

Etudes thermiques à la Soufrière de la Guadeloupe

Michel FEUILLARD*

MOTS-CLÉS : Température, Manifestation volcanique, Géothermie, Eau thermale, Sondage, Flux géothermique, Pyroclastique, Andésite Guadeloupe (Soufrière)

RÉSUMÉ

Deux campagnes de mesures thermiques, étude de surface et mesures en profondeur moyenne, ont été réalisées, ces dernières années, dans le massif volcanique de la Soufrière.

Les travaux de surface se sont fixés comme objectif de déterminer l'extension et la forme de l'anomalie thermique superficielle. La préparation de cette campagne a nécessité la mise au point, au Laboratoire de Saint-Claude, d'un pont de température de terrain dont la précision était de 0,05 °C et l'étude des différents facteurs intervenant pendant cette campagne: amplitude des variations thermiques annuelles et journalières, détermination de la profondeur des mesures

à effectuer, équilibre thermique des trous réalisés à la barre à mine, etc.

La carte des anomalies a permis de mettre en évidence, outre la forme réelle des zones solfatarieuses, des zones moins spectaculaires qui recèlent cependant des anomalies de température.

Les études de semi-profondeur se sont essentiellement orientées vers la réalisation et l'exploitation de deux forages d'une centaine de mètres, implantés sur les flancs du dôme volcanique. Les principaux travaux réalisés ont été l'étude des gradients thermiques, la mesure de la conductibilité des roches et l'évaluation des flux de chaleur.

A — NOTE LIMINAIRE

A.I — CARACTÈRE CLIMATIQUE EN GUADELOUPE

L'île est située par 16° de latitude Nord et 61° de longitude Ouest, elle est donc caractérisée par un climat tropical insulaire. Les dominantes climatiques sont une humidité atmosphérique toujours élevée et une constance des températures, liée à une faible amplitude thermique.

Le caractère principal des variations de température est une variation diurne nettement supérieure à l'amplitude thermique annuelle:

- amplitude annuelle moyenne de Pointe-à-Pitre: 3,3 °C
- amplitude annuelle moyenne à Saint-Claude: 3,3 °C
- amplitude diurne moyenne à Pointe-à-Pitre: 8,2 °C.

La ville de Basse-Terre est un peu plus chaude que celle de Pointe-à-Pitre. L'ordre de grandeur de la différence est de 0,5 °C sur les températures annuelles moyennes.

La localité de Saint-Claude, située en altitude, est plus fraîche que les villes de Basse-Terre et de Pointe-à-Pitre, l'écart est de l'ordre de 3,5 °C. Sur l'axe Basse-Terre - Saint-Claude, le gradient thermique est de 0,7 °C par 100 mètres.

A.II — CARACTÈRE VOLCANIQUE ACTIF

La Soufrière avec ses 1 467 m se trouve être le plus haut sommet de la Guadeloupe, c'est encore le volcan le plus

* Institut de physique du Globe, 97120 Saint-Claude.

récent. Il domine le centre Sud de l'île qui est une zone à forte densité de population. La dernière manifestation de surface date de 1956, principalement caractérisée par l'ouverture d'une fracture nouvelle et la projection de gaz, de vapeur, et d'éléments fins.

L'activité solfatarienne est soutenue, elle est actuellement installée sur les flancs du massif, après avoir longtemps occupé les parties les plus hautes du dôme volcanique. On rencontre quatre zones principales [J. DOREL, S. ESCHENBRENNER, M. FEUILLARD, 1972] qui, du Nord au Sud sont :

- les fumerolles du Morne Amic, d'extension E-W,
- les fumerolles des sources du Carbet sur le flanc est du volcan,
- les fumerolles de la zone dite des Chaudières-Souffleur sur le flanc nord de l'Echelle,
- les fumerolles du Morne Mitan au Sud.

B — ETUDE DE L'ANOMALIE THERMIQUE SUPERFICIELLE

B.I — MÉTHODE THERMOMÉTRIQUE

Le choix de la méthode de mesure sur le terrain s'est porté sur l'utilisation des thermistances, associées à une méthode de zéro. Cela a nécessité la mise au point d'un pont à fil réalisé au Laboratoire.

Les thermistances utilisées étaient sous enveloppe de verre, leur résistance caractéristique de 100 000 ohms à 25 °C, dans le but de s'affranchir des résistances de ligne, même à haute température.

L'intérêt de l'utilisation des thermistances réside dans leur grande sensibilité, dans un choix très varié dans la gamme des résistances à 25 °C. Elles sont encore caractérisées par la diversité de leurs formes, de leurs dimensions, du mode de protection de la partie sensible. Tout cela ne va évidemment pas sans quelques inconvénients :

— Le premier est la tolérance avec laquelle les thermistances sont jusqu'ici livrées, en règle générale, elles vont de $\pm 5\%$ à $\pm 20\%$;

— La deuxième difficulté réside dans la loi de variation : résistance température, qui n'est pas linéaire. Nous avons cependant volontairement évité le montage en shunt qui, au prix d'une diminution de sensibilité, permet d'obtenir une loi de variation voisine d'une loi linéaire;

— La troisième difficulté est liée au faible coefficient de dissipation thermique de ces éléments. Cela nécessite de veiller à la limitation des intensités circulant dans les parties sensibles, afin de réduire au seuil acceptable, la dissipation de puissance par effet joule.

Les sondes réalisées pour la prospection de surface étaient des cannes métalliques recouvertes d'une gaine de plastique, de 1,50 m de long, à l'extrémité desquelles se trouvaient une ou deux thermistances par sonde, la précision du pont sur le terrain était de 0,05 °C.

B.II — TRAVAUX DE TERRAIN PRÉLIMINAIRES

Avant la campagne de mesures sur le terrain, dans la zone de l'anomalie de température, il a été nécessaire de

Les températures relevées oscillent entre 95 °C et 96 °C. Elles atteignent parfois des températures plus élevées, en période de déficit d'eau, dans le cas d'une pluviométrie anormalement faible, des températures de 138 °C ont ainsi pu être mises en évidence.

C'est dans ce double contexte climatique et volcanique, qu'ont été menées ces dernières années, des études diverses sur l'anomalie thermique du volcan.

Deux campagnes de mesures ont été entreprises :

— l'objectif de la première a été de préciser l'importance et la forme de l'anomalie thermique superficielle;

— la seconde campagne a été articulée autour de la réalisation de deux forages dans le massif volcanique afin d'étudier les gradients de températures et de mesurer des flux de chaleur.

préciser les conditions dans lesquelles devaient se faire les mesures, mettre en évidence les conditions extérieures susceptibles de modifier les résultats, les éliminer ou les évaluer afin de pouvoir en tenir compte dans l'interprétation définitive, tels ont été les buts poursuivis dans la mise en œuvre de la phase préliminaire des travaux.

B.II.1 — Détermination de la cote de mesure

Les profondeurs habituellement utilisées pour la mesure de températures dans une zone où l'on désire mettre en évidence les anomalies thermiques, vont de 1 m à 1,50 mètre. La valeur de 1 m est utilisée quand on désire faire une rapide prospection de surface; la valeur de 1,50 m est caractérisée par le fait qu'à ce niveau, on est pratiquement hors d'atteinte des variations diurnes. Compte tenu des natures différentes des zones de surface, il paraît toujours judicieux de réaliser dans ce domaine des mesures préliminaires.

Une série de mesures a donc été entreprise à la cote —1,25 m, au Laboratoire, à 650 m d'altitude. A cette cote, les variations de température liées aux variations diurnes ont été, dans l'ensemble, inférieures à 0,05 °C.

Les mesures ont été réalisées dans des conditions de couverture végétale identiques à celles susceptibles de se rencontrer dans la zone à étudier : végétation d'herbe rase. Un deuxième type de végétation susceptible de se rencontrer, zone forestière à végétation basse mais dense, zone de mangliers (*Clusia venosa*), a nécessité la connaissance des gradients latéraux liés aux couvertures végétales denses. Des mesures ont été menées en un point à 1,25 m de profondeur, placé dans une zone d'ombre quasi permanente au pied d'un vaste démultipliant, à 5 m du trou précédent. L'écart de température mesuré a été de 0,87 °C, inférieur donc au degré centigrade.

Compte tenu du sous-sol varié de la zone volcanique, sous-sol de laves, d'argiles de décomposition, mais aussi de brèches de nuées plus ou moins bien consolidées, afin de tenter de s'affranchir des perturbations de surface, un soin tout particulier a été nécessaire pour le colmatage des

tubages des trous entre l'instant de leur réalisation et celui de la prise de températures, de plus, toutes les mesures ont été en définitive, réalisées à la cote —1,50 mètre.

B.II.2 — Variations annuelles de température à la cote —1,50 mètre

Afin de connaître l'ordre de grandeur des variations annuelles susceptibles d'influer sur les mesures de températures s'étendant sur plusieurs semaines, voire plusieurs mois, il a paru judicieux de poursuivre des mesures de température à 1,50 m du sol pendant toute une année. Le résultat est matérialisé par la courbe de la figure 1. Il s'agit de mesures faites en 1964-1965. Elles ne peuvent en aucune façon être considérées comme des moyennes annuelles; elles ont l'intérêt de fournir l'ordre de grandeur des variations dans notre cas particulier. L'amplitude annuelle donnée par ces valeurs est de 1,53 °C pour la cote —1,50 m au Laboratoire.

B.II.3 — Détermination des gradients thermiques

Quatre bases de mesures ont été définies pour l'étude des gradients. Elles ont été placées sur le flanc ouest du massif, hors de la zone anormale. Toutes les mesures de températures ont été faites à la cote —1,50 m du sol dans des conditions identiques, végétation rase faite de gazon. La première base était à Basse-Terre, à une altitude de 60 m, la deuxième à Bonne-Terre, dans la caserne de gendarmerie, à une altitude de 380 m, la troisième était la station installée au Laboratoire à l'altitude de 650 m, enfin la dernière installée dans le massif volcanique à l'altitude de 1 140 m, au lieu-dit « Savane à Mulets ».

Des mesures ont été réalisées avant la campagne sur le terrain, elles ont donné les valeurs suivantes:

- axe Laboratoire-Basse-Terre: 1°35/100 m,
- axe Laboratoire-Savane à Mulets: 0°94/100 m.

D'où le choix d'un gradient de 1°10/100 m pour la campagne de 1967.

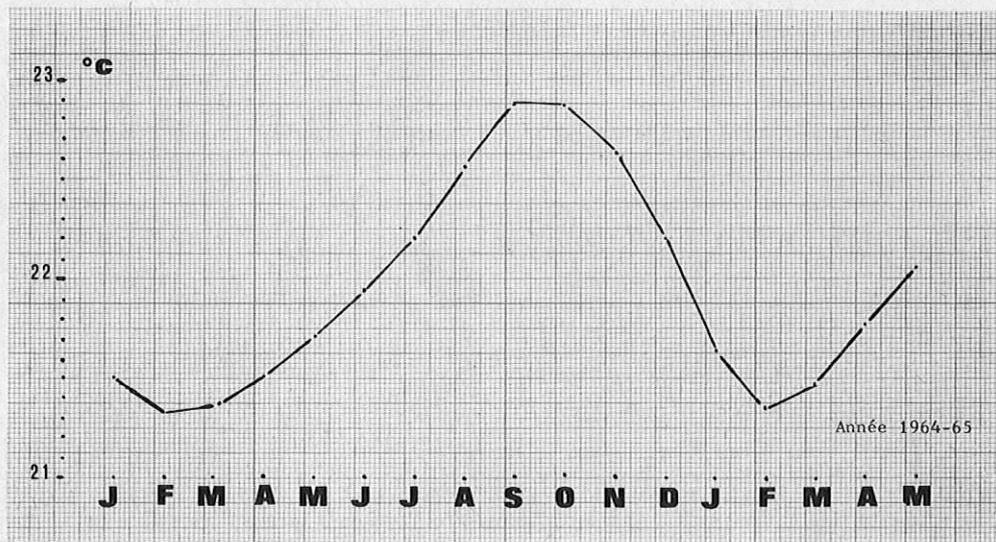


Fig. 1

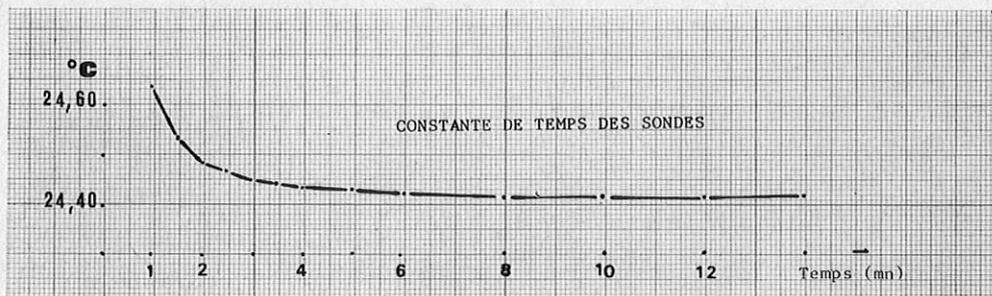


Fig. 2

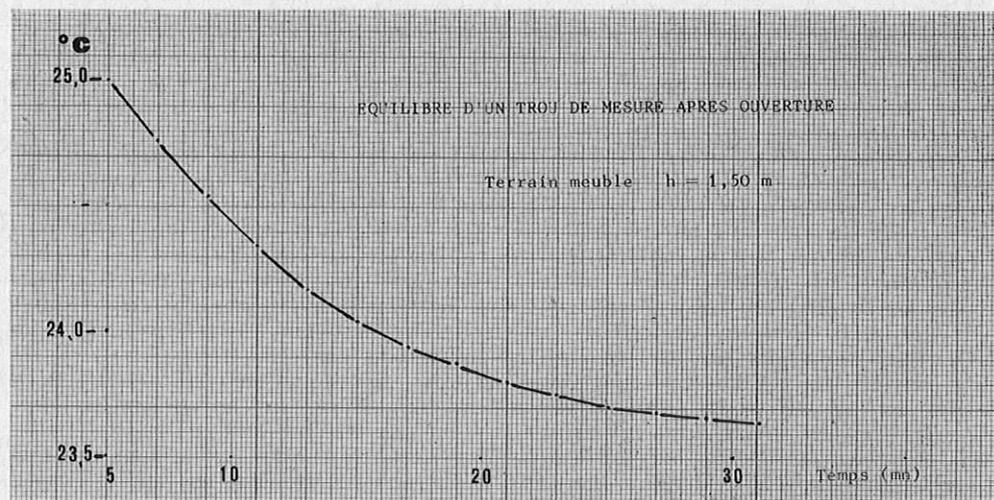


Fig. 3

B.II.4 — Equilibre d'un trou de mesure après forage

L'organisation de la campagne sur le terrain a encore nécessité la connaissance des perturbations thermiques créées par l'utilisation des trous de mesures ouverts par percussion; des essais furent entrepris au Laboratoire, qui montrèrent que dans le cas d'un terrain tendre (brèche volcanique plus ou moins bien consolidée et altérée) percé à la barre à mine, il fallait attendre une bonne demi-heure avant d'espérer obtenir la température du trou à l'équilibre (fig. 3). Compte tenu du fait que nous n'étions pas toujours en terrain tendre, nous nous sommes organisés afin de laisser au moins quarante-huit heures entre le moment du percement et du tubage du terrain, et celui de la mesure de température.

B.III — RÉALISATION DE LA CAMPAGNE PROPREMENT DITE

Les trous de mesures ont été réalisés à la barre à mine, percés jusqu'à 1,50 m de profondeur, maintenus à l'aide de tubes plastiques, ils étaient colmatés extérieurement afin d'éviter les ruissellements possibles le long des parois extérieures, et bouchés dans leur partie supérieure. Cent sept points ont ainsi été exploités pendant cette campagne. Ils ont été complétés par des mesures en surface effectuées dans les zones fumerolliennes et aux griffons des sources chaudes.

Cette campagne proprement dite a été précédée d'une campagne de reconnaissance dont le but était de soumettre à l'épreuve du terrain le matériel utilisé, de permettre la mise au point d'une technique de travail adaptée aux

conditions difficiles du massif volcanique. Une cinquantaine de points avaient été réalisés dans cette première phase, permettant de percevoir déjà les zones chaudes intéressantes, dépourvues d'indices de surface spectaculaires. La plupart de ces points de mesures ont été réutilisés lors de la campagne principale.

Toutes les mesures sur le terrain ont été ramenées à une même journée, par l'étude de la variation annuelle en deux points de référence: le Laboratoire d'une part, à 650 m d'altitude, un point de la Savane à Mulets d'autre part, au pied du dôme volcanique, à 1 140 m d'altitude. Toutes les mesures ont, en outre, été ramenées à un plan horizontal de référence passant par le point (1 140 m) de la Savane à Mulets.

Une carte régionale (fig. 4) présente le tracé des courbes isothermes. Toutes les valeurs mesurées ont été ramenées à la date du 8 juin 1967 et à l'altitude de référence 1 140 mètres. La figure 5 rassemble, elle, les fractures bien visibles sur le terrain, les zones fumerolliennes actuelles, elle situe enfin les principales sources chaudes de la région.

B.IV — INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Le tracé des courbes isothermes met en évidence la présence de trois secteurs volcaniques caractérisés par des anomalies thermiques de plus de 20°, ces trois zones sont directement liées à des activités solfatariales de surface.

Du Nord au Sud, nous trouvons:

Une anomalie de direction sensiblement E-W, vraisemblablement liée à l'existence d'une fracture de même direction, responsable de la dislocation de la coulée du Nez Cassé et de la présence des sources thermales des Bains Chauds du Matouba et de la source chaude de l'habi-

tation Revel. La zone fumerollienne proprement dite de cette anomalie, développée sur la crête du Morne Amic a été découverte en 1902.

Chronologiquement plus ancienne, puisque signalée dès 1892, l'anomalie fumerollienne du flanc est de la Soufrière, regroupe la zone solfatarienne des sources du Carbet et celle, plus accessible, dite des Chaudières-Souffleur. Elle est, elle aussi, probablement liée à une fracturation des terrains superficiels.

Participant à cette zone anormalement chaude, on trouve encore une petite aire, caractérisée par son important dépôt de soufre en surface, qui s'est développée à l'extrémité de la fracture de 1956, au Col de l'Echelle.

Le domaine fumerollien le plus méridional est le secteur dit du Morne Mitan et de la Rivière Claire. Son activité est déjà signalée en 1797 et sa mise en place a probablement été favorisée par le contact des massifs Soufrière et Echelle.

Avec une température moyenne annuelle de l'ordre de 17 °C pour l'air ambiant, le sommet de la Soufrière où l'on rencontre des températures du sol supérieures à 19 °C, doit être considéré comme une région anormalement chaude. La dernière fumerolle d'altitude, la fumerolle de la Fente du Nord, s'est définitivement éteinte en 1970.

Autrefois, siège d'une intense activité solfatarienne, le plateau terminal a progressivement perdu de son activité au profit des flancs du massif. Les sites des anciennes zones les plus actives du sommet, la zone de la fumerolle du Nord et celle de l'ancien « Cratère » Napoléon, restent des secteurs réduits, caractérisés par des valeurs de températures plus élevées.

Le flanc sud du massif présente une anomalie thermique liée à un axe de circulation de fluide chaud. La forme étroite

de l'anomalie suggère la présence d'une fracture favorisant cette circulation. Elle pourrait bien être le prolongement de la grande fracture N-S qui, en surface, se désorganise à ce niveau et disparaît sous les dépôts superficiels. Les repères seraient pourtant les sources thermales du Galion et de la Matylis.

Plein Ouest, l'isotherme 19 °C sur le flanc du dôme, suggère là encore, une circulation d'un fluide chaud en direction de la ravine Marchand. Une zone de minimum de résistivité électrique a été mise en évidence dans ce secteur, par des profils électriques.

A ce stade des études thermométriques de surface, on peut imaginer :

— une activité solfatarienne favorisée par la fracturation rayonnante profonde du dôme volcanique;

— une altération hydrothermale qui, aidée par la forte pluviométrie, a permis le colmatage des événements d'altitude et a poussé à la mise en place progressive des dégagements fumerolliens sur les flancs du massif. Cette migration a été favorisée par la faible valeur de la pression des gaz à la sortie des événements fumerolliens.

L'anomalie du flanc ouest pourrait bien être les derniers indices de la zone fumerollienne signalée par les premiers chroniqueurs dans ce secteur et dont les indices de surface avaient disparu au fil des ans.

La fracture au Nord du massif (Morne Amic), d'orientation E-W, n'est pas directement liée à la tectonique cassante de la Soufrière, elle a probablement été récupérée ultérieurement par les dégagements fumerolliens du secteur nord de la Soufrière.

C — FORAGES GÉOPHYSIQUES DANS LE MASSIF VOLCANIQUE RÉCENT

La deuxième partie de la campagne thermique menée dans le massif de la Soufrière, a consisté en la réalisation de deux forages de faible profondeur, sur les flancs de la Soufrière. Le choix des sites a été fonction des objectifs fixés: faire le premier forage dans une zone faiblement perturbée, réaliser le second forage dans une zone proche d'une aire fumerollienne active. Les possibilités d'accès dans le massif volcanique, la nécessité pour les foreurs d'avoir de l'eau à proximité des sites, le coût enfin d'une telle opération, furent des éléments qui pesèrent très fortement dans le choix définitif des lieux d'implantation.

Les forages furent menés par une société privée qui n'avait qu'une faible expérience des travaux géothermiques. Le contrôle scientifique du chantier était à la charge du Laboratoire de Saint-Claude. L'objectif était la réalisation de deux trous de 100 m de profondeur maximum, entièrement carottés, ces trous devaient, à la fin de la campagne, être tubés et fermés par des vannes. La durée journalière des travaux sur le terrain était de 10 heures, ce qui permettait de faire, au début de chaque poste, une mesure de température après un repos du fond du trou, de 14 heures environ.

C.I — RÉALISATION DES FORAGES

La conduite de ces forages se fit au travers d'énormes difficultés, problèmes nombreux avec le matériel utilisé, qui n'était pas de première jeunesse, pénurie d'eau pour les forages, isolement du chantier, etc.

Le premier site choisi fut à la Savane à Mulets, un point situé dans le Nord-Ouest de l'actuelle aire de stationnement des véhicules (16°02'; 48-61°39'; 68-1 143 m), la cote foreur atteinte fut (—) 97 m, après 50 jours de travail. Le pourcentage des carottes récupérées ne dépassa pas 40%.

Le deuxième forage fut implanté sur le flanc nord-ouest de l'Echelle (16°02'; 57-61°39'; 42-1 253 m), la cote foreur atteint (—) 77,50 m après 40 jours de travail. Le pourcentage de carottes récupérées fut de 30%.

Les deux forages furent équipés d'un tubage définitif de 1 1/4, cimenté au sol sur toute la hauteur, et fermé par une vanne.

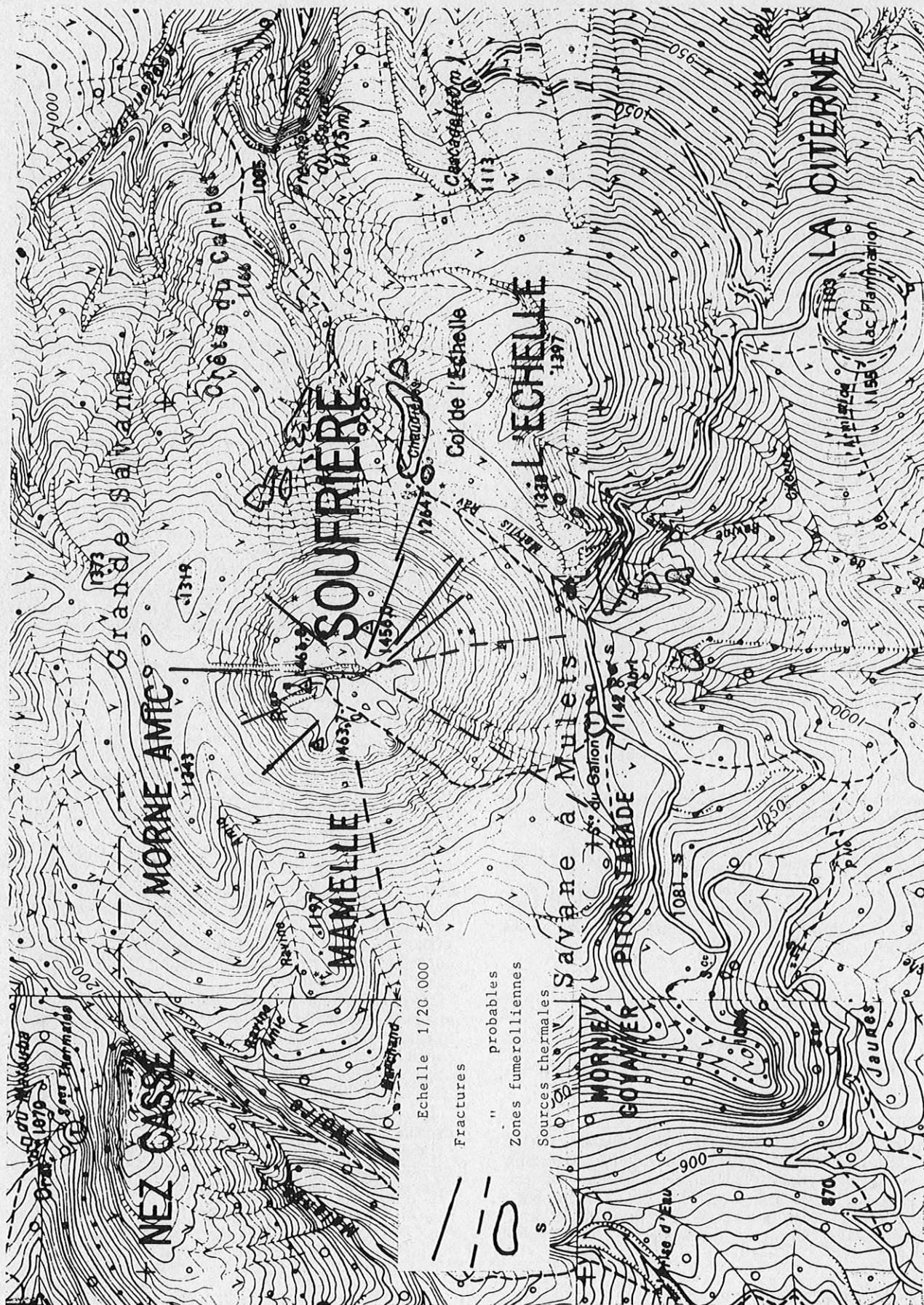


Fig. 5

C.II — EXPLOITATION DES RÉSULTATS

Les deux forages de la Soufrière ont été implantés volontairement dans deux secteurs très différents.

Les buts scientifiques recherchés par cette campagne étaient :

— étudier la coupe géologique sur 100 m d'épaisseur, sur un flanc du volcan Soufrière et sur un flanc du volcan Echelle;

— mesurer les températures au fur et à mesure de la réalisation des trous;

— suivre ces températures pendant un laps de temps important, et déterminer la courbe de température de chaque forage;

— réaliser des mesures de gradients pour chacun des puits et suivre leur évolution;

— mesurer au laboratoire, les conductibilités thermiques des roches recueillies;

— obtenir les premières mesures de flux dans ce massif;

— avoir des forages profonds pour la surveillance des températures au volcan;

— faire des mesures magnétiques pour les carottes récupérées;

— déterminer la composition des gaz occlus dans les carottes.

Ces deux derniers aspects des travaux, en cours d'exploitation, n'entrent pas dans le cadre de cette étude.

La détermination pétrographique sommaire des échantillons a été faite au laboratoire de Saint-Claude. Les cinquante premiers mètres du forage de la Savane à Mulets ont fait l'objet d'une prise d'échantillons qui ont été analysés au B.R.G.M. à Orléans.

La thermométrie de surface et de profondeur a été conduite par le laboratoire de Physique du Globe de Saint-Claude après la mise au point du matériel nécessaire. La précision des mesures de température sur le terrain était de 0,05 °C.

Les mesures de conductibilité thermique ont été faites à l'Institut de Physique du Globe de Paris, au laboratoire de J. JOLIVET.

Les forages ont été réalisés en 1968; ils ont été régulièrement suivis depuis. En 1972, une série de mesures a été faite toute l'année, qui a abouti à une courbe lissée pour chaque forage. Ces courbes sont maintenant des éléments de référence qui permettent de comparer l'évolution des valeurs actuelles.

C.III — SONDRAGE DE LA SAVANE A MULETS F I (fig. 6)

Premier forage de la Soufrière: son implantation s'est faite dans l'axe de l'anomalie de température responsable des sources thermales du Pic Tarade et des Bains Jaunes.

L'isotherme de surface est de 18 °C. Si la « cote foreur » annoncée est —97 m, la mise en place du tubage définitif n'a pas permis de retrouver ce même niveau et le fond actuel

du puits est à la cote —93,30 m, le diamètre du tubage est voisin de 32 millimètres.

La série géologique traversée se présente de la façon suivante :

0- 4,50: alternance de niveaux de cendre et de niveaux composés de ponce et d'éléments pyroclastiques;

4,50- 8,30: cendre volcanique, à la base ponces et débris d'andésite;

8,30-20,20: andésite massive, gris clair, diaclasses tapissées d'hydroxydes de fer. La roche présente parfois des baguettes d'hypersthène;

20,20-22,80: roche contenant de nombreux cristaux de pyrite;

22,80-41,00: blocs d'andésite, gris clair ou foncé, nombreux grains de minerais (pyrite); diaclasses tapissées d'hydroxydes de fer;

41,00-51,30: niveau andésitique altéré, début d'argilisation, présence d'hydroxydes de fer;

51,30-79,30: blocs d'andésite massifs, compacts, peu altérés, parfois très diaclasses; par endroits, roche déformée;

79,30-97,00: andésite très altérée.

Les mesures de températures ont été régulièrement prises au cours du forage. Elles étaient faites le matin en début de poste. Cette courbe de température, courbe A (fig. 6), est présentée sur le même graphique que la courbe lissée B (fig. 6). Elle est caractérisée par son allure en dents de scie. Ses valeurs sont dans l'ensemble supérieures à celles de la courbe moyenne; l'allure générale des deux courbes est néanmoins identique.

La courbe lissée a été obtenue à partir d'une série de mesures faites quatre ans après le forage du puits.

La section a-b de cette courbe correspond à la zone d'aération du terrain.

Le niveau b coïncide probablement avec la surface piézométrique du secteur: c'est le niveau d'eau dans le tubage.

La portion b-c de la courbe correspond à la variation de température du terrain par conduction. La température au fond du trou, à la cote —93,30 m, oscille très peu, autour de 33°02, la valeur moyenne.

Le gradient pour cette portion de courbe a une valeur élevée: 6°45 par 10 mètres. On peut comparer cette valeur avec celles obtenues le 3 mai 1974, par exemple, qui donnent 6°47 de gradient par 10 m, avec une température au fond du trou de 32°80.

Dans ce forage, les valeurs de la conductibilité thermique ont été calculées pour quatre niveaux: 10,80 m, 36,00 m, 58,00 m, 97,00 mètres.

La méthode utilisée pour obtenir la conductibilité thermique des échantillons emploie le procédé du régime stationnaire. Elle consista essentiellement à comparer la conductibilité thermique de l'échantillon à étudier à celle d'un matériau de conductibilité parfaitement connue [J. JOLIVET, 1966].

Les valeurs des gradients et celles de la conductibilité mènent à l'évaluation du flux.

Le flux géothermique dans une zone donnée est la quantité de chaleur qui traverse pendant l'unité de temps, la zone considérée. Son calcul se fait en utilisant la formule:

$$Q = \lambda \frac{d\theta}{dz}$$

Q: le flux cherché,
 λ : la conductibilité thermique du corps,
 $\theta(z)$: la température du corps, fonction de la cote z.
 Tous ces résultats sont consignés dans le tableau I.
 On y compare les valeurs obtenues pour la courbe lissée

au-delà de -74 m et les valeurs expérimentales mesurées aux mêmes cotes, dans le forage, le 3 mai 1974. Les gradients et les flux sont pratiquement les mêmes. Les conductibilités sont plutôt faibles, mais les gradients sont forts; il en résulte une importante valeur de flux thermique.

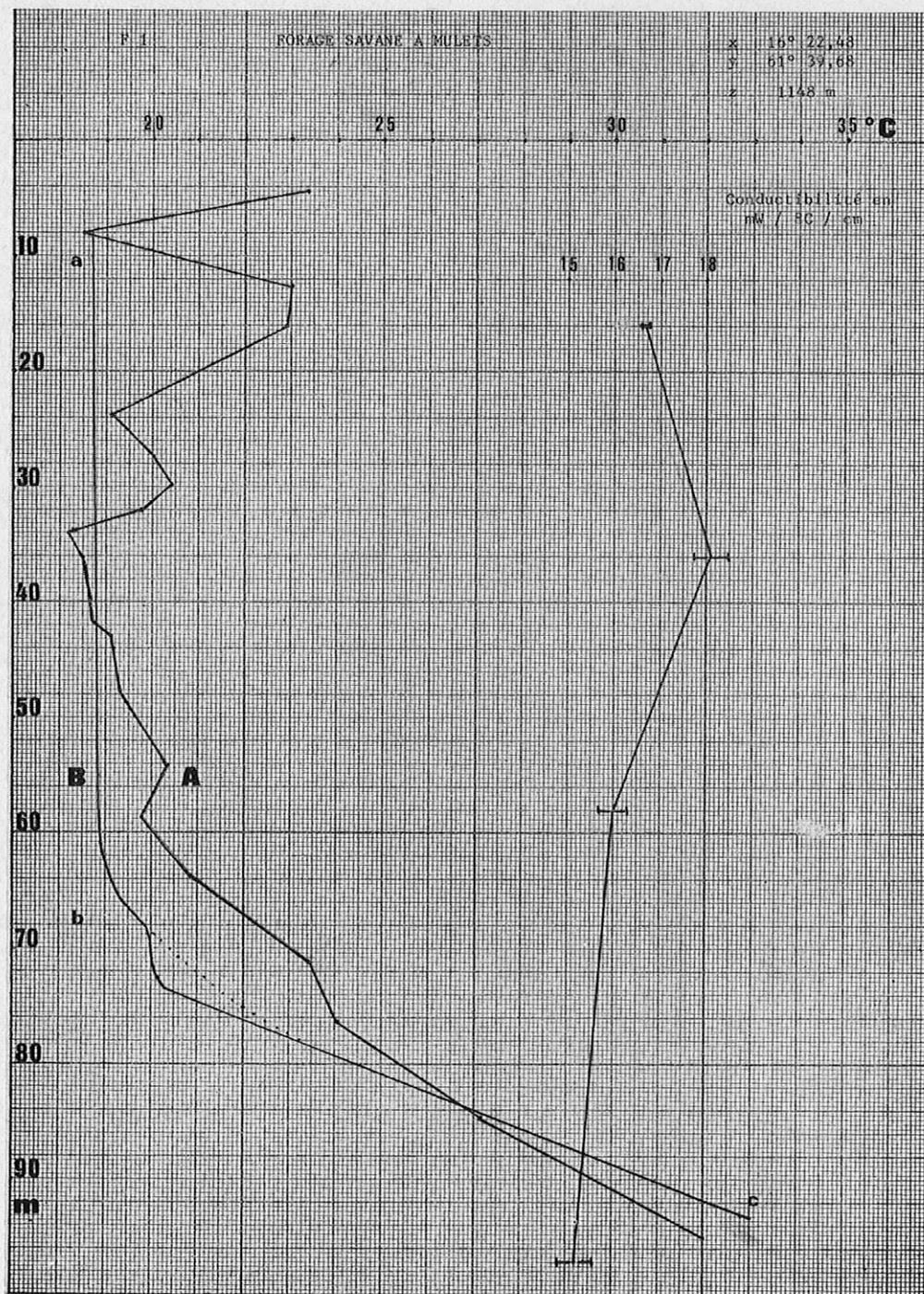


Fig. 6

TABLEAU I. — Analyse d'échantillons - S.A.M.

<i>Altitude (m)</i>	— 10,80	— 36,00	— 58,00	— 97,00
Porosité effective % volume	16,60			
Densité moyenne	2,37			
Conductibilité thermique W/d°/cm ² /cm	$0,01665 \pm 8 \cdot 10^{-5}$	$0,018082 \pm 3,5 \cdot 10^{-4}$	$0,015966 \pm 3,3 \cdot 10^{-4}$	$0,015120 \pm 4,8 \cdot 10^{-4}$
Gradient de la courbe lissée/10 m			6°,45	6°,45
Flux en microwatt/cm ²			103,00	100,20 97,50
Gradient expérimental du 3 mai 1974 pour 10 m			6°,47	6°,47
Flux en microwatt/cm ²			103,30	100,50 97,80

TABLEAU II. — Analyse d'échantillons - C-d-E

<i>Altitude (m)</i>	— 42	— 70	— 77
Porosité effective % volume	35,40	15,50	3,30
Densité moyenne	2,03	2,26	2,74
Conductibilité thermique W/d°/cm ² /cm	$0,013057 \pm 1,1 \cdot 10^{-4}$	$0,015277 \pm 5,2 \cdot 10^{-5}$	$0,01741 \pm 9 \cdot 10^{-5}$
Gradient de la courbe lissée/1 m	4,53 °C	0,53 °C	0,53 °C
Flux en microwatt/cm ²	591,40	81,00	86,60 92,30
Gradient expérimental du 1 ^{er} juin 1973 pour 1 m	4,36 °C	0,55 °C	0,55 °C
Flux en microwatt/cm ²	569,90	84,10	90,00 95,90

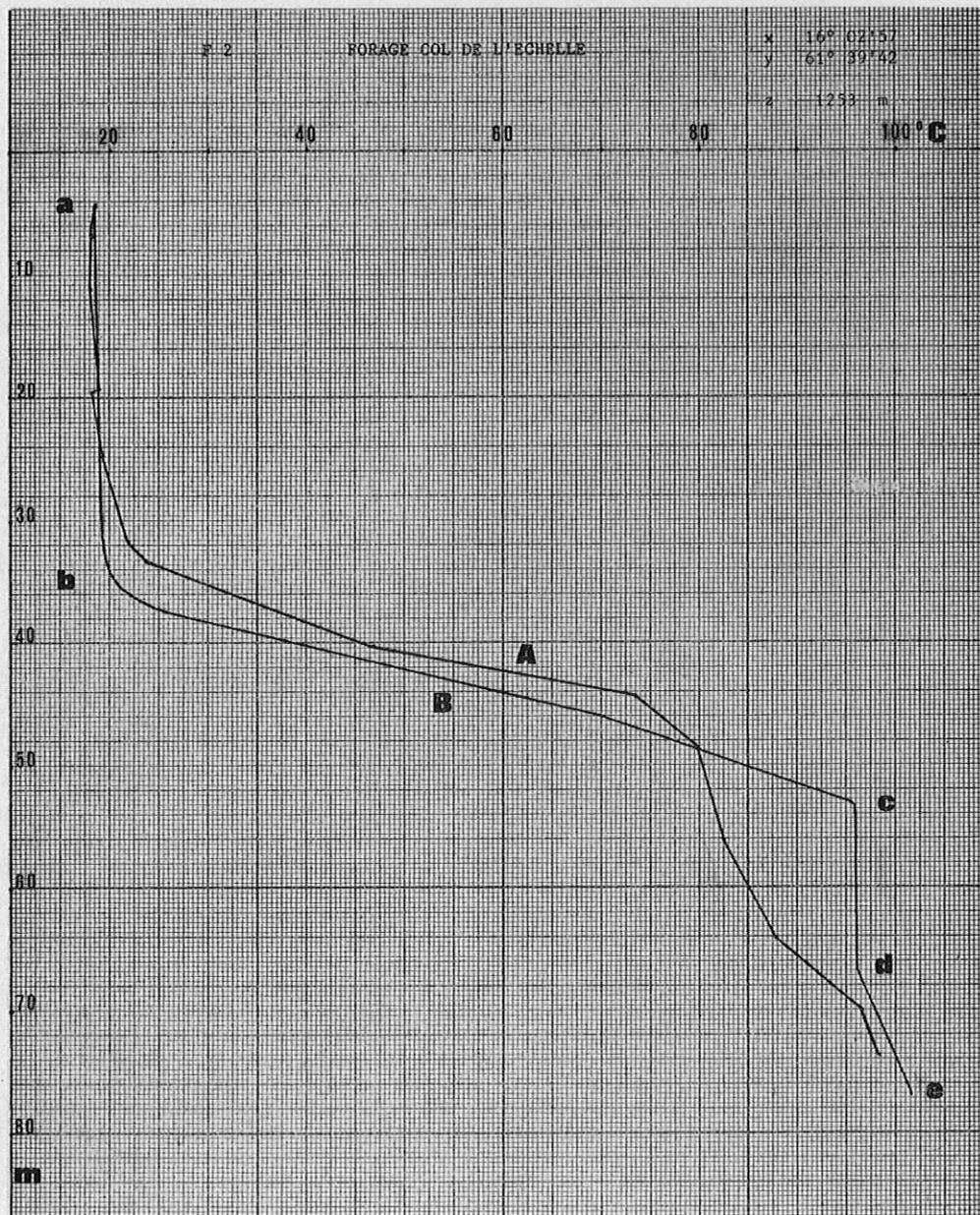


Fig. 7

**C.IV — SONDAGE
DU COL DE L'ÉCHELLE F 2 (fig. 7 et 8)**

L'implantation du sondage du Col de l'Echelle s'est faite sur le flanc nord-ouest de l'Echelle, entre deux aires fumerolliennes actives, la zone Chaudière-Souffleur au Nord, la zone du Morne Mitan au Sud. L'isotherme de

surface est de 19 °C. La partie supérieure du sol était caractérisée par de l'argile de décomposition, indice d'une altération hydrothermale ancienne.

La « cote foreur » annoncée est de -77,50 mètres. Comme dans le cas précédent, après la mise en place du tubage, c'est une cote de -76,90 m qui a été retrouvée au fond du puits. Les caractéristiques des tubages sont identiques pour les deux sites.

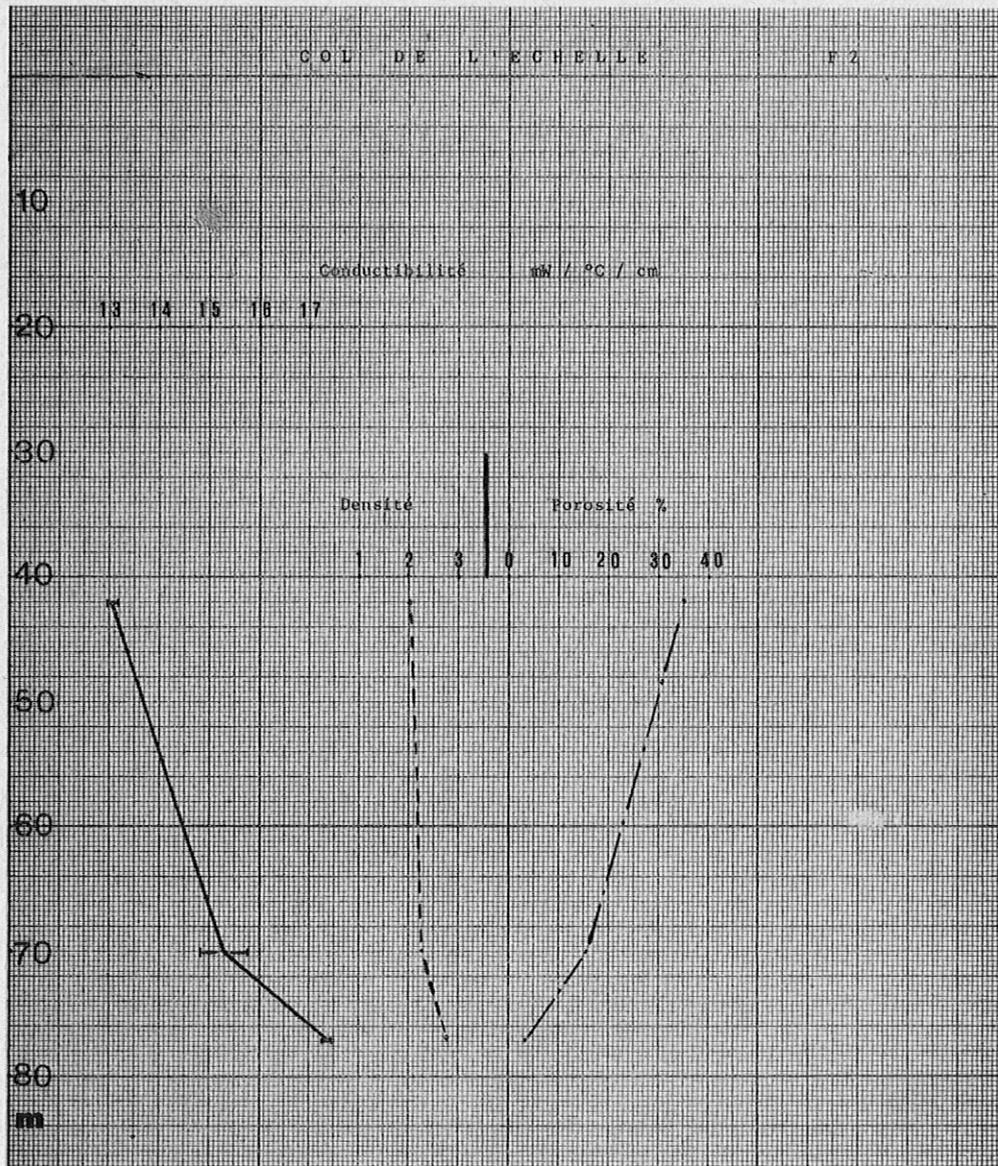


Fig. 8

La série géologique traversée est, dans son ensemble, plus altérée que dans le cas précédent. On y trouve successivement:

- 0-2 m: argile claire d'altération;
- 2-5 m: cendre fine ponceuse altérée;
- 5-10,50 m: andésite claire, compacte, peu diaclasée. Niveau intermédiaire avec veines d'argile;
- 10,50-11,00 m: niveau argileux très altéré;
- 11,00-31,00 m: niveau de lapilli ponceux — hydroxyde de fer — reposant sur un « sol » très altéré;

- 31,00-33,00 m: brèche andésitique altérée;
- 33,00-62,00 m: alternance de niveaux de laves andésitiques plus ou moins altérés et de niveaux pyroclastiques soudés (lapilli);
- 62,00-77,50 m: niveau de lave andésitique altéré dans la partie supérieure qui passe progressivement à une roche dure, compacte et saine en profondeur.

La méthode de mesure de températures en cours de travaux a été menée comme pour le chantier précédent.

La courbe A de la figure 7 représente les valeurs de la température prises 14 heures après l'arrêt des travaux. Une courbe lissée B (fig. 7) est présentée sur le même graphique. Elle est le résultat de mesures faites en 1972, quatre ans après la fin des travaux. Elle joue le rôle de courbe de référence pour les mesures actuelles.

La section a-b de cette courbe correspond ici, à la zone d'aération du terrain.

Le niveau b coïncide avec la surface piézométrique du terrain; c'est ici encore le niveau d'eau dans le tubage.

La portion b-c correspond à un échange de chaleur par conduction; le gradient thermique dans cette zone est très élevé: il correspond à 4,53 °C/m pour la valeur moyenne sur la courbe lissée.

Si on compare ces valeurs à celles obtenues expérimentalement le 1^{er} juin 1973, par exemple, on trouve pour ce niveau de forage, un gradient de 4,36 °C/m.

La portion c-d de la courbe de référence B correspond à une zone d'échange de chaleur par convection. La mise en place de cette zone a probablement été favorisée par la présence d'un niveau perméable; la température moyenne est de 96°20.

Au-delà de 67 m de profondeur, avec la portion d-e de la courbe, nous retombons dans une zone de transfert de chaleur par conduction. Le gradient dans cette portion de courbe est de 0,53 d°/m, valeur élevée, du même ordre de grandeur que celui trouvé à la Savane à Mulets.

Si on compare cette valeur avec les mesures expérimentales du 1^{er} juin 1973 pour cette portion de courbe, on trouve un gradient de 0,55 d°/m avec une valeur au fond du puits de 101,10 °C.

La nature généralement altérée des carottes de forage n'a pas permis de nombreuses déterminations de conductibilité thermique sur les échantillons. Trois déterminations ont cependant été faites aux cotes -42 m, -70 m et -77 mètres.

Ces déterminations placées dans les deux zones à échange thermique par conduction permettent une évaluation des flux de chaleur. Les résultats sont présentés dans le tableau II.

On peut signaler que toute modification dans l'apport d'énergie profonde, doit apparaître sur la portion de courbe d-e, et doit se retrouver, sur la portion de courbe b-c sous forme de variation de gradient thermique.

D — RÉSULTATS DES FORAGES

Le forage de la Savane à Mulets montre la courbe classique de variation de température d'une zone où les échanges thermiques se font par conduction. Les températures du domaine prospecté sont faibles, mais les gradients sont élevés; ils se répercutent sur le flux qui, lui aussi, a une valeur élevée. La zone de rétention, partie supérieure du terrain étudié, dépourvue d'eau de percolation est caractérisée par une température inférieure à 19 °C. La circulation des fluides pendant les travaux a désorganisé au moins pendant les 30 premiers mètres, la distribution thermique du terrain.

Le forage du Col de l'Echelle a une courbe de température plus complexe. La zone de rétention est définie par des températures voisines de 19 °C. Les mesures de température faites pendant les travaux montrent une notable perturbation de la zone convective lors de la réalisation du puits due à l'injection des fluides des foreurs. Il est particulièrement intéressant que ce sondage ait pu atteindre des températures dépassant les 100 °C.

E — CONCLUSION

La campagne thermique menée dans le cadre de cette étude a permis de mieux préciser, en surface, l'extension des zones solfatarieuses; elle a mis en évidence des zones superficielles anormalement chaudes (anciennes zones solfatarieuses et axes de circulation de fluide en profondeur). La carte des isothermes représente le visage actuel de l'anomalie de surface; elle permettra de suivre l'évolution, la modification éventuelle de la distribution des températures superficielles.

Avec les résultats des forages, nous avons pu définir la courbe de variation des températures du sol en deux points du massif. Les carottages continus ont permis non seulement d'atteindre les séries pétrographiques sur une centaine de mètres d'épaisseur, mais encore de réaliser les premières mesures de conductibilité thermique dans ce secteur et d'obtenir des valeurs de flux de chaleur au volcan, valeurs vingt fois supérieures au flux de chaleur normale (5,5 $\mu\text{W}/\text{cm}_2$).

Le visage de cette zone volcanique anormalement chaude se précise davantage; les zones fumerolliennes sont d'origine profonde, la circulation des gaz et de la vapeur à haute température est favorisée par des fracturations en profondeur et les dépôts volcaniques plus ou moins bien consolidés en surface. La nappe phréatique d'altitude peu développée, probablement très compartimentée, joue un rôle déterminant dans le régime thermique de surface. Elle bloque les dégagements à haute température en jouant le rôle de nappe tampon. En période de déficit de pluie, lors de la réduction de l'importance de la nappe phréatique, apparaissent en certains points de la zone solfatarienne, des températures très souvent supérieures à la température d'ébullition de l'eau.

L'exploitation des deux forages tubés, toujours immédiatement utilisables, devra pouvoir se faire dans la perspective d'une détection de mouvements magmatiques profonds, et, ce faisant, s'inscrire dans le cadre des méthodes à exploiter pour la protection des personnes et des biens.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CARSON J. E. — Analysis of soil and air temperatures by Fourier techniques. *J.G.R.*, 15 avril 1963.
- DOREL J., ESCHENBRENNER S., FEUILLARD M. (1972). — Les volcans actifs de la Guadeloupe et de la Martinique-Petites Antilles. *Bull. volcanol., Ital.*, XXXVI, 2, pp. 359-381.
- DROMS C. R. — Thermistors for temperatures measurements. Resistance thermometry, pp. 339-346.
- HENTINGER R., JOLIVET J. (1967). — Sur quelques déterminations de flux géothermiques en France. *Bull. B.R.G.M., Fr.*, (2), pp. 101-114.
- JOLIVET J. (1966). — Mesure de la conductibilité thermique des roches au Laboratoire. *IPG*, n° 19, Université Paris.