



Géosciences pour une Terre durable



Compléments d'exploration géothermique en Martinique

La Martinique a payé, dans le passé, le prix fort du voisinage d'un volcan actif. Si la formidable énergie du volcan ne peut être domptée, elle peut être utilisée sous certaines conditions.

Il y a près de 50 ans les scientifiques ont commencé à vérifier si ces conditions étaient réunies en Martinique, c'est à dire à explorer le potentiel géothermique de l'île. A l'heure où la nécessité de sources d'énergie à la fois plus durables et plus propres devient pressante et quand la volonté d'indépendance énergétique s'affirme, la possibilité d'utiliser la géothermie devient une chance pour les Martiniquais.

Une campagne de compléments d'exploration, menée par le BRGM et cofinancée par la Région, le SMEM, le FEDER, l'ADEME et le BRGM vient de s'achever en 2014. Elle aboutit à des résultats encourageants sur les quatre zones couvertes :

- Montagne Pelée et Petite Anse d'Arlet : zones favorables à l'implantation de forage d'exploration dans la perspective de production d'électricité (possibilité de ressource géothermique de haute température) ;
- Plaine du Lamentin : zone potentiellement favorable au développement de la géothermie de moyenne température
- Pitons du Carbet : exploration à compléter pour mieux localiser l'éventuelle ressource de moyenne température

4 sites explorés (Fig.1)

Haute température :

- Montagne Pelée
- Petite Anse (Anses d'Arlet)

Moyenne température

- Pitons du Carbet
- Plaine du Lamentin

Exploration multi-méthode

- Géophysique : magnéto-tellurique*, gravimétrie*, électromagnétique à source contrôlée*)
- Géologie : étude des magmas et volcans, structure des formations, altérations hydrothermales,...)
- Hydrogéologie : bilans hydriques (recharge, infiltration, écoulements souterrains,...)
- Géochimie : composition chimique et isotopique des fluides souterrains et superficiels.

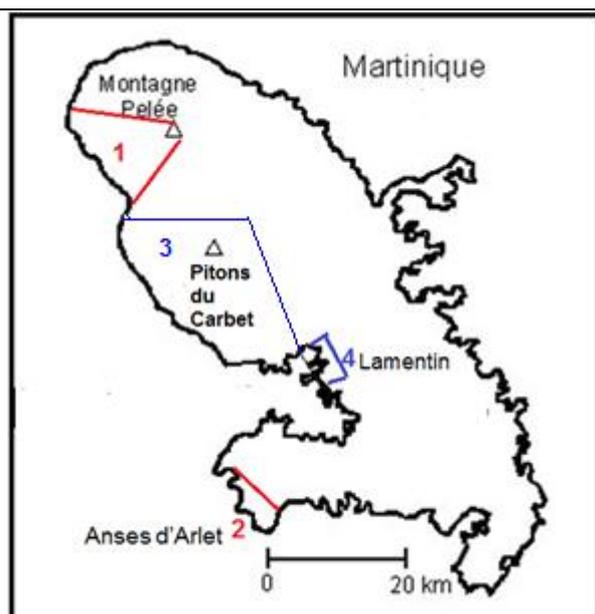


Fig.1 : Localisation des 4 zones explorées

Montagne Pelée



Fig.2 : Panorama de la Montagne Pelée vue du sud

Caractéristiques du site

La Montagne Pelée (Fig.2) est un édifice récent à l'échelle géologique, (environ 120 000 ans). Trois cicatrices sur le flanc Sud-Ouest de la montagne révèlent l'existence d'effondrements sectoriels* qui ont eu lieu successivement il y a 100 000 ans, 25 000 ans et 9 000 ans, probablement à la faveur de zones de faiblesse provoquées par l'hydrothermalisme;

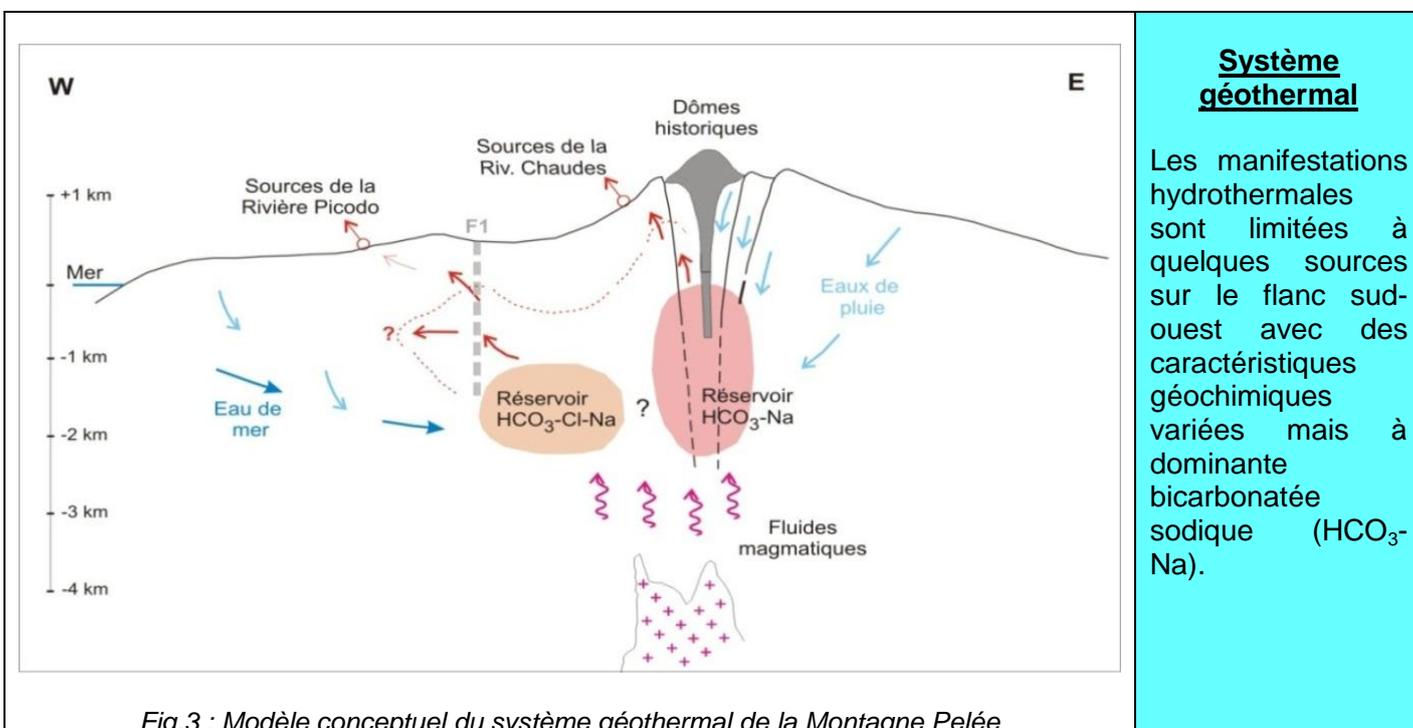


Fig.3 : Modèle conceptuel du système géothermal de la Montagne Pelée

Les prospections géophysiques montrent une couche conductrice* couvrant la quasi-totalité du sous-sol de l'édifice, à 500 m de profondeur et sur une épaisseur de 500 m. Deux indices caractéristiques des toits de gisements géothermaux, dévoilent l'existence de réservoirs sur le flanc sud-ouest (SO) de la montagne : un bombement de la couche conductrice sous la zone sommitale du volcan et un conduit résistant traversant cette couche en amont du flanc SO. En revanche, le flanc est du volcan ne présente aucune anomalie.

On distingue donc(Fig.3)

- un premier réservoir ayant une composition nettement bicarbonatée-sodique ($\text{HCO}_3\text{-Na}$), il se situe dans la partie centrale de l'appareil. Il alimente les sources de la rivière Chaude et d'après les calculs de géothermomètre*, les températures y avoisinent les 180-200°C. D'après la géochimie, ces sources évolueraient vers un pôle bicarbonaté (HCO_3) avec une diminution de leur température. Cela indiquerait une diminution du débit du fluide chaud, profond et, donc, un colmatage progressif du conduit de fuite,
- un second réservoir plus excentré et bicarbonaté- chloruré sodique ($\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$) atteint une

gamme de températures de 155-180°C. Il connaît une légère contribution marine (d'où la présence de chlore) et alimente les sources de la rivière Picodo.

Les sources chaudes sous-marines au niveau du Prêcheur et du forage d'eau d'observation de la commune de Saint-Pierre sont interprétées comme les exutoires d'un écoulement latéral à faible profondeur depuis la rivière Chaude et passant sous la coulée Blanche.

Une chambre magmatique* dont la température avoisine les 800°C, sert de source de chaleur à 5-6 km de profondeur, à ces deux réservoirs profonds. Ils sont rechargés grâce aux fortes précipitations tropicales et à l'importante perméabilité du terrain souligné par les campagnes hydrogéologiques.

Sans doute en liaison avec l'activité du volcan, les réservoirs géothermaux de la Montagne Pelée ne semblent pas avoir atteint leur équilibre à l'échelle géologique et leurs températures maximales, bien que celles-ci soient suffisantes pour l'exploitation géothermique de haute-température.

En conclusion :

Deux zones de forage sont proposées (Fig.4), la première cible le premier réservoir central au niveau de la rivière Chaude (**Zone 1**) ; la seconde vise le réservoir latéral au-dessus de la rivière Picodo entre le Gros Morne et le Morne Dos d'Ane (**Zone 2**).

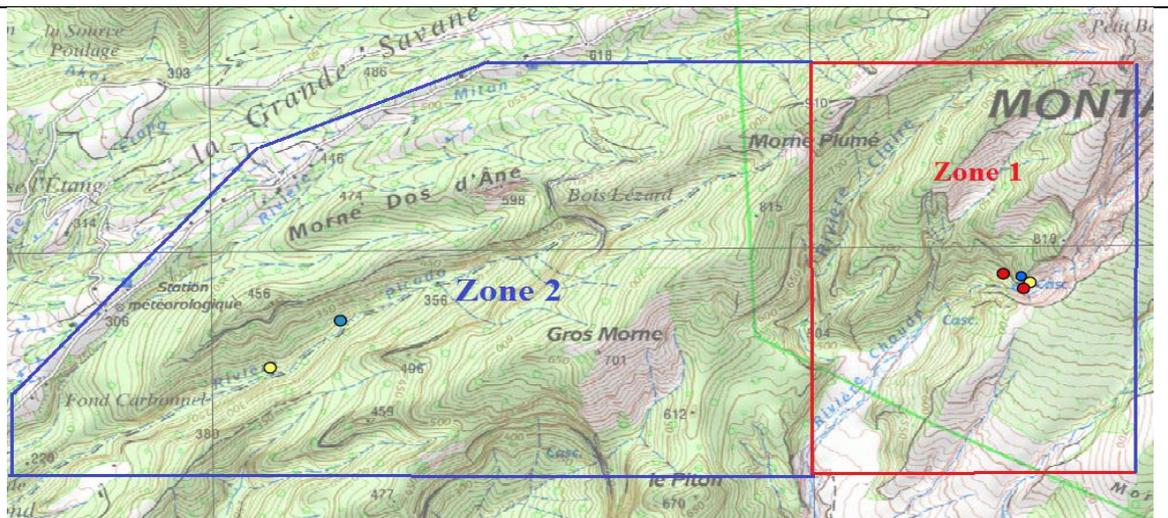


Fig.4 : Flanc sud-ouest de la Montagne Pelée et zones proposées pour les forages d'exploration



Les Anses d'Arlet

Caractéristiques du site

Les premières études géothermiques sur les Anses d'Arlet s'étaient, jusque-là, concentrées sur la zone de Petite Anse en raison des indices de surface qu'offraient les Eaux Ferrées. En 2012, la zone de recherche a été étendue à l'ensemble de l'axe volcanotectonique*, c'est-à-dire de la Pointe Burgos (~1 720 000 ans) au Rocher du Diamant (~1 100 000 ans), en passant par le Morne Champagne (~670 000 ans), Roches Genty, Morne Jacqueline et le Morne Larcher (346 000 ans) (Fig. 5).



Fig. 5 : La baie de Petite Anse, la zone hydrothermale des Eaux Ferrées et le Morne Larcher depuis l'intrusion du flanc sud du Morne Jacqueline (premier plan)



Fig. 6 : Prélèvement de gaz sous-marin dans la baie de Petite Anse

Il y a quelque centaines de milliers d'années, peu de temps à l'échelle géologique, le flanc sud du Morne Jacqueline a été destabilisé, donnant lieu à un effondrement sectoriel*. Celui-ci a mis à jour une partie de la couche imperméable du réservoir géothermal et d'une intrusion magmatique. Ceci a permis de révéler en surface des minéralisations hydrothermales que traverse aujourd'hui la source thermo-minérale de Petite Anse (les Eaux Ferrées). Des émanations de gaz (CO_2 , He) d'origine magmatique accompagnent les altérations hydrothermales, la source thermo-minérale et se prolongent en mer (Fig. 6).

La minéralisation de la source thermique est plutôt chlorurée sodique, probablement en raison d'une forte contamination par l'eau de mer. Elle exprime l'activité hydrothermale actuelle, avec une interaction forte avec l'encaissant rocheux profond, à haute température. D'après les géothermomètres*, celle-ci converge vers 190 à 210°C. Aucune des sources voisines analysées n'a de lien avec le système de Petite Anse.

Système géothermal

La géophysique révèle une couche conductrice* étendue sur l'ensemble de la zone. Elle présente un bombement sur son flanc sud-est au sud de Roches Genty, caractéristique d'un toit de gisement géothermique (Fig.7).

Contrairement à la zone de la Montagne Pelée, la faible pluviométrie, la forte évapotranspiration* et l'extension de la zone argilisée imperméable, induisent une faible infiltration, donc une recharge limitée, malgré l'apport probable en eau de mer ; cela peut expliquer le petit débit des sources.

La source de chaleur potentielle du réservoir géothermal peut être alimentée de deux façons : une chambre magmatique* localisée sous le Morne Larcher, ou une intrusion magmatique dont une partie affleure juste à l'ouest des Eaux Ferrées.

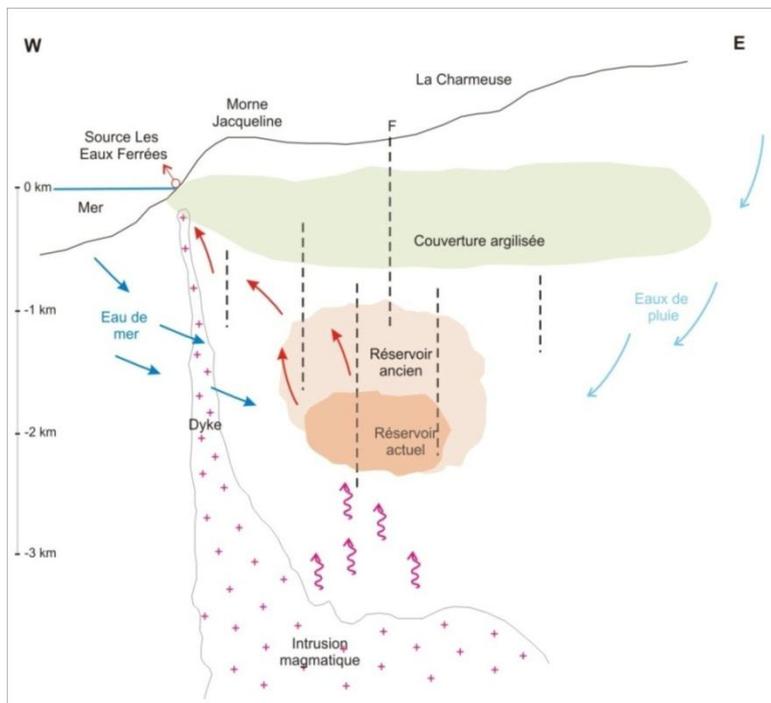


Fig.7 : Modèle conceptuel du système géothermal de Petite Anse

A la différence des systèmes géothermaux caractérisés sur la Montagne Pelée qui se signalaient par leur manque de maturité, celui de la Petite Anse, bien qu'atteignant une température voisine ou supérieure, semble être relativement ancien et en voie de contraction probablement du fait d'une recharge insuffisante. A l'échelle géologique, cette tendance ne contredit pas les possibilités d'exploitation d'une ressource géothermique qui reste cependant à confirmer par forage d'exploration.

En conclusion :

La vallée située au nord du bourg de Petite Anse (Fig.8) semble être le site le plus favorable à l'implantation de forages d'exploration.

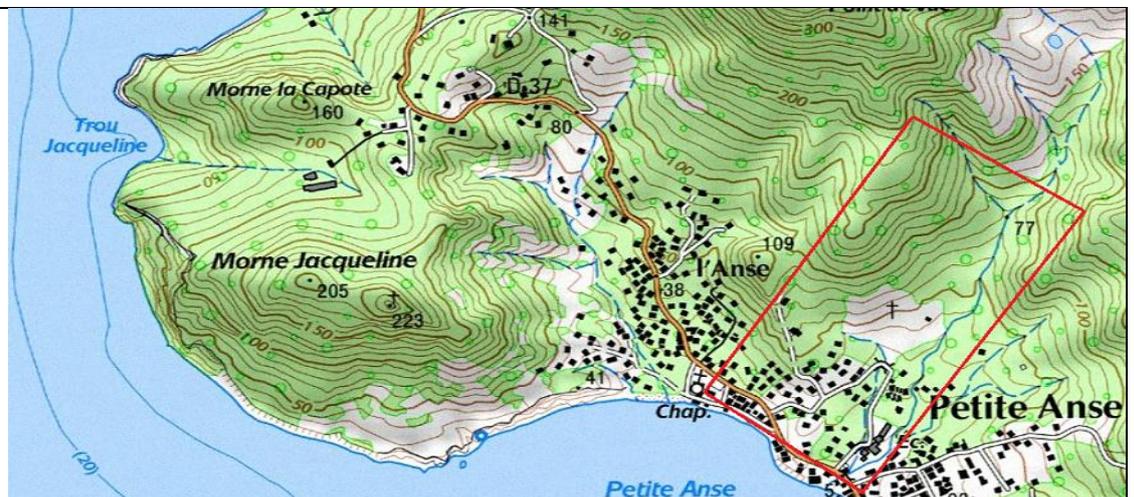


Fig.8 : Baie de Petite Anse et zone proposée pour les forages d'exploration



Pitons du Carbet

Caractéristiques du site

Le massif des Pitons du Carbet est formé de dômes de lave dont les plus récents ont un peu plus de 330 000 ans (Fig.9).

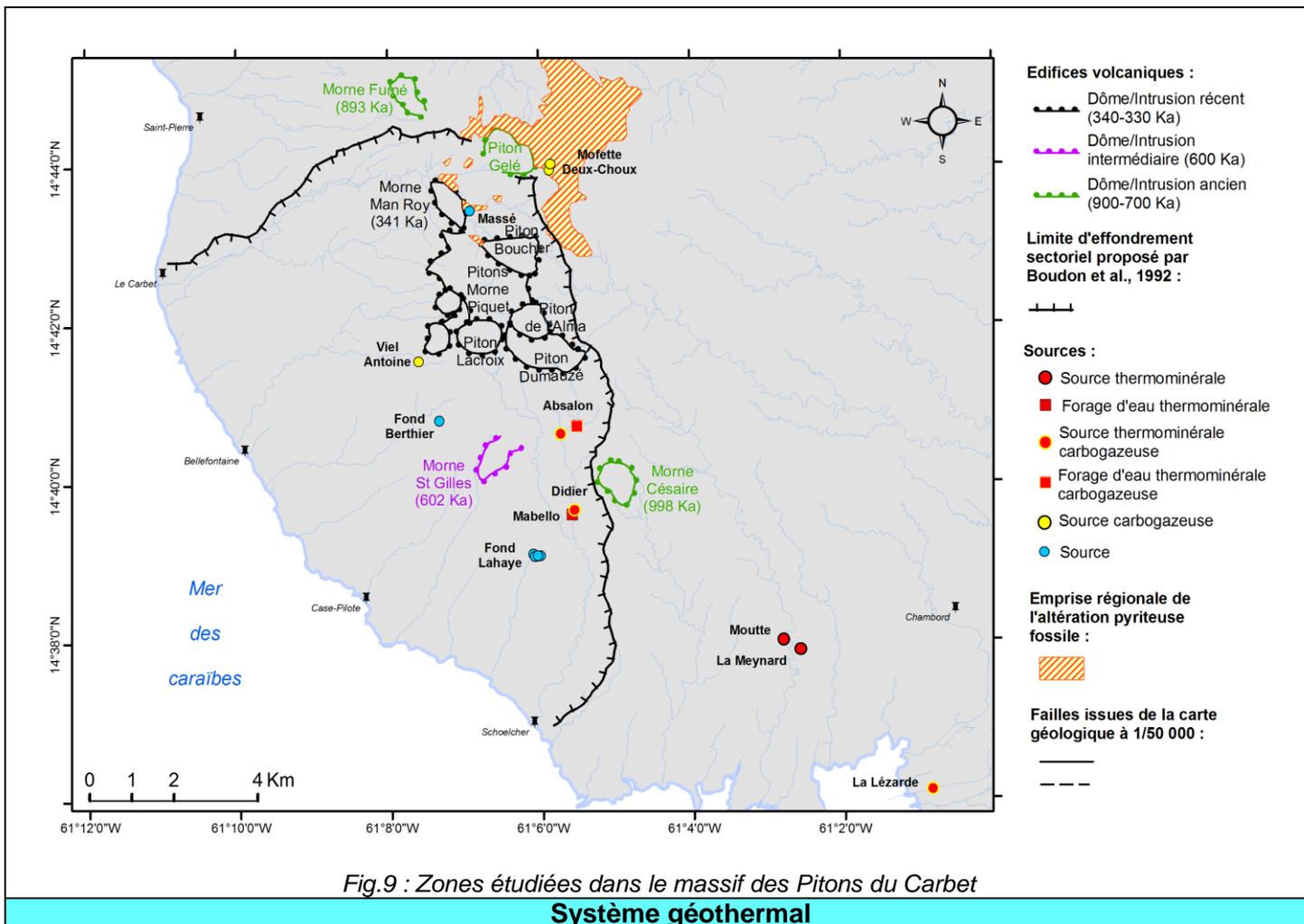
Le massif est orienté NNO-SSE et la cicatrice orientale d'un effondrement du flanc* ouest de cet ensemble souligne cette direction.

Un hydrothermalisme ancien (> 770 000 ans) à sulfures de fer (pyrite) s'est développé au NE et marque la composition des fluides (Deux Choux).

L'exploration gravimétrique couplée au levé MT* permet de définir (i) un ensemble lourd et résistant qui s'enfonce du NE vers le SO (volcanisme du Morne Jacob, premiers épisodes des Pitons du Carbet) et (ii) des formations légères et résistantes issues du démantèlement des précédentes.



Fig.9 : Le Piton Lacroix (à droite) et le Morne Piquet (à gauche), vus depuis le sud du massif des Pitons du Carbet



Système géothermal

Plusieurs sources thermales et venues de gaz magmatique jalonnent le pourtour des Pitons les plus récents.

Le calcul du bilan hydrique* ne permet pas de mettre en évidence une infiltration importante. Les eaux souterraines peuvent se répartir en deux groupes :

(i) celles qui se rattachent aux sources de Didier et Absalon nettement bicarbonatées sodiques, associées à une pression de gaz d'origine magmatique (CO₂, He), montrant des signes d'interaction eau-roche à moyenne température (100-140°C) et une très faible composante d'eau de mer (<0,1%) acquise avant l'interaction avec la roche du réservoir (Fig.10);



Fig.10 : Source froide ferrugineuse dans la ravine Absalon

(ii) celles qui se rapprochent de la source de Moutte toutes localisées à moins de 3 kms du littoral sud du massif ; la composante d'eau de mer est plus importante (0,4 à 1,2%) et les signes d'interaction sont plus faibles (avec la roche comme avec le gaz magmatique) pour une même température profonde estimée (90-140°C) ; cela traduit soit un rapport eau roche plus élevé, soit un temps de transit plus court ;

En cohérence avec l'estimation de température profonde moyenne, aucune structure du type couverture / réservoir géothermique n'a été mise en évidence par l'exploration magnéto-tellurique* ;

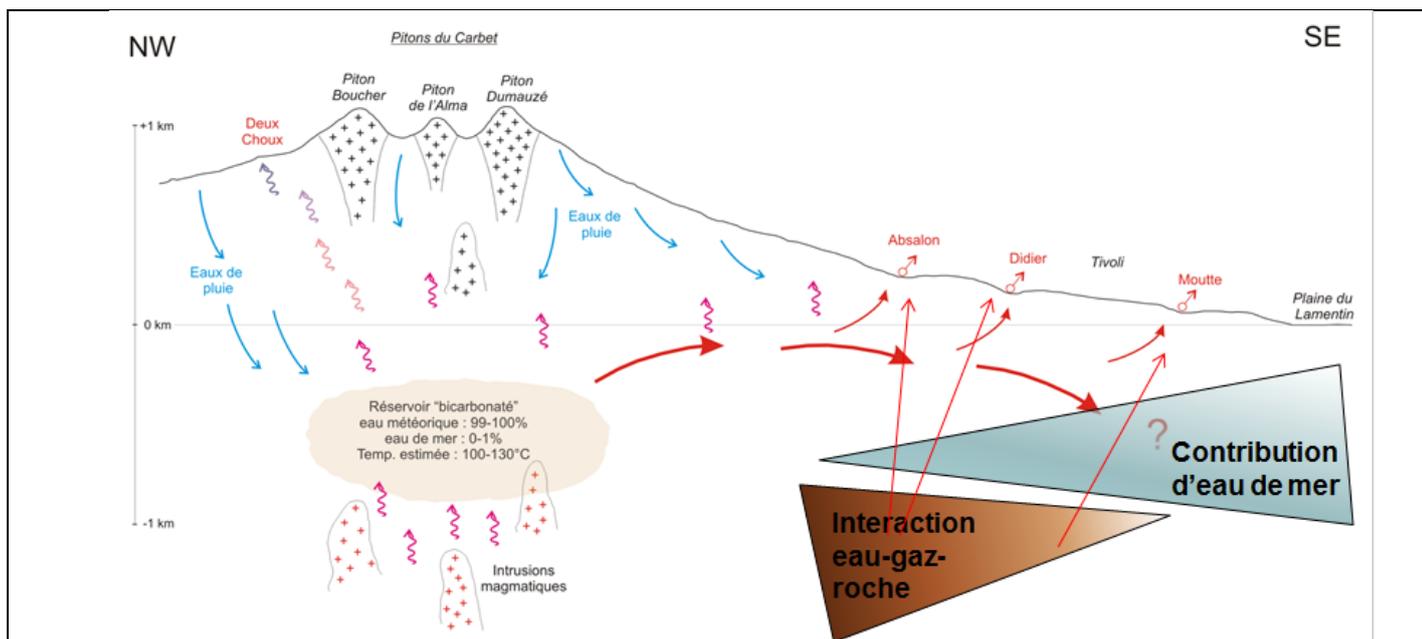


Fig.11 : Modèle conceptuel du système géothermique des Pitons du Carbet

En conclusion :

Les seuls indices d'activité hydrothermale témoignent de températures moyennes* et sont associées aux émanations de CO₂.

Les zones les plus favorables pour capter cette éventuelle ressource, où la composante d'interaction eau-gaz-roche est la plus forte (Fig.11), se situent plutôt à la périphérie des Pitons les plus récents.

Des compléments d'exploration seront nécessaires pour mieux localiser les zones d'intérêt : pointements de gaz, zones de fracture profonde, croisement de fractures, ...



Plaine du Lamentin



Fig.12: Plaine du Lamentin avec les Pitons du Carbet au second plan

Caractéristiques du site

La Plaine du Lamentin est une plaine alluviale entourée de massifs volcaniques plus anciens (Fig.12). Le secteur est affecté par un jeu de failles NO-SE et NE-SO.

Un hydrothermalisme polyphasé (250 000 – 300 000 ans) de haute température (> 200°C) s'est développé avec des dépôts massifs de silice et une altération massive (argiles) en profondeur. Il a été suivi d'une phase de moins haute température (120 à 200°C).

L'altération actuelle (autres argiles) est en équilibre avec le fluide des sources thermales et des forages (50 à 90°C).

Le régime hydrologique y est dominé par la mise en pression des eaux provenant des Pitons du Carbet.

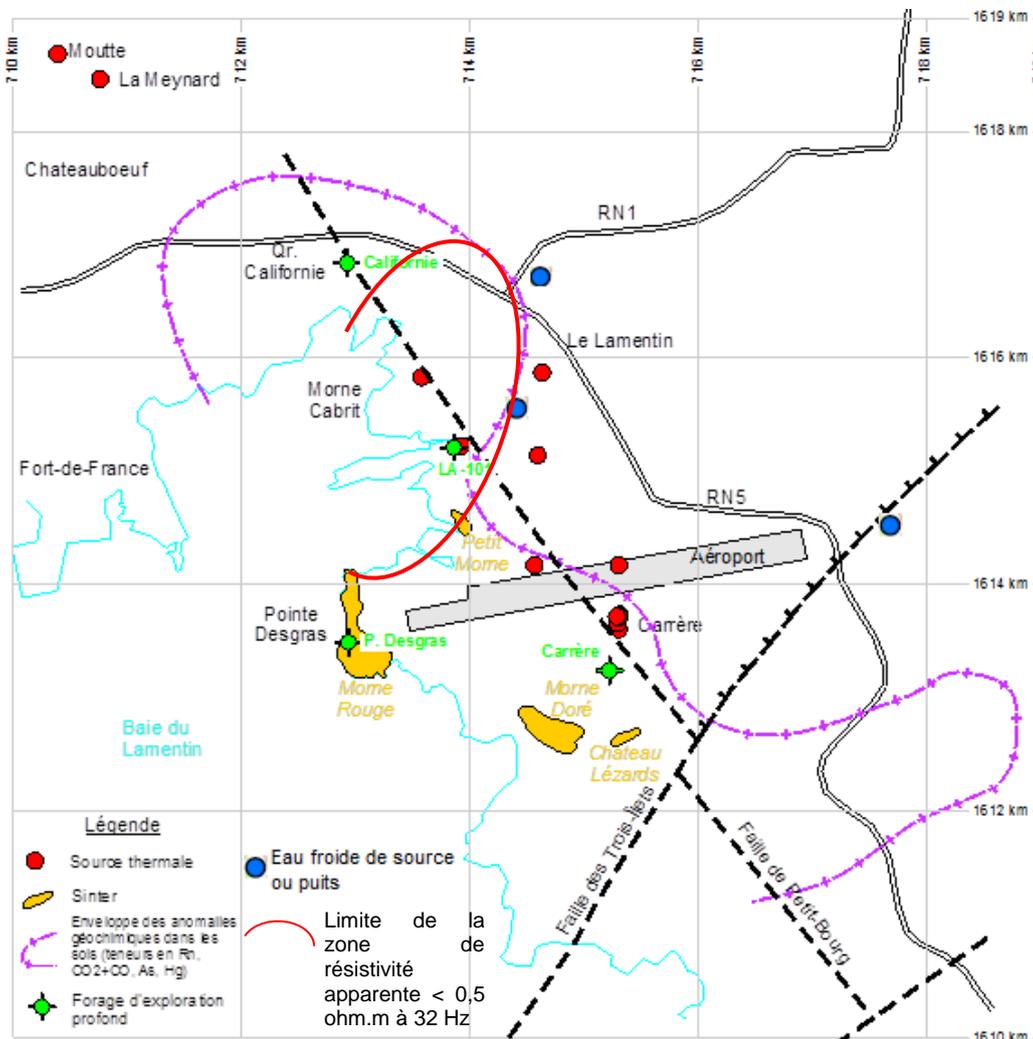


Fig. 13 : Manifestations hydrothermales et caractéristiques géologiques, géochimiques et géophysiques de la Plaine du Lamentin

Une convergence entre la localisation des sources chaudes, des anomalies de gradient thermique, des anomalies géochimiques des sols (CO₂, He, Rn, Hg, As) se retrouve à partir de l'est du Cohé jusqu'à Carrère sur une direction NO-SE (Fig. 13).

Les mesures de conductivité (par CSEM*) indiquent la convergence vers l'est du Cohé (i) à moins de 400 m d'une zone très conductrice contenant un niveau producteur, ouverte vers l'ouest et (ii) à plus de 800 m d'un niveau conducteur orienté vers le NNO.



Fig. 14 : Forage captant un fluide hydrothermal près de l'aéroport

Système géothermal

Les eaux thermales sont très minéralisées (> 30% d'eau de mer) et riches en CO₂ d'origine magmatique (Fig. 14).

Elles sont enrichies en éléments typiques de l'interaction à haute température mais le calcul de leur température d'équilibre* indique une valeur comprise entre 90 et 140°C. Leur minéralisation semble acquise au contact des anciennes altérations hydrothermales ;

Le champ géothermal de moyenne température* pourrait résulter d'un mélange entre une eau peu minéralisée venue des Pitons du Carbet et de l'eau de mer entre la Pointe Desgras et le quartier Californie.

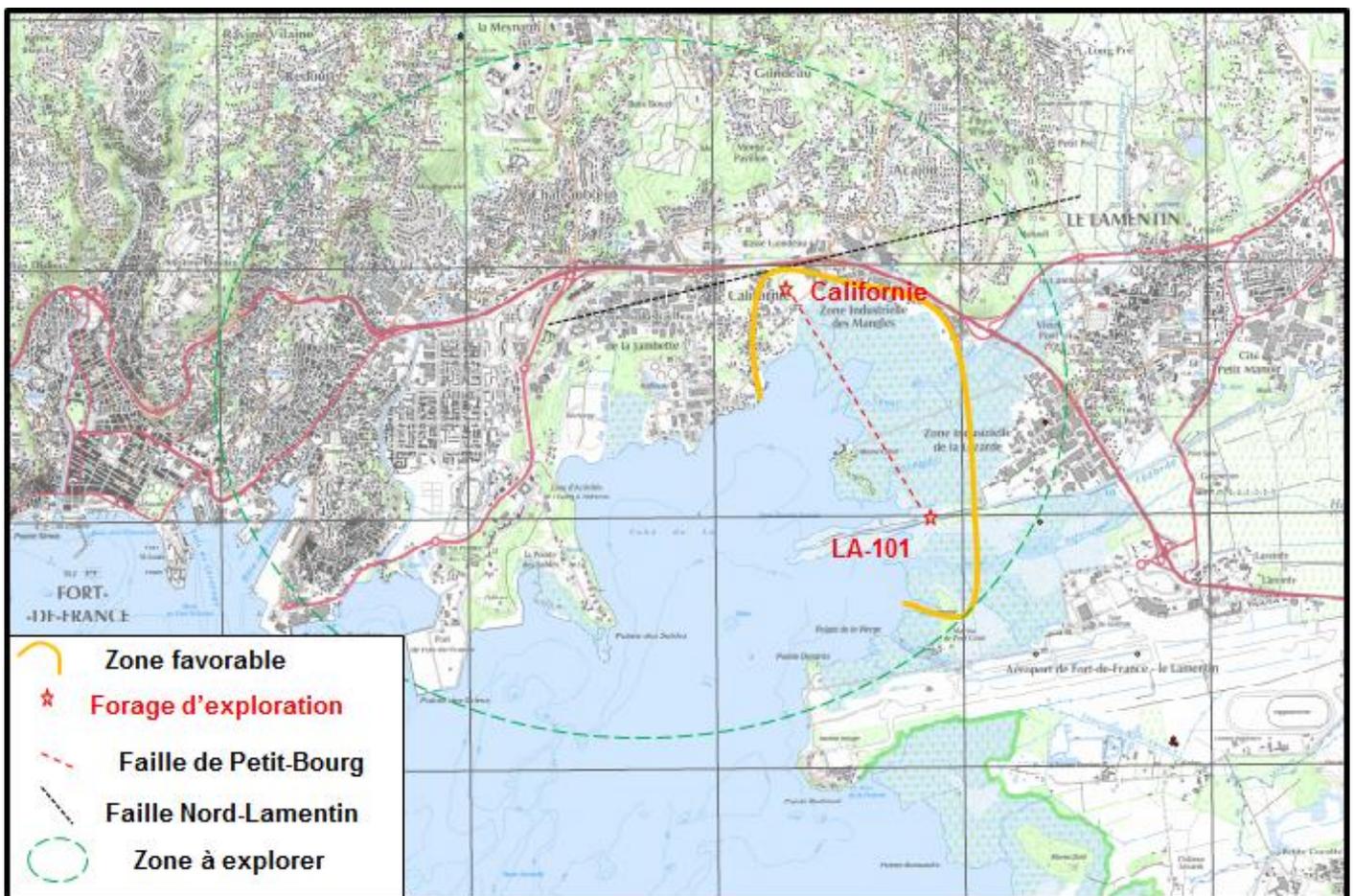


Fig. 15 : Baie du Lamentin, zone favorable à l'implantation de forage et zone à explorer

En conclusion :

La zone la plus favorable au développement de la ressource géothermale de moyenne température*, peu profonde, se situe, à terre, au NE du Cohé.

La priorité reste cependant la réalisation de pompages d'essais sur le forage Californie afin de mieux qualifier et quantifier la ressource captée en 2000.

Des compléments d'exploration notamment par CSEM, pourront être menés avec des stations de mesure couvrant plus largement les zones situées au Nord et à l'Ouest des forages Californie et LA-101 (Fig. 15). Il sera ainsi possible de mieux cerner à la fois l'extension vers l'ouest de la zone productive peu profonde et de préciser l'extension de la zone conductrice plus profonde.

=====
Contacts :

BRGM : Anne-Lise Tailame

A.Tailame@brgm.fr

Service Géologique Régional de Martinique

Villa Bel Azur, 4Lot. Miramar

Route Pointe des Nègres

97200 Fort-de-France

Tel. : 05.96.71.17.70

Méthodes

L'exploration géothermique de surface doit faire appel à des méthodes variées de mesure pour recueillir des informations sur le sous-sol et les circulations d'eau en profondeur.

Toutes les méthodes utilisées dans les différentes campagnes de prospection géothermique en Martinique et dans les approches diverses des sciences de la terre, ne peuvent être présentées ici. Observations et mesures de terrain et analyses minéralogiques pour la géologie, calculs de bilans hydriques* pour l'hydrogéologie, analyses sur site des gaz des sols* pour la géochimie, méthodes électriques*, polarisation spontanée*, magnétisme* ou sismique* pour la géophysique, toutes ont apporté une contribution à la définition d'un (ou de) modèle(s) conceptuel(s).

Quatre ont été choisies pour le rôle qu'elles ont joué dans la dernière campagne, pour la mise en œuvre de techniques de pointe et pour leur caractère innovant.



Fig. 13 : Mesures et prélèvement d'eau sur le site de la Rivière Chaude

Hydrogéochimie

La mesure de paramètres physico-chimiques* sur place (à gauche), les analyses chimiques et isotopiques* (en laboratoire) sur les eaux souterraines (sources, forages,...) renseignent sur les conditions qui ont conditionné l'équilibre de ces eaux. Les roches traversées, la pression de gaz, la température,... impriment leur signature aux eaux souterraines. Il devient alors possible de reconstituer l'histoire de l'eau les phénomènes de mélange qu'elle a connu, la pression de gaz et la température à laquelle elle a séjourné en profondeur.

Ces caractéristiques du réservoir géothermal vont permettre d'estimer son potentiel.

Exploration magnéto-tellurique (MT)

Permet d'appréhender les variations des résistivités électriques du sous-sol par la mesure des composantes électriques et magnétiques du champ électromagnétique naturel à différentes fréquences. Plus les fréquences sont basses plus l'investigation est profonde (quelques km à 10 km en exploration géothermique).

L'objectif est d'obtenir une image de la résistivité d'un réservoir géothermique et de sa couverture sus-jacente



Fig. 14 : Installation d'une station magnéto-tellurique sur le flanc sud-ouest de la Montagne Pelée



Fig.15 : Acquisition de données gravimétriques sur les pentes des Pitons du Carbet

Exploration par gravimétrie

Mettre en évidence et localiser des anomalies dans la distribution de la densité du sous-sol ; des anomalies légères peuvent signaler des zones fracturées, poreuses, des formations moins compactes comme des pyroclastes* ; des anomalies lourdes peuvent signaler des intrusions magmatiques ou des accumulations de coulées de lave plutôt basiques (basalte*, ...). La profondeur d'investigation est limitée selon le rapport masse / profondeur de la cible : plus la cible est profonde, plus elle doit être lourde.

Exploration électromagnétique à source contrôlée (en anglais CSEM)

Déterminer la distribution des résistivités électriques du sous-sol en créant un champ électrique contrôlé à la surface du sol et/ou à partir de forage. Vise les mêmes objectifs que la MT*. L'utilisation de forages profonds (quelques km) permet de se rapprocher des cibles et d'améliorer la résolution et la profondeur d'investigation (1,5 à 2 fois la profondeur des forages).

Cette méthode a été testée pour la première fois au Lamentin dans le cadre d'une exploration géothermique.

Elle a révélé une excellente concordance avec les autres méthodes électrique et électromagnétiques utilisées au Lamentin. Les perturbations dues à la mer et à l'urbanisation ont pu être surmontées



Fig. 16 : Acquisition de données électromagnétiques avec source contrôlée dans la mangrove du Lamentin

=====

Glossaire technique

Altération hydrothermale : L'altération hydrothermale est une modification de la composition chimique et / ou minéralogique d'une roche qui résulte d'un déséquilibre chimique entre la roche encaissante et le fluide géothermal.

Analyses des gaz des sols : Cette méthode s'attache à analyser sur site certains gaz (CO₂, Hélium, Radon) qui peuvent être émis au niveau des sols. Ces gaz sont prélevés par un micro-forage à 1 m de profondeur et permettent de déceler les fuites d'un système géothermal mais aussi des gaz émis par une masse de magma parfois très profonde, en cours de refroidissement. Ils jalonnent les zones de fractures plus ou moins actives.

Axe volcano-tectonique : ensemble de fractures de même direction affectant la croûte terrestre et associé au développement de volcanisme

Basalte: lave de composition « basique », relativement riche en éléments ferro- magnésiens et de densité élevée.

Bilan hydrique : Le calcul de ce bilan vise à mesurer les différents paramètres entrant et sortant d'un système donné (bassin versant hydrogéologique, ensemble d'un massif, d'une île). L'hydrogéologie permet ainsi d'estimer la part d'infiltration profonde pouvant recharger le système géothermal.

Chambre magmatique : Au cours de son ascension, le magma peut séjourner dans un réservoir pour se différencier. Une telle « chambre magmatique » constitue alors une source de chaleur pour alimenter un système géothermique.

Couche conductrice : diverses méthodes électriques et electro-magnétiques s'attachent à représenter la résistivité des formations souterraines. Dans les champs géothermiques de haute température la couverture du gisement est souvent formée par une couche altérée par l'hydrothermalisme (formation d'argiles) imperméable. Cette couche possède, en outre, une forme bombée caractéristique à l'aplomb du réservoir. Celui-ci, constitué de formations altérées à plus haute température, a une signature moins conductrice.

Effondrement sectoriel (ou de flanc) : Effondrement d'un pan entier de volcan suite à une déstabilisation gravitaire, à la fragilisation de secteurs entiers du cône volcanique par l'altération hydrothermale.

Evapotranspiration : évaporation directe et transpiration par les plantes

Géothermie de haute température : température de la ressource au-dessus de 150°C,

Géothermie de moyenne température : température de la ressource comprise entre 100 et 150°C

Géothermie de basse température : température de la ressource à moins de 100°C

Géothermomètre : L'interaction entre l'eau, la roche et le gaz à haute température imprime des marques chimiques et isotopiques au fluide considéré. Les géothermomètres sont des moyens fondés sur les données analytiques pour déterminer la **température d'équilibre**. Ils s'appuient sur des équilibres thermodynamiques et des relations semi-empiriques entre la température et (i) la concentration de certaines espèces, (ii) certains rapports de concentrations d'éléments ou (iii) certains rapports isotopiques d'éléments entre espèces.

Les espèces, rapports entre concentrations d'éléments et rapports isotopiques doivent être suffisamment invariants vis-à-vis des phénomènes autres que les variations de température (mélange, oxydation, adsorption,...).

Magnétisme : cette méthode permet de localiser des anomalies dans la distribution des propriétés magnétiques du sous-sol ; des anomalies positives peuvent tracer des corps magmatiques froids et magnétiques, des anomalies faiblement magnétiques peuvent signaler des roches altérées, des sédiments ; des zones amagnétiques peuvent indiquer des réservoirs de magma chaud.

Méthode électrique : l'émission de courant, son injection dans le sol au moyen d'électrodes et sa réception permettent d'obtenir une représentation de la résistivité des formations souterraines.

Paramètres physico-chimiques : Ces paramètres (classiquement température, conductivité, pH, potentiel d'oxydo-réduction, oxygène dissous) peuvent être mesurés rapidement sur site et donner de premières indications sur la qualité de l'eau (niveau de minéralisation, acidité, ...).

Polarisation spontanée : méthode électro- magnétique permettant de localiser et éventuellement caractériser la géométrie des remontées de fluides géothermaux

Pyroclastes : Débris de roche magmatique éjecté par les volcans au cours d'éruptions plus ou moins explosives.

Rapports isotopiques : les éléments chimiques peuvent avoir plusieurs isotopes qui se distinguent par leur masse ; les rapports isotopiques sont sensibles à des phénomènes comme les changements de phase, le niveau d'oxydation...et permettent ainsi de tracer l'histoire de l'eau analysée ; ils sont souvent caractéristiques d'une origine particulière (mer, magma d'origine profonde, ...)

Réservoir géothermal : Formation géologique perméable contenant un fluide caloporteur (liquide et/ou vapeur) à partir duquel on est capable d'extraire de la chaleur.

Ressource géothermale : Partie fluide du réservoir dont on peut extraire de l'énergie pour utilisation directe de la chaleur ou pour produire de l'électricité, dans des conditions techniquement et économiquement viables.

Sismique : Cette méthode utilise le signal (les ondes) émis par une explosion provoquée ou par un séisme pour distinguer les milieux de propagation par la vitesse de ces ondes.