

# Prélèvement et analyses des condensats de fumerolles sur volcans actifs: Soufrière de la Guadeloupe (1976-1977) et Pouzzoles et Vulcano (Italie) (1978)

R.M. CHEVRIER

*Conservatoire National des Arts et Métiers, Laboratoire de Géologie appliquée au Batiment et Travaux Publics, 2 rue Conté, 75003 Paris, France*

F. LE GUERN

*Centre des Faibles Radioactivités, Domaine du C.N.R.S., 91190 Gif sur Yvette, France.*

## ABSTRACT

The cooling of volcanic gases generates sublimates, condensates and gases.

Condensates were sampled and analysed on different volcanoes:

On Guadeloupe, phreatic eruptions occur when pH of condensates has maintained higher than 4 to 5 for 3 to 7 days. After the phreatic eruption, pH decreases to 1.5 to 2.

At Pozzuoli and Vulcano it is possible to distinguish between gases washed by superficial waters (low mineral contents and high pH) and gases less affected by condensation and dissolution in the ground (high mineral contents and low pH).

## RESUME

Les gaz volcaniques en se refroidissant donnent une phase solide: les sublimés, une phase liquide: les condensats et une phase gazeuse résiduelle. Les condensats ont été analysés sur place puis au laboratoire. Cette technique a été testée sur différents volcans:

A la Soufrière de la Guadeloupe les éruptions phréatiques surviennent après des périodes de 3 à 7 jours où le pH des condensats est supérieur à 4 ou 5, ces éruptions sont toujours suivies d'une diminution du pH: 1,5 à 2 pendant plusieurs jours.

A Pouzzoles et Vulcano les condensats des fumerolles lessivés par des aquifères superficielles ont des pH élevés et une faible minéralisation, les pH bas et les minéralisations

élevées correspondant à des gaz peu affectés par les condensations dans le sol.

## INTRODUCTION

Les gaz magmatiques se composent en majeure partie de vapeur d'eau surchauffée (de l'ordre de 90%) et de divers gaz tels que CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, HCl, HF, COS... en proportions variables selon le type de volcanisme. Les gaz véhiculent aussi des métaux qui se déposent en surface autour des événements éruptifs.

Les eaux issues des fumerolles de haute et basse température sont recueillies par condensation spontanée. L'analyse se fait ensuite directement sur le terrain pour la majorité des éléments.

Les événements éruptifs choisis sont tubés, le plus souvent à l'aide de tubes de silice, les sublimés s'y déposent sélectivement en fonction du gradient de température et sont ensuite analysés au laboratoire, après découpage du support (LE GUERN et BERNARD, 1982; BERNARD *et al.*, ce volume). Les gaz condensables prélevés à la sortie du tube sont analysés directement par chromatographie en phase gazeuse (LE GUERN *et al.*, 1979), et parallèlement est effectué le prélèvement de la fraction condensable de ce même gaz. On obtient donc un bilan général de ce qui est



émis sous forme gazeuse, solide et liquide, en un lieu et un moment donnés.

### TECHNIQUES DE PRELEVEMENT DE LA PHASE CONDENSABLE

La technique la plus simple consiste à faire transiter le gaz chaud à travers un tube souple (type silicone) où il se refroidit spontanément (Fig. 1).

L'analyse des différents ions majeurs et en traces nécessite un volume minimum de condensat d'une centaine de  $\text{cm}^3$ . Cette technique est lente, et l'échantillon est en contact avec l'air. C'est pourquoi nous utilisons actuellement une technique nouvelle inspirée de celle employée et mise au point par les chercheurs italiens.

A la sortie de l'évent, le gaz est condensé dans un appareil constitué par un serpentín de Pyrex immergé dans un réservoir d'une capacité de  $1000 \text{ cm}^3$ , susceptible de renfermer un corps volatil (ici on utilise l'éther sulfurique) qui, en s'évaporant, assure son rapide refroidissement. L'eau de condensation est recueillie dans un flacon de polyéthylène. Le système est relié à une pompe péristaltique qui permet de condenser un volume appréciable de gaz dans un temps très court.

Le système est clos et les gaz recueillis ne sont à aucun moment en contact avec l'atmosphère (Fig. 2).

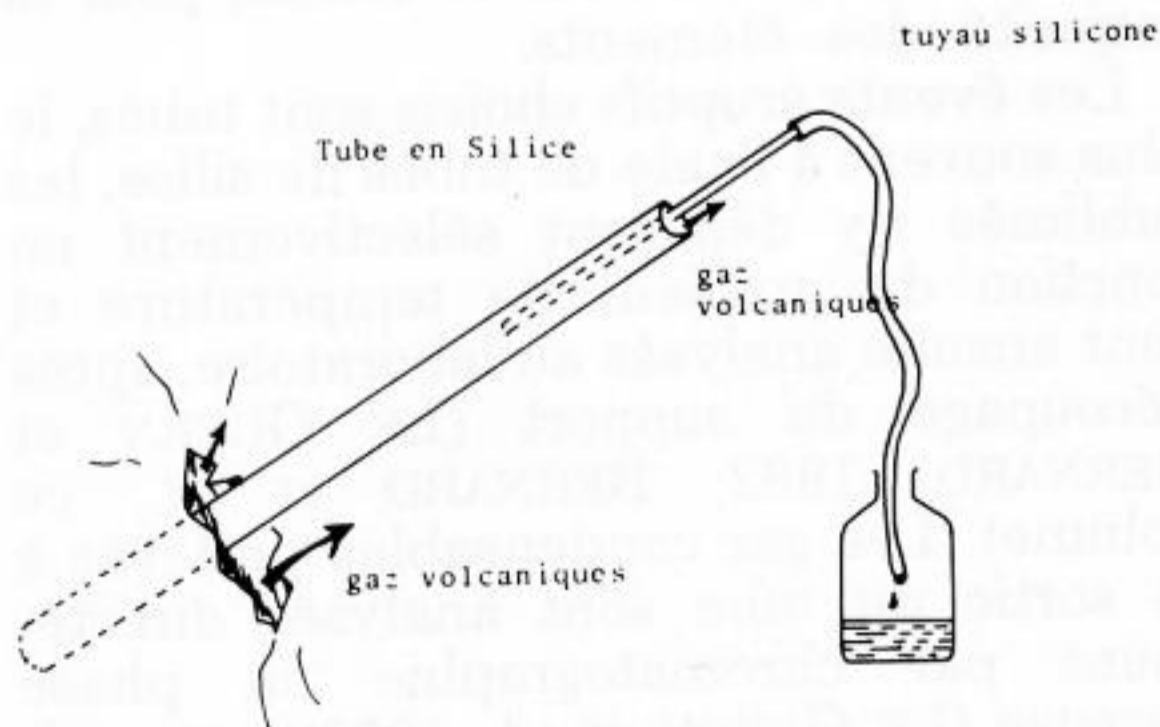


FIG. 1 — Condensation naturelle dans un flacon.

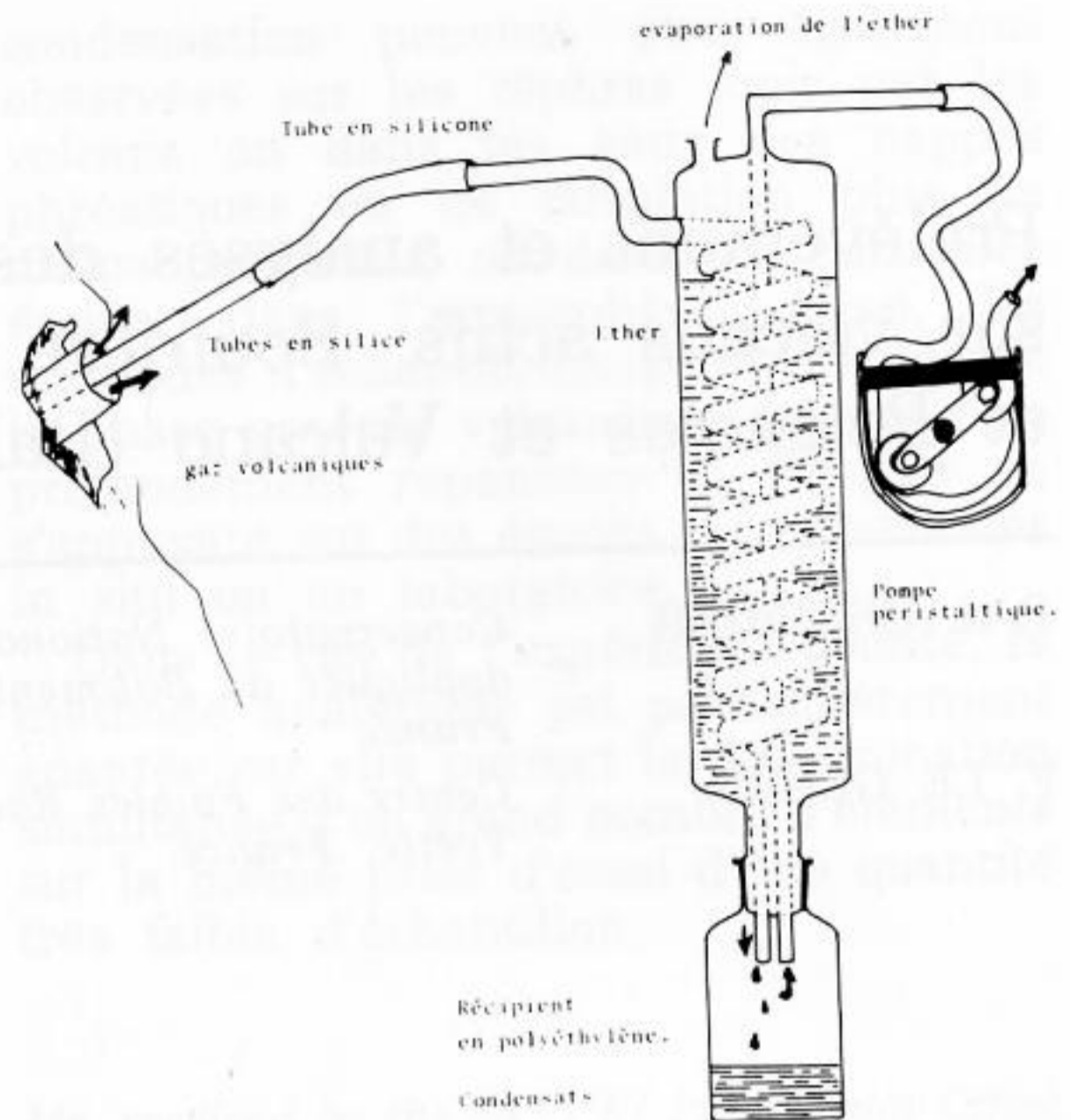


FIG. 2 — Prélèvement de condensats à l'abri de l'air.

### Validité des deux techniques de prélèvement

La méthode du condenseur nous permet d'obtenir rapidement des échantillons dans d'excellentes conditions de reproductibilité. La pollution atmosphérique est pratiquement éliminée.

La première technique, aussi frustrante soit-elle, nous a cependant donné, pendant longtemps, entière satisfaction, et ne saurait être totalement abandonnée.

En effet, dans certaines conditions de prélèvement, difficiles ou dangereuses, il sera toujours possible de tuber un événement et de mettre en place ce dispositif simple qui n'exige pas la présence constante d'un opérateur.

Enfin, les deux méthodes ont été couplées sur un même événement dans le but de comparer leur fiabilité. Les analyses effectuées ensuite sur les deux échantillons prélevés simultanément n'ont pas montré de différences significatives au niveau des résultats (de l'ordre de 0,05% pour les ions  $\text{Cl}^-$ ), compte-tenu de la précision des méthodes analytiques de terrain employées (Tableau 1).



TABLEAU 1 — Comparaison de deux techniques de prélèvement Vulcano (Italie), cratère; Juin 1980, analyses faites sur place.

	pH	Cl <sup>-</sup> mg/l	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> en mg de SO <sub>2</sub>
Prélèvement sur tube simple	1	14250	750
Prélèvements avec le condenseur	1	14750	750

### Techniques analytiques

La presque totalité des ions peut être traitée directement sur le terrain. On utilise soit les dosages volumétriques classiques (CO<sub>2</sub>, Cl<sup>-</sup>), soit, plus généralement, les différentes méthodes colorimétriques au moyen d'un colorimètre de terrain (NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, S<sup>2-</sup>, SiO<sub>2</sub>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, Cr<sup>+6</sup>,...). Les sulfates sont dosés par néphélométrie.

Les cations majeurs (Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>,...) ainsi que les traces sont étudiés, dans un deuxième temps, au moyen d'un spectrophotomètre d'absorption atomique (Philips Pye Unicam) au Laboratoire d'Hydrogéochimie du C.N.A.M.

## RESULTATS OBTENUS

### Soufrière (Guadeloupe)

La Soufrière, volcan andésitique situé dans la région de Basse-Terre de l'île de Guadeloupe, a manifesté durant une période allant du 8 juillet 1976 au mois de mars 1977, une activité phréatique importante. Outre des émissions fumerolliennes accrues, il a été observé une série d'éruptions phréatiques violentes précédées et accompagnées d'une activité sismique très anormalement élevée. Au début de la crise, les 14, 15 et 16 juillet, outre les gaz, le volcan expulsait au niveau des failles sommitales, de l'eau liquide à une température voisine de 96 °C.

Les jours suivants, il ne sortait plus que de la vapeur (LE GUERN *et al.*, 1980).

Le Tableau 2 donne les compositions d'une sélection de ces eaux prélevées directement les trois premiers jours, condensées les jours suivants; les prélèvements ont été faits rigoureusement sur les mêmes événements (col de l'Echelle).

(Les cations ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique dans les laboratoires du C.F.R. de Gif sur Yvette par M.A. Vigot).

La Fig. 3 représente les variations du pH pendant les 2 premiers mois de l'éruption et les variations de débit de vapeurs et de cendres évalués selon la méthode décrite en 1980.

Les cinq éruptions phréatiques: 24 juillet, 9 août, 22 août, 30 août, 14 septembre, surviennent après des périodes de 3 à 7 jours où le pH est supérieur à 4,5 (24 juillet) puis 5,5. Ces éruptions phréatiques sont toujours suivies d'une diminution du pH (1,5 à 2).

Toutes les éruptions phréatiques sont précédées d'une période de quelques heures à plusieurs jours où le débit de vapeur est très faible.

Ce mécanisme suggère le lessivage d'un gaz volcanique acide (peut être magmatique) dans les nappes d'eau superficielles. Les eaux très acides émises durant les 3 premiers jours proviennent de la condensation de ces gaz dans les nappes souterraines. Ce sont ces eaux acides qui sont responsables de l'altération en profondeur des roches volcaniques du Dome générant les cendres entraînées en surface par la vapeur d'eau.

### Pouzzoles (Italie)

Près de Naples, dans le cratère d'un volcan assoupi se trouve un célèbre et important champ de fumerolles, connu depuis l'antiquité sous le nom de Solfatara.

Les fumerolles condensées sont émises par les deux événements principaux.

Nous sommes ici en présence d'un gaz filtré mais ayant transité au travers d'assises contenant de nombreuses substances de solubilité élevée.



TABLEAU 2 — Soufrière de la Guadeloupe, éruption de 1976-1977: Composition des condensats de fumerolles, température des gaz 96 °C, résultats en mg/l.

Date	pH	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Fe	Mn <sup>++</sup>	Ni <sup>++</sup>	Cr
14-7-76	1,1	11857	2780	630	175	2120	1100	520	115	1,1	1,2
15-7-76	2,4	5325	1326	415	130	1300	570	200	100	1,8	0,6
16-7-76	3,2	3914	1371	360	95	1240	465	150	60	1,1	2,5
pendant ces trois jours les fissures émettaient de l'eau liquide											
17-7-76	4,9	tr.	-	2,1	1,1	1,8	1,28				
18-7-76	4,5	tr.	-	0,75	0,7	1,2	0,66	3,6	1		
20-7-76	5	-	-	1,5	0,95	0,9	0,29	1,3	-		
21-7-76	4,5	52,9	5	0,7	0,6	0,45	0,1	0,1	0,9		
22-7-76	4,5	24,85	23,5	0,3	0,6	0,7	0,12	0,2	0,8		
23-7-76	3,4	7,45	-	1,6	0,95	1,15	1	11,5	0		
25-7-76	3,4	10,65	-	8,75	2,8	3,3	5	37,5	1,1		
27-7-76	3,4	23,08	-	-	-	-	-	-	-		
28-7-76	1,2	12,43	-	-	-	-	-	-	-		
29-7-76	4	26,63	-	2,8	0,9	1,3	1,25	3,6	0		
30-7-76	4,5	10,65	-	0,5	0,7	0,8	0,18	0,4	0		
31-7-76	4	55,03	-	4,5	0,9	3,2	1,4	9	1		
1-8-76	4	-	-	3,7	1,1	0,85	2,2	45	1		
3-8-76	3	26,27	-	5	2,95	3,4	0,7	3,4	25		
4-8-76	2,3	-	-	5	0,9	1,7	1,2	1,5	22,5		
5-8-76	1,8	131,35	265	0,65	0,8	1,4	0,38	1,2	1		
7-8-76	5	9,23	-	4,3	1	1,7	1,1	5,8	0		
8-8-76	5	12,43	-	28,75	1	0,95	1,1	2,3	1		
9-8-76	5	17,04	-	8,7	1,1	0,9	1,29	0,3	0,9		
10-8-76	4,5	5,68	-	15	6	6,6	19,5	75	2,1		
12-8-76	5	17,4	-	2,20	1	1,4	0,74	12,4	1,5		
13-8-76	5	6,75	-	3	1,1	1	1,14	14,9	0		
14-8-76	5	3,55	-	1,1	0,6	0,6	0,22	1,4	1		
15-8-76	5	tr.	-	9,5	2,8	1,1	0,48	10	-		
16-8-76	2,5	tr.	-	2	0,8	1,2	0,36	1	0		
17-8-76	2,5	2,84	-	10	3,7	3,1	20,75	85	1		
18-8-76	5	8,17	149	3,25	0,7	0,8	0,93	13	0		
21-8-76	5	5	-	5,4	2	1,5	1,04	-	22,5		
25-8-76	5	-	-	53,75	1,2	2,2	4	6,8	0		
26-8-76	5	-	-	21,25	0,85	3,2	0,27	0	1,4		
27-8-76	5	-	-	1,3	0,7	2,55	0,6	0,4	1		
29-8-76	5	-	98	1,8	0,7	2,4	0,84	1,8	1,2		
30-8-76	5	-	-	0,8	0,5	0,6	0,14	0	0		
31-8-76	5	-	-	0,9	0,55	1	0,2	0,1	0		

du 17-7-76 au 31-8-76 la vapeur était condensée suivant le montage de la Figure 1

TABLEAU 3 — Pouzzoles (Italie). Analyse de condensats de fumerolles.

Juin 1978 : Solfatares (Résultats en mg/l de condensats)		
	P <sub>1</sub> : 140°C	P <sub>2</sub> : 164°C
pH	5,5	6,5
conductivité (μ Mho/cm)	1200	2800
CO <sub>2</sub>	230	250
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	85	13
Cl <sup>-</sup>	25	370
SO <sub>3</sub> (en ppm SO <sub>2</sub> )	35	175
N ammoniacal	165	315
SiO <sub>2</sub>	1,3	1,7
Fe <sup>++</sup> (total)	0,95	<0,5
Na <sup>+</sup>	15	7,5
K <sup>+</sup>	17,5	17,5
Mg <sup>++</sup>	0,15	0,1
Ca <sup>++</sup>	10	5
r Na / r K	1,44	0,726

*Vulcano (Italie)*

Dans l'archipel des îles Eoliennes, Vulcano, strato-volcan à lave acide de type habituellement explosif, présente une activité fumerollienne relativement modérée.

On distingue deux types de fumerolles:

— Les fumerolles sommitales s'échappant d'une faille au niveau du cratère et dont les températures se situent autour de 200 à 300°.

— Les fumerolles de basses températures (100 °C) émises sur la plage ou en mer, au pied du cône volcanique.

Sur la plage, les gaz acides et chauds sont lessivés par les nappes aquifères et les sédiments saturés d'eau de mer. Autour des fumerolles les plus actives,

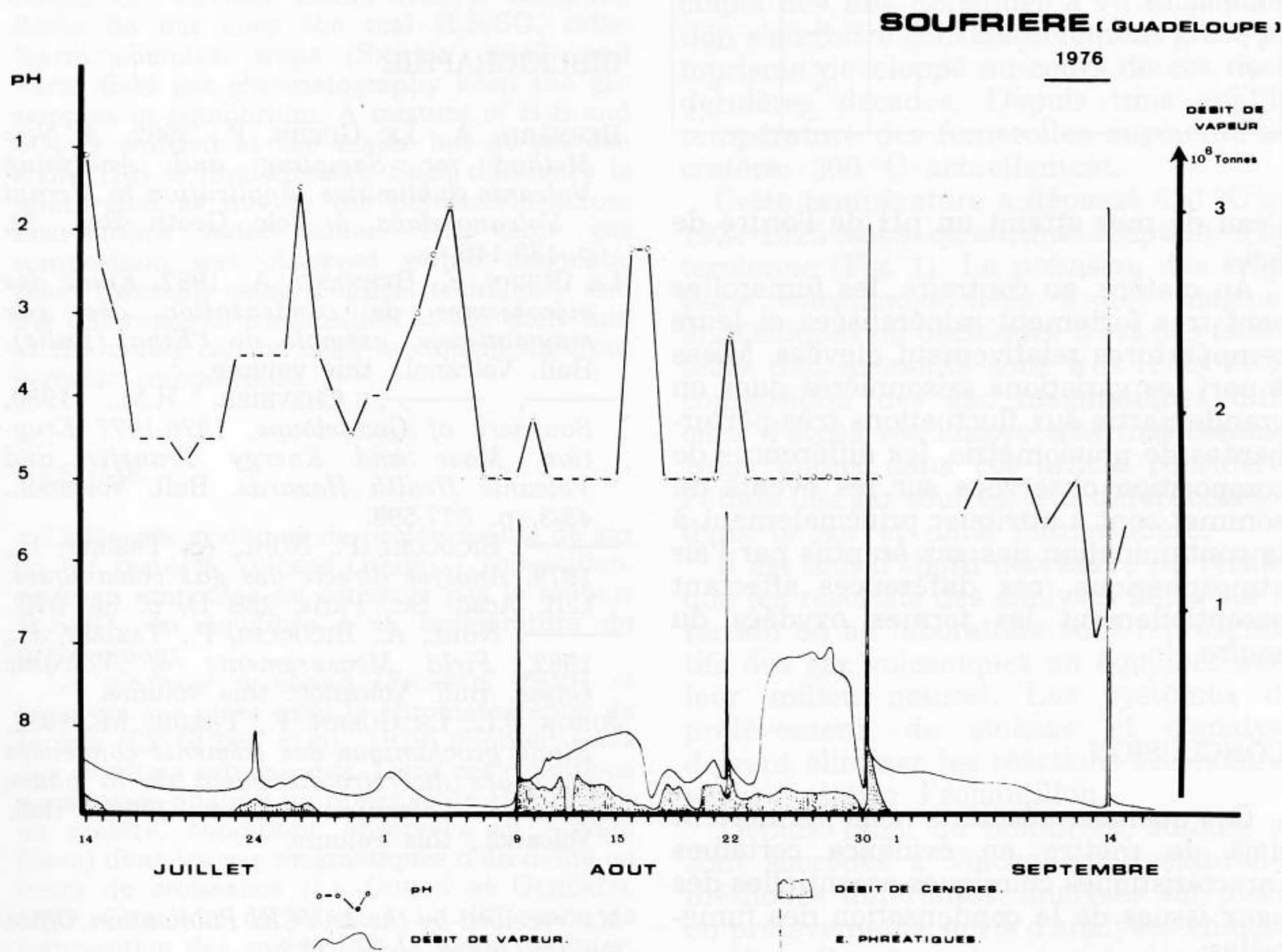


FIG. 3 — Soufrière de la Guadeloupe, éruption de 1976-1977: Variation du pH des condensats en fonction de l'activité éruptive.



TABLEAU 4 — Vulcano (Italie). Composition de condensats de fumerolles: résultats en mg/l.

Campagne de Juin 1978				
	PLAGE		CRATERE	
	en mer	sur la plage 100°C	215°C	196°C
pH	5,8	4,0	0,8	0,6
conductivité ( $\mu$ Mho/cm)	390	23	-	-
CO <sub>2</sub>	23	17	-	-
Cl <sup>-</sup>	130	15	15200	19300
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	6	< 4	1725	140
SO <sub>3</sub> (ppm de SO <sub>2</sub> )	< 5	< 5	700	150
N ammoniacal	6,28	1,6	188	112
SiO <sub>2</sub>	1	0,25	16,6	17
Fe <sup>++</sup> Total	0,22	0,06	tr.	7,6
Na <sup>+</sup>	67,5	2,5	24	32
K <sup>+</sup>	7,5	2,5	11	46
Mg <sup>++</sup>	10	0,2	3	4
Ca <sup>++</sup>	5	0	28	43
r Na r K	15,26	1,69	3,7	1,18

Campagne de Novembre 1978		
	CRATERE	
	201 °C	180 °C
pH	-	1,5
Cl <sup>-</sup>	10500	7500
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	500	450
SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	1250	375
N ammoniacal	63	72,5
SiO <sub>2</sub>	50	11,5
Fe <sup>++</sup> Total	14	15
Na <sup>+</sup>	15	5
K <sup>+</sup>	10	22,5
Mg <sup>+</sup>	10	5
Ca <sup>++</sup>	25	40
r Na r K	2,5	0,58

l'eau de mer atteint un pH de l'ordre de 5,6.

Au cratère, au contraire, les fumerolles sont très fortement minéralisées et leurs températures relativement élevées. Mises à part les variations saisonnières dues en grande partie aux fluctuations très perturbantes de pluviométrie, les différences de composition observées sur les événements du sommet sont à attribuer principalement à la contamination des gaz éruptifs par l'air atmosphérique, ces différences affectant essentiellement les formes oxydées du soufre.

## CONCLUSION

Ces quelques résultats nous permettent déjà de mettre en évidence certaines caractéristiques chimiques essentielles des eaux issues de la condensation des fumerolles:

1) Les condensats de gaz volcaniques non filtrés par une aquifère superficielle présentent un pH bas et une très forte minéralisation (surtout au niveau des chlorures).

2) Les condensats de gaz volcaniques filtrés par un aquifère superficiel présentent un pH élevé et une minéralisation très faible.

A partir de ces deux critères, il est possible de suivre l'évolution d'une éruption volcanique à caractère phréatique (exemple de la Soufrière).

Ces caractéristiques permettent aussi de comparer les fumerolles d'un même édifice volcanique comme nous l'avons fait à Vulcano. Sur ce volcan, les gaz émis au cratère ne traversent pas d'aquifère alors qu'à la plage, au contraire, ils sont très fortement lessivés.

## BIBLIOGRAPHIE

- BERNARD, A., LE GUERN, F., 1982, *A New Method for Sampling and Analysing Volcanic Sublimates. Application to Merapi Volcano Java*. J. Volc. Geoth. Res., 12, p. 133-146.
- LE GUERN, F., BERNARD, A., 1982, *Etude des mécanismes de condensation des gaz magmatiques: exemple de l'Etna (Italie)*. Bull. Volcanol., this volume.
- , CHEVRIER, R.M., 1980, *Soufriere of Guadeloupe, 1976-1977 Eruption, Mass and Energy Transfer and Volcanic Health Hazards*. Bull. Volcanol., 43-3, p. 577-593.
- , BIOCCHI, P., NOHL, A., TAZIEFF, H., 1979, *Analyse directe des gaz volcaniques*. C.R. Acad. Sc., Paris, 288 D, p. 867-870.
- , NOHL, A., BIOCCHI, P., TAZIEFF, H., 1982, *Field Measurements of Volcanic Gases*. Bull. Volcanol., this volume.
- JORON, J.L., LE GUERN, F., TREUIL, M., 1982, *Etude géochimique des éléments condensés au cours du refroidissement de la phase gazeuse volcanique Etna 1976*. Bull. Volcanol., this volume.