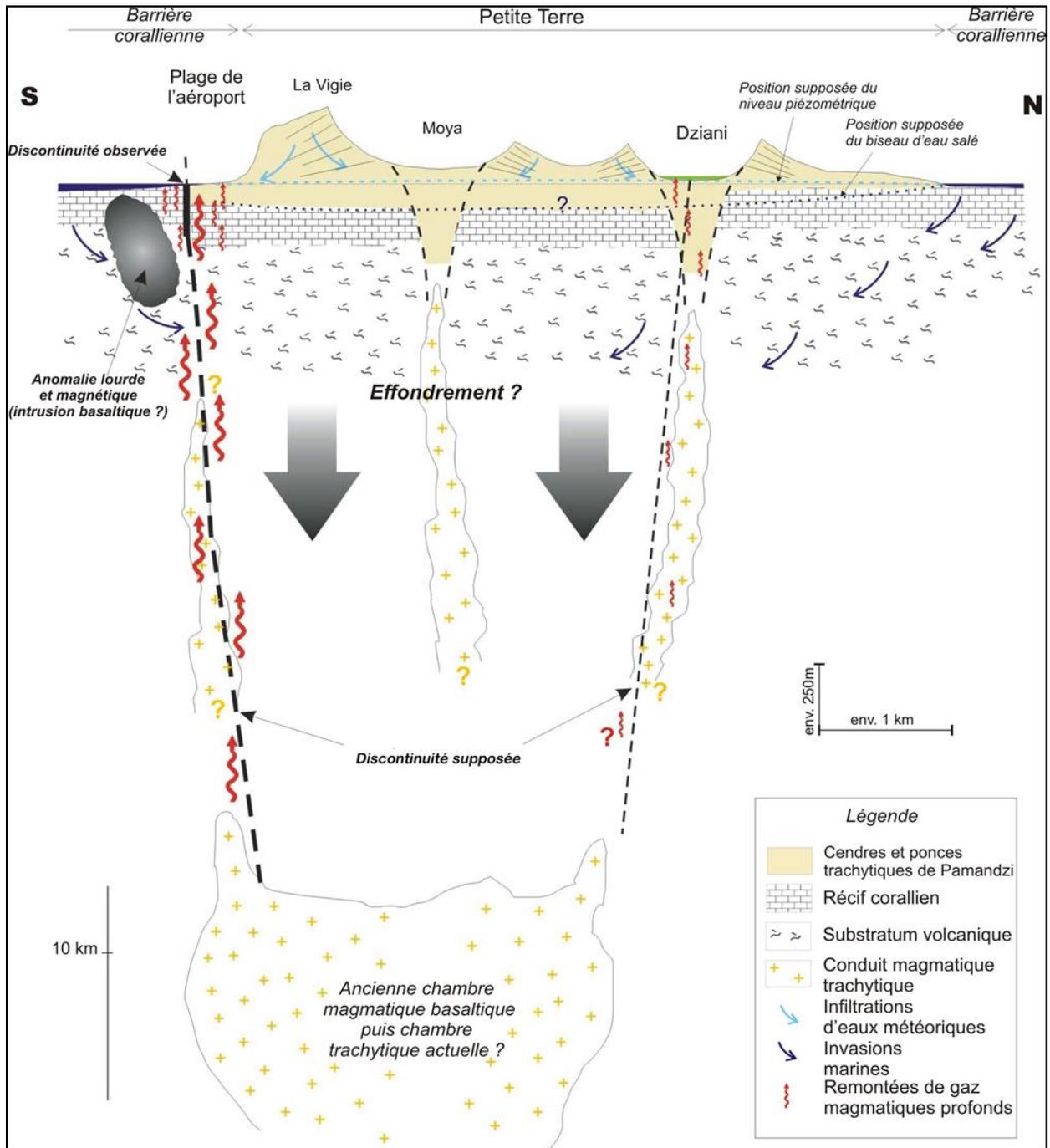


Figure 5 : Section verticale interprétative orientée nord-sud à travers l'île de Petite-Terre montrant la géologie du substratum et les liens entre dégagements gazeux et activité magmatique récente.

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. Cette section, tirée de Traineau *et al.* (2006), a été reprise en tenant compte des nouveaux résultats obtenus au cours de l'étude de 2008.

2.1.4. Conclusions sur le potentiel géothermique de Petite-Terre

Compte tenu des résultats obtenus en 2008, la présence d'une ressource géothermale dans les premiers 1 000 mètres de profondeur a été écartée et paraissait peu probable jusqu'à environ 1 500 m, profondeurs qui sont jugées économiquement intéressantes pour produire de l'électricité à partir de la géothermie. Néanmoins, étant donné le volcanisme récent de Petite-Terre, la localisation et le contexte de cette zone par rapport aux données géologiques, bathymétriques, géochimiques et géophysiques, l'existence d'une anomalie thermique ou d'un système hydrothermal à des profondeurs plus importantes n'a pu être exclue.

2.2. CARTOGRAPHIE GÉOLOGIQUE DE MAYOTTE (NEHLIG *ET AL.*, 2013)

Lors de la mise de la carte géologique de Mayotte, la campagne de géophysique hélicoptérée conduite en 2010 et 2011 a permis l'acquisition de données électromagnétiques et magnétiques sur Petite-Terre (Nehlig *et al.*, 2013). Les données électromagnétiques obtenues fournissent une information sur l'architecture de l'île, jusqu'à une profondeur de 200 m environ, et ont été utilisées pour la cartographie géologique de l'île.

La Figure 6 représente des coupes horizontales de résistivité à différentes profondeurs de Petite-Terre (entre 5 et 10 m, 50-60 m, 100-110 m et 150-160 m). Les édifices volcaniques récents et émergés (e.g. La Vigie et Dziani) sont clairement marqués par des anomalies de résistivité élevées (supérieures à 100 Ohm.m) du fait de l'absence d'eau et d'altération hydrothermale. Les couches sous-jacentes et situées sous le niveau de la mer sont quant à elles marquées par des anomalies de résistivité faibles (inférieures à 10 Ohm.m) et très probablement associées à des formations gorgées d'eau de mer et/ou présentant une altération hydrothermale.

Ces données n'ont pas encore été exploitées pour l'évaluation du potentiel géothermique de Petite-Terre et permettraient d'affiner le modèle géologique 3D de Petite-Terre, ainsi que de réduire les ambiguïtés d'interprétation des données géophysiques électriques et électromagnétiques acquises sur Petite-Terre.

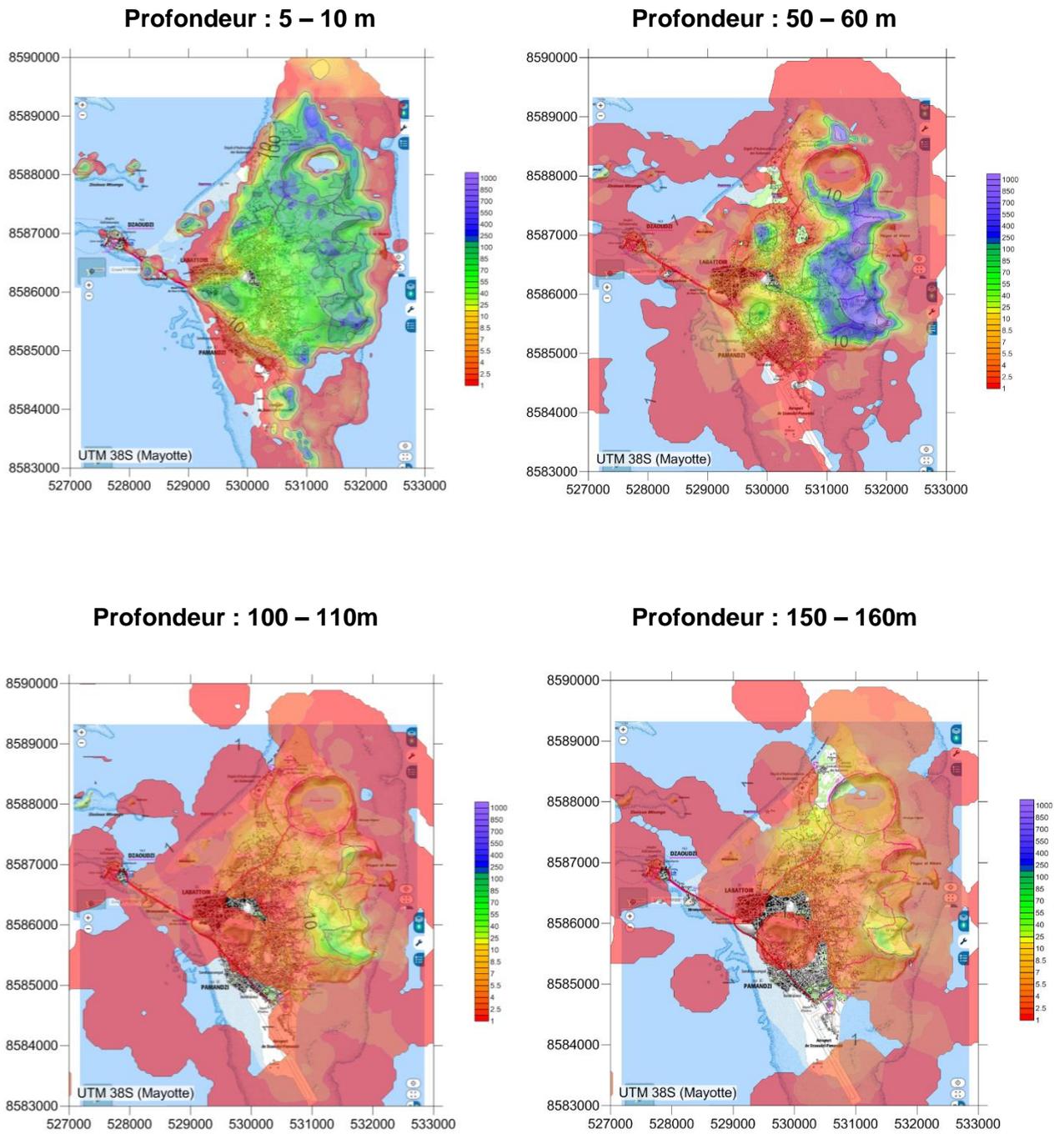


Figure 6 : Coupes horizontales de résistivité (Ohm.m) obtenues par inversion des données électromagnétiques hélicoptérées.

2.3. TESTS DE FAISABILITÉ DE SONDAGES ÉLECTROMAGNÉTIQUES TERRESTRES ET MARINS À PETITE-TERRE EN MAI 2019

Les sondages réalisés en 2007 ont conclu à la difficulté de réaliser des sondages magnétotelluriques (MT) sur Petite-Terre du fait de la présence d'un fort bruit électromagnétique. Dans le cadre de la présente étude, des tests de faisabilité de sondages magnétotelluriques terrestres et marins avec de nouveaux équipements plus performants ont été réalisés afin de valider ou invalider cette technique pour imager un réservoir géothermal à grande profondeur (> 1 000 m).

2.3.1. Test de faisabilité de sondages MT terrestres

Lors du test de faisabilité réalisé en mai 2019, trois stations magnétotelluriques ont été déployées par le BRGM et la société IMAGIR : deux sur Petite-Terre sur la plage de Moya et sur le volcan Dziani (Figure 7), et l'une sur Grande-Terre près du Mlima Combani (Figure 8). Les coordonnées des stations sont données dans le Tableau 1. Les stations ont mesuré les champs électriques et magnétiques pendant cinq jours de façon synchrone. Le traitement des données par la société IMAGIR a permis d'obtenir des sondages MT de très bonne qualité sur la plage de Moya et la référence, et de qualité moindre mais tout de même exploitable sur le volcan Dziani (Figure 9).

Les données ont été ensuite inversées pour obtenir un modèle de résistivité à cinq couches homogènes dont la réponse calculée ressemble au mieux aux données observées. Le sondage de la plage de Moya (Figure 10) fait apparaître une couche superficielle résistante (> 100 Ohm.m) de quelques dizaines de mètres d'épaisseur correspondant très vraisemblablement aux dépôts volcaniques non altérés et secs, comme observés sur les données électromagnétiques hélicoptérées (Figure 6). Ensuite, on retrouve également une couche conductrice (< 10 Ohm.m) dont l'épaisseur est estimée à 600 m grâce au sondage MT. Cette couche correspond indifféremment à des séries profondément hydrothermalisées et/ou saturées d'eau de mer, et/ou dans la partie supérieure (moins de 250 m de profondeur) à des calcaires récifaux poreux saturés d'eau de mer. Plus profondément, la résistivité augmente pour atteindre des valeurs de l'ordre d'une dizaine d'ohm.mètres sur plusieurs kilomètres avant d'atteindre des valeurs de l'ordre d'une centaine d'ohm.mètres. Cette configuration d'une couche conductrice de quelques ohm.mètres sur plusieurs centaines de mètres surmontant une couche plus résistante de quelques dizaines d'ohm.mètres se rapproche très bien du modèle géo-électrique classique de réservoir géothermique généralement utilisé pour identifier des ressources géothermiques exploitables (cf. Annexe 1). Par ailleurs, un autre corps conducteur (< 10 Ohm.m) semble présent à grandes profondeurs (> 20 km), pourrait correspondre à la présence d'un réservoir magmatique et serait la source de chaleur du système hydrothermal.

Le sondage du volcan Dziani est plus difficilement interprétable car beaucoup plus bruité que la plage de Moya, probablement du fait de la proximité d'installations industrielles (e.g. centrale thermique, dépôt d'hydrocarbures). Un modèle de résistivité similaire à celui de la plage de Moya semble cependant compatible avec les données du volcan Dziani (Figure 11), à la différence que la couche résistante superficielle (> 100 Ohm.m) serait bien plus épaisse (environ 100 m). Ceci peut très bien s'expliquer par le fait que la station MT est installée en haut du cratère du Dziani, à une altitude de 50 m, sur une couche plus épaisse de dépôts volcaniques non altérés et secs. Ceci est par ailleurs confirmé par les données électromagnétiques hélicoptérées (Figure 6).

Ces résultats permettent de conclure à la faisabilité et l'intérêt de sondages MT sur certains sites peu anthropisés de Petite-Terre. Il sera cependant nécessaire de déployer des émetteurs électromagnétiques pour les sites proches des milieux anthropisés afin de compenser l'effet du bruit électromagnétique ambiant et d'obtenir des sondages électromagnétiques de qualité à grande profondeur (> 1 km).

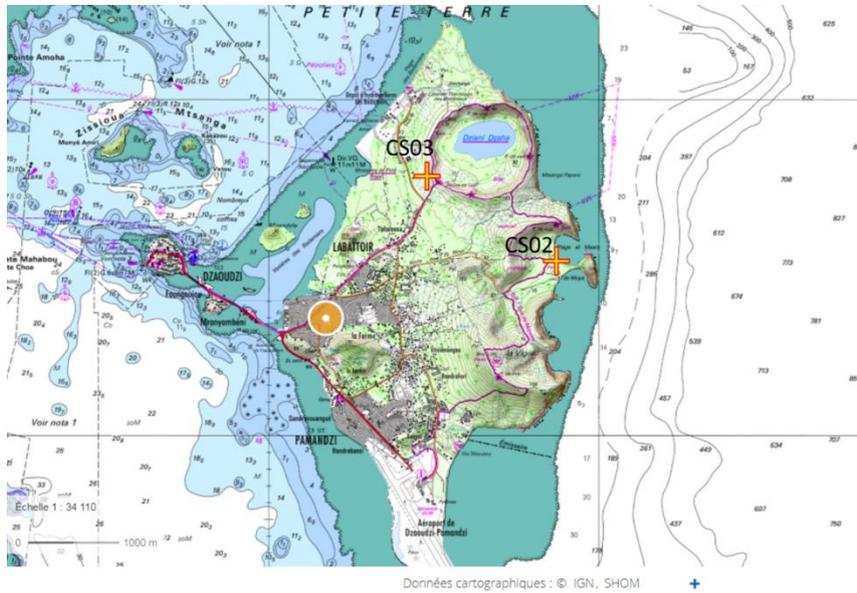


Figure 7 : Positions des deux stations magnétotelluriques déployées sur Petite-Terre lors du test de faisabilité de mai 2019.

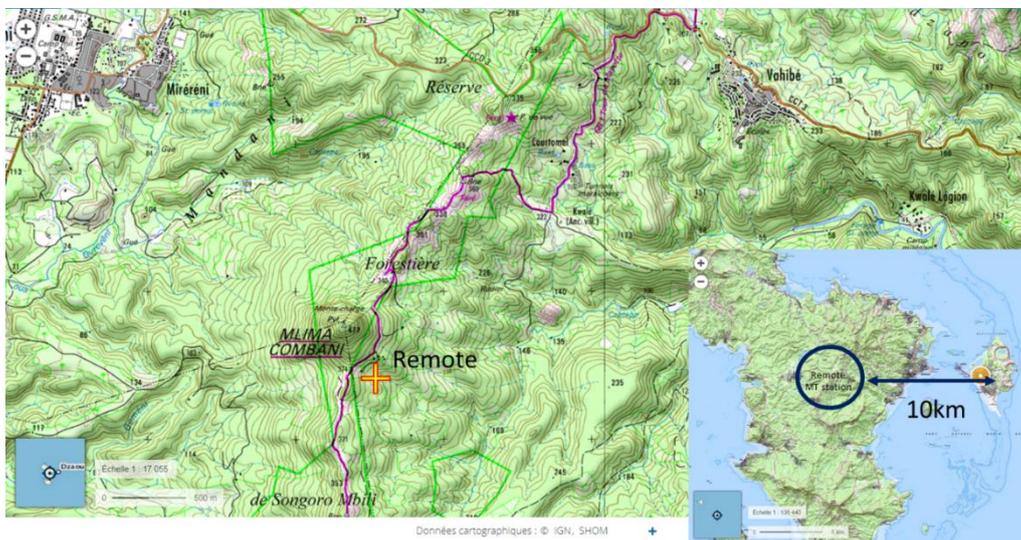


Figure 8 : Position de la station magnétotellurique de référence déployée sur Grande-Terre lors du test de faisabilité de mai 2019.

	Easting (UTM38S. WGS84)	Northing (UTM38S. WGS84)	Altitude
Remote	516810.46	8584191.17	331
CS002	532050.51	8586887.25	16.7
CS003	530716.44	8587740.25	48.5

Tableau 1 : Coordonnées des stations MT déployées en mai 2019.

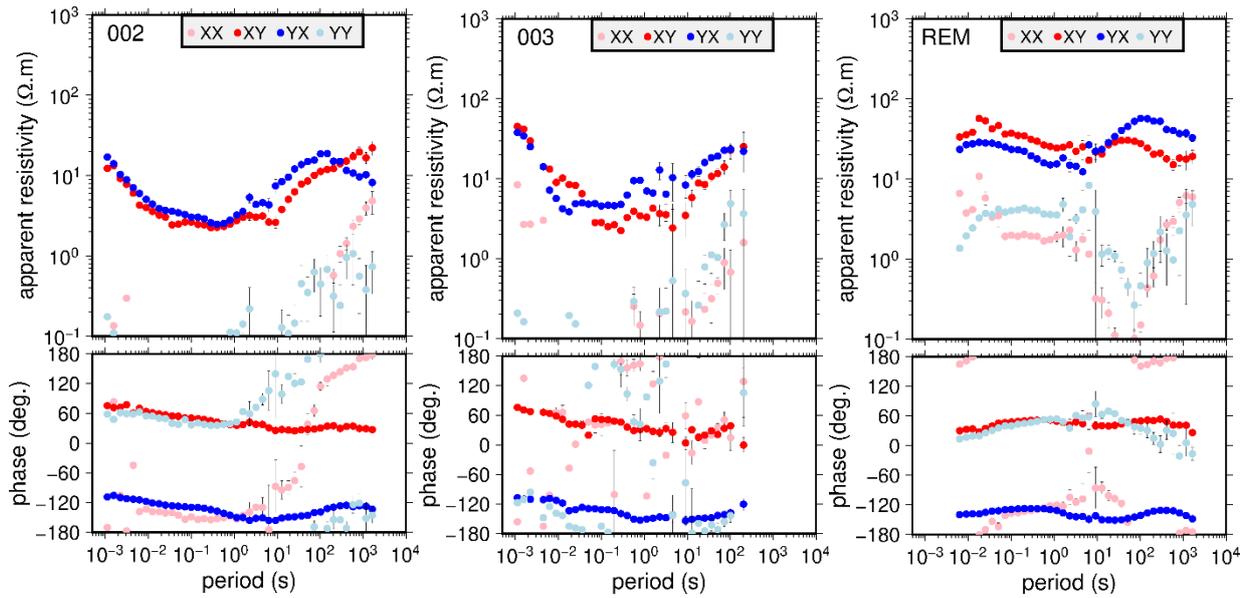


Figure 9 : Sondages magnétotelluriques réalisés sur la plage de Moya (site 002 à gauche), le volcan Dziani (site 003 au centre) et le Mlima Combani (site REM à droite).

En haut, les courbes de résistivité apparentes et en bas les courbes de phases des tenseurs MT.

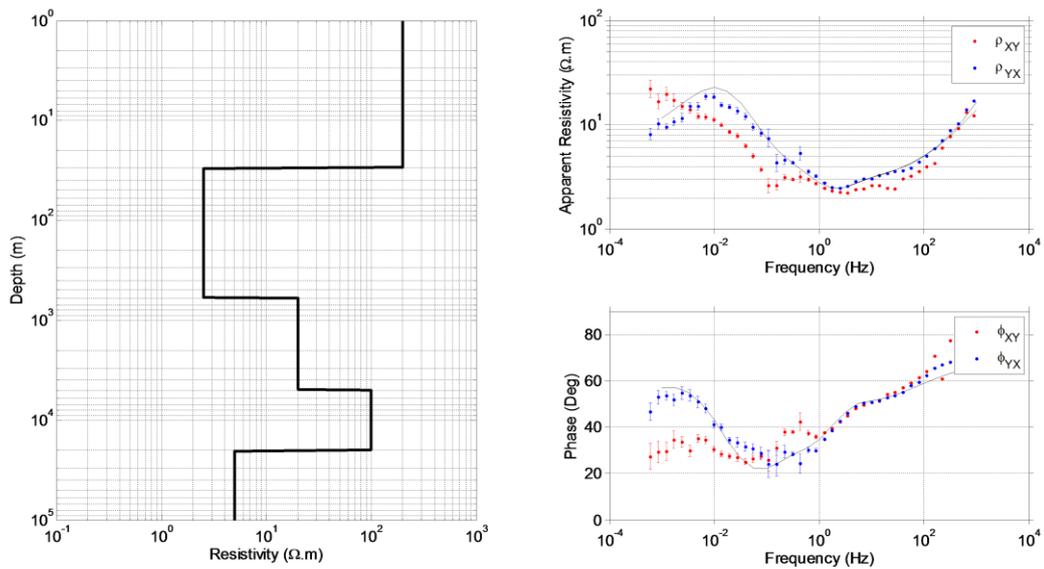


Figure 10 : Modèle de résistivité à cinq couches (à gauche) dont la réponse MT calculée (en gris à droite) explique au mieux les données MT observées sur la plage de Moya (en rouge et bleu à droite).

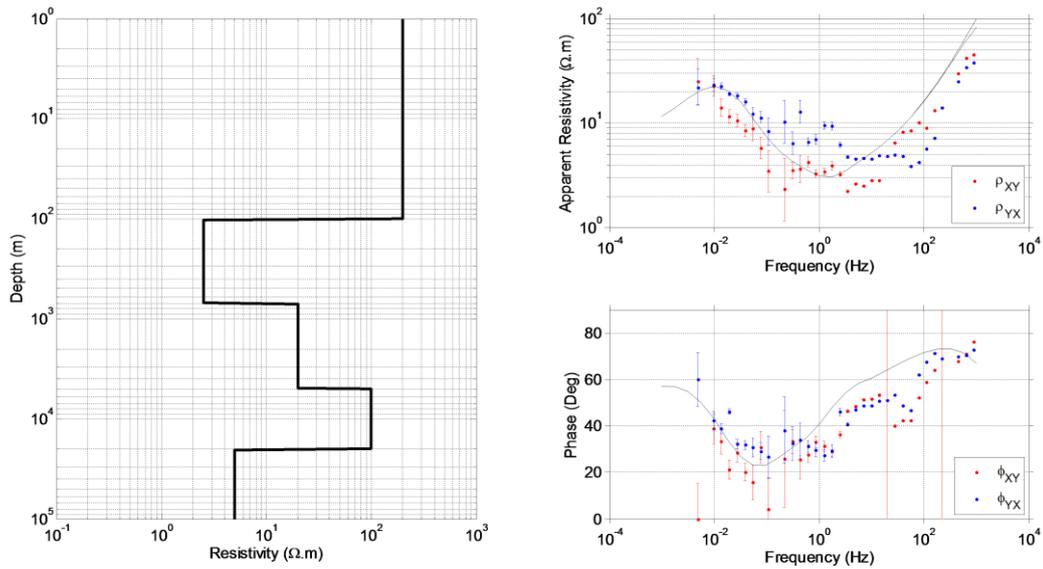


Figure 11 : Modèle de resistivité à cinq couches (à gauche) dont la réponse MT calculée (en gris à droite) explique au mieux les données MT observées sur le volcan Dziani (en rouge et bleu à droite).

2.3.2. Test de faisabilité de sondages MT marins

Lors du test de faisabilité réalisé en mai 2019, une campagne en mer de sondages magnétotelluriques s'est déroulée simultanément à la campagne de mesures à terre menée par le BRGM et IMAGIR Sarl. L'objectif de la campagne en mer était de démontrer la faisabilité de sondages magnétotelluriques par petit fond dans et au-delà du lagon, en dépit des bruits océaniques (houles, vague) et anthropiques (activité électrique sur Petite-Terre). Les instruments STATEM ont été développés dans le cadre d'une collaboration entre l'UBO et MAPPEM Geophysics. Quatre sites ont été occupés en deux phases, du 27 au 29 mai puis du 29 au 31 mai (Figure 12).

La campagne a été menée en louant la barge de la société STMM (Figure 13a) avec leurs plongeurs. Les instruments (Figure 13bcd) ont été installés, orientés et nivelés sur le fond dans des poches sableuses dans le lagon (MT01 et MT04) ou près des tombants (MT02 et MT04). Le Tableau 2 précise les coordonnées et profondeurs des quatre sites.

Le système STATEM enregistre cinq composantes du champ électromagnétique naturel (trois composantes magnétiques et deux électriques) à une cadence de 512 points par seconde. Des paramètres de contrôle sont également enregistrés (température, tilt bidirectionnel). Dans cette opération test, les instruments ont été orientés et nivelés par les plongeurs de la société STMM. Les stations étant des prototypes, le système de présentation des données n'a pas pour l'instant la performance des systèmes terrestres. De plus, du fait que la station soit immergée, la synchronisation GPS au départ est perdue pendant l'enregistrement. L'heure est récupérée au retour à bord de l'instrument et comparée avec le GPS pour la correction de la dérive. Pour l'instant cette dérive est faible, de l'ordre 100-180 ms sur 48 h, et sera encore réduite par la suite.

La difficulté du traitement de données MT marines petit fond est l'omniprésence de bruits océaniques qui peuvent largement dépasser le signal MT exosphérique. Pour le champ électrique, ces bruits sont le mouvement de l'eau (vagues, houle, marée) dans le champ magnétique terrestre principal, qui génère un champ électrique parasite, et la vibration des électrodes en bout de ligne due aux courants marins locaux. Pour le champ magnétique, il s'agit du champ issu des courants électriques engendrés par les champs électriques parasites et aussi la vibration de la structure sous l'effet des différents courants marins. De fait, ces signaux électriques et magnétiques parasites sont corrélés entre eux et un traitement classique mélange la réponse MT et ces bruits. Il s'agit donc d'exploiter la méthode de station éloignée, dépourvue de signaux marins pour traiter les données sous-marines. Le niveau de bruit marin étant très important, le problème est délicat. Suivant les bruits, les composantes magnétiques (approche classique) et électriques de la station éloignée peuvent alors être utilisées. Il est donc indispensable, pour ce type de mesures marines proche de la côte et par petit fond, de disposer d'une station terrestre pendant toute la période d'enregistrement. Cette station a été la station de référence installée par le BRGM et IMAGIR sur Grande-Terre, à une distance suffisante pour servir aussi bien les stations terrestres que marines.

Dans la Figure 14, les fonctions de transfert MT pour les quatre sites marins sont présentées. Même si elles paraissent déjà d'une assez bonne qualité, il reste sans doute une marge de progrès pour les optimiser. Au stade actuel, elles servent à démontrer la faisabilité de ces mesures marines, notamment aux fréquences hautes. Une difficulté supplémentaire apparaît avec l'atténuation exponentielle du signal MT en fonction de la fréquence et de la profondeur d'eau expliquant entre autre le faible rapport signal sur bruit. Néanmoins, en comparant à la station terrestre de la plage de Moya (Figure 9), nous voyons que la réponse MT est bien récupérée, sauf dans la zone d'ombre 1-10 s correspondant à la fois au minimum de signal MT et à la gamme de période de la houle.

En conclusion, les instruments STATEM offrent maintenant la possibilité de réaliser des sondages MT par petits fonds. Une version améliorée pour des fonds plus importants (~100 m) et donc sans plongeur est en cours de finalisation. Ils viennent compléter les instruments MAGELLAN et SIMBA de l'Université de Brest pour les fonds allant jusqu'à 6 000 m, qui ont fait leur preuves les années passées.

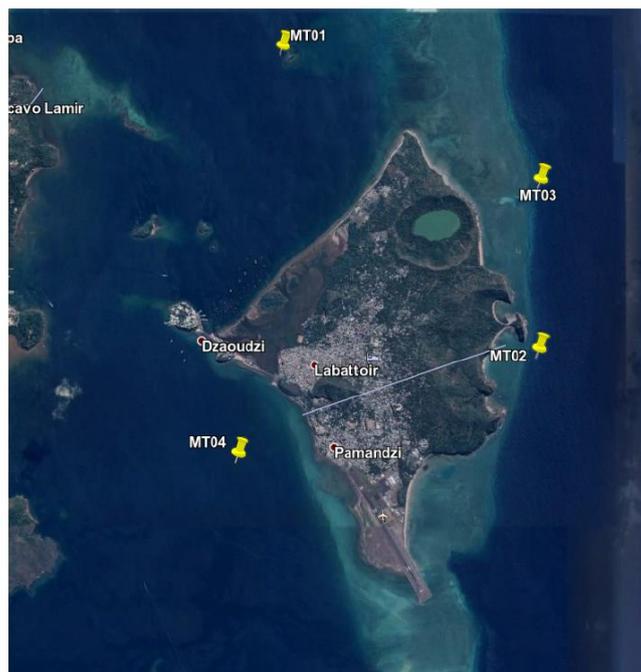


Figure 12 : Localisation des sites MT marins déployés en mai 2019.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 13 : Déploiement des instruments STATEM à partir de la barge STMM
(a). Instrument sur le pont (b) ; en déploiement (c) et sur le fond (d).

	Latitude	Longitude	Profondeur	Heure début	Durée
MT01	12°44'57.4 S	45°16'05.6 E	17m	27/05 9:10:07 TU	44 h51
MT02	12°47'14.90 S	45°18'03.80 E	22m	29/05 09:12:30 TU	43h48
MT03	12°45'58.1 S	45°18'04.7 E	21m	29/05 09:47:01 TU	43h52
MT04	12°48'02.2 S	45°15'45.5 E	15m	27/05 08:04:34 TU	43h06

Tableau 2 : Coordonnées des sites MT marins déployés en mai 2019.

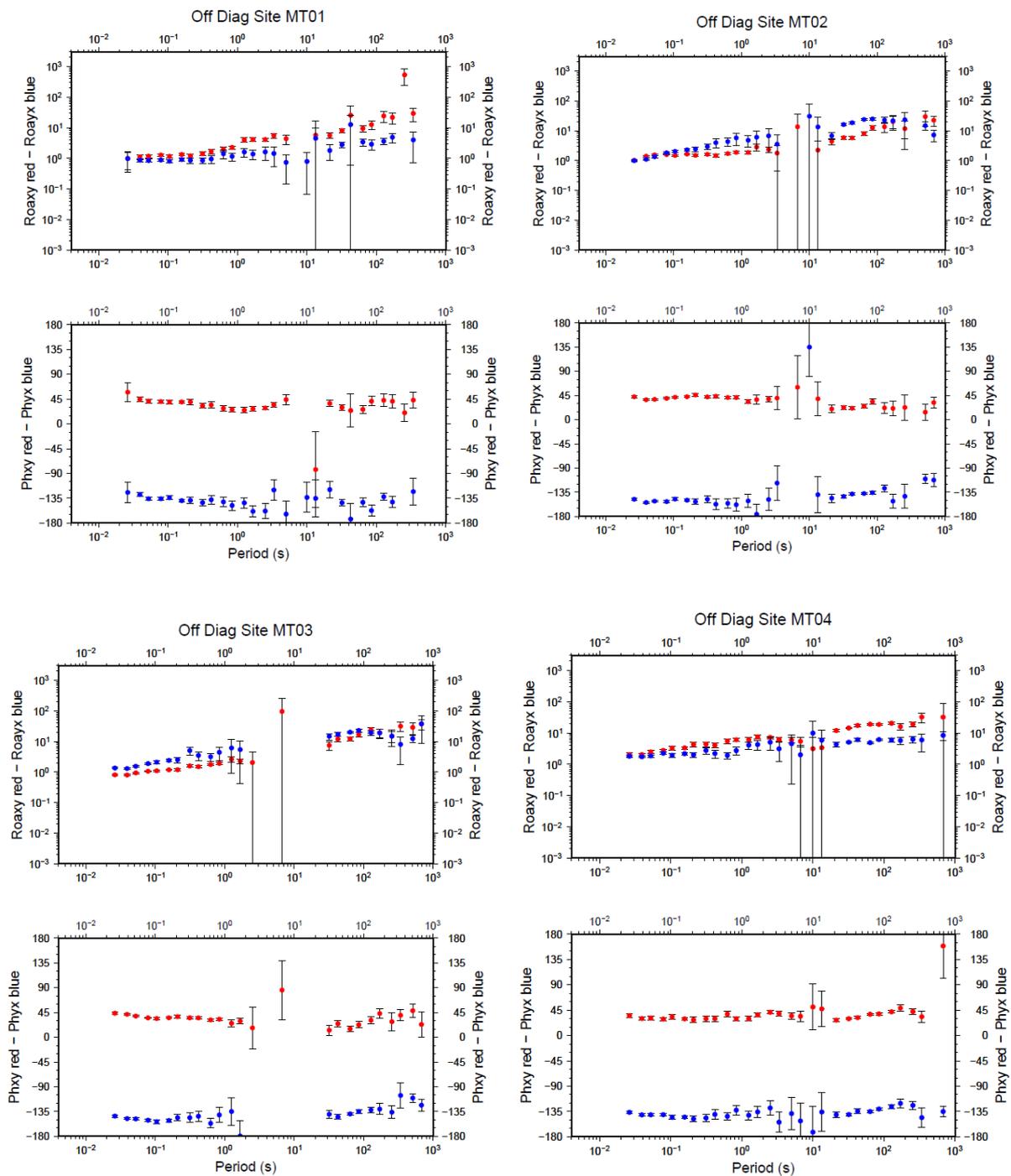


Figure 14 : Sondages MT marins réalisés en mai 2019. La résistivité apparente (en haut) et phase (en bas) du tenseur MT sont représentés pour chaque site.

2.4. OBSERVATIONS GÉOSCIENTIFIQUES LORS DE LA CRISE SISMO-VOLCANIQUE DE 2018-2019 (BULLETINS REVOSIMA, www.ipgp.fr/revosima)

L'archipel des Comores se situe dans une région sismique considérée comme modérée. Depuis mai 2018, la situation volcano-tectonique a évolué. Une activité sismique affecte l'île de Mayotte depuis le début du mois de mai 2018. Ces séismes forment deux essaims (Figure 15) avec des épacentres regroupés en mer, entre 5 et 15 km à l'est de Petite-Terre pour l'essaim sismique principal, et à 25 km à l'est de Petite-Terre pour le secondaire, à des profondeurs comprises entre 25 et 50 km dont les localisations ont pu être affinées grâce aux relocalisations effectuées lors des campagnes en mer (MD220-MAYOBS-1, MD221-MAYOBS-2, MD222-MAYOBS-3, MD223-MAYOBS-4). La majorité de ces séismes est de faible magnitude, mais plusieurs événements de magnitude modérée (max. Mw 5,9 le 15 mai 2018) ont été fortement ressentis par la population et leur succession a endommagé certaines constructions (rapport BCSF-RéNaSS, juillet 2018).

Du 2 au 18 mai 2019, une campagne océanographique (MD220-MAYOBS-1) sur le Marion Dufresne a permis la découverte d'un nouveau site éruptif sous-marin à 50 km à l'est de Mayotte, qui a formé un édifice d'environ 820 m de hauteur sur le plancher océanique situé à 3 500 m de profondeur d'eau. Les campagnes (MD221-MAYOBS-2 - 10-17 juin 2019 ; MD222-MAYOBS-3 - 13-14 juillet 2019 ; et MD223-MAYOBS-4 - 19-31 juillet 2019) ont mis en évidence de nouvelles coulées de lave, au sud et à l'ouest du nouveau site éruptif, laissant supposer la présence de plusieurs sorties de lave dans la région du nouveau site éruptif. Des panaches acoustiques (700 à 1 000 m de haut ; dont la nature hydrothermale et/ou magmatique reste à préciser) ont été détectés dans la colonne d'eau au-dessus de la nouvelle coulée de lave de juin-juillet 2019, ainsi qu'au-dessus de la structure volcanique ancienne située à l'aplomb de la zone de l'essaim sismique principal (5-15 km à l'est de Petite-Terre). En l'état actuel des connaissances, le nouveau site éruptif a produit au moins 5 km³ de lave depuis le début de son édification.

Les déplacements de surface mesurés depuis le début de la crise par les stations GPS de Mayotte indiquent : a) un déplacement d'ensemble des stations GPS de Mayotte vers l'est d'environ 18 à 21 cm ; b) un affaissement (subsidence) d'environ 8 à 15 cm selon leur localisation sur l'île. Les premières modélisations montrent que ces déplacements pourraient être induits par la déflation d'un réservoir magmatique profond à l'est de Mayotte.

Les résultats préliminaires de la mission de reconnaissance géochimique des gaz réalisées du 7 au 14 septembre 2019 par une équipe de l'IPGP-OVPP ont permis de :

- mettre en évidence la présence d'émissions de CO₂ des sols d'intensité modérée sur l'alignement sud-est/nord-ouest des cônes basaltiques, avec des flux de CO₂ rapidement décroissants avec la distance du platier de la plage à l'est de l'aéroport (Figure 16). Les températures des émissions de gaz sur ce platier sont proches de celle de l'eau de mer et évoluent avec l'épaisseur de la lame d'eau (de 25 à 30 °C, en septembre 2019) ;
- confirmer que l'anomalie principale de CO₂, d'origine magmatique, mise en évidence par le BRGM, est bien celle qui est proche du secteur de la plage de l'aéroport. Les flux de CO₂ les plus élevés à terre restent modestes et sont jusqu'à deux ordres de grandeur plus faibles que ceux mesurés sur le platier de la plage de l'aéroport. Une autre anomalie importante, également d'origine magmatique, provient du lac Dziani ;
- identifier, pour la première fois, et seulement dans les émissions de gaz, avec le flux le plus important, situées dans le secteur le plus éloigné de la côte sur le platier de la plage à l'est de l'aéroport, la présence de H₂S.

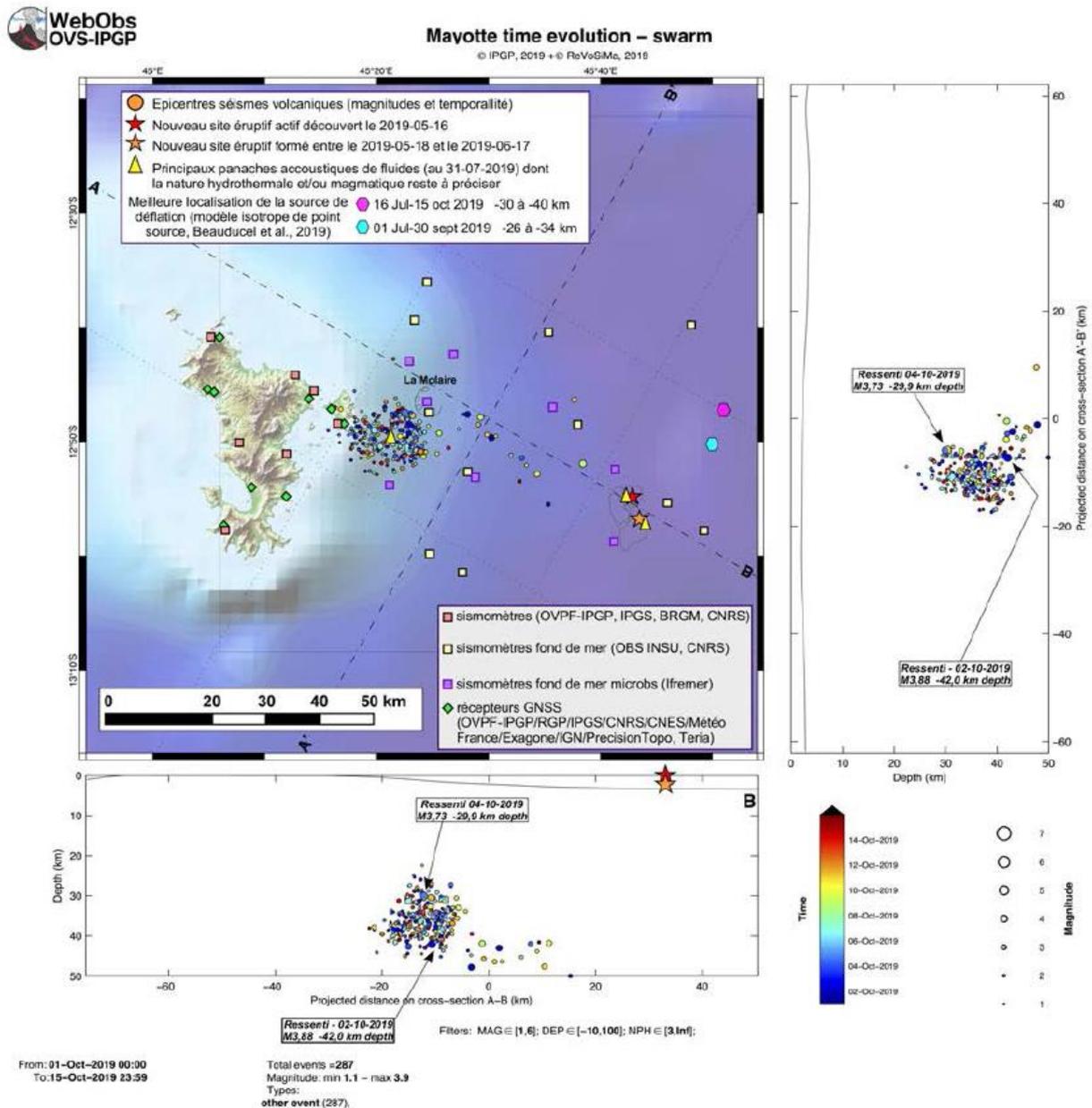


Figure 15 : Carte de localisation des épicentres (± 5 km) des séismes volcano-tectoniques avec les réseaux sismiques à terre (IPGP-IFREMER-CNRS-BRGM-BCSF-RéNaSS, IPGS) entre le 1^{er} et le 15 octobre 2019 (15 jours) (échelle temporelle de couleur) et coupes transversales et axiales le long de la ride montrant la localisation estimée en profondeur (précision variant entre ± 5 km et ± 15 km) des séismes en fonction de la magnitude (taille des symboles).

La localisation approximative des panaches acoustiques identifiés pendant les campagnes océanographiques IFREMER (MD220-Mayobs-1, MD221-Mayobs-2, MD222-Mayobs-3, MD223-Mayobs-4) et dont la nature hydrothermale et/ou magmatique reste à préciser, est indiquée par des triangles jaunes, l'étoile rouge indique le site éruptif nouvellement identifié le 16 mai 2019, et l'étoile orange le deuxième site éruptif identifié le 17 juin 2019. Les structures volcaniques de la zone dite de « La Molaire » sont indiquées en grisé tout comme les coulées de lave du site éruptif actuel. La position des meilleurs modèles de source en déflation (dégonflement) issues des modélisations (modèle isotrope point source) sur des périodes de temps choisies est indiquée par des polygones de couleur (rose : 2019-07-16/2019-10-15 ; bleu : 2019-07-01/2019-09-30) avec la profondeur associée en km. Les stations sismiques du réseau terrestre, les sismomètres fond de mer (OBS) et les stations de positionnement par satellite GPS sont indiquées par des symboles (voir légende) (© OVPF-IPGP, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RéNaSS, IPGS / REVOSIMA).

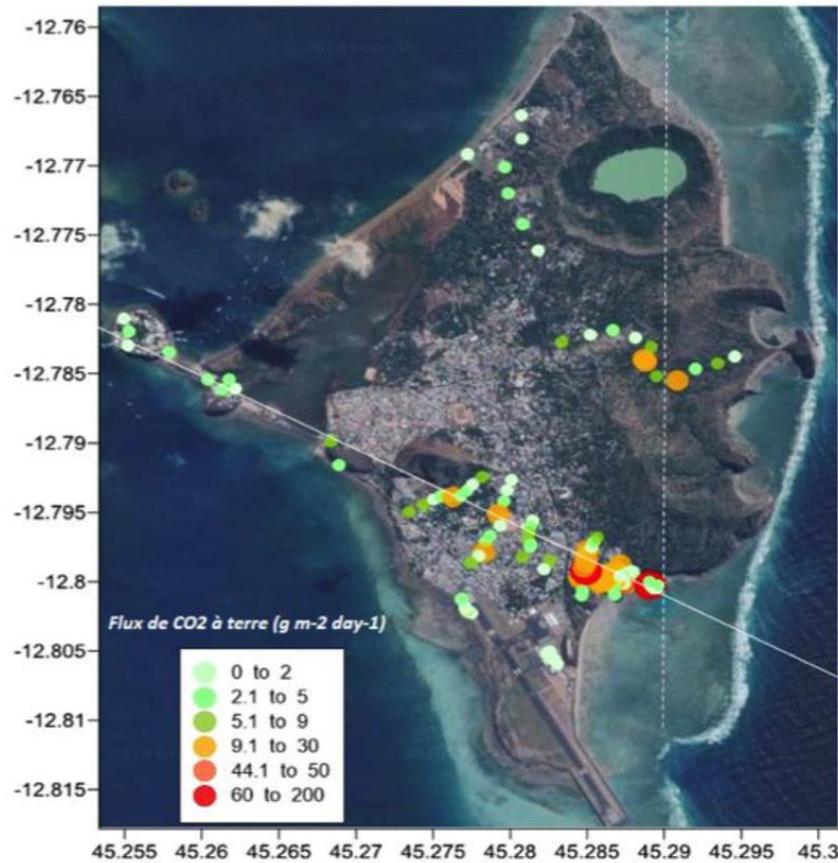


Figure 16 : Distribution spatiale des émissions de CO₂ par le sol (méthode de la chambre d'accumulation). On remarquera la présence d'émissions d'intensité modérée sur l'alignement sud-est/nord-ouest des cônes basaltiques. Note : l'échelle d'intensité (jusqu'à deux ordres de grandeur plus élevée) sur le plateau ne correspond pas à celle à terre (extrait de bulletin n° 4 REVOSIMA).

L'évolution temporelle de ces émissions de gaz, à ce stade, n'est pas très claire car leur composition chimique semble assez stable dans le temps. Une faible augmentation de la proportion de gaz d'origine magmatique pourrait avoir eu lieu par rapport à 2005-2008. Une diminution possible des émissions de CO₂ par le sol au niveau de la plage de l'aéroport est évoquée entre décembre 2018 et septembre 2019. Mais tout cela reste à valider.

Par rapport aux informations obtenues par le BRGM en 2005-2008, ce sont surtout les données géochimiques acquises sur les dégagements de gaz provenant du lac Dziani, depuis 2016 (Milesi *et al.*, submitted et Moreira, pers. Comm.), qui présentent le plus de nouveautés et qui mettent en évidence, pour la plupart, l'origine magmatique de ces gaz et leur similarité avec les dégagements gazeux de la plage de l'aéroport.

Ainsi, Milesi *et al.*, submitted, ont réalisé les analyses chimiques de plusieurs sorties de gaz du lac Dziani en août 2016. La majorité des sorties de gaz possèdent des compositions chimiques reflétant des proportions de CO₂ importantes (de 95,5 à 99,6 %) et des quantités faibles de CH₄ (de 0,3 à 0,7 %), proches de celles des dégagements gazeux de l'aéroport (99,3 % CO₂ et 0,3 % CH₄). Pour ces gaz, on retrouve également des valeurs isotopiques de δ¹³C (de -2,4 à -0,3 ‰ pour CO₂ et de -28,1 à -11,1 ‰ pour CH₄, respectivement) assez proches de celles des dégagements gazeux de l'aéroport (de -3,7 à -3,2 ‰ pour CO₂ et de -15,4 ‰ pour CH₄, respectivement). Seules les valeurs de δ¹³C de la sortie G2 (-20,1 ‰ pour CO₂ et -66,0 ‰ pour CH₄) suggèrent une origine biogénique de ces gaz.

Les analyses du rapport isotopique $^3\text{He}/^4\text{He}$ faites sur les sorties de gaz du lac Dziani par Moreira (IPGP) sont également proches de celles analysées sur les dégagements gazeux de la plage de l'aéroport en 2008 par le même laboratoire (6,44-6,68 ; Sanjuan *et al.*, 2008). Elles sont proches de celles d'autres volcans de l'archipel des Comores, bien qu'intermédiaires entre celles des volcans La Grille et Khartala. Ces valeurs sont caractéristiques de la partie lithosphérique sub-continentale du manteau (SCLM).

Toutes ces observations récentes confirment qu'un réservoir magmatique actif est bien présent au large de Petite-Terre, très probablement en lien avec les dégagements gazeux observés sur Petite-Terre, et qui peut jouer le rôle de source de chaleur nécessaire au développement d'un réservoir géothermal sous Petite-Terre.

2.5. SIG DE SYNTHÈSE

À partir des travaux menés depuis le début des années 2000, un SIG a été réalisé afin de rassembler toutes les données disponibles sous un même environnement et de permettre l'édition d'une carte. Le référentiel retenu pour cette base de données est le référentiel géographique EPSG4471 (RGM04/UTM Zone 38S).

Ces données proviennent des principales études suivantes :

- géologie : carte géologique à 1/30 000 (Nehlig *et al.*, 2013) ;
- géochimie : rapports Traineau *et al.* (2006) et Sanjuan *et al.* (2008) ;
- géophysique : Pajot *et al.* (2007), Sanjuan *et al.* (2008), Nehlig *et al.* (2013), ce rapport.

Seule la partie de la carte géologique de Petite-Terre a été incluse dans le SIG pour ne pas alourdir inutilement la carte (Figure 17). Deux couches constituent cette carte :

- Petite-Terre_L_FGEOL_4471 : contours géologiques, réseau hydrographique et limite de la côte ;
- Petite-Terre_S_FGEOL_4471 : formations géologiques.

Les données géochimiques concernent aussi bien les gaz que les sources, avec les analyses physico-chimiques et chimiques disponibles dans les rapports. Toutes les positions de prélèvements ont été vérifiées et converties dans le référentiel retenu (Figure 17). Les couches présentées sont les suivantes :

- Ana_Eaux2005_4471 : compositions chimiques des eaux prélevées durant la campagne de 2005 (Traineau *et al.*, 2006) ;
- Ana_Gaz2005_4471 : compositions des gaz prélevés durant la campagne de 2005 (Traineau *et al.*, 2006) ;
- Bulles2005_4471 : position et mesures physico-chimiques des émanations de gaz de la plage à l'est de l'aéroport de Pamandzi réalisées pendant la campagne de 2005 (Traineau *et al.*, 2006) ;
- Bulles2008_4471 : compositions chimiques des émanations de gaz de la plage à l'est de l'aéroport de Pamandzi réalisées pendant la campagne de 2008 (Sanjuan *et al.*, 2008).

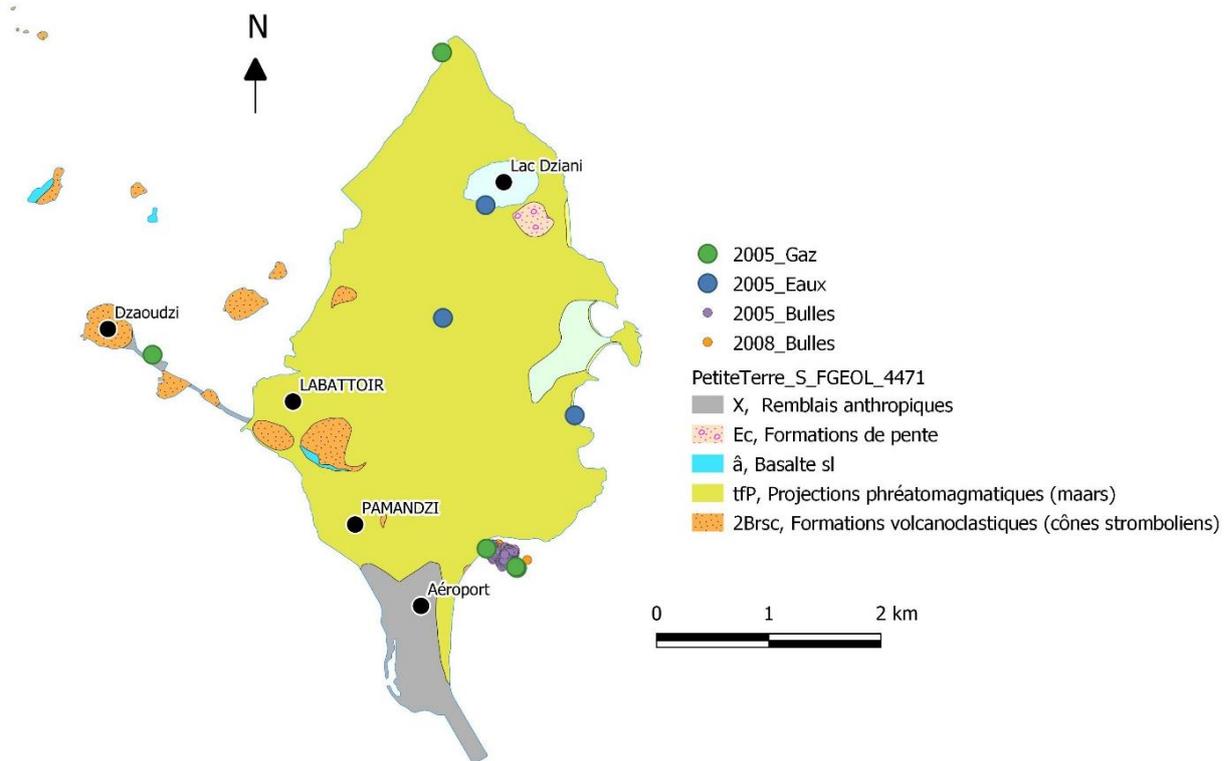


Figure 17 : Carte géologique de Petite-Terre et éléments de données géochimiques.

Les données gravimétriques (couche Gravi2007_4471 ; Figure 18) ont été acquises par F. Dupont du 21 au 30 mai 2007. Des incohérences entre les corrections de la marée terrestre et l'heure notée par l'opérateur ont été mises en évidence et corrigées. Des écarts maximaux de l'ordre de 0.1 mGals sont ainsi observés sur le g compensé sans que cela n'affecte les interprétations présentées dans les rapports. La base de données intègre pour chaque station les valeurs de :

- gcomp : g compensé au sol (mGal) ;
- g0 : valeur de g théorique sur l'ellipsoïde GRS80 ;
- +-magnétiques aéroportées proviennent du modèle 3D issues des levés de XXX. Quatre couches d'isovaleurs ont été incluses dans le SIG.

Un profil électrique acquis en deux phases en juin 2007 par J.-M. Miehé et en novembre 2008 par F. Mathieu est localisé dans le SIG sous la couche ERT2007_4471 (Figure 18). Les mesures ne sont cependant pas incluses et sont présentes dans un fichier Excel complémentaire (ERT_2007+2008.xls) comportant les champs suivants :

- nb : numéro de mesure ;
- x : abscisse le long du profil ;
- a : espacement de dipôle ;
- n : indice d'écartement émetteur-récepteur ;
- roa-mes : résistivité apparente mesurée en Ohm.m ;
- roa-mod : résistivité apparente modélisée en Ohm.m ;
- roa_corr : résistivité apparente corrigée en Ohm.m.

Les dernières mesures géophysiques MT réalisées dans le cadre de ce projet sont simplement localisées sous la couche MT2019_4471 (Figure 18).

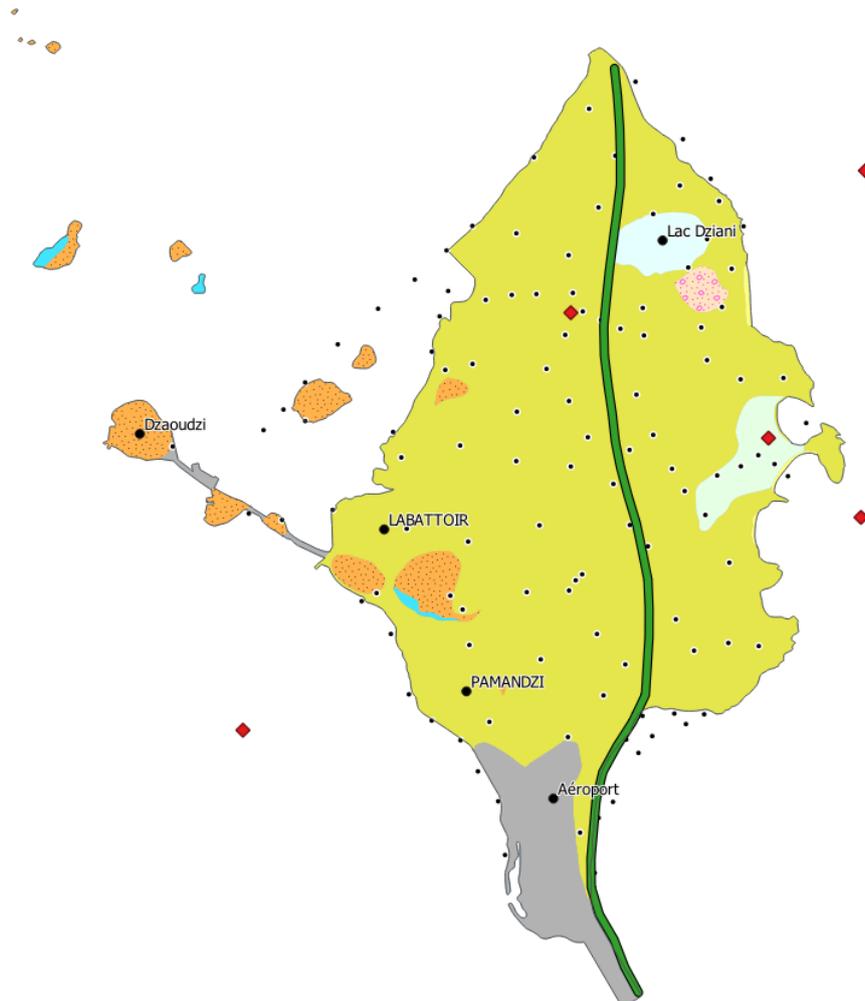


Figure 18 : Position des données géophysiques sur la carte géologique de Petite-Terre.

Points noirs : stations gravimétriques de 2007, ligne rouge : profil électrique de 2007-2008, losange rouge : stations MT cette étude. Géologie : même légende que la Figure 17.

Dans le cadre de l'établissement de la cadre géologique, une campagne d'acquisition électromagnétique aéroportée a été réalisée en 2010 (Nehlig *et al.*, 2013). Le résultat des mesures de résistivité a été reporté dans le SIG sous forme de courbe d'isovaleurs pour différentes profondeurs dans le modèle d'interpolation (Figure 19) :

- TEM_005-010_4471 : isovaleurs de résistivité entre 5 et 10 m de profondeur ;
- TEM_050-060_4471 : isovaleurs de résistivité entre 50 et 60 m de profondeur ;
- TEM_100-110_4471 : isovaleurs de résistivité entre 100 et 110 m de profondeur ;
- TEM_150-160_4471 : isovaleurs de résistivité entre 150 et 160 m de profondeur.

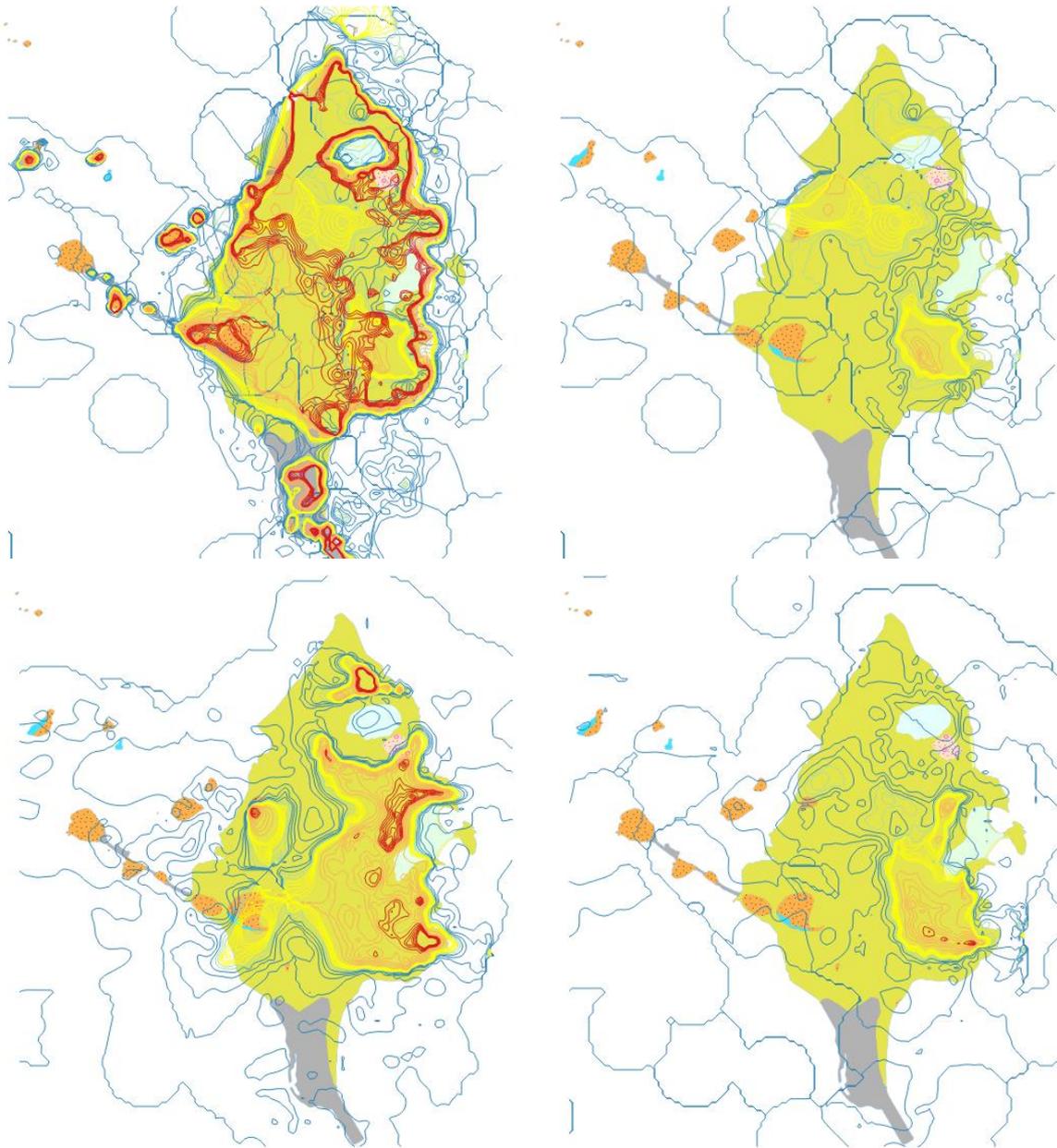


Figure 19 : Courbes d'isorésistivité à différentes profondeurs basées sur les acquisition EM aéroporté de 2010.

De gauche à droite et de haut en bas : 5 à 10 m de profondeur, 50 à 60 m de profondeur, 100 à 110 m de profondeur ; 150 à 160 m de profondeur. Bleu : 1 à 4 Ohm.m, vert : 4 à 6 Ohm.m, jaune 6 à 10 Ohm.m, orange ; 10 à 50 Ohm.m, rouge : 50 à 100 Ohm.m. Géologie : même légende que la Figure 17.

Afin d'aider à l'implantation future de forages d'exploration, des éléments d'aménagement du territoire ont été intégrés dans le SIG (Figure 20 et Figure 21). Il s'agit du plan d'occupation des sols (Petite-Terre_Occup_sol2016_4471) indiquant les surfaces anthropisées, les surfaces naturelles et la végétation, les espaces remarquables (Petite-Terre_Esp_Rem_4471) et les espaces naturels de protection stricte (Petite-Terre_Esp_Nat_Prot_Stric_4471). Ces couches ont été récupérées auprès du site internet de l'Observatoire de Mayotte géré par la DEAL.

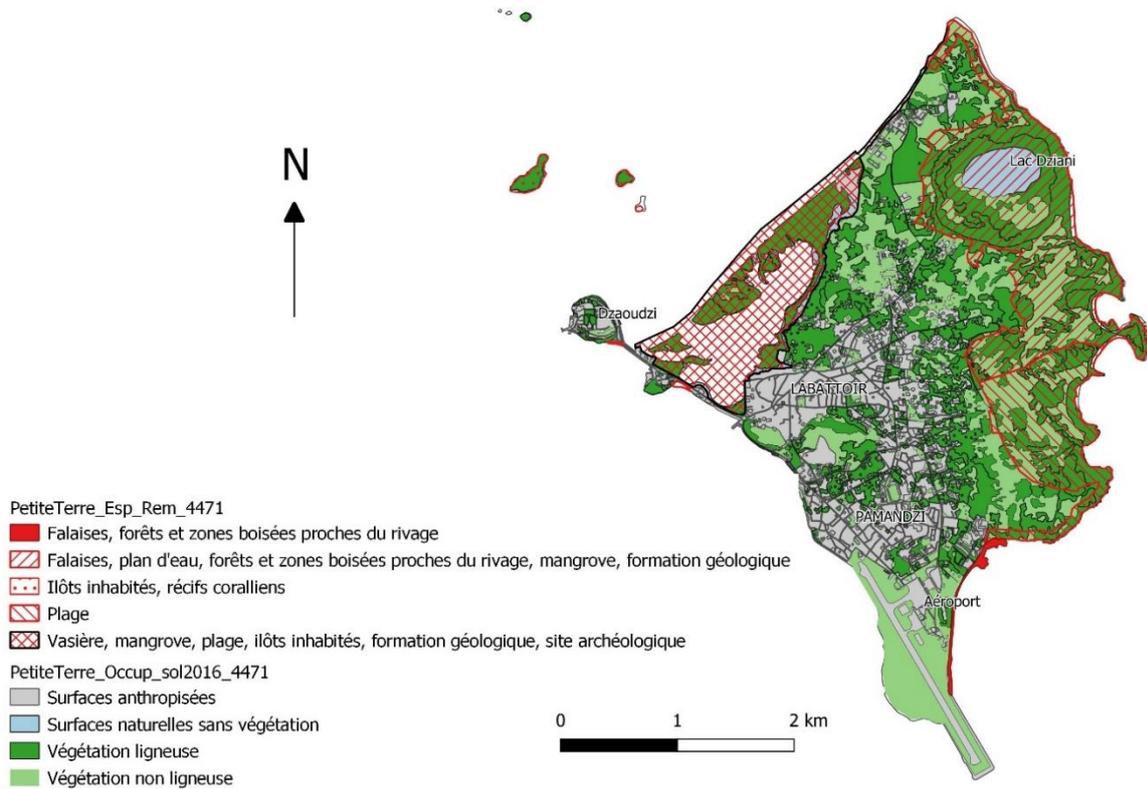


Figure 20 : Occupation des sols et espaces remarquables.

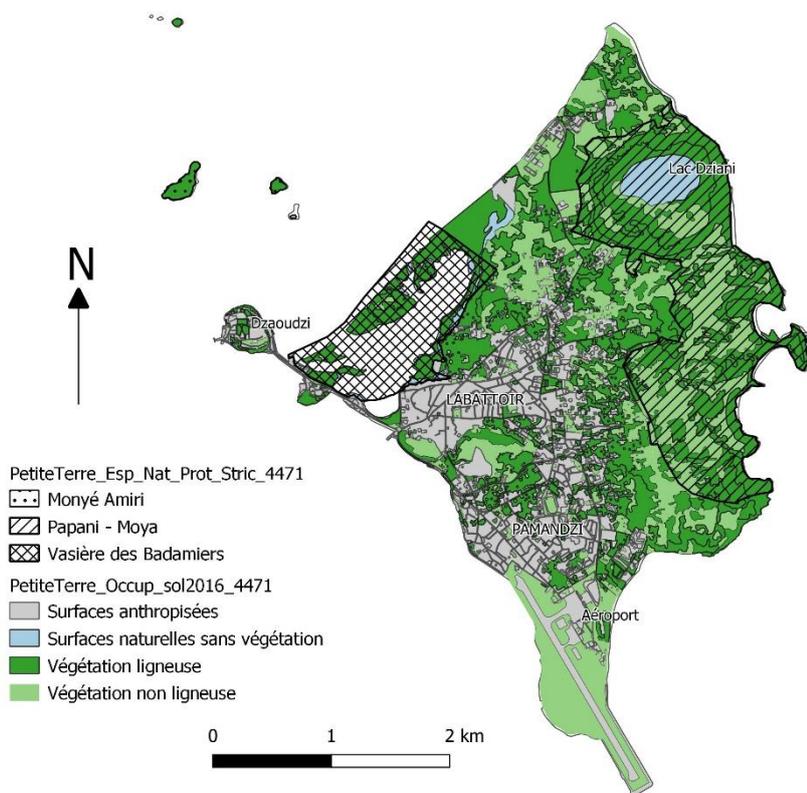


Figure 21 : Occupation des sols et espaces naturels de protection stricte.

Deux couches en lien avec la topographie ont été ajoutées pour faciliter la localisation (Figure 17) :

- toponymie_4471 : principales villes et lieux mentionnés ;
- Contour_PetiteTerre_4471 : contour de la côte de l'île de Petite-Terre et des îlots alentour.

2.6. ESTIMATION ACTUALISÉE DE LA RESSOURCE GÉOTHERMALE DE PETITE-TERRE

L'objectif de ce chapitre est de reprendre les conclusions des différentes études géoscientifiques menées sur Petite-Terre dans les vingt dernières années exposées précédemment afin d'actualiser l'estimation du potentiel géothermique de Petite-Terre. Pour cela, il convient d'estimer la probabilité d'occurrence des cinq éléments constitutifs d'un réservoir géothermique, illustrés graphiquement sur la Figure 22 :

- 1) la présence d'une source de chaleur (température, position, volume) ;
- 2) la présence d'une couverture (« cap-rock ») ;
- 3) la présence d'une recharge en eau pérenne (météorique et/ou marine) ;
- 4) la présence d'un milieu perméable (e.g. réseau fracturé) ;
- 5) l'âge du système hydrothermal (pour disposer de suffisamment de temps pour développer un réservoir géothermique).

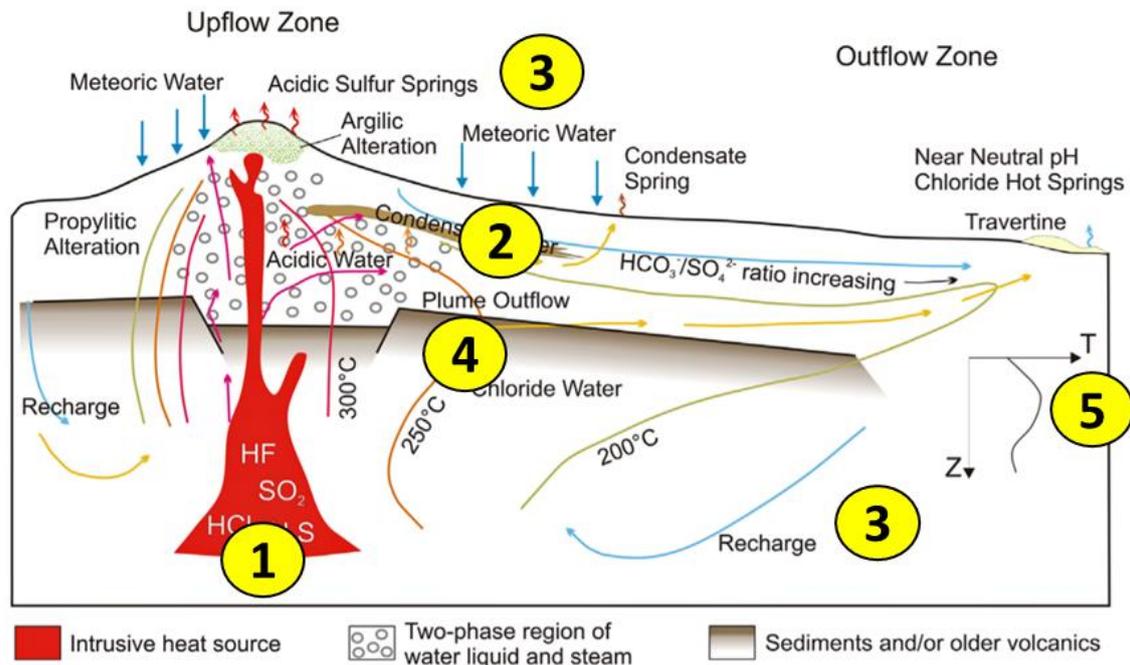


Figure 22 : Éléments constitutifs d'un réservoir géothermique.

2.6.1. Source de chaleur

La probabilité de présence d'une source de chaleur à Petite-Terre est estimée à **très forte (> 90 %)** au regard des indices suivants :

- ↳ Positif : importants dégagements de CO₂ d'origine magmatique indiquant la présence d'une chambre magmatique ;
- ↳ Positif : la géothermométrie des gaz suggère la présence d'un système hydrothermal haute température (300 °C) dont la nature (volcanique/hydrothermale ou géothermale) et profondeur reste à déterminer ;
- ↳ Positif : l'île volcanique de Petite-Terre est récente (appareils de Dziani et La Vigie avec les dernières manifestations datant de 4000 à 7000 ans BP) ;
- ↳ Positif : une activité sismo-volcanique actuelle au large de Petite-Terre (5 km) témoignant de la présence d'une chambre magmatique profonde et active ;
- ↳ Positif : les sondages magnétotelluriques révèlent la présence d'un conducteur profond (> 20 km) sous Petite-Terre, vraisemblablement lié à un réservoir magmatique.

2.6.2. Couverture (« caprock »)

La probabilité de présence d'une couverture au réservoir géothermal est estimée à **forte (> 50 %)** au regard des indices suivants :

- ↳ Positif : présence de couches électriquement conductrices observées jusqu'à 600 m de profondeur sur les sondages MT terrestres et marins (de type « caprock »), surmontant des couches plus résistantes en profondeur (de type « réservoir ») caractéristiques de réservoirs géothermaux ;
- ↳ Négatif : absence de manifestations de surface d'une zone d'altération géothermale n'est pas en faveur de la présence d'une couverture de type « caprock » très développée.

2.6.3. Recharge en eau pérenne

La probabilité de présence d'une recharge en eau pérenne du réservoir géothermal est estimée à **neutre (50/50)** au regard des indices suivants :

- ↳ Positif : La grande partie de l'édifice volcanique de Petite-Terre se situe sous le niveau de la mer, assurant une alimentation pérenne en eau ;
- ↳ Négatif : La présence de formations carbonatées récifales karstiques sous Petite-Terre peut stopper l'alimentation en eau de surface ;
- ↳ Négatif : Absence de sources thermales sur Petite-Terre ;
- ↳ Négatif : Faible pluviométrie excluant une recharge météorique.

2.6.4. La présence d'un milieu perméable

La probabilité de présence d'un milieu perméable où se développe un réservoir géothermal est estimée à **forte (> 50 %)** au regard des indices suivants :

- ↳ Positif : plusieurs familles de fractures observées en surface suggérant une histoire tectonique complexe et intense pouvant favoriser le développement de réservoirs géothermiques fracturés/faillés ;
- ↳ Positif : axe nord/sud des édifices volcaniques suggérant une même structure d'alimentation magmatique selon un plan de faiblesse nord-sud ;

- ↳ Positif : activité sismique intense témoignant de failles actives ;
- ↳ Positif : déformation intenses (soulèvements/affaissements) sur Petite-Terre en lien avec la crise sismo-volcanique (ré)activant des failles majeures ;
- ↳ Négatif : substratum volcanique de Petite-Terre probablement très hétérogène dans lequel le développement de réservoirs connectés et perméables reste incertain ;
- ↳ Négatif : absence d'anomalies thermiques et de sources thermales sur Petite-Terre.

2.6.5. Âge du système hydrothermal

La probabilité d'avoir eu suffisamment de temps pour développer un réservoir est estimée à **faible (< 50 %)** au regard des indices suivants :

- ↳ Positif : volcanisme très récent ayant émis des magmas basaltiques puis trachytiques témoignant de la pérennité d'une chambre magmatique en profondeur au nord-est de l'île de Grande-Terre (Mamoudzou, Petite-Terre) ;
- ↳ Négatif : volcanisme trop récent observé sur Petite-Terre (< 10 000 ans) pour développer un système géothermal ?
- ↳ Négatif : absence d'anomalies thermiques et de sources thermales sur Petite-Terre.

2.6.6. Conclusions sur la probabilité d'existence d'un réservoir géothermal à Petite-Terre

En résumé, les probabilités d'occurrence des cinq éléments constitutifs d'un réservoir géothermal à Petite-Terre sont estimées ainsi :

- 1) Source de chaleur : très forte (> 90 %) ;
- 2) Couverture : forte (> 50 %) ;
- 3) Recharge en eau : neutre (50/50) ;
- 4) Milieu fracturé perméable : forte (> 50 %) ;
- 5) Temps pour développer le réservoir géothermal : faible (< 50 %).

En conclusion, la probabilité de présence d'une ressource géothermale est estimée à forte (> 50 %). Cependant, nos connaissances actuelles de la ressource géothermale sont également incomplètes et pourraient être complétées en mettant en œuvre un programme d'exploration. Les méthodes impliquées dans un tel programme sont explicitées dans la suite de ce rapport.

3. Programme d'exploration de la ressource géothermale profonde à Petite-Terre

3.1. OBJECTIFS DU PROGRAMME D'EXPLORATION DE LA RESSOURCE GÉOTHERMALE PROFONDE À PETITE-TERRE

Par analogie à l'exploration pétrolière (Doré and Sinding-Larsen, 1996), la probabilité de succès (POS) d'un projet géothermique peut se définir comme la probabilité de trouver un réservoir géothermique exploitable lors d'un forage d'exploration, indépendamment du volume de fluide géothermique trouvé. La courbe de prédiction de la puissance extractible d'un projet géothermique quantifie la quantité de fluide géothermique exploitable en donnant la probabilité d'obtenir une certaine puissance extractible (Figure 23).

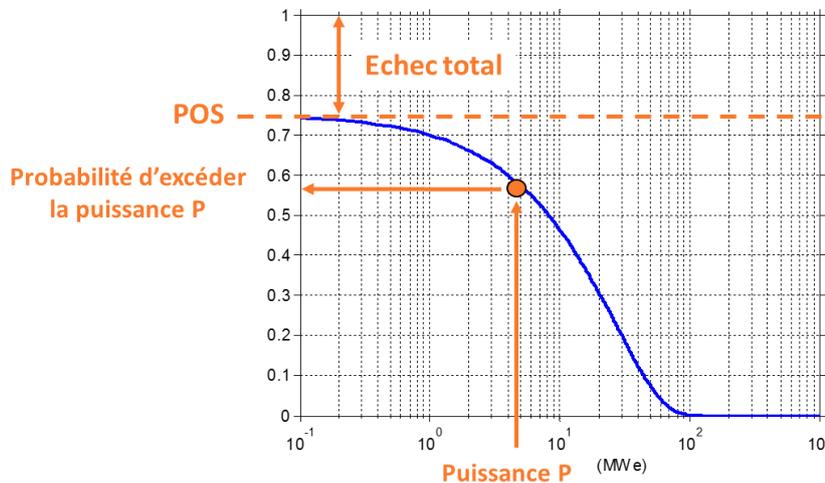


Figure 23 : Exemple de distribution de la puissance extractible d'un projet géothermique.

L'objectif du programme d'exploration de la ressource géothermale profonde à Petite-Terre est multiple (Figure 24) :

- 1) mettre à jour la probabilité de trouver un réservoir géothermique exploitable (POS) ;
- 2) mieux contraindre l'estimation basse (P90) du projet géothermique pour s'assurer d'un projet économiquement viable dans le cas où un fluide exploitable est trouvé mais en quantité insuffisante ;
- 3) contraindre mieux les paramètres du sous-sol pour resserrer la courbe de distribution des puissances possibles afin de dimensionner au mieux le projet géothermique (éviter le sous ou surdimensionnement dans le cas du P10 ou P90, respectivement).

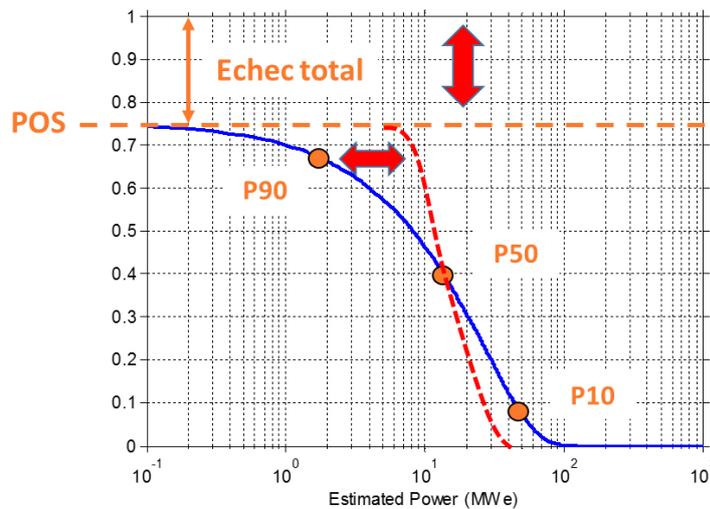


Figure 24 : Exemple d'impact sur la distribution de puissance extractible d'un projet géothermique que peut avoir un programme d'exploration.

La chaleur exploitable dans le réservoir géothermique (J) s'exprime comme

$$Q = A \cdot h \{ C_r \cdot \rho_r (1 - \varphi) (T_i - T_f) + \rho_w \cdot \varphi (u_{wi} - u_{wf}) \}$$

Où A est la surface du réservoir (m²) ;
 h est l'épaisseur effective du réservoir (m) ;
 C_r est la chaleur spécifique de la roche (J/kg °C) ;
 ρ_r et ρ_w sont respectivement la densité de la roche et du fluide (kg/m³) ;
 φ est la porosité de la roche (sans unité) ;
 T_i et T_f sont la température initiale et après exploitation du réservoir (°C) ;
 u_{wi} et u_{wf} sont respectivement l'énergie interne du fluide initiale et après exploitation du réservoir (J/kg).

De cette formule, on dérive la puissance extractible P d'un réservoir géothermique (en W) avec :

$$P = \frac{Q \cdot R_f \cdot \mu_c}{F \cdot L}$$

Où Q est la chaleur exploitable (J) ;
 R_f est le « recovery factor » (sans unité) ;
 μ_c est le facteur de conversion thermodynamique du fluide en électricité (sans unité) ;
 F est le facteur de disponibilité de la centrale géothermique (sans unité) ;
 L est la durée de vie de la centrale géothermiques (s).

À partir de ces formules, une analyse de sensibilité de la puissance extractible d'un projet géothermique hypothétique de type électrogène de 20 MW permet d'établir que les paramètres liés au sous-sol qui influencent la puissance extractible sont, par ordre d'importance (Tableau 1) :

- 1) la température initiale du réservoir ;
- 2) le volume du réservoir (surface x épaisseur) ;
- 3) la porosité et la perméabilité du réservoir (recovery factor).

Afin de contraindre la distribution de puissance extractible d'un futur projet géothermique, le programme d'exploration de la ressource géothermale profonde à Petite-Terre doit donc avoir pour objectif d'estimer au mieux le POS du projet mais également ces trois paramètres clés et leur incertitude associée.

Base (20 MW)	Paramètre – 10 %	Paramètre + 10 %
Température réservoir	14.3 Mwe	26.5 Mwe
Volume réservoir	16.2 Mwe	24.2 MWe
Porosité/Recovery Factor	17.9 Mwe	22.1 MWe
Facteur de conversion thermodynamique	18 Mwe	22 MWe
Disponibilité de la centrale	18.2 Mwe	22.2 MWe
Durée de vie de la centrale	18.2 Mwe	22.2 MWe
Chaleur spécifique de la roche	18.3 Mwe	21.7 Mwe
Densité roche	18.3 Mwe	21.7 Mwe

Tableau 3 : Analyse de sensibilité de la puissance extractible d'un projet géothermique hypothétique de type électrogène de 20 MW permettant d'établir les paramètres liés au sous-sol qui influencent la puissance extractible.

3.2. MÉTHODOLOGIE DE SÉLECTION DES MÉTHODES D'EXPLORATION

De nombreuses méthodes d'exploration permettent de caractériser une ressource géothermale haute température en contexte volcanique (IGA, 2014). Nous avons sélectionné ici les méthodes les plus appropriées pour estimer le POS d'un projet géothermique haute température sur Petite-Terre, mais également les trois paramètres clés du sous-sol : température, volume, porosité/perméabilité du réservoir (Tableau 4). Sur ce tableau, nous présentons également une estimation qualitative de la capacité de chaque méthode à influencer sur le paramètre considéré. Le fait marquant est qu'aucune méthode ne peut à elle seule influencer sur tous les paramètres, mais que c'est bien l'intégration de méthodes complémentaires qui permet d'estimer au mieux ces paramètres.

La modélisation conceptuelle et/ou numérique (e.g. géologique, hydro-thermique) est par ailleurs l'outil le mieux adapté pour réaliser cette intégration. Nous avons également ajouté un ordre de grandeur du coût de chaque méthode et du délai nécessaire pour leur mise œuvre. Il apparaît clairement que les méthodes les plus coûteuses (e.g. imagerie géophysique, forages d'exploration) sont également les seules à donner accès à l'ensemble des paramètres à évaluer. Ce type de méthodes est donc incontournable dans un programme d'exploration. Cependant, chaque projet doit également optimiser le volume de travail associé (e.g. taille de la surface couverte en imagerie géophysique, nombre/type de forages d'exploration) afin de limiter l'impact financier qu'ont de telles méthodes sur l'économie du projet.

Capacité à influencer sur le paramètre			Probabilité d'existence d'une ressource géothermale					Puissance extractible				
Méthode	Coût	Délai d'exécution	Source de chaleur	Couverture	Recharge en eau	Milieu perméable	Temps	Température	Surface	Epaisseur	Perméabilité	Porosité
Etude pétrographie du magmatisme/datation et lithologie de Petite Terre et de sa barrière corallienne	~ 50 k€	1 an	Faible	Faible	Faible	Faible	Forte	Aucune	Faible	Faible	Faible	Forte
Reconnaissance marine par ROV (dégagements de gaz et sources thermales+géochimie)	~ 500 k€	1 an	Forte	Faible	Forte	Faible	Forte	Faible	Faible	Faible	Faible	Aucune
Reconnaissance géochimique	~ 50 k€	1 an	Faible	Aucune	Aucune	Forte	Aucune	Faible	Faible	Aucune	Forte	Aucune
Etude structurale de Petite Terre	~ 50 k€	1 an	Aucune	Aucune	Faible	Forte	Faible	Aucune	Faible	Aucune	Forte	Aucune
Analyse de la sismicité récente et géodynamique	~ 50 k€	1 an	Forte	Aucune	Aucune	Forte	Aucune	Faible	Aucune	Aucune	Forte	Aucune
Etude bathymétrie/géomorphologique	~ 50 k€	1 an	Forte	Aucune	Faible	Faible	Aucune	Aucune	Faible	Aucune	Faible	Faible
Imagerie géophysique profonde (EM aéroporté, CSEM/MT, sismique passive, gravimétrie, magnétisme)	~ 300 k€	1 an	Aucune	Forte	Faible	Faible	Aucune	Faible	Forte	Forte	Faible	Faible
Intégration géologique/géophysique/géochimie/hydrogéologie - Modélisation conceptuelle et/ou numérique 3D	~ 100 k€	1 an	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte
Forage(s) de gradient thermique (< 200m)	500 - 1000 k€ / puits + mobilisation foreuse	> 2 ans	Faible	Faible	Faible	Aucune	Aucune	Faible	Faible	Aucune	Aucune	Aucune
Forage(s) d'exploration	~ 7 mln€ / puits + mobilisation foreuse	> 2 ans	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Forte	Forte	Forte

Tableau 4 : Méthodes d'exploration sélectionnées pour estimer le POS d'un projet géothermique haute température sur Petite-Terre et les trois paramètres clés du sous-sol : température, volume, porosité/perméabilité du réservoir.

Afin de dimensionner au mieux le programme d'exploration de la ressource géothermale profonde à Petite-Terre, nous proposons de réaliser une étude de la valeur de l'information collectée lors ce programme (Value Of Information en anglais ou VOI). Cette analyse modélise le flux financier du projet tout au long de son cycle de vie (de la conception à la fermeture du projet) et permet d'estimer l'impact financier d'un programme d'exploration en calculant la Valeur Monétaire Attendue (VMA) du projet, avec ou sans sa mise en œuvre (Figure 25).

Un exemple de flux de trésorerie modélisé pour une centrale géothermique de 15 MWe similaire à ce qui est envisageable à Petite-Terre est représenté sur la Figure 26. Les hypothèses en termes de coût unitaires proviennent du rapport BRGM/RP-56960-FR (Gadalia *et al.*, 2011). Ici, nous avons supposé que trois puits de production sont nécessaires à l'installation de 15 MWe. À partir de ce modèle, nous pouvons estimer la VMA du projet en cas de succès ou d'échec des forages. Nous obtenons une VMA de + 125 mln€ en cas de succès et - 20 mln€ en cas d'échec. Ces valeurs nous permettent d'estimer la VMA du projet comme la moyenne pondérée de la VMA en cas de succès et en cas d'échec par la probabilité de succès des forages (POS). L'évolution de la VMA du projet en fonction du POS est représentée sur la Figure 27.

Logiquement, plus le POS est élevé, plus la VMA du projet est forte. Il est cependant intéressant de comparer l'augmentation de la VMA pour un POS avant et après la réalisation d'une campagne d'exploration. En effet, cette valeur permet d'évaluer le bénéfice potentiel du programme d'exploration. Pour notre exemple, une augmentation de 10 % du POS permet d'augmenter de 15 mln€ la VMA du projet, ce qui revient à dire que tant que le programme d'exploration coûte moins de 15 mln€ et qu'il permet d'augmenter le POS de 10 %, il n'aura pas d'impact financier négatif sur le projet. Ce résultat est très important car il illustre le fait que pour un projet géothermique du type envisagé à Petite-Terre, les bénéfices potentiels du projet sont tels qu'ils permettent de justifier des investissements importants lors de la campagne d'exploration.

De manière plus formelle et en reprenant le formalisme énoncé sur la Figure 25, on peut généraliser que le coût d'un programme d'exploration doit être inférieur à :

$$POS_f \times VMA_{succès} + (1 - POS_f) \times VMA_{échec} - POS_i \times VMA_{succès} + (1 - POS_i) \times VMA_{échec}$$

où POS_i et POS_f sont le POS du projet avant et après la campagne d'exploration, respectivement. Cette analyse illustre bien le fait que le paramètre décisif pour la sélection d'une méthode d'exploration n'est pas uniquement son coût mais également sa capacité à influencer sur le POS du projet. Pour cela, le Tableau 4 donne des éléments pour aider à la décision. Il est aussi important de garder à l'esprit que même si un programme d'exploration

est financièrement attractif, l'abandon du projet avant sa mise en exploitation (branche négative de l'arbre sur la Figure 25) engage à financer le coût du programme d'exploration autrement que par le projet lui-même.

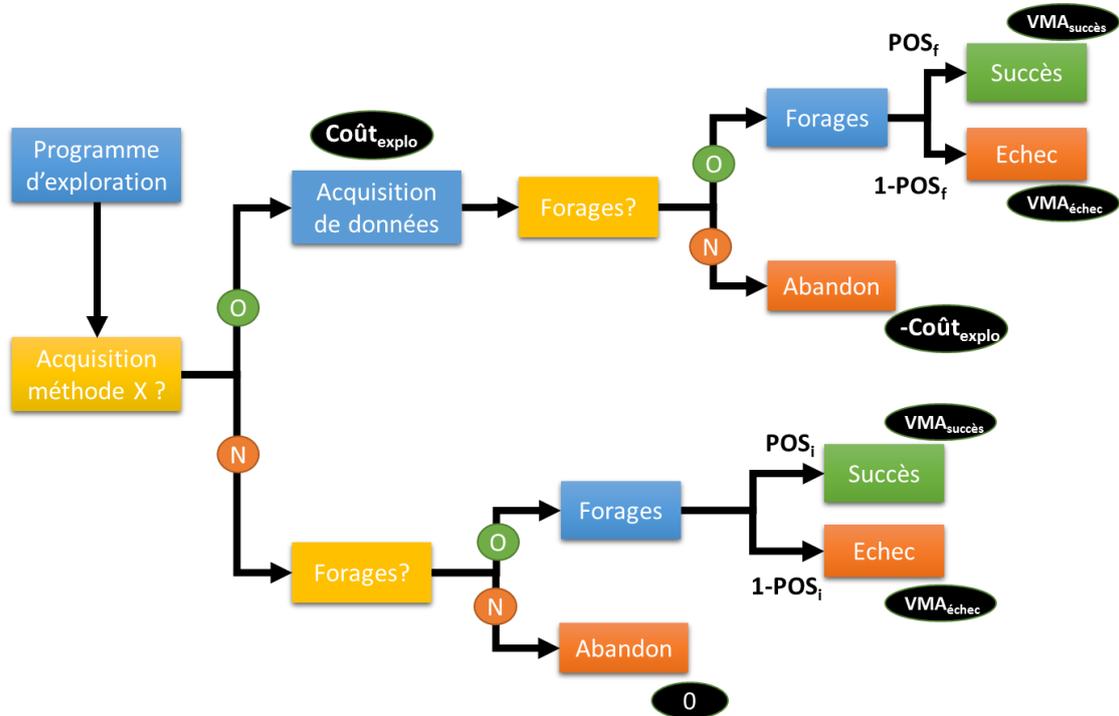


Figure 25 : Arbre décisionnel pour la mise en œuvre d'une méthode d'exploration pour un projet géothermique.

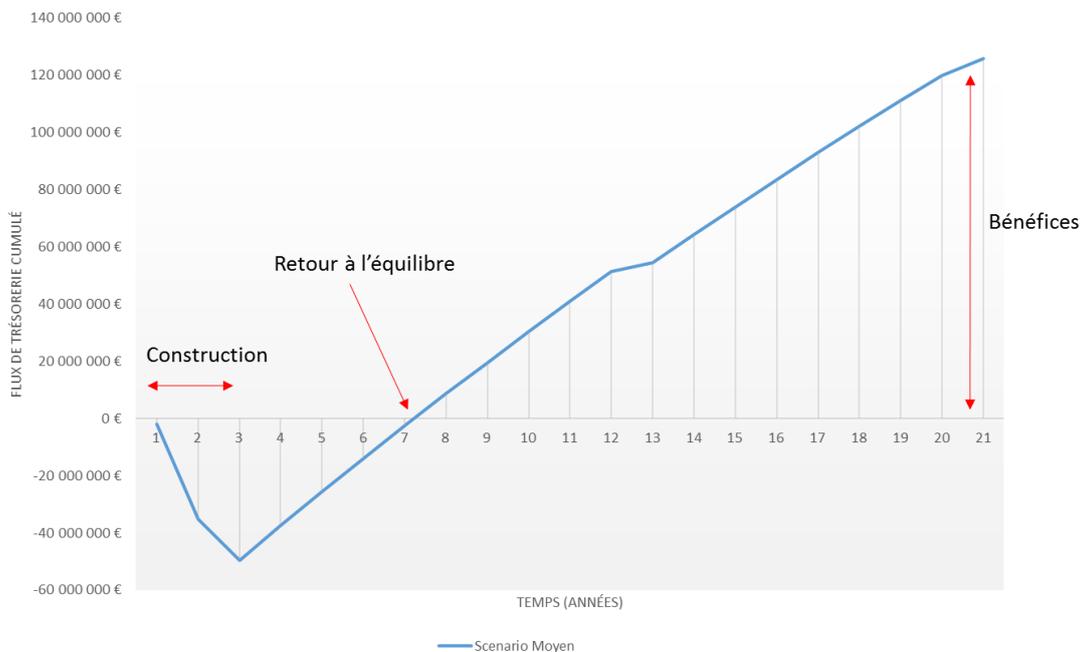


Figure 26 : Flux de trésorerie cumulé modélisé pour une centrale géothermique de 15 MWe du type envisageable à Petite-Terre.

Ce flux prend en compte l'investissement initial (CAPEX) et les coûts de maintenance annuels (OPEX).

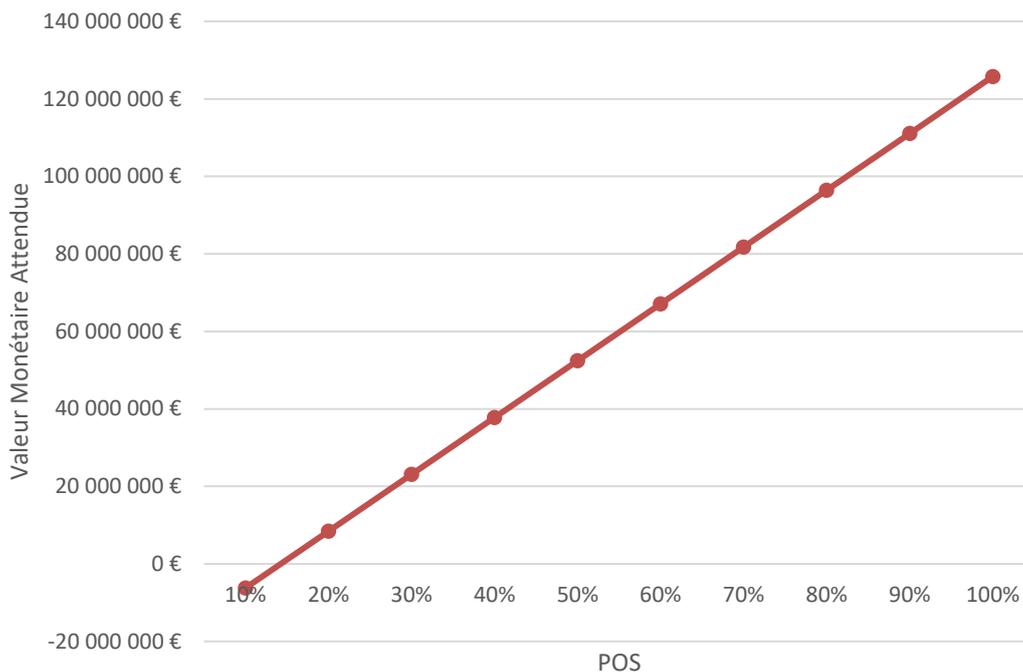


Figure 27 : Valeur Monétaire Attendue pour une centrale géothermique de 15 MWe du type envisageable à Petite-Terre en fonction du POS des forages.

3.3. CONTENU DU PROGRAMME D'EXPLORATION

Dans ce chapitre, nous avons appliqué la méthode de sélection des méthodes d'exploration décrite dans le chapitre précédent pour dimensionner au mieux un programme d'exploration de la ressource géothermique profonde de Petite-Terre. Il est tout d'abord important de rappeler que ce programme d'exploration vient en complément du programme d'exploration réalisé sur la période 2006-2008 (Sanjuan *et al.*, 2008). Ce programme a permis de réaliser des études géologiques, géophysiques, géochimiques et hydrogéologiques à l'échelle « régionale » de l'île de Mayotte et d'identifier la zone de Petite-Terre comme la zone d'intérêt majeur. Elle a également permis d'établir un premier modèle conceptuel de la ressource géothermique potentiellement présente en profondeur (> 1000 m) à Petite-Terre. La présente étude a repris ces éléments, mais également collecté de nouvelles observations géoscientifiques, qui permettent de conclure à un fort potentiel géothermique profond à Petite-Terre. Nous recommandons donc maintenant de passer à une phase d'exploration plus « ciblée » permettant de réaliser des forages d'exploration afin de quantifier la ressource exploitable (Figure 28). Ce travail nécessitera dans un premier temps de définir la position des forages et d'évaluer leur probabilité de succès à partir de nouvelles études géoscientifiques ciblées sur Petite-Terre, mais également en valorisant les observations du Réseau de Surveillance Volcanologique et Sismologique de Mayotte (REVOSIMA).

À la suite de cette première phase, tous les éléments nécessaires à la prise de décision d'investir dans les forages d'exploration proposés seront disponibles. La phase suivante consistera à réaliser les forages proprement dits (peu profonds de gradient thermique et/ou profonds dans le réservoir géothermique) afin de confirmer la présence d'une ressource géothermique exploitable et en quelle quantité. Cette information constituera un des éléments clés pour la prise de décision de passer à la phase suivante de l'exploitation de la ressource géothermique. Le premier chapitre suivant décrit les actions nécessaires à la réalisation de la première phase d'implantation et d'évaluation du POS de forages d'exploration à Petite-Terre. Le second chapitre décrit les actions nécessaires à la réalisation de forages d'exploration à Petite-Terre.

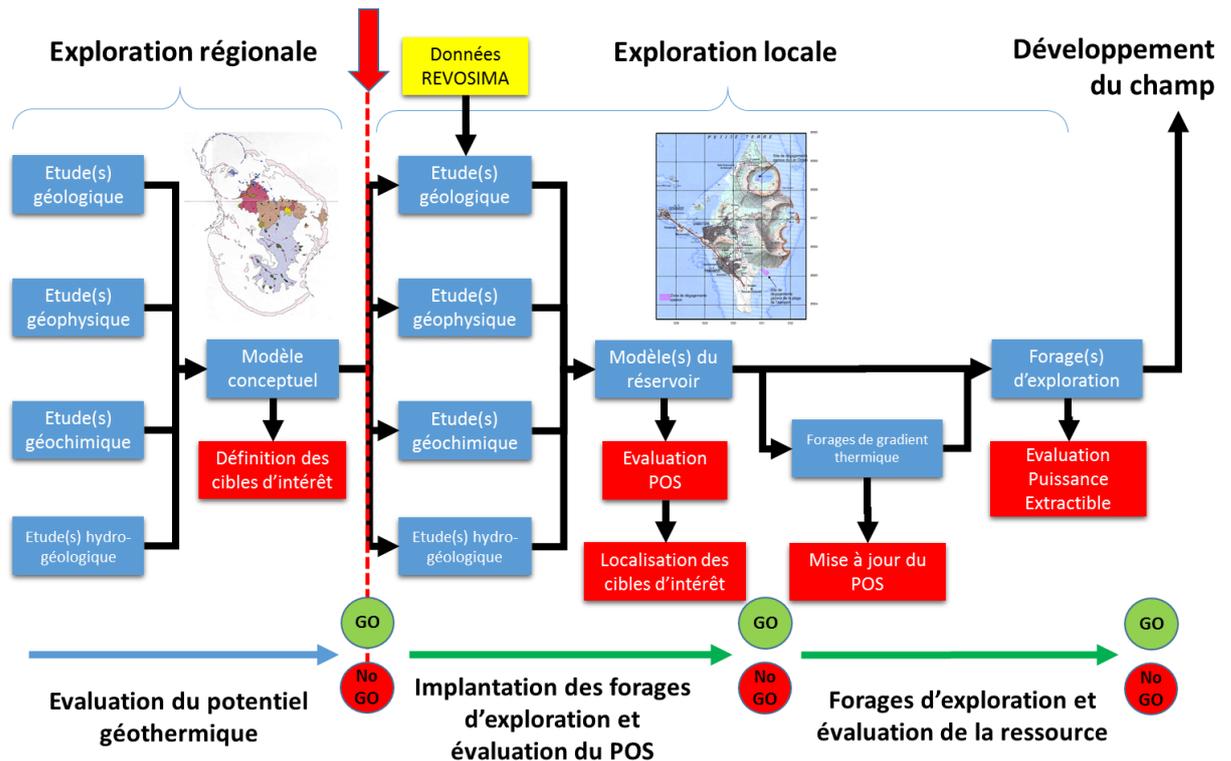


Figure 28 : Schéma conceptuel d'exploration de la ressource géothermique profonde de Petite-Terre.

3.3.1. Implantation et évaluation de la probabilité de succès de forages d'exploration

Ce premier chapitre décrit les actions nécessaires à la réalisation de la première phase d'implantation et d'évaluation de la probabilité de succès de forages d'exploration profonds à Petite-Terre (Figure 28). L'objectif de ces actions est de définir :

- la stratégie et le nombre de forages d'exploration profonds (pouvant aller jusqu'à 2 000 m de profondeur) à réaliser ;
- leurs emplacement, profondeur à atteindre, trajectoire (pour le cas éventuel de forages inclinés ou déviés) et coût ;
- la probabilité de succès de ces forages.

Pour atteindre cet objectif, nous n'avons retenu ici que les méthodes proposées dans le Tableau 4 qui n'ont pas encore été mises en œuvre dans le cadre du REVOSIMA. Pour celles qui sont en cours d'application dans le cadre du REVOSIMA, des collaborations sont envisagées avec les différents instituts impliqués (IPGS, IFREMER, CNRS, ISTO...) afin de partager les connaissances acquises.

a) Géologie structurale

L'étude géologique proposée dans ce cadre aura pour principal objectif d'estimer la perméabilité des roches et permettre d'apporter des éléments de données aux modèles hydrauliques. Pour cela, elle sera axée sur une analyse fine de la fracturation et de la minéralogie associée à cette fracturation.

Des analyses structurales ont déjà eu lieu dans le cadre des reconnaissances menées par le BRGM en 2005 et par l'Université de La Réunion dans le cadre la compréhension de la crise sismo-volcanique de 2018-2019. Dans ce cas, les acquisitions se sont focalisées sur les failles

(fractures avec mouvement) à Mayotte et dans les îles alentours afin de remonter aux états de contrainte locaux et régionaux pour comprendre des mouvements des blocs tectoniques et la géodynamique régionale. Quant à l'étude structurale de 2005 réalisée par le BRGM dans le cadre de la reconnaissance du potentiel géothermique de Mayotte, elle est très partielle et ne prend en compte que les directions des structures.

Il paraît donc essentiel de compléter ces données par une étude plus détaillée, d'une part géographiquement sur l'île de Petite-Terre avec une attention particulière sur les zones d'émanations gazeuses à l'est de l'aéroport et près du lac Dziani, et d'autre part avec des acquisitions plus complètes de données de fracturation. Ainsi, et si les conditions d'affleurement le permettent, un relevé systématique sera réalisé le long de la scanline, voire un relevé photogrammétrique manuel. La position de chaque fracture le long de la scanline, ainsi que son orientation complète (direction + inclinaison), sa dimension, son éventuelle ouverture, la description de son remplissage (minéraux, altération...) sera faite de façon précise afin de pouvoir réaliser une caractérisation complète du réseau de fractures. Cette caractérisation se fera à partir d'une étude statistique détaillée des données (familles, répartition, extension) et par l'observation minéralogique et de la porosité au microscope.

Ces résultats seront ensuite exploités afin d'estimer au mieux une perméabilité du réservoir fracturé qui pourrait être exploité en géothermie. Ils permettront également d'apporter des éléments d'information aux modèles géologique et hydraulique quant aux principaux drains de circulation et à leur hiérarchisation.

Par ailleurs, ces résultats pourront venir compléter les études prévues à plus grande échelle sur les reconnaissances des failles et des édifices volcaniques sous-marins qui sont prévues prochainement dans le cadre du projet académique financé par l'ANR COYOTTES (COmoros & maYotte : vOlcanism, TEctonics and Seismicity), coordonné par le BRGM et incluant l'université de la Réunion-IPGP, Sorbonne Université-ISTEP et l'université de Strasbourg-IPGS.

b) Géochimie des fluides

Les différentes campagnes de reconnaissance menées par le BRGM en 2005 et en 2008 et par d'autres équipes (IPGP-OVPF, etc.) en 2016 et en 2019 ont mis en évidence que la zone principale d'émanations de gaz constituées essentiellement de CO₂ d'origine magmatique (95-99 %) se trouvait sur la plage, à l'est de l'aéroport. Les flux de CO₂ décroissaient très rapidement, avec la distance du platier de cette plage et semblaient suivre plus ou moins l'alignement sud-est/nord-ouest des cônes basaltiques. Les seules autres sorties de gaz de l'île, qui indiquent des compositions chimiques et isotopiques comparables à celles de cette plage, ont été observées sur le lac Dziani.

Sachant que ces dégagements gazeux vont faire l'objet d'un suivi spatial et temporel par des équipes universitaires et de l'IPGP-OVPF, dans le cadre de la surveillance scientifique de la crise sismo-volcanique régionale actuelle, et que des analyses chimiques et isotopiques vont être également conduites par l'IFREMER en mer, les résultats analytiques obtenus au cours de cette surveillance devraient pouvoir être exploités pour acquérir une meilleure connaissance et compréhension de ces émanations gazeuses, de leur origine, de leur circulation et de leur évolution.

Un point qui intéresse tout particulièrement l'exploration géothermique est l'estimation de la température de la source de ces gaz, que l'on sait, par ailleurs, être d'origine magmatique (d'après les valeurs isotopiques $\delta^{13}\text{C}$ et $^3\text{He}/^4\text{He}$). Les premières estimations données, malheureusement, à partir de deux seules espèces gazeuses (CO₂ et CH₄), sont autour de 300 ± 25 °C, et sont à considérer avec beaucoup de précautions.

Il serait donc souhaitable de pouvoir utiliser d'autres relations thermométriques pour mieux estimer la température de la source de ces gaz, qui est un paramètre clé pour pouvoir développer la géothermie dans la région. Au cours des campagnes de reconnaissance de 2005 et 2008, aucune présence de sulfure d'hydrogène (H₂S), d'hydrogène (H₂), ni d'argon (Ar) n'avait été détectée, ce qui n'avait pas permis d'utiliser la plupart des autres géothermomètres chimiques existants (CO₂-H₂S-H₂-CH₄, H₂/Ar, CO₂/Ar... ; Serra et Sanjuan, 2004). Or, au cours de la campagne de 2019, menée par l'IPGP-OVFP, la présence de H₂S aurait été identifiée pour la première fois, seulement dans les émissions de gaz, avec le flux le plus important, situées dans le secteur le plus éloigné de la côte sur le platier de la plage, à l'est de l'aéroport.

Le BRGM se fixe, donc, pour ce nouveau programme, comme objectif principal en géochimie des gaz, de faire des mesures sur site de CO₂, CH₄, O₂, H₂S et He, avant de réaliser les prélèvements de gaz destinés à des analyses complètes en laboratoire, ceci afin d'augmenter les chances de pouvoir détecter H₂S et de ne sélectionner que les échantillons sur place contenant cette espèce pour les analyses en laboratoire. Des mesures de température accompagneront également ces analyses pour suivre ce paramètre sur place.

La plupart des mesures sur site seraient conduites sur le secteur de la plage à l'est de l'aéroport, mais quelques autres mesures seraient aussi réalisées sur les dégagements gazeux du lac Dziani. L'objectif affiché serait alors de pouvoir prélever une dizaine d'échantillons contenant du H₂S pour pouvoir ensuite faire les analyses chimiques (CO₂, N₂, O₂, CH₄, H₂S, H₂, Ar, ...) et isotopiques ($\delta^{13}\text{C}$), dans les laboratoires du BRGM.

Les émanations gazeuses seront captées à l'aide de différents dispositifs adaptés à la configuration du site (entonnoir ou canne métallique enfoncée dans le sol, avec un tube en plastique à leur extrémité pour récupérer les gaz, chambre à flux...). Les analyses sur site seront ensuite effectuées au moyen de différents appareils de terrain, suivant les espèces chimiques gazeuses analysées :

- LFG20 TELGAN portable (Infra-Rouge Non Dispersif / Electrochimie) pour les analyses de CO₂, CH₄ et O₂, avec des précisions analytiques absolues de l'ordre de 0,5 à 3 %, suivant la valeur de la concentration déterminée ;
- Dräger Xam-7000 (Électrochimie) pour les analyses de H₂S, avec des concentrations comprises entre 0 et 100 ppm, et des précisions analytiques absolues de 2 à 5 ppm, suivant la valeur de la concentration déterminée. Les espèces gazeuses CH₄ et CO₂ peuvent également être analysées au moyen de cet appareil par technologie infrarouge. On pourra également essayer de quantifier la présence de H₂ avec cet appareil par technologie électrochimique ;
- ECHO chambre à flux pour les analyses de CO₂, CH₄ et O₂ (Infra-Rouge Non Dispersif / Electrochimie), avec des précisions analytiques relatives de 2 % pour CO₂ et O₂, et 5 % pour CH₄ ;
- spectromètre de masse ALCATEL, type ASM100, pour l'analyse de He, avec une précision analytique absolue de 0,02 ppm. Les analyses seront effectuées le soir, à partir de sacs en téflon Tedlar, qui auront été utilisés pour faire les prélèvements de gaz sur site, pendant la journée.

Les prélèvements de gaz destinés aux analyses dans les laboratoires du BRGM seront conditionnés sur place et leur conditionnement sera adapté en fonction des valeurs des mesures acquises sur site (ampoules de 250 ml, cartouches, etc.).

Les analyses des espèces chimiques gazeuses majeures seront effectuées dans les laboratoires du BRGM par chromatographie en phase gazeuse, avec une précision analytique de l'ordre de 3 % pour l'analyse de CO₂, N₂, O₂, Ar, CH₄, C₂H₆, C₃H₈ et les autres dérivés, et

de 5 % pour la détermination de H₂, He et H₂S. L'analyse isotopique de δ¹³C du CO₂ sera effectuée par spectrométrie de masse en phase gazeuse (spectromètre MAT252, Finnigan/Thermo), après séparation du CO₂ des échantillons, et avec une incertitude analytique absolue de 0,1 ‰ vs PDB (Pee Dee Belemite, qui est l'étalon standard international).

Les résultats analytiques obtenus seront ensuite exploités pour obtenir la meilleure estimation possible de la température de la source profonde des émanations de gaz observées sur la plage, située à l'est de l'aéroport, et sur le lac Dziani, en utilisant le plus grand nombre possible de relations thermométriques existantes dans la littérature, et en analysant leur concordances/divergences afin de consolider et affiner l'estimation de la température recherchée. Par ailleurs, les résultats analytiques obtenus pourront également être comparés à ceux acquis par l'IFREMER en mer, si cela est possible, pour examiner s'il existe des liens communs entre les émanations de gaz à terre et celles en mer, et si ces liens sont confirmés, mieux comprendre le fonctionnement du système hydrothermal dont ils dépendent.

c) Imagerie géophysique

Petite-Terre a fait l'objet d'une prospection géophysique (magnétique et gravimétrie) qui a permis de cartographier à grande échelle les ensembles structuraux de ce secteur. Elle a été complétée par des mesures électriques mais leur faible profondeur d'investigation (< 1 000 m) n'a pas permis d'imager le réservoir géothermique profond.

L'étape suivante, nécessaire dans cette phase visant à l'implantation précise de forages d'exploration profonds, nécessite d'augmenter la profondeur d'investigation et la couverture spatiale des mesures électromagnétiques, aussi bien à terre qu'en mer. La campagne électromagnétique test a été réalisée en mai 2019 et a conclu à la validité de mesures électromagnétiques passives (magnétotelluriques ou MT) sur certaines zones inhabitées mais également à la nécessité de mettre en œuvre des mesures électromagnétiques actives (CSEM : Controlled-Source Electro-Magnetic) à proximité ou dans les zones habitées afin de s'affranchir des problèmes liés au bruit électromagnétique ambiant (lignes électriques, installations militaires, aéroport). Il a été également démontré que les mesures MT et CSEM en mer sont possibles et nécessiteront des appareils spécifiques développés par la société MAPPEM Geophysics.

L'objectif est donc de réaliser une campagne de mesures électromagnétiques (MT et CSEM) couvrant toute l'île de Petite-Terre (Figure 29). Ces mesures couvriront également le lagon autour de Petite-Terre où le réservoir géothermique semble s'étendre. Enfin, deux sources électromagnétiques artificielles seront déployées au nord et au sud de l'île afin de s'affranchir de tout problème de résolution lié à la présence de bruit électromagnétique d'origine anthropique. Ces mesures devront être réalisées pendant la saison sèche et au moment où les alizés sont les plus faibles afin de minimiser l'impact des intempéries.

Ces mesures permettront d'obtenir in-fine un cube de conductivité électrique 3D haute résolution de la zone d'intérêt (d'environ 4 x 6 km de côté x 2 km de profondeur) et ainsi d'optimiser le positionnement des forages d'exploration (en évitant par exemple les structures géologiques peu perméables telles que les intrusions magmatiques cristallisées ou dykes).

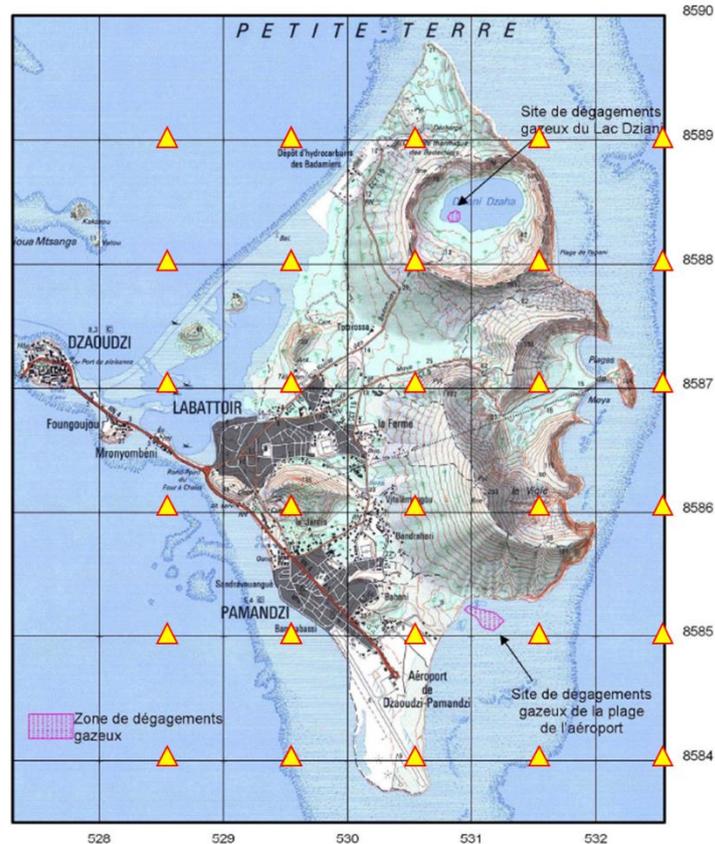


Figure 29 : Campagne de mesures CSEM/MT 3D proposée pour l'optimisation de l'implantation de forages d'exploration géothermique dans la région de Petite-Terre.

Les positions réelles des stations (triangles jaunes) seront définies en fonction des contraintes logistiques et administratives.

d) Intégration et modélisation statique 3D de la ressource géothermale

Afin de pouvoir implanter avec précision les forages d'exploration, il est nécessaire de réaliser un modèle conceptuel 3D du système géothermique intégrant l'ensemble des données existantes en géologie et géophysique, et en particulier le cube de conductivité électrique 3D, mais également toutes les observations géoscientifiques collectées dans le cadre de la crise sismo-volcanique actuelle. Le logiciel GeoModeller, développé au BRGM et permettant de modéliser des structures géologiques complexes, sera utilisé dans le but d'intégrer les données et interprétations des différentes approches complémentaires. Ce type de modèle est un prérequis indispensable à la modélisation hydrothermique décrite dans la section suivante et dans l'hypothèse du développement de ce champ à l'issue de la campagne de forages d'exploration, pour l'évaluation des ressources disponibles. Il permettra également de réaliser une analyse croisée des différents résultats de type « expert-driven » en 3D afin d'identifier les cibles d'intérêt géothermique les plus probables.

Il est attendu de pouvoir développer un modèle géologique 3D, qui a pour but d'imaginer en 3D les objets du système géothermique (réservoir, cap-rock, manifestations de surface, failles, dykes...) et qui résulte de la confrontation interdisciplinaire des résultats acquis en géologie, géochimie, géophysique. L'emprise du modèle sera d'environ 4x6x2 km.

e) Modélisation hydro-thermique de la ressource géothermale

Le modèle géologique 3D ne donnant qu'une vision statique du système géothermique, il convient d'aborder les aspects dynamiques par de la modélisation hydrodynamique et thermique 3D afin de valider les hypothèses émises quant à la géométrie du réservoir, la position/l'extension de la source de chaleur mais aussi sur l'importance des principales structures drainantes (e.g. failles majeures), tout en tenant compte du contexte insulaire (eau de mer). Pour cela, le modèle hydro-thermique employant une approche hybride (2D-3D) permettra l'intégration des différents objets du système géothermique (failles, cap-rock, réservoir, ...) et découlera donc du modèle géologique 3D. Les résultats seront confrontés aux observations hydrogéologiques et géochimiques en surface et/ou en forage. Ces simulations devraient permettre d'apporter des contraintes sur le fonctionnement global du système hydrothermal et ainsi permettre de préciser la géométrie et la position des cibles géothermiques identifiées sur le modèle géologique 3D.

Ce modèle hydro-thermique 3D sera également utilisé pour estimer l'intérêt et aider à la décision de la position des forages de gradient thermique envisagés. En effet, ceux-ci doivent être capables de caractériser les transferts de chaleur se faisant par conduction et par convection dans le système géothermique.

f) Définition de la stratégie de la campagne de forages, des implantations et des caractéristiques des forages d'exploration

À partir des modèles 3D du système géothermique, l'objectif de cette dernière étape est de définir la stratégie des campagnes de forages d'exploration profonds et notamment le nombre de forages nécessaires pour estimer les ressources géothermales présentes. À travers une étude d'avant-projet sommaire, elle s'emploiera à définir les caractéristiques techniques et une estimation budgétaire plus fine que la présente étude, des forages (profondeur, diamètre et angle, pour le cas d'éventuels forages inclinés ou déviés) et leur emplacement, tout en prenant en compte les contraintes opérationnelles et réglementaires.

Les livrables seront une carte d'implantation, des schémas techniques, une évaluation budgétaire et un planning de réalisation des forages d'exploration profonds pertinents pour aller reconnaître les ressources géothermales présentes.

g) Budget et chronogramme prévisionnels

Le budget prévisionnel nécessaire à la réalisation de l'étude d'implantation et d'évaluation de la probabilité de succès de forages d'exploration à Petite-Terre est estimé à 500 k€ HT. Les différents postes de dépenses sont explicités sur le Tableau 5. La durée de l'étude est estimée à deux ans (Tableau 6).

Actions	Budget prévisionnel (en k€ HT)
Géologie	40 k€
Géochimie	40 k€
Géophysique	300 k€
Intégration et modélisation statique 3D	40 k€
Modélisation hydro-thermique	30 k€
Préparation campagne de forages	50 k€
Total	500 k€

Tableau 5 : Budget prévisionnel pour l'étude d'implantation et d'évaluation de la probabilité de succès de forages d'exploration à Petite-Terre.

Actions	N-1		Année N											
	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Géologie			■	■	■	■	■	■						
Géochimie			■	■	■	■	■	■						
Géophysique						■	■	■	■	■	■	■		
Intégration et modélisation statique 3D													■	■
Modélisation hydro-thermique														
Préparation campagne de forages														

Actions	N		Année N + 1											
	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Géologie														
Géochimie														
Géophysique														
Intégration et modélisation statique 3D	■	■	■	■	■	■	■	■						
Modélisation hydro-thermique					■	■	■	■	■					
Préparation campagne de forages														

Tableau 6 : Chronogramme prévisionnel pour l'étude d'implantation et d'évaluation de la probabilité de succès de forages d'exploration à Petite-Terre.

3.3.2. Forages d'exploration

À la suite de la phase d'implantation et d'évaluation de la probabilité de succès de forages d'exploration profonds à Petite-Terre, la phase suivante consistera à préparer et réaliser ces forages. Ce chapitre présente les aspects suivants de cette action :

- a. choix du ou des types de sondages d'exploration (coupe technique, trajectoire, diamètre...) en fonction des caractéristiques de la cible d'exploration ;
- b. présentation des conditions de réalisation d'un programme de sondages d'exploration sur l'île de Petite-Terre à Mayotte ;
- c. estimation préliminaire du coût de réalisation d'un programme d'exploration par sondages ;
- d. planning prévisionnel de réalisation ;
- e. aperçu du cadre réglementaire.

h) Choix du type de sondage

- **Contraintes géologiques**

Le choix du type de sondage à réaliser est tributaire des connaissances ou des hypothèses faites sur la localisation de la cible à explorer. La Figure 30 illustre les formations attendues à l'aplomb de Petite-Terre. Sous les formations calcaires de la barrière récifale, le substratum est probablement constitué de formations volcaniques sous-marines où alternent des laves massives (coulées de lave, intrusions), des hyaloclastites (formations volcaniques sous-marines bréchifiées) et des formations volcano-sédimentaires.

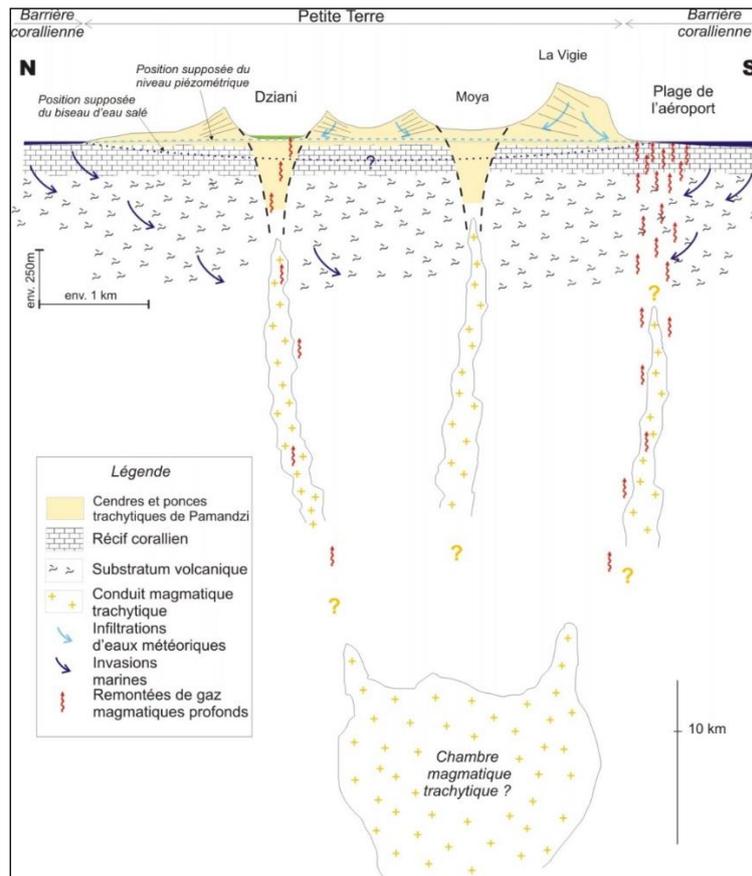


Figure 30 : Section verticale interprétative orientée nord-sud à travers l'île de Petite-Terre montrant la géologie du substratum et les liens possibles entre dégagements gazeux et activité magmatique récente.

Les conditions de perméabilité sont probablement très élevées au sein des formations récifales superficielles qui doivent être envahies par l'eau de mer. Au sein du substratum volcanique, elles sont très mal appréhendées et très probablement limitées à la fracturation tectonique.

La profondeur de la cible n'est pas contrainte avec précision. Le seul indice disponible est fourni par les résultats des campagnes de géophysique qui ont détecté un changement de résistivité électrique vers 800 m de profondeur. Ce changement pourrait être interprété comme une interface entre la couverture et le toit d'un réservoir géothermique. Il conduit à fixer une profondeur minimale pour des sondages de reconnaissance de l'ordre de 1 000-1 500 m, avec un sabot du cuvelage interne vers 700-800 m.

- **Objectifs d'un programme de sondages d'exploration**

L'objectif d'un programme de sondages d'exploration est de confirmer ou non l'existence d'une ressource géothermale en profondeur. Généralement, les principaux résultats attendus de ces sondages sont :

- l'établissement de la colonne lithologique ;
- le relevé de la fracturation en profondeur et le prélèvement de produits de l'altération hydrothermale ;
- la localisation des zones perméables ;
- la mesure de profils de température et de pression en fonction de la profondeur, et éventuellement la réalisation de diagraphies différées et imageries de paroi ;
- l'obtention de données sur l'injectivité et la productivité des zones perméables rencontrées, à travers un programme d'essai adapté ;
- le prélèvement du fluide géothermal profond ;
- une mise à jour de l'estimation de la ressource géothermale exploitable.

Outre les informations sur la présence et la qualité d'une ressource géothermale, ces informations seront déterminantes pour configurer d'éventuels puits de développement qui permettront d'exploiter la ressource géothermale.

- **Type de sondages préconisé**

Au vue de la profondeur cible (1 000-1 500 m) et l'objectif assigné à ces sondages d'exploration géothermiques, le type de puits qui apparait comme étant le mieux adapté est un puits foré en diamètre 6"1/4 au niveau du réservoir et doté d'un cuvelage en 7" jusqu'à environ 800 m de profondeur. Ce diamètre final permet d'envisager la réalisation d'essais d'injectivité et des tests de production représentatifs des caractéristiques du milieu. Il permet également de réaliser des diagraphies standard et des imageries de paroi de la section en trou nu.

En l'absence de cible précise à atteindre et sans connaissances précises de la lithologie du substratum et de l'orientation des structures tectoniques principales qui pourraient être des zones de circulation préférentielle des fluides, il est préconisé de réaliser des puits verticaux. Ce type de puits est parfaitement approprié à la première reconnaissance d'un prospect. Il réduit le coût de forage. Il réduit également les difficultés lors de la foration et facilite l'atteinte de la profondeur visée (1 000-1 500 m).

Pour les mêmes raisons budgétaires et de chance d'atteindre la profondeur cible, il est préconisé de réaliser ces puits en forage destructif plutôt qu'en carottage.

- **Nombre de puits**

À ce stade, le nombre de puits à réaliser reste ouvert. Pour cette raison, deux options de programmes d'exploration sont envisageables :

- un programme comportant la réalisation d'un puits unique ;
- un programme comportant la réalisation de trois puits situés sur des plateformes distinctes.

- **Coupe technique préconisée**

La coupe technique préconisée pour ce ou ces sondages d'exploration profonds est donnée sur la Figure 31 et détaillée dans le Tableau 7.

Le programme d'exploration géothermique de l'île de Petite-Terre par sondage profond sera localisé dans une zone qui n'a pas encore été reconnue par sondage profond. Cette coupe technique prévisionnelle est donc susceptible d'évoluer au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles données géoscientifiques sur ce prospect. Elle est également susceptible d'évoluer au fur et à mesure de l'avancement des travaux de forage. Ceci concerne tout particulièrement les profondeurs d'arrêt des différentes phases de forage et bien évidemment la profondeur finale des ouvrages.

Phases	Profondeur (m)	Forage	Cuvelage	Cimentation
Avant-trou	20	17''1/2	13''3/8	oui
Phase 1	300	12''1/4	9''5/8	oui
Phase 2	800	8''1/2	7	oui
Phase 3	1000-1500	6''1/4	Liner 4''1/2	non

Tableau 7 : Programme de forage proposé pour des sondages d'exploration géothermique profonds sur l'île de Petite-Terre à Mayotte.

De 0 à 20 m de profondeur environ, il est prévu de forer un avant-trou (avec la machine de forage) qui sera tubé en 13''3/8. Cet avant-trou couvrira des formations volcaniques récentes, peu consolidées et perméables.

De 20 m à 300 m de profondeur environ, il est prévu de forer en diamètre 12''1/4 et de tuber en 9''5/8. Cette phase traversera les formations de calcaire récifal plus ou moins consolidées et susceptibles de donner lieu à des pertes importantes pendant la foration. Il est donc important de la couvrir pour la suite des travaux. Au niveau de cette phase, les conditions de température attendues sont faibles.

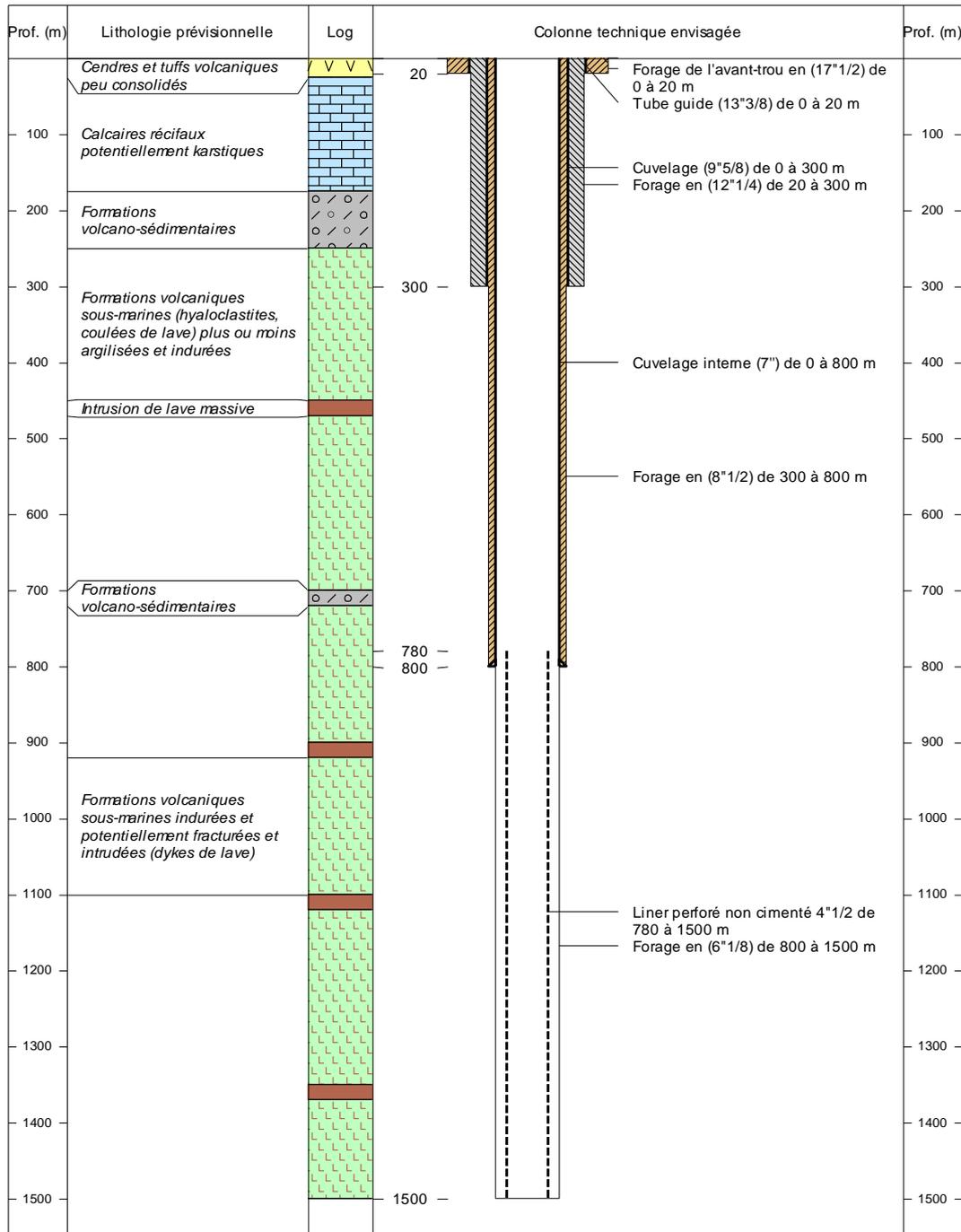


Figure 31 : Coupe technique prévisionnelle des sondages d'exploration géothermique profonds sur l'île de Petite-Terre à Mayotte.

De 300 à 800 m de profondeur environ, il est prévu de forer en diamètre 8"1/2 et de tuber en 7". Les formations traversées lors de cette phase seront des formations volcaniques sous-marines (hyaloclastites, coulées de lave, intrusions, ...) plus ou moins bréchifiées et argilisées. Elles sont considérées comme étant compactes et peu perméables, sauf au niveau d'éventuelles zones fracturées. Les conditions de température attendues peuvent progressivement augmenter avec la profondeur et dépasser 100 °C si le puits traverse la couverture d'un réservoir géothermal.

De 800 m de profondeur à la cote finale, il est prévu de forer en 6"1/4. Des zones fracturées perméables et altérées avec un fluide géothermal à température élevée, peuvent être rencontrées. Cette section pourra éventuellement être couverte par un liner perforé en 4"1/2 si elle montre des signes d'instabilités.

i) Programme de forage

- **Technique de forage retenue**

Comme indiqué précédemment, il est préconisé de privilégier la méthode du forage destructif plutôt que le carottage. La traversée d'éventuelles zones fracturées et hydrothermalisées sera facilitée et les chances d'atteindre la profondeur cible seront plus élevées.

À ce stade, on considère que l'avant-trou (phase 1) sera foré avec la même machine de forage que les phases plus profondes. Lors de l'étude d'avant-projet, l'intérêt éventuel de forer cet avant-trou avec des moyens de forages légers disponibles sur place pourra être examiné.

Le fluide de forage sera à base de bentonite pour les phases 1 et 2. Le forage de la phase 3, correspondant à la traversée d'un éventuel réservoir, devrait se faire à l'eau avec des bouchons de polymères périodiques pour nettoyer le puits.

- **Moyen de forage retenu**

Le type de machine de forage qui peut être retenu pour réaliser un puits vertical à 1 500 m de profondeur est le rig HH102 construit par Drillmec (Italie) qui est illustré sur la Figure 32 ci-dessous. Ses caractéristiques techniques sont données dans le Tableau 8.



Figure 32 : Vue d'un chantier de forage mettant en œuvre le rig HH102 de Drillmec.

MODEL		HH102	
INPUT POWER	Kw	575	
	Hp	780	
STATIC HOOK LOAD CAPACITY	m ton	100	
	lbs	220000	
MAX PULL DOWN	m ton	20	
	lbs	44000	
MAX HEIGHT FROM GROUND LEVEL	m	26,4	
	ft	86,8	
CLEAR HEIGHT FROM RT LEVEL	m	16	
	ft	52,5	
RT RATED CAPACITY	m ton	100	
	lbs	220000	
TOP DRIVE DATA	CAPACITY	m ton	100
		lbs	220000
	RPM MAX	N	154
	MAX TORQUE	daNm	3584
ft lbs		26435	
DRILLING LINE DATA	LINE	N	2
	NOMINAL DIAMETER	mm	34
	BREAKING STRENGTH	m ton	112
		lbs	247430
VERTICAL PIPE RACK CAPACITY	DP 3 1/2"	m	2900
		ft	9500
	DP 5"	m	1800
		ft	5900
	DC	m	110
		ft	360

Tableau 8 : Caractéristiques techniques du rig HH102 construit par Drillmec.

- **Contraintes liées à la température et à la présence de fluides hydrothermaux**

La possibilité d'avoir des venues de fluide à température élevée pendant le forage est envisagée. Il est donc nécessaire de prévoir un dispositif de type BOP (Bloc Obturateur de Pression) en tête de puits pendant le forage.

La qualité des fluides qui seront rencontrés en profondeur est inconnue, notamment en ce qui concerne leur teneur en gaz magmatiques (HCl, H₂S, ...) pouvant représenter un risque de corrosion pour les matériaux métalliques. À ce stade, il a été considéré que le ou les puits seraient équipés de tubage et cuvelages standard en acier au carbone. Lors de l'étude d'avant-projet, la nécessité d'utiliser une métallurgie particulière pour les cuvelages et tubages métalliques devra être évaluée.

- **Aspects logistiques**

-  Accès routier

L'équipement de forage sera monté sur camion au gabarit routier. En fonction de l'implantation de la ou des plateformes de forage, l'aménagement d'une piste d'accès peut être nécessaire.

À ce stade, les implantations de puits ne sont pas encore connues. Le coût de cet aménagement n'a donc pas été pris en compte.

Génie civil

La surface d'une plateforme de forage est de l'ordre de 3 000 m². Le coût de son aménagement sera fonction des conditions locales de topographie et des caractéristiques des sols.

À ce stade, faute de connaître l'emplacement des puits, il est encore difficile de chiffrer précisément le coût de ces travaux de génie civil.

Alimentation en eau

Les travaux de forage nécessitent un approvisionnement en eau continu pour la préparation du fluide de foration (boue de forage). Les besoins en eau peuvent aller de 10 à 100 m³/h en fonction des phases de forage et de l'importance des pertes dans la formation. Au niveau de Petite-Terre, deux solutions sont envisageables :

- 1) une alimentation en eau douce par pompage dans un puits existant ou à réaliser ;
- 2) une alimentation en eau de mer par pompage.

À ce stade, la solution qui serait retenue n'est pas encore déterminée. Il est encore difficile de chiffrer précisément le coût de ce poste.

Alimentation en énergie

Le chantier de forage nécessite une alimentation en électricité et en air pour le fonctionnement des organes électriques et pneumatiques. Cette énergie sera fabriquée sur place par les groupes électrogènes et les compresseurs de l'entreprise de forage.

Évacuation des déchets solides et liquides

Les opérations de forage vont générer des déchets solides (déblais de forage) et liquides (boues de forage) qui devront être évacués vers des centres de traitement agréés. Il faut donc prévoir des coûts de transport et de traitement de ces déchets qui seront fortement dépendants des conditions locales (distance au centre de traitement, frais de mise en décharge, ...). À ce stade préliminaire, ils sont encore difficiles à chiffrer précisément.

Stockage des effluents liquides lors des tests de production

La réalisation de tests de production nécessitera le stockage temporaire des effluents liquides déchargés par le ou les puits avant leur réinjection dans ces mêmes puits. Des bassins de stockage équipés d'une bâche étanche seront à prévoir. Ils seront dimensionnés en fonction des volumes envisagés.

À ce stade, il est encore difficile de chiffrer précisément le coût de ces bassins.

• Remise en état des sites

À l'issue des travaux de forage, l'entreprise de forage démontera son matériel et effectuera son repli. Les déchets seront évacués vers des centres de traitement agréés.

Les plateformes de forage seront conservées ou remises en état selon le choix du maître d'ouvrage et les préconisations de l'étude d'impact.

Le coût de ces travaux n'est pas encore estimable à ce stade.

- **Suivi géologique**

Pendant le forage, un suivi géologique est généralement assuré pour renseigner l'entreprise de forage et la supervision forage sur la nature des formations traversées. Il permet également de détecter les indices de l'existence d'une ressource géothermale.

- **Mesures et essais**

Pendant le forage, des mesures de température sont réalisées régulièrement afin de détecter l'existence de température élevées qui pourraient témoigner de l'approche d'un réservoir géothermique haute température.

À la fin du forage, un programme d'essais est généralement réalisé. Il inclut :

- un essai de perte d'eau ou « Water loss test » pour identifier les zones perméables ;
- des essais d'injectivité pour déterminer l'indice d'injectivité et la transmissivité du puits ;
- des profils de pression et température à intervalles réguliers lors de la phase de récupération thermique, lorsque l'injection d'eau sera stoppée ;
- un essai de production de quelques jours si les contraintes environnementales le permettent ;
- la collecte du fluide géothermal (phases vapeur, liquide et gaz).

Les principaux équipements qui seront utilisés seront les suivants :

- les moyens de pompage de l'entreprise de forage et un approvisionnement en eau ;
- un treuil de mesures et des sondes de pression et température ;
- un équipement de test de production comportant une ligne de test équipée d'une vanne de régulation, un séparateur/silencieux, un bac déversoir, un bassin permettant le stockage temporaire des effluents liquides ;
- un équipement de prélèvement du fluide géothermal déchargé par le puits.

En complément, des diagraphies lithologiques (densité, porosité, résistivité, radioactivité...) peuvent être réalisées dans la section non tubée afin de caractériser les diverses lithologies traversées et mettre en évidence les zones fracturées et altérées. Parallèlement, des imageries de paroi peuvent être réalisées afin de mesurer l'orientation et le pendage des fractures. Le coût de ces diagraphies est fortement tributaire des conditions de température et il n'a pas été chiffré à ce stade.

- **Planning de réalisation indicatif**

Un planning indicatif des travaux d'un programme de trois sondages d'exploration géothermique profonds sur l'île de Petite-Terre à Mayotte est donné Figure 33.

Ce planning prend en compte uniquement les travaux de forages et d'essais, depuis la préparation des plateformes jusqu'à la remise en état du site. Il ne prend pas en compte les temps nécessaires pour l'obtention des autorisations administratives, ni les temps nécessaires aux appels d'offres, sélection des entreprises et passation des marchés.

La durée prévisible de réalisation d'un forage est de l'ordre de 45 jours.

	Durée (jours)	Mois 1	Mois 2	Mois 3	Mois 4	Mois 5	Mois 6	Mois 7	Mois 8	Mois 9
Préparation de la plateforme	30									
Montage de la machine de forage	15									
Forage du premier puits	45									
Tests du premier puits	5									
Ripage de la machine sur 2nd puits	10									
Forage du second puits	45									
Tests du second puits	5									
Ripage de la machine sur 3ème puits	10									
Forage du troisième puits	45									
Test du troisième puits	5									
Démobilisation machine de forage	15									
Nettoyage et remise en état du site	15									

Figure 33 : *Planning indicatif des travaux d'un programme de trois sondages d'exploration géothermique profonds sur l'île de Petite-Terre à Mayotte.*

- **Estimation de la ressource géothermale exploitable**

Au vu des résultats obtenus dans les forages d'exploration, une estimation de la ressource géothermale exploitable sera réalisée (P10, P50, P90 de la puissance extractible). Pour cela, les nouvelles données collectées dans les forages seront intégrées aux modèles géologiques statique et hydro-thermique dynamique afin de déterminer la géométrie et la capacité du réservoir géothermal. Différentes hypothèses sur le type de centrale géothermique à développer (e.g. directe, simple/double flash, binaire/ORC, de type Kalina) seront testées afin de proposer le type d'exploitation le mieux adapté au contexte de Petite-Terre. Enfin, la probabilité de succès du développement de cette ressource sera également estimée. Cette étude doit se réaliser en parallèle des travaux de forages afin de confirmer le programme (notamment le nombre de puits d'exploration) en fonction des résultats obtenus. Le coût estimé de ce travail est de l'ordre de 100 k€.

- **Aspects réglementaires**

La réalisation de sondages d'exploration géothermiques profonds est encadrée par le Code Minier et ses décrets et arrêtés spécifiques d'application. La procédure habituelle comporte :

- la préparation et le dépôt d'un dossier de demande de Permis Exclusif de Recherches (PER), dont les modalités sont définies par le décret n° 2006-648 du 2 juin 2006 relatif aux titres miniers et aux titres de stockage souterrain ;
- la préparation et le dépôt d'un dossier de Demande d'Autorisation d'Ouverture de Travaux Miniers (DAOTM) dont les modalités sont définies par le décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains.

Ces dossiers comportent entre autres volets une étude d'impact environnementale des travaux de forage, abordant également les impacts environnementaux des travaux d'exploitation de la ressource géothermale à venir.

Le démarrage des travaux de forage est conditionné par l'obtention préalable d'un arrêté préfectoral d'autorisation d'ouverture de travaux de forage. La durée nécessaire à la préparation de ces dossiers, à leur instruction et à l'obtention des autorisations est de l'ordre de 1 an.

- **Évaluation budgétaire**

Sur la base du programme de forages présenté, une évaluation budgétaire préliminaire des travaux a été faite et est présentée dans le Tableau 9 ci-dessous. Elle distingue le coût du premier forage qui inclut les coûts d'amenée-repli d'un équipement complet de forage depuis la métropole, du coût des deux forages suivants qui bénéficieront de sa présence sur site :

- le coût de réalisation d'un puits unique de 1 500 m de profondeur et tubé en 7" est évalué entre 4,24 M€ et 5,67 M€ ;
- le coût de réalisation d'un programme de trois puits de 1 500 m de profondeur et tubés en 7" est évalué entre 9,760 M€ et 13,235 M€.

Il s'agit d'une première estimation basée sur un certain nombre d'hypothèses qui ont été faites en tenant compte du contexte insulaire de Mayotte et de Petite-Terre. Pour obtenir un chiffrage plus précis, il serait nécessaire de réaliser une étude d'avant-projet sommaire.

Poste de dépenses	1er puits	2nd puits	3ème puits
Accès routier	non chiffré	non chiffré	non chiffré
Aménagements plateforme	100-250	100-250	100-250
Approvisionnement en eau	50-100	50-100	50-100
Bassin de stockage des effluents	50-100	50-100	50-100
Amenée repli équipements de forage	1000-1300		
Amenée repli équipements de service	200-300		
Transfert du rig entre puits		100-120	100-120
Travaux de forage	1600-2000	1600-2000	1600-2000
Traitement des déchets	100-150	100-150	100-150
Supervision forage	180-200	180-200	180-200
Suivi géologique	60-80	60-80	60-80
Mesures , tests et essais	200-250	60-80	60-80
Diagraphies	non chiffrées	non chiffrées	non chiffrées
sub-total	3540-4730	2610-3350	2610-3350
Ingénierie (10% des travaux)	350-470	230-320	230-320
TRC (9% travaux et ingénierie)	350-470	230-310	230-310
Coût total par puits	4240-5670	2760-3790	2760-3790
Coût pour 3 puits			9760-13250

Tableau 9 : Évaluation préliminaire des coûts d'un programme de sondages d'exploration géothermique profonds à Petite-Terre (coûts en k€).

j) Forages de gradient thermique

Si les modélisations hydro-thermiques prévues dans la phase d'implantation des forages d'exploration mettent en évidence qu'un gradient de température est attendu dans la zone de 0 à 200 m, alors des forages peu profonds de gradient thermique auront comme objectif de le confirmer. Si les modélisations montrent que les hautes températures restent confinées en profondeur, alors deux options seront possibles : soit un ou plusieurs forages de gradient thermique seront réalisés pour confirmer que le système profond n'a pas de signature propre en surface, mais aussi pour confirmer la nature du cap-rock sur cette profondeur, soit les forages de gradient thermique sont annulés et la phase de forages d'exploration profonds peut commencer.

Les forages de gradient thermique consistent à creuser un puits de petit diamètre (≈ 10 cm) jusque 150 à 200 m de profondeur afin de réaliser des diagraphies de température et de conductivité électrique, mais aussi d'échantillonner les formations géologiques traversées ainsi que les fluides rencontrés (eau et gaz). Une attention toute particulière sera portée à la caractérisation des altérations géothermales afin de différencier d'éventuelles paléo-altérations des altérations actuelles. À partir des mesures de température, il est attendu de pouvoir localiser les anomalies thermiques superficielles associées au système géothermal profond et ainsi optimiser la position des forages d'exploration profonds. Il est également attendu de mettre à jour le modèle 3D du système géothermique à la lumière des nouvelles informations géologiques, géophysiques, géochimiques et hydrogéologiques obtenues dans les forages.

Le coût de tels forages de gradient thermique à Petite-Terre est estimé entre 240 et 400 k€ avec les différents postes suivants :

- sous-traitance entreprise de forage et diagraphie (estimation, à moduler en fonction du nombre de forages, leurs profondeurs et caractéristiques) : 150 k€ à 250 k€ ;
- suivi géologique et technique, analyses (estimation) : 50 à 70 k€ ;
- caractérisation des altérations hydrothermales : 20 à 40 k€ ;
- synthèse, conclusions, mise à jour de la stratégie de la campagne de forages profonds, rédaction du rapport, présentation des résultats, gestion de projet et réunions : 20 à 40 k€.

4. Conclusions

Le programme d'exploration géothermique réalisé par le BRGM entre 2005 et 2008 à Mayotte a identifié la zone de Petite-Terre comme le secteur présentant des indices d'une potentielle ressource géothermale active profonde (> 1 000 m) de haute température (> 200 °C) susceptible d'être utilisée pour la production d'électricité. Ces indices indiquaient par ailleurs la présence d'une chambre magmatique profonde, ce qui s'est confirmé par la suite avec la crise sismo-volcanique en cours au large de Petite-Terre.

De juin 2018 à décembre 2019, l'ADEME et le BRGM ont élaboré un programme d'exploration du potentiel géothermique profond de Petite-Terre. Dans le cadre de ce projet, de nouvelles investigations géoscientifiques ont été réalisées et ont permis de conclure au fort potentiel géothermique profond à Petite-Terre, mais également à la nécessité de réaliser plusieurs forages d'exploration profond (pouvant aller jusqu'à 2 000 m de profondeur) afin de :

- caractériser la nature géologique des formations situées sous Petite-Terre ;
- identifier les différentes arrivées d'eau, leurs températures et caractéristiques physico-chimiques ;
- déterminer la perméabilité du réservoir ;
- estimer la capacité de production électrique du réservoir.

Pour y parvenir, il est recommandé de réaliser, dans un premier temps, une étude complémentaire afin de définir l'implantation des forages et d'évaluer leur probabilité de succès. Cette étude d'appuiera sur des études géoscientifiques (e.g. géologiques, géophysiques, géochimiques, hydro-thermiques) ciblées sur Petite-Terre, mais également en valorisant les données acquises par le Réseau de Surveillance Volcanologique et Sismologique de Mayotte (REVOSIMA). Elle permettra de rassembler les éléments géoscientifiques nécessaires à la prise de décision d'investir dans des forages d'exploration. Le coût d'une telle étude est estimée à 500 k€ sur une durée de deux ans.

La phase suivante consistera à réaliser les forages proprement dits (peu profonds de gradient thermique et/ou profonds dans le réservoir géothermique) afin de confirmer la présence d'une ressource géothermale exploitable et d'estimer sa quantité. Cette information constituera un des éléments clés à la prise de décision pour passer à la phase suivante d'exploitation de la ressource géothermale. Le coût d'un forage unique d'exploration de 1 500 m de profondeur à Petite-Terre est estimé entre 4 et 6 M€, alors que la réalisation d'un programme de trois puits de 1 500 m de profondeur est évaluée entre 10 M€ et 13 M€. La durée des travaux pour trois forages d'exploration de 1 500 m de profondeur est estimée à environ un an, depuis la préparation des plateformes jusqu'à la remise en état du site. À cela, il faut rajouter les temps nécessaires pour l'obtention des autorisations administratives (environ un an) et les temps nécessaires aux appels d'offres, sélection des entreprises et passation des marchés.

5. Bibliographie

- Doré, A. G., & Sinding-Larsen, R.** (Eds.) (1996) - Quantification and Prediction of hydrocarbon Resources (Vol. 6). Elsevier.
- Fiebig J., Chiodini G., Caliro S. et al.** (2004) - Chemical and isotopic equilibrium between CO₂ and CH₄ in fumarolic gas discharges: Generation of CH₄ in arc magmatic-hydrothermal systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 68, n° 10, 2321-2334.
- Flovenz O.G., Spangenberg E., Kumlenkamp J. et al.** (2005) - The role of electrical interface conduction in geothermal exploration. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, April 24-29.
- Gadalia, A. ; Charni, M. ; Fréchin, N. et al.** (2011) - Faisabilité et évaluation d'un programme de prospection et de valorisation géothermique en Martinique. Rapport final. BRGM/RP-59690-FR. 359 p.
- 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.** (1993) - Redox control of gas compositions in Philippine volcanic-hydrothermal systems. *Geothermics*, vol. 22, n° 5/6, 575-587.
- IGA** (2014) - Best Practices Guide for Geothermal Exploration. Joint Publication IGA-IFC World Bank.
- Johnston J. M., Pellerin L., Hohmann G.W.** (1992) - Evaluation of electromagnetic methods for geothermal reservoir detection. *Geothermal resources transactions*, vol. 16, oct. 92.
- 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.
- Nehlig P., Lacquement F., Bernard J. et al.** (2013) - Notice explicative de la carte géologique de Mayotte à 1/30 000.
- Pajot G., Debeglia N., Miehé J.-M.** (2007) - Estimation du potentiel géothermique de Mayotte : Phase 2 - Étape 1. Investigations géophysiques par gravimétrie, magnétisme et panneau de résistivité électrique. Rapport intermédiaire BRGM/RP-56027-FR, 60 p.
- Sanjuan B., Baltassat J.-M., Bezelgues S. et al.** (2008) - Estimation du potentiel géothermique de Mayotte : Phase 2 - Étape 2. Investigations géologiques, géochimiques et géophysiques complémentaires, synthèse des résultats. Rapport BRGM/RP-56802-FR, 82 p., 18 fig., 3 tabl., 6 ann.
- Sanjuan B., J.-M. Baltassat, Traineau H. et al.** (2008) - Estimation du potentiel géothermique de Mayotte : Synthèse élargie des principaux résultats. *Rapport final BRGM/RP-56802SYNTH-FR*, 26 p., 7 fig.
- Serra H. et Sanjuan B.** (2004) - Exploration géothermique : synthèse bibliographique des géothermomètres à gaz et des méthodes de mesures de gaz dans les sols. *Rapport BRGM/RP-53132-FR*, 66 p.
- Traineau H., Sanjuan B., Brach M. et al.** (2006) - État des connaissances du potentiel géothermique de Mayotte. *Rapport final BRGM/RP-54700-FR*, 82 p.
- Ussher G., Harvey C., Johnstone R. et al.** (2000) - Understanding the resistivities observed in geothermal systems. Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-june 10, 2000, 1915-1920.

Annexe 1

Modèle géoélectrique des réservoirs géothermiques

Un modèle géoélectrique schématisé de réservoir géothermique est d'abord proposé par Johnston *et al.* (1992 ; voir Figure 34), modèle confirmé ultérieurement par des observations similaires faites en Islande (Flovenz *et al.*, 2005 ; voir Figure 35) ou sur d'autres sites géothermiques connus (Ussher *et al.*, 2000 ; voir Figure 35). D'après ces schémas, la série des altérations argileuses d'origine hydrothermale n'est pas forcément affleurante et peut être surmontée par des terrains plus résistants où domine la conduction électrolytique dans la porosité de la roche. La résistivité de ce recouvrement est alors très dépendante de la salinité de l'eau interstitielle existant localement près de la surface. Le schéma de Flovenz est particulièrement illustratif sur ce point.

Dans le modèle de Johnston *et al.* (Figure 34), les zones d'altération hydrothermale les plus superficielles et les plus froides, caractérisées par une altération à smectite, sont aussi les plus conductrices (résistivités généralement comprises entre 1 et 10 ohm.m). Avec l'élévation de la température, la teneur en smectite diminue et la teneur en illite augmente (70 % d'illite à 180 °C dans un environnement andésitique selon Anderson *et al.*, 2000). La transition se fait en général sous la forme d'un interstratifié illite-smectite. L'illite pure apparaît généralement vers 220 °C avec d'autres minéraux de la zone d'altération propylitique (chlorite et épidote) et les résistivités s'établissent dans la gamme 20-100 ohm.m. Le réservoir géothermique correspond à cette zone de haute température, électriquement résistante.

La base de la zone conductrice a souvent été utilisée avec succès pour délimiter le toit de la zone d'intérêt géothermique (zone à chlorite). Dans les basaltes d'Islande (Flovenz *et al.*, 2005), le passage de la zone mixte illite-smectite vers la zone à chlorite se fait vers 250-300 °C et l'augmentation de résistivité se produit dans la partie inférieure de la zone mixte (Figure 35). Sur les différents sites analysés par Ussher *et al.* (2000), l'augmentation des résistivités est corrélée avec la disparition de la smectite à une température d'environ 200 °C (Figure 35).

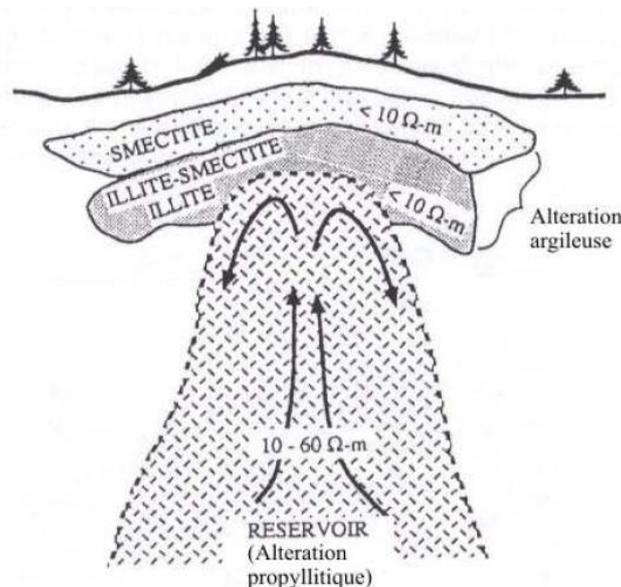


Figure 34 : Modèle géoélectrique conceptuel d'un système géothermique typique (d'après Johnston *et al.*, 1992).

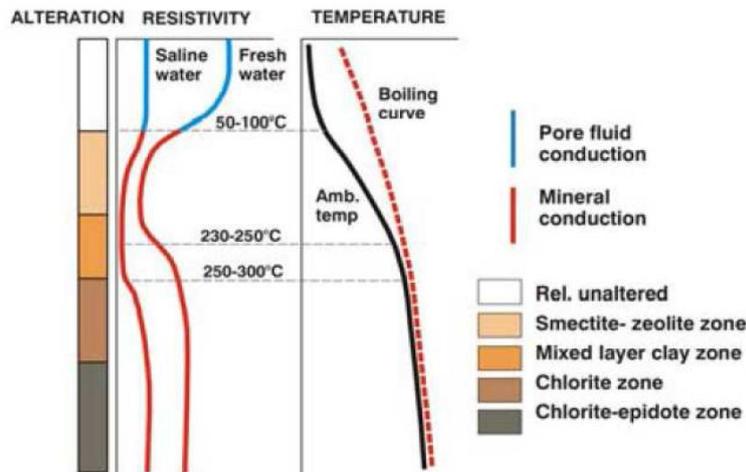


Figure 35 : Structure géoélectrique générale de la croûte basaltique en Islande (d'après Flovenz et al., 2005).

L'échelle de profondeur est arbitraire, elle dépend des profils de température passé et présent.

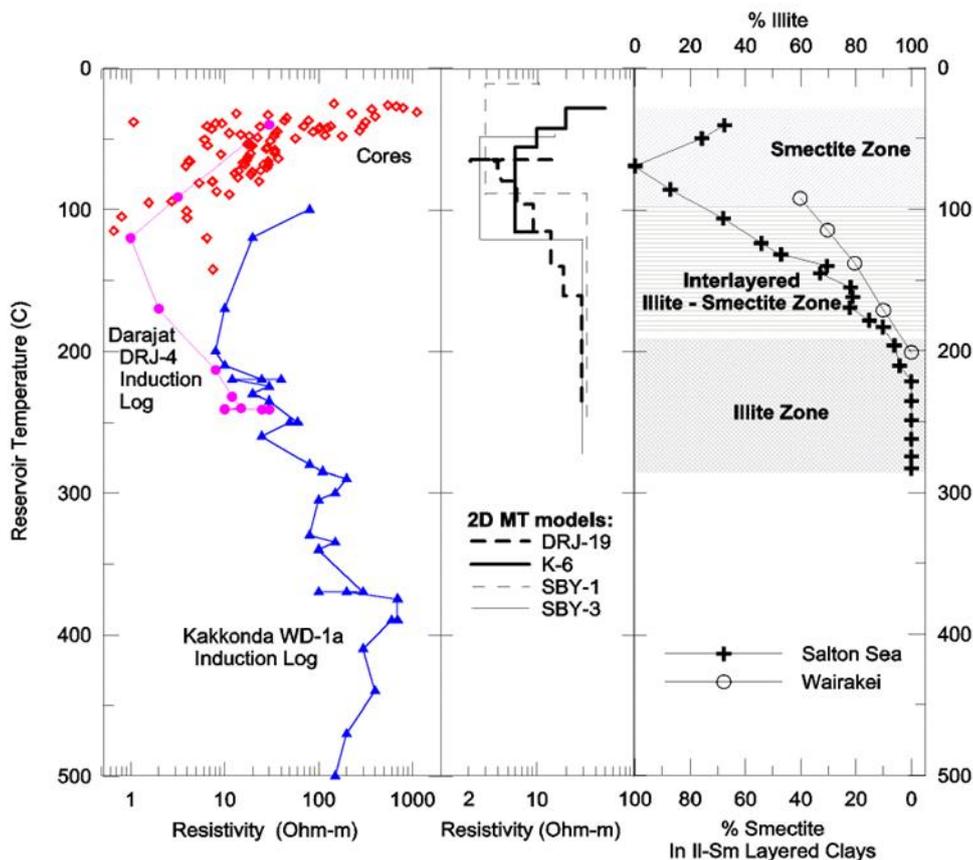


Figure 36 : Résistivités électriques et teneurs en illite-smectite en fonction de la température estimée du réservoir sur différents sites géothermiques (d'après Ussher et al., 2000).

À gauche : résistivités mesurées sur carottes (en rouge) et par diagraphie d'induction en forage (en rose et en bleu) ; les mesures sur carottes ont été réalisées à température ambiante puis ont été transposées à la température du réservoir. Au centre : résistivités obtenues par inversion 2D de données MT sur différents sites géothermiques. À droite : proportions d'illite et de smectite observées dans les argiles interstratifiées sur deux autres sites géothermiques.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

**Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources**

3, avenue Claude Guillemin

BP 36009 - 45060 Orléans cedex 2 - France - Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr