AGENCE FRANÇAISE POUR LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE A.F.M.E.

PROSPECTION GÉOTHERMIQUE DE LA PLAINE DU LAMENTIN

(Martinique)

MODÈLE HYDROGÉOCHIMIQUE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département géothermie et hydroénergie

Rapport du B.R.G.M.





AGENCE FRANÇAISE POUR LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE

A.F.M.E.

27, rue Louis-Vicat - 75737 PARIS CEDEX 15

PROSPECTION GÉOTHERMIQUE DE LA PLAINE DU LAMENTIN (Martinique)

MODÈLE HYDROGÉOCHIMIQUE

par

R. FABRIOL et G. OUZOUNIAN



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département géothermie et hydroénergie B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 64.31.22

Rapport du B.R.G.M.



Septembre 1985

R E S U M E

.

La prospection hydrogéochimique de la zone du Lamentin a permis d'identifier que l'eau du réservoir traversé par le forage LA 101 et qui alimente les sources chaudes à environ 50°C a une température de dernier équilibre comprise entre 110 et 140°C. Ce dernier équilibre masque en partie l'histoire antérieure de cette eau, et en particulier la température maximale que puisse atteindre le réservoir.

SOMMAIRE

-=-=-

1 ·	~ INTRODUCTION	1
2 ·	- GENERALITES	1
	2.1 Acquisition des caractéristiques chimiques par une eau géothermale	I
	2.2 Méthodes de prélèvements	2
	2.3 Mesures de terrain	3
	2.4. – Analyses de laboratoires	4
3.	- DESCRIPTION DES SITES PRELEVES	4
	3.1 Situation des émergences	5
	3.2 Description des émergences	5
4.	- CARACTERISTIQUES GENERALES DES EAUX DU LAMENTIN	7
5	~ RESULTATS	8
6	- INTERPRETATION	8
	6.1 Origine de l'eau des sources chaudes	8
	6.2 Estimation de la température du réservoir alimentant les sources chaudes	20
	6.3. – Modèle	23
	BIBLIOGRAPHIE	25

.

LISTE DES FIGURES, TABLEAUX ET DIAGRAMMES

Figure 1 : Implantation des sources du Lamentin

- TableauI : Résultats des analyses chimiques des sources de la région
du Lamentin (en moles/l)
- Tableau II : Résultats des analyses chimiques des sources de la région du Lamentin (en moles/l)
- Tableau III : Résultats des analyses isotopiques des sources de la région du Lamentin (en δ ‰)
- Tableau IV : Résultats des analyses $\delta^{1\,\theta}$ 0 dans les sulfates et calcul géothermométrique basé sur le rapport entre l'oxygène 18 dans les sulfates et dans l'eau
- TableauV : Résultats des analyses de gaz libres de trois sources
chaudes du Lamentin (% en volume)
- Tableau VI : Résultats des calculs géothermométriques (en °C)

Diagrammes 1 à 14 : Composition chimique - Diagrammes binaires

Diagrammes 15 - 16 : Composition chimique - Diagrammes isotopiques

Diagramme 17 : Equilibre eau-minéraux en fonction de l'accroissement de température - Source Ll

1 - INTRODUCTION

Les résultats de la dernière campagne d'exploration en Martinique (rapport 84 SGN 292 GTH) avaient permis d'identifier des indices, essentiellement qualitatifs, pouvant tracer un réservoir de type haute énergie dans la région du Lamentin. La forage LA 101 réalisé au Morne Cabri en 1969 avait atteint un réservoir à 93,5°C. L'ensemble des observations et données existantes permettait d'envisager un modèle suivant lequel le réservoir identifié, tant par le forage que par les émergences, pouvait correspondre à une couverture de gisement à plus haute température.

L'objectif de l'étude hydrogéochimique lors de la reconnaissance géothermique de la région du Lamentin est de préciser l'existence éventuelle de ce gisement profond et d'en estimer les caractéristiques des fluides.

Le support de l'étude hydrogéochimique est constitué par une série de prélèvements et d'analyses d'eaux chaudes ou froides produites par des émergences naturelles. Les travaux sont réalisés suivant une méthodologie précise, spécifique aux techniques d'exploration.

L'exploitation des résultats se propose d'établir :

- . l'origine de l'eau constituant le réservoir profond,
- . la composition des eaux en profondeur,
- . la température du réservoir,
- . la nature et l'origine des gaz,

dans la mesure où les fluides captés n'ont pas vu leur composition perturbée par des phénomènes secondaires subsuperficiels. Dans le cas contraire, on cherchera à retracer l'histoire de l'eau afin de tenter d'obtenir les caractéristiques recherchées.

2 - GENERALITES

2.1. - Acquisition des caractéristiques chimiques par une eau géothermale

L'eau rencontrée dans les aquifères des champs géothermiques est, de façon générale, d'origine superficielle au sens large : écoulement en surface d'eau météorique, rivière, lac d'eau douce ou salée, mer.

Cette eau s'infiltre à la faveur de discontinuités lithologiques ou tectoniques et pénètre en profondeur où elle va rencontrer des roches de plus en plus chaudes. Lorsque le système perméable profond est bien développé, l'eau transite ou stationne dans un aquifère que le géothermicien recherche comme objectif de production. Pendant son parcours, elle acquiert une certaine quantité d'éléments chimiques constituant les terrains traversés. Dans le réservoir où elle séjourne pendant une période suffisante, l'eau va fixer sa composition chimique et isotopique par le jeu des réactions entre le fluide et les minéraux à la température et à la pression du réservoir. Pour certains ions, la concentration en solution va être contrôlée par ces minéraux, tels Na et K pour les feldspaths ou la silice par le quartz. Ces équilibres sont fonction de plusieurs paramètres dont la température qui joue un rôle prépondérant. C'est pour cette raison que ces équilibres sont utilisables comme géothermomètres.

L'eau va acquérir de la même façon une certaine quantité de gaz dissous dont l'analyse permet d'en déterminer l'origine (superficielle ou profonde).

La composition isotopique de l'eau indiquera l'origine de l'eau et, dans certains cas favorables, la zone de recharge de l'équifère, par comparaison avec la composition isotopique des eaux météoriques et superficielles locales.

Dans le cas d'eaux produites en surface à partir d'un réservoir géothermique, une étude attentive de la chimie des eaux permettra donc de connaitre la qualité de l'eau des réservoirs, son origine et la température qu'elle a pu atteindre en profondeur.

Lorsqu'au cours de son trajet, depuis le réservoir vers la surface, la composition de l'eau a été perturbée, le rôle de l'étude hydrogéochimique consistera à identifier les modifications. Dans le cas de mélanges avec des eaux de surface, la perturbation est généralement aisément détectée. Dans d'autre cas, tels les rééquilibrations chimiques, dans un aquifère subsuperficiel, l'histoire de l'eau à plus grande profondeur peut être camouflée ; seuls les indices qualitatifs permettent alors de concevoir un modèle ; les températures obtenues sont alors les dernières températures d'équilibre donc des températures minimales.

2.2. - Méthodes de prélèvements

Les eaux sont prélevées suivant les procédures standards. Les conditionnements spécifiques sont adaptés aux différents types d'analyses qui seront ultérieurement réalisés en laboratoire.

Les prélèvements d'eau sont, pour la plupart, filtrés ; certains sont acidifiés afin d'éviter les phénomènes de reprécipitations ou de fixation sur les parois des flacons. Lorsque le prélèvement concerne un élément peu stable dans le temps, celui-ci est soit fixé à l'aide d'une réaction qui lui est propre, soit dosé sur place.

Les anions

[•] Prélèvements de 250 ml en flacon polyéthylène ; filtration sur membrane interte de 0.45 μ m de porosité pour la détermination des teneurs en HCO₃⁻⁻; Cl⁻, SO₄⁻⁻, F⁻, SiO₂, B.

Lorsque les teneurs en SiO₂ sont élevées, il y a lieu de diluer immédiatement l'échantillon afin d'éviter toute précipitation secondaire sous une forme moins soluble que celle qui a réglé la concentration. En présence de teneurs en sulfures relativement importantes vis à vis des sulfates, une représentation fiable de la forme oxydée peut être obtenue soit par dégazage des espèces réduites, volatiles en milieu acide, soit par différence après oxydation de l'ensemble des formes du soufre et dosage des formes réduites.

Les cations

Prélèvement de 250 ml après filtration sur membrane filtrante de 0,45 μ m de porosité et acidification par HNO, suprapur. Les éléments dosés sur ce prélèvement sont : Na, K, Li, Ca, Mg, Sr.

Eléments en traces

Pour le dosage des éléments en traces, le prélèvement est filtré sur une membrane de $0.1 \,\mu\text{m}$ de porosité puis acidifié par HNO, suprapur. L'échantillon doit être conditionné de manière à éviter toute pollution ou toute réaction secondaire pouvant affecter des microteneurs. Les éléments qui seront dosés sur ce prélèvement sont : Rb, B, As, F, Fe, ainsi que tout autre élément présentant un intérêt particulier (fonction des objectifs de l'analyse et de la spécificité des caractéristiques de l'échantillon).

Isotopes ¹⁸0-D

Un prélèvement brut de 500 ml en flacon polyéthylène.

Isotopes ¹⁸0 dans les sulfates

Un prélèvement de l litre d'eau brute auquel on ajoute un réactif permettant de fixer les sulfures éventuels qui pourraient dans le cas contraire s'oxyder en sulfates et perturber l'analyse ultérieure.

Gaz

Les gaz libres sont receuillis en ampoule de verre par déplacement d'eau.

2.3. - Mesures de terrain

Les grandeurs non conservatives sont déterminées sur place, dans ces conditions rigoureuses :

Température

La température des prélèvements et des analyses est déterminée à l'aide d'une sonde thermométrique à environ 0.1°C. <u>pH</u>

Le pH est déterminé dans les conditions de production, à la température du fluide. L'étalonnage de l'ensemble de mesure est réalisé à l'aide de tampons précis, calibrés, portés à la température de mesure. Le pH est mesuré en système clos, à l'abris de l'air, de manière statique dans un tube hermétique ou en circulation dans un montage conçu à cet effet.

Conductivité

Elle est mesurée à l'aide d'une sonde de conductivité, à la température de production.

Réserve alcaline

Représentation de l'ensemble des espèces actives sur le pH ; la réserve alcaline est dosée par les méthodes GRAN et CULBERSON, d'ajouts successifs d'acide. La détermination est réalisée à la température d'émergence, l'ensemble de mesure étant préalablement calibré à cette température.

2.4. - Analyses de laboratoires

Analyses chimiques

- . Les éléments Na, K, Ca, Mg, Li, Rb, Sr, Fe sont analysés en absorption atomique en flamme ou en four, ou encore à l'aide d'une torche à plasma.
- . Cl, NH₄ et SiO₂ par méthodes colorimétriques.
- . Le bore (B) par absorption atomique après extraction organique.
- . Les sulfates par néphélométrie.
- . L'arsenic (As) par absorption atomique en four graphite.
- . Les gaz sont analysés par chromatographie.

Analyses isotopiques

L'oxygène (¹⁸0) et le deutérium (D) de l'eau et l'oxygène des sulfates sont dosés classiquement au spectromètre de masse après extraction.

3 - DESCRIPTION DES SITES PRELEVES

L'étude a porté sur les sources émergeant dans la plaine du Lamentin. Seules 8 sources ont pu être identifiées et localisées ; les enquêtes auprès de la population ont indiqué que d'autres émergences avaient existé mais qu'elles avaient disparu depuis de longues années. De la même manière, les puits d'eau "douce" (au dire de la population locale) sont hors d'usage et n'ont pu permettre l'échantillonnage d'eau superficielle. Seule la Fontaine de Moutte, à Fort de France, a pu être prélevée et analysée.

3.1. - Situation des émergences

La carte (fig. l) indique l'implantation des différentes sources prélevées et analysées.

3.2. - Description des émergences

Ll - Source de la voie ferrée - Morne Cabri - Mangrove

La source de la voie ferrée est la source la plus au Nord du Lamentin. Elle émerge le long du chemin, anciennement voie ferrée, qui relie la zone industrielle du Lamentin au Morne Cabri. Cette source émerge en bordure du chemin qui constitue une surélévation artificielle d'environ un mètre par rapport à la mangrove. L'émergence est diffuse sur un rayon d'environ un mètre et constitue une flaque d'eau dont la couleur ocre des dépôts ferriques permet de la repérer. Le débit ne peut être mesuré compte tenu de la géométrie de l'émergence ; toutefois la source Ll est la plus productive de toutes les sources. Un dégazage important de l'eau se produit au contact de l'atmosphère.

L2 - Habitation Carrère

La source L2 est située au Sud du canal Carrère, à environ 500 m d'Habitation Carrère, entre une batisse et le canal. Son débit est très faible, de l'ordre de quelques litres par minute. Contrairement à la source L1, on ne relève aucune trace de dépôts ferrugineux, ni de dégazage.

L3 - Source de la Lézarde

La source de la Lézarde émerge le long du Canal de la Lézarde, sur le versant nord, à environ 300 m de l'extrêmité de la zone industrielle du Lamentin. Elle se caractérise par un débit extrêmement faible, lui conférant un aspect de flaque de boue. En revanche, l'abondance des gaz bullant dans cette flaque permet de repérer la source. Il est à noter que l'eau a été prélevée par extraction dans la boue quelques heures après un orage. On a pu vérifier qu'après quelques jours de temps sec, cette source ne produisait plus que du gaz. Cette émergence se situe sur la surélévation constituant la bordure du canal, à environ un mètre du niveau de la mangrove.

L4 - Habitation Carrère

La source L4 émerge au Nord du Canal Carrère, de manière symétrique à la source L2 par rapport au canal. Elle présente le même aspect que la source L2.

MARTINIQUE - LE LAMENTIN

IMPLANTATION DES SOURCES DU LAMENTIN

ECHELLE : 1/50.000



LES TROIS ILETS

L5 - Mangrove

Cette source émerge dans la mangrove à environ 300 m au Nord du parc d'avions de tourisme de l'aéroport civil. L'accès à l'émergence n'a pu être possible qu'à marée basse et moyennant des difficultés importantes ; il faut en effet traverser environ 200 m de zone marécageuse pour atteindre un monticule émergeant d'environ 20 cm à marée basse. L'émergence est également diffuse et le débit est très faible.

L6 - Fontaine de Moutte

Cette eau a été prélevée à Fort de France, sur le flanc sud du relief de Moutte. Cette eau était autrefois exploitée pour la consommation. L'accès à l'émergence, envahi par la végétation, a pu être dégagé pour le prélèvement. Le débit de la source est de quelques litres par minute. On y note un dépôt ferrugineux important. La source de la Fontaine de Moutte est la moins chaude de toutes les sources prélevées.

L7 - Aéroport civil

La première émergence se situe à l'angle du parking pour avions de tourisme et de la voie d'accès à la piste d'envol. Son débit est très faible.

L8 - Aéroport civil

La seconde émergence est voisine du parking pour avions de tourisme, du côté de l'aéroport voyageurs. Elle présente l'aspect d'une flaque faiblement alimentée en eau mais abondamment productrice de gaz.

Le personnel de l'aéroport nous signale que de nombreuses sources existaient auparavant dans ce secteur mais qu'elles ont disparu lors des travaux. Un tuyau d'environ 10 cm de diamètre a été noyé dans la dalle bétonnée du hangar de l'aéroport ; on relève à partir de ce tuyau une production très importante de gaz, essentiellement constituée de CO_2 .

L9 - Parking autocar de l'aéroport civil

Cette source est très proche des deux sources précédentes (environ 100 m) et émerge derrière le parking autocar. Son débit est également faible.

4 - CARACTERISTIQUES GENERALES DES EAUX DU LAMENTIN

Les eaux émergeant actuellement dans la plaine du Lamentin ont des débits très faibles ; les températures s'échelonnent de 39 à 54,2°C. L'eau de la Fontaine de Moutte a une température plus faible, de 29,3°C. Exceptée cette dernière, toutes les eaux ont une composition sensiblement identique :

- . une minéralisation essentiellement représentée par NaCl (environ 8,4 g/l NaCl pour 11,8 g/l au total)
- . des pH de l'ordre de 6.

La Fontaine de Moutte présente un caractère plus acide (pH = 5.63) et une minéralisation nettement plus faible.

5 - RESULTATS

Les résultats sont reportés dans les tableaux I, II, III, IV et V suivants. Les données disponibles sur la région, et concernant la mangrove, l'eau de mer et l'eau du forage sont également présentées.

6 - INTERPRETATION

6.1. - Origine de l'eau des sources chaudes

La composition chimique et isotopique de l'eau permet de définir son origine. Il est commode pour cela d'utiliser des diagrammes binaires afin d'observer aisément les relations entre les éléments chimiques dosés. Le chlore est pris comme référence car sa concentration en solution n'est pas limitée par un minéral dans des conditions physicochimiques du réservoir géothermique.

Dans les diagrammes 1 à 14, on observe :

- le groupe des sources chaudes très homogène, auquel se rattache l'eau du forage LA 101 (forage de gradient réalisé par Eurafrep en 1969);
- là composition en Na, K, Cl semble indiquer que les sources chaudes seraient à l'origine un mélange d'environ 70 % d'eau météorique et 30 % d'eau de mer. A titre de comparaison, la mangrove est un mélange en parties égales d'eau de mer et d'eau météorique ;
- . l'enrichissement en Ca, HCO_3 , SiO_2 , B, NH_4 , F, Sr, As, Rb, Li et Al et l'appauvrissement en Mg et SO_4 par rapport aux eaux de surface seraient le résultat d'un rééquilibrage dans un réservoir plus chaud.

Les points représentatifs de sources et de la mer ont été placés dans un diagramme (n° 15) oxygène 18/deutérium. Les sources froides se situent sur la droite caractéristique de la composition des eaux météoriques mondiales.

ECH Temp PH NA K CA NG CL	HC03 504
L1 52.5 6.21 0.143E+00 0.335E-02 0.175E-01 0.556E-02 0.180E+ L2 54.2 6.09 0.148E+00 0.325E-02 0.203E-01 0.561E-02 0.180E+ L3 47.3 6.22 0.152E+00 0.335E-02 0.200E-01 0.573E-02 0.196E+ L4 43.9 6.02 0.130E+00 0.281E-02 0.182E-01 0.495E-02 0.170E+ L5 41.0 5.96 0.137E+00 0.292E-02 0.184E-01 0.651E-02 0.170E+ L6 29.3 5.63 0.422E-02 0.179E-03 0.161E-02 0.102E-02 0.564E- L7 39.0 6.14 0.143E+00 0.312E-02 0.198E-01 0.551E-02 0.564E- L7 39.0 6.14 0.143E+00 0.312E-02 0.196E-01 0.553E-02 0.187E+ L8 50.4 5.99 0.143E+00 0.317E-02 0.196E-01 0.553E-02 0.187E+ L9 53.0 6.18 0.138E+00 0.317E-02 0.192E-01 0.528E-02 0.185E+ M6NB 26.8 7.69 0.241E+00 0.482E-02 0.570E-02 0.265E-01 0.270E+	00 0.155E-01 0.174E-02 00 0.137E-01 0.337E-02 00 0.122E-01 0.347E-02 00 0.122E-01 0.344E-02 00 0.122E-01 0.344E-02 00 0.127E-01 0.344E-02 00 0.174E-01 0.264E-02 02 0.414E-02 0.729E-04 00 0.149E-01 0.318E-02 00 0.346E-02 0.346E-02 00 0.141E-01 0.327E-02 00 0.700E-02 0.874E-02

TABLEAU I

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES SOURCES DE LA REGION DU LAMENTIN (en moles/1)

ECH	5102	ĹI	SR	RB	R	AS	F	NH4	AL	FE
						*****	1976 1979 1979 1979 1979 1979 1979 1979		1. 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12	********
L1	0.203E-02	0.115E-03	0.1871-03	0.314E-05	0.139E-02	0.567E-05	0.4216-04	0.333E-03	0,51YE-05	0.220F-03
L2	0.1198-02	0,180E-03	0.2168-03	0.386E-06	0,395E-02	0,147E-04	0,316E-04	0.1398-03	0.734E-05	0.119E-03
L3	0.123E-02	0.166E-03	0.2218-03	0.608E-06	0.401E-02	0+641E-05	0.316E-04	0.155E-03	0,139E-01	0.192E-01
Ľ4	0,969E-03	0.144E-03	0.195E-03	0.1998-05	0.350E-02	0,7748-05	0,3166-04	0.8896-04	0.493E-05	0.183E-04
L5	0.160E-02	0.138E-03	0.1978-03	0.255E-05	0.3728-02	0+367E-05	0.3681-04	0,628E-03	0,0005,100	0+2181-03
L6	0.215E-02	0,216E-05	0,285E-05	0.2348-06	0.139E-04	0,000E+00	0,770E-05		0+000E+00	U.134E-03
1.7	0.113E-02	0.166E-03	0.2111-03	0.318E-05	0.380E-02	0.1091-04	0.316E-04	0.1678-03	0,515E-05	0.132E-03
L8	0,1088-02	0,166E-03	0.209E-03	0.3386-05	0.3868-02	0,3/9E-05	0,316E-04	0.1338-93	0.871E-05	0.1976-05
L9	0.104E-02	0.166E-03	0.2048-03	0.3181-05	0.3601-02	0.144E-04	0.3161-04	0.133E-03	0.122E-04	0.106E-03
MANG	0.5208-03	0,9008-05	0,450E-04	0.0008700	0.1208-02	0,000E+00	0.200E-04	0.0008700	0.0008100	0.JO0E-05
MER	0.500E-04	0.200E-04	0.7401-04		0.430E-03		0.3161-04	0.500E-04		
FUR										

TABLEAU II

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES SOURCES DE LA REGION DU LAMENTIN (en moles/1)

1 9

ECH		nesene D
#1 12345 1567 157 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17	-2.8 -1.8 -1.3 -1.7 -2.2 -2.7 -2.1 -2.1 -2.1 -2.0	-7.5 -7.4 -6.7 -7.0 -7.6 -10.6 -7.7 -7.4 -7.4 -7.4
FOR		

TABLEAU III

RESULTATS DES ANALYSES ISOTOPIQUES DES SOURCES DE LA REGION DU LAMENTIN (en 8 ‰)

	θ^{18} O/Smow \pm 0,3	T° C Mizutani Rafter	T° Lloyd
L1	+ 13,7	106	115
L2	+ 12,0	134	142
L4	+ 12,0	135	143
L6	+ 15,9	87	97
L7	+ 16,2	90	98

TABLEAU IV

RESULTATS DES ANALYSES δ^{18} 0 DANS LES SULFATES ET CALCUL GEOTHERMOMETRIQUE BASE SUR LE RAPPORT ENTRE L'OXYGENE 18 DANS LES SULFATES ET DANS L'EAU

,

.

		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
	LI	L3	L7
CO ₂	97,8 %	98,5 %	99,7 %
Ar	0,01 %	0,02 %	< 30 ppm
02	0,15 %	0,32 %	< 30 ppm
N ₂	2,10 %	1,24 %	0,29 %
He	< 20 ppm	< 20 ppm	< 20 ppm
H ₂	< 15 ppm	< 15 ppm	< 15 ppm
CH	2180 ppm	420 ppm	780 ppm
C ₂ H ₆	2 ppm	0,5 ppm	0,5 ppm
C ₃ H ₈	< 0,3 ppm	< 0,3 ppm	< 0,3 ppm
	< 0,2 ppm	< 0,2 ppm	< 0,2 ppm
$C_{5}H_{12}$	< 0,2 ppm	< 0,2 ppm	< 0,2 ppm
	< 0,2 ppm	< 0,2 ppm	< 0,2 ppm
H ₂ S	< 90 ppm	< 90 ppm	< 90 ppm
-			

TABLEAU V

RESULTATS DES ANALYSES DE GAZ LIBRES DE TROIS SOURCES CHAUDES DU LAMENTIN (% en volume)





LAMENTIN

.



LAMENTIN



LAMENTIN



.

.











LAMENTIN

- 17 -











.

LAMENTIN

Les sources chaudes se localisent entre des sources froides et la mer, ce qui confirme le mélange observé avec certains éléments chimiques. La dispersion des valeurs en oxygène 18, sur environ 1,5 δ , est dûe aux échanges isotopiques entre le CO₂ et l'eau au cours du dégazage proche de la surface et à de faibles mélanges avec de l'eau météorique au point d'émergence. Le diagramme 16 montre bien la relation entre la composition en oxygène 18 de l'eau et sa teneur en bicarbonate directement liée au dégazage du CO₂.

L'eau des sources chaudes est donc d'origine superficielle, probablement un mélange de 30 % d'eau de mer et 70 % d'eau météorique, qui aurait acquis sa composition chimique définitive dans un réservoir chaud dont nous évaluerons la température dans le paragraphe suivant.

6.2. - Estimation de la température du réservoir alimentant les sources chaudes

En premier lieu, il faut remarquer que les sources chaudes sont enrichies en éléments indicateurs qualitatifs de température Li, As, B et appauvries en magnésium caractéristique des eaux froides. Cependant, ces variations sont faibles par rapport à celles relevées dans les champs haute énergie.

Plusieurs techniques d'évaluations quantitatives ont été mises en oeuvre :

Géothermomètre à cations

Les résultats se trouvent dans le tableau VI. Les valeurs obtenues sont très homogènes et varient dans une fourchette de 140 à 150°C, sauf pour le géothermomètre NAKM dont les valeurs varient entre 100 et 110°C.

Géothermomètre à silice (tableau VI)

Les sources chaudes n'étant pas à l'équilibre avec la silice amorphe ou avec la calcédoine à l'émergence, et les mélanges avec l'eau météorique en surface semblant faibles ou inexistants, les températures obtenues pour l'équilibre avec le quartz sont homogènes et fiables. Elles oscillent entre 110 et 140°C, soit des valeurs très proches de celles obtenues avec des géothermomètres à cations.

Géothermomètre isotopique

La distribution de l'oxygène 18 entre l'eau et les sulfates en solution est fonction de la température. Les mesures réalisées se trouvent dans le tableau IV. Elles sont comprises entre 100 et 140°C, dans la fourchette définie précédemment.

- 25222	======				******			
ECH	Temp	NAKF	NAKM	NKC	TSIA	TCI.D	TQTZ	TQZV
L1	52.5	148.8	108.5	152.6	27.5	122.3	148.9	142.6
L2 L3	54.2	144.7	104.2	149.6	$\frac{1.9}{3.0}$	89+6	119.6	117.9
L4 15	43.9	143.9	103.3	149.0	-7.6	/8.3	109.3	109.0
L7	39.0	144.2	103.5	149.1	-0.9	86.7	116.9	115.6
L8 L9	53.0	140.3	107.2	150.0	-2.8	84.3	114.7 113.0	113.7

 Temg : Temperature d"emergence

 NAKF : T=(1217/(Log(Na/K)+1, 256))-273
 Fournier R. 0. (1979)

 NAKM : T=(908/(Log(Na/K)+0, 70))-273
 Michard G. (1979)

 NKC : T=(1647/(Log(Na/K)+B Log(VCa/Na)+2, 24))-273
 avec B=4/3

 Fournier R. 0. , Truesdell A. H. (1973)
 Si T>100

 TSIa : T=(-731/(0, 26+Log C))-273
 Fournier R. 0. , Rowe J. J. (1966)

 TCld : T=(-1015/(0, 125+Log C))-273
 Fournier R. 0. , Rowe J. J. (1966)

TC1d :	T=(-1015/(0, 125+Log C))-273	Fournier R.O., Rowe	J. J.	(1966)
TQtz :	T=(1309/(0.410-Log ^C))-273	Fournier	R. O.	(1966)
TQzV :	T=(1522/(0.97-Log C))-273	Fournier	R. O.	(1966)

SIa=Silice amorphe ; Cld=Calcedoine ; Qtz=Quartz QzV=Quartz avec perte de vapeur maximum

TABLEAU VI

RESULTATS DES CALCULS GEOTHERMOMETRIQUES

(en °C)



DIAGRAMME 17 : EQUILIBRE EAU-MINERAUX EN FONCTION DE L'ACCROISSEMENT DE TEMPERATURE - SOURCE L1

Température d'équilibre du fluide avec les minéraux du réservoir

Le calcul est basé sur l'équilibre thermodynamique du fluide avec les minéraux du réservoir. Le programme de calcul est une évolution du programme Mass Transfert d'Helgeson réalisé par le BRGM, de façon à obtenir l'équilibre du fluide, par accroissement de la température, avec de nombreux minéraux susceptibles de constituer la roche réservoir. Dans le diagramme n° 17, l'équilibre est atteint quand log Q/K = 0, k étant la constante d'équilibre pour le minéral, et Q le produit d'activité des espèces en solution en equilibre avec ce minéral.

Le calcul réalisé sur la source Ll montre que l'eau était en équilibre entre 120 et 130°C avec le quartz, les feldspaths, la chlorite, la serpentine. Cette zone de température est incluse dans la fourchette définie précédemment par les géothermomètres.

Géothermomètre à gaz

La distribution des composés CO_2 , CH_4 , H_2 et H_2S dans la phase gazeuse est fonction de la température. Le calcul réalisé sur les données de la source Ll fournit une température de ll6°C conforme aux précédentes.

Compte tenu de l'homogénéité des valeurs des estimations de températures obtenues avec tous les géothermomètres et sur toutes les sources chaudes, il parait vraisemblable que la température du réservoir qui alimente les sources se situe entre 110 et 140°C.

6.3. - Modèle

La synthèse des données géochimiques permet de proposer le schéma suivant de fonctionnement du système hydrothermal :



L'eau du réservoir à $110-140^{\circ}$ C a pour origine un mélange de 70 % d'eau météorique et 30 % d'eau de mer. L'eau obtenue pénètre en profondeur vers une région à température plus élevée ; sur son parcours, elle s'équilibre pour la dernière fois à $110-140^{\circ}$ C avec la roche encaissante composée de quartz, de feldspaths et de minéraux d'altération, chlorite et serpentine. A cause de ce dernier équilibre, on ne peut plus savoir exactement le chemin thermodynamique parcouru auparavant. Le fluide remonte ensuite vers la surface, assez rapidement pour ne pas modifier sa chimie, tout en cédant de la chaleur par conduction. Il est recoupé par le forage LA 101 à 93°C entre 150 et 180 m de profondeur. Le fluide poursuit encore sa remontée avec perte de chaleur et alimente finalement les sources chaudes à 50°C environ.

En tenant compte du profil de température et des formations rencontrées dans le LA 101 et en considérant que les circulations de fluide ascendantes et descendantes se font dans les zones fracturées, le schéma suivant est proposé :



Dans ce schéma, le réservoir à 90°C est un panache alimenté par une remontée d'eau ayant atteint son dernier équilibre entre 110 et 140°C. La géochimie ne permet pas actuellement de déterminer si elle a pu être portée à plus haute température avant de voir sa composition fixée à 110-140°C. BIBLIOGRAPHIE

.

ALLEGRE J.C., MICHARD G. (1976)

Introduction to geochemistry. D. Reidel Publisching Company.

ARNOSSON S., GUNNLAUGSSON E. and SVAVARSSON H. (1983a)

The chemistry of geothermal waters in Iceland. II. Mineral equilibria and independant variables controlling water compositions. Geochim. Cosmochim. Acta 47 ; 547-566.

ARNOSSON S., GUNNLAUGSSON E. and SVAVARSSON H. (1983b)

The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geochemistry in geothermal investigations. Geochim. Cosmochim. Acta 47, 567-577.

CAYOL A. (1975)

Contribution à l'étude hydrogéologique et hydrogéochimique de la Martinique. Thèse 3ème cycle, Université Paris VI (1975).

CORMY G., DEMIANS D'ARCHIMBAUD J. et SURCIN J. (1970)

Prospection géothermique aux Antilles Françaises, Guadeloupe et Martinique. U.N. Symposium on the development and utilization of geothermal resources, Pire, vol. 2, part 1.

CORMY G., DEMIANS D'ARCHIMBAUD J. et SURCIN J. (1970)

Prospection géothermique aux Antilles Françaises, Guadeloupe et Martinique. Rapport inédit EURAFREP.

CRAIG H. (1961)

Isotopic variations in meteoric waters. Science 133, pp. 1702-1703.

CULBERSON C., PYTCOWICZ R.M., HAWLEY J.E. (1970)

Sea water alkalinity determination by pH method. J. Mars. Res. Volc. 18, pp. 15-21.

DANSGAARD W. (1964)

Stable isotopes in precipitations. Tellus, 16 : pp. 436-458.

DEMIANS D'ARCHIMBAUD J. (1969)

Comparaison des fluides recueillis lors de l'éruption de LA 101 aux eaux de sources voisines. Rapport inédit EURAFREP.

ELLIS A.J. (1970)

Quantitative interpretation of chemical characteristics of hydrothermal systems. Geothermics, special issue 2, 1970, pp. 516-528.

ELLIS A.J., MAHON W.A.J. (1967)

Natural hydrothermal systems and experimental hot water-rock interactions. Part 1, Geochim. Cosmochim. Acta 29, pp. 1323-1357.

FOUILLAC C. and MICHARD G. (1981)

Sodium/Lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoir. Geothermics Vol. 10 n° 1, pp. 55-70.

FOURNIER R.O., ROWE J.J. (1966)

Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet steam wells. Amer. J. Sci., 264, pp. 685-697.

FOURNIER R.O. (1979)

A revised equation for the Na/K geothermometer. Geothermal Resources Council. Transactions, vol. 3, pp. 221-224.

FOURNIER R.O., TRUESDELL A.H. (1973)

An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. Geochim. Cosmochim. Acta 37, pp. 1255-1275.

FOURNIER R.O. and POTTER I.I. (1979)

Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer. Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol. 43, pp. 1543 to 1550.

HELGESON H.C. (1968)

Evaluation of irreversible reactions in geochemical processes involving minerals and aqueous solutions. I. Thermodynamic relations. Geochim. Cosmochim. Acta 32, 853-877.

HELGESON H.C. (1969)

Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. Amer. J. Sci., 267, 724-804.

HELGESON H.C., GARRELS R.M. and MACKENZIE F.T. (1979)

Evaluation of irreversible reactions in geochemical processes involving minerals and aqueous solutions. II. Applications. Geochim. Cosmochim. Acta 33, 455-481.

HELGESON H.C., BROW T.H., NIGRINI A. and JONES T.A. (1970)

Calculation of mass transfer in geochemical problems involving aqueous solutions. Geochim. Cosmochim. Acta 34, 596-592.

HELGESON H.C. (1969)

Mass transfer among minerals and hydrothermal solutions. In "Geochemistry of hydrothermal ore deposits" (ed. H.L. Barnes), 2nd ed., pp. 568-610. Holt, Rinehart and Winston, Inc. Statistical treatment of environmental isotope data in precipitation. Technical report n° 206, Vienne.

IUNDT F. (1984)

Réévaluation géochimique du potentiel géothermique de l'île de la Martinique. Rapport BRGM 84 SGN 292 GTH.

KODA A., NODA T. (1975)

Geochemical prospecting in vapor dominated fields for geothermal exploration. Proceeding ONU - Symposium San Francisco, vol. 1, pp. 761-765.

KNOCK K.K. (1974)

Boron geochemistry and environmental chemistry Arizona state University, pH. D. 1974 Geochemistry.

LOPOUKHINE M. et MOURET C. (1977)

Etude géothermique des sources de la Martinique. Rapport BRGM n° 77 ANT 36. 32 p.

MICHARD G., FOUILLAC C., GRIMAUD D. and DENNIS J. (1981)

Une méthode global d'estimation des températures des réservoirs alimentant les sources thermales. Exemple du Massif Central Français. Geochim. Cosmochim. Acta 45, pp. 1199-1207.

MOURET C. (1979)

Contribution à l'étude hydrogéologique d'un bassin versant en milieu volcanique tropical. Rivière Capot (Martinique). Thèse BRGM 79 SGN 181 HYD.

REED M.H. (1982)

Calculation of multicomponent chemical equilibria and reaction processes in systems involving minerals, gases and an aqueous phase. Geochim. Cosmochim. Acta 46, 513-528.

REED M. and SPYCHER N. (1984)

Calculation of pH mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution. Geochim. Cosmochim. Acta 48, pp. 1479-1492.

