

Dégazage magmatique diffus à la Soufrière de Guadeloupe, Antilles

Diffuse magmatic soil degassing at Soufrière of Guadeloupe, Antilles

Patrick Allard^a, Gilbert Hammouya^b, Franco Parello^c

^a Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, CEA-CNRS, Orme des Merisiers, 91191 Gif-sur-Yvette, France

^b Observatoire volcanologique de la Soufrière, IPGP, Le Houelmont, 97113 Gourbeyre, Guadeloupe

^c Dipartimento di Chimica e Fisica della Terra ed Applicazioni, Università di Palermo, 90123 Palermo, Italie

Abstract—A soil gas profiling made along the southern basis of Soufrière summit lava dome, in Guadeloupe, reveals the existence of diffuse emanations of magma-derived CO₂ in coincidence with a major volcanic (Ty) fault, where CO₂ concentrations at 70 cm depth in the ground reach 35–96 % and are associated with a thermal convective cell. Outside, a few 'cold' gaseous anomalies of volcanic origin (lack of methane) provide reliable conditions for continuous radon monitoring of soil degassing. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

soil gases / Soufrière Volcano / Guadeloupe / magma degassing / monitoring

Résumé — Un profil de prospection des gaz du sol révèle l'existence d'un dégazage diffus de CO₂ magmatique au pied sud du dôme sommital de la Soufrière de Guadeloupe, en coïncidence avec la faille de la Ty. Ce dégazage est marqué par de très fortes anomalies en CO₂ (35–96 %) et en température (30–75 °C), à 70 cm de profondeur dans le sol. En dehors, quelques anomalies gazeuses « froides », dont l'origine volcanique est attestée par l'absence de méthane, offrent des conditions propices pour une surveillance en continu par l'intermédiaire du radon. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

gaz du sol / Soufrière / Guadeloupe / dégazage magmatique / surveillance

1. Introduction

Des études menées depuis une dizaine d'années ont démontré l'existence d'un dégazage magmatique diffus, invisible, à travers le sol des volcans actifs (ex. : Allard et al., 1988, 1991 ; Baubron et al., 1990 ; Allard, 1992 ; Farrar et al., 1995, Chiodini et al., 1996). Composées essentiellement de CO₂ et de gaz rares, ces émanations peuvent affecter de larges secteurs des édifices et représenter une proportion importante, voire prépondérante, des émissions de CO₂ (Baubron et al., 1990 ; Allard et al., 1991 ; Chiodini et al., 1996). De plus, leur basse température et l'absence de composés acides corrosifs les rendent aisément instrumentables pour une surveillance en continu.

Parmi les volcans français, la Soufrière de Guadeloupe est le plus susceptible de présenter ce type de dégazage. Depuis sa dernière éruption en 1 440 ± 40 (Vincent et al., 1979), ce volcan andésitique manifeste une intense activité hydrothermale (fumerolles, sources chaudes), ponctuée d'éruptions phréatiques récurrentes qui, comme le

démontrent les rapports isotopiques de l'hélium et du carbone dans les fluides (Allard et al., 1983 ; Delorme, 1983 ; Allard et al., 1996, données non publiées), est entretenue par le dégazage d'une source magmatique souterraine, située à plus de 6 km de profondeur (Feuillard et al., 1983). Nous avons donc initié une prospection des gaz du sol à la Soufrière, pour y évaluer la possibilité d'un dégazage magmatique diffus et ses applications à la surveillance. On décrit ici les premiers résultats obtenus en février 1996, dans le cadre du Programme national pour les risques naturels (PNRN, CNRS-Insu). Auparavant, une prospection semblable avait été réalisée dans les zones de Bouillante (Baubron et Sabroux, 1984) et de Capesterre (Baubron, 1990), respectivement situées à l'ouest et à l'est du massif volcanique.

2. Méthodologie

Un profil de prospection long de 400 m a été effectué au pied sud du dôme sommital de la Soufrière (*figure 1*), depuis le parking de la Savanne à Mulets jusqu'au Morne Mitan

Note présentée par Jean-Louis Le Mouél.

Note remise le 20 avril 1998, acceptée après révision le 20 juillet 1998.

* E-mail : allard@lsce.saclay.cea.fr

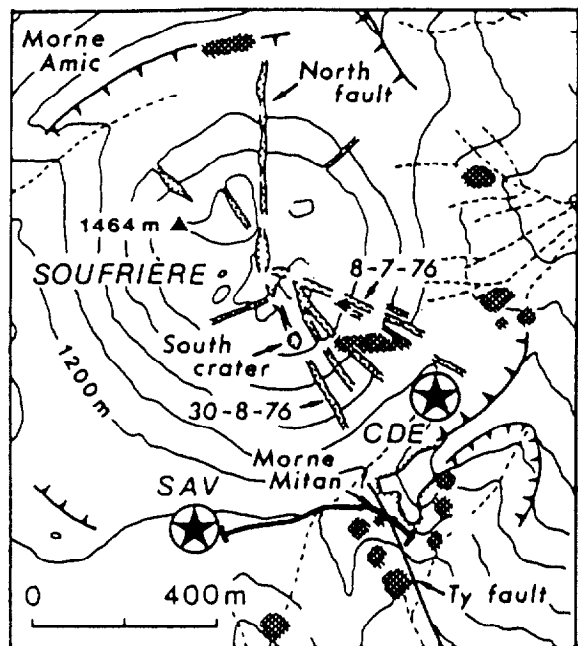


Figure 1. Carte du dôme de la Soufrière et localisation du profil de prospection des gaz du sol (tracé épais). Zones hachurées : fumarolles ; étoiles : forages (SAV : Savanne à Mulets).

Map of Soufrière summit lava dome, with location of the soil gas profile (thick black line). Dashed areas: fumarolic areas; stars: drilled holes (SAV: Savanne à Mulets).

(route de la Citerne). Les sols y sont constitués de dépôts volcaniques grossiers, de granulométrie hétérogène et de perméabilité variable, fortement hydrothermalisés entre + 250 et + 400 m. Le profil a été réalisé avec un pas de 10 m (compte-fil), resserré à 2,5–5 m dans les zones anomaes, suivant une procédure déjà décrite (ex. : Baubron et al., 1991). Une sonde en acier inox (1,5 m), remplie d'un capillaire en téflon et munie d'un marteau glissant, a été utilisée pour perforer le sol jusqu'à une profondeur moyenne de 70 cm. Cette sonde étanche, de volume interne négligeable,

était ensuite connectée à un analyseur infra-rouge portable (ADC-LFG20), permettant de mesurer simultanément les concentrations de CO₂ et CH₄ (absorption IR différentielle, détecteurs solides), mais aussi la teneur en O₂ (cellule électrochimique). Le pompage était réglé à 0,2 L·min⁻¹. Un filtre hydrophobe et un filtre à poussières placés en amont de l'appareil protégeaient les circuits optiques. La température du gaz a été mesurée à la même profondeur avec un thermocouple chromel-alumel. Les résultats sont reportés dans le tableau et illustrés sur les figures 2 et 3.

3. Résultats

Les concentrations mesurées le long du profil varient entre 0,04 % (air) et 96 % pour CO₂ et entre 0 et 10 % pour CH₄. L'oxygène, généralement en déficit par rapport à l'air (21 %), varie en étroite anti-corrélation avec CO₂. La concentration respective des trois gaz et le rapport CH₄/CO₂ permettent de distinguer aisément les anomalies d'origine volcanique, du bruit de fond biogénique local — caractérisé par des teneurs moyennes de 0,5–1,5 % de CO₂ et 0,1–5 % de CH₄, selon le degré d'humidité et de fermentation organique dans le sol. Au même moment, les fumarolles de la Soufrière contenaient 91–95 % de CO₂ et 0,01–0,02 % de méthane (tableau).

La figure 2 révèle deux parties distinctes dans le profil.

a) Une première section (entre 0 et +280 m) est dominée par le bruit de fond naturel, où n'apparaissent que quelques faibles anomalies de signature volcanique (CO₂ à 3–5 %) : entre +10 et +40 m et entre +150 et +190 m. Le gaz a une température égale ou à peine inférieure à celle de l'air extérieur (21,7 °C). Une simple fermentation organique est indiquée par les teneurs élevées en méthane à +30 et +230 m (figure 3b), où le sol était sursaturé en eau. Par ailleurs, mis à part un fort déficit en oxygène, aucune anomalie importante n'a été décelée dans le forage de la Savanne à Mulets, profond de 93 m.

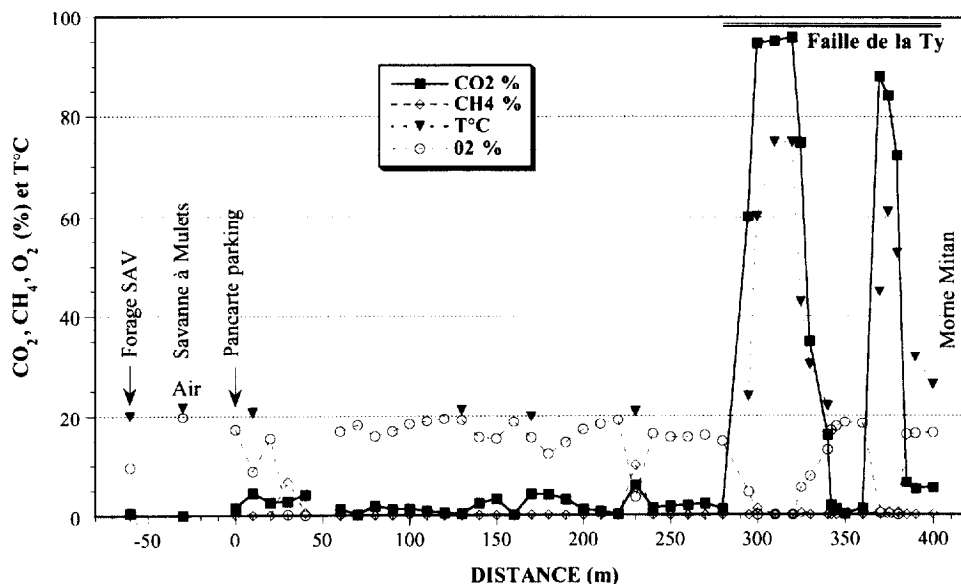


Figure 2. Variations de T(°C) et des pourcentages volumiques de CO₂, CH₄ et O₂ dans le sol le long du profil Savanne à Mulets – Morne Mitán.

Variations of T(°C) and the volume percentages of CO₂, CH₄ and O₂ in the ground along the profile Savanne à Mulets to Morne Mitán.

Sites/Distance	T (°C)	CO ₂ %	CH ₄ %	O ₂ %	radon pCi·L ⁻¹
Air	21,7	0,04	0,00	20,9	2
Forage SAV	20,0	0,50	0,45	9,7	3
0		1,53	0,10	17,2	26
10 m	20,7	4,41	0,05	8,9	
20 m		2,57	0,03	15,4	
30 m		2,77	6,80	0,2	
40 m		4,05	0,55	0,0	109
60 m		1,28	0,05	16,8	
70 m		0,17	0,00	18,1	
80 m		1,87	0,00	15,8	
90 m		1,24	0,00	16,8	
100 m		1,26	0,07	18,3	
110 m		0,89	0,03	18,9	
120 m		0,50	0,00	19,3	
130 m	21,2	0,30	0,00	19,1	
140 m		2,34	0,05	15,6	
150 m		3,20	0,00	15,3	
160 m		0,09	0,00	18,7	
170 m	19,8	4,20	0,07	15,5	
180 m		4,11	0,10	12,3	
190 m		3,12	0,05	14,6	
200 m		1,13	0,00	17,2	
210 m		0,80	0,00	18,3	
220 m		0,27	0,03	19,1	
230 m	20,9	6,04	10,00	3,6	142
240 m		1,46	0,05	16,3	
250 m		1,78	0,05	15,6	
260 m		1,95	0,02	15,6	
270 m		2,29	0,05	16,0	
280 m		1,25	0,00	14,8	
295 m	23,9	60,00	0,00	4,6	
300 m	60,1	94,80	1,30	0,0	
310 m	75,0	95,20	0,00	0,0	
320 m	75,0	95,90	0,00	0,0	
325 m	42,9	74,90	0,36	5,5	*6 512
330 m	30,1	35,00	0,00	7,8	*2 183
340 m	21,9	16,00	0,02	13,0	
342,5 m		1,90	0,02	16,9	
345 m		1,13	0,01	17,8	
350 m		0,21	0,01	18,6	
360 m		1,32	0,02	18,4	
370 m	44,9	88,20	0,65	0,3	
375 m	61,1	84,20	0,50	0,2	
380 m	52,7	72,30	0,50	0,0	
385 m		6,46	0,03	16,1	*821
390 m	31,7	5,20	0,03	16,3	
400 m	26,2	5,48	0,08	16,4	
Fumerolles de la Ty	96,3	91,70	0,01	0,2	*9 471

Tableau. Température et concentrations des gaz du sol au pied du dôme de la Soufrière de Guadeloupe (profil Savanne à Mulets-Morne Miton, figure 1). Mesures à 70 cm de profondeur. T (°C) ($\pm 0,1^\circ$). CO₂ et CH₄ mesurés par absorption infrarouge dans les gammes 0–10 % ($\pm 0,5$ %) ou 10–100 % ($\pm 1,5$ %) et O₂, avec une cellule électrochimique dans la gamme 0–25 % ($\pm 0,4$ %). Les incertitudes relatives ont été déterminées par calibrations avec un mélange étalon et l'air. La stabilité du zéro pour chacun des gaz est de $\pm 0,05$ %. Les activités en radon-222 ont été mesurées par comptage alpha après prélèvement en fioles scintillantes ; (*) Baubron et Sabroux, 1984.

Temperature and concentration of soil gases at the base of Soufrière lava dome, Guadeloupe (profile from Savanne à Mulets to Morne Miton, figure 1). Measurements at 70 cm depth in the ground. T (°C) ($\pm 0.1^\circ$). CO₂ and CH₄ analysed by infra-red absorption (ADC-LFG20) in the ranges 0–10 % (± 0.5 %) or 10–100 % (± 1.5 %); O₂ measured with an electrochemical cell in the range 0–25 % (± 0.4 %). Relative errors determined from calibrations with both a standard gas mixture and air. Zero stability for each gas was ± 0.05 %. Radon-222 activities measured by alpha counting after sampling in pre-evacuated scintillating flasks; (*) data from Baubron and Sabroux (1984).

b) Une deuxième section, longue de 120 m, jusqu'au Morne Miton, est marquée par deux zones pincées, où l'on observe de très fortes anomalies en CO₂ (35–96 %) et en température (30–75 °C), ainsi qu'une absence quasi-totale de CH₄ et O₂. Ces deux zones, séparées par une bande de 20 m de large sans aucun signal, coïncident avec une faille majeure du volcan : la faille de la Ty (figure 1). Les anomalies gazeuses et leur température élevée indiquent l'existence d'un intense flux de CO₂ et de vapeur à l'aplomb de cette faille, marquée en amont et en aval par des fumerolles contenant de l'hélium (10–13 ppm) et du CO₂, typiquement d'origine magmatique ($^3\text{He}/^4\text{He} = 8,2 \times R_{\text{atm}}$ et $\delta^{13}\text{C} = -3,2$ ‰ ; Allard et al., 1983 ; Allard et al., données non publiées, 1996). La composition du gaz du sol, en CO₂ mais aussi en radon et en hélium (8,7–12,6 ppm, pour 40–59 % de CO₂ ; Baubron, 1990), converge vers celle des fumerolles (figure 3, a–b), indiquant une source magmatique commune.

4. Discussion et conclusions

Ces résultats démontrent l'existence d'émanations magmatiques diffuses à la base du dôme de la Soufrière, préférentiellement localisées sur une faille active, où affleure une importante cellule thermique, également décelée par sondage électrique (Zlotnicki et al., 1994). La limite occidentale abrupte des anomalies gazeuses coïncide avec l'apparition de fortes anomalies positives de polarisation spontanée. Les quelques anomalies volcaniques plus faibles et « froides », en dehors de la faille, cohérentes avec des potentiels électriques beaucoup plus bas (Zlotnicki et al., 1994), suggèrent, soit une circulation gazeuse distincte, soit une plus grande profondeur de la même cellule thermique (condensation de la vapeur et dilution accrue du gaz dans le sol, du fait d'un flux moindre). En effet, les variations illustrées dans la figure 3

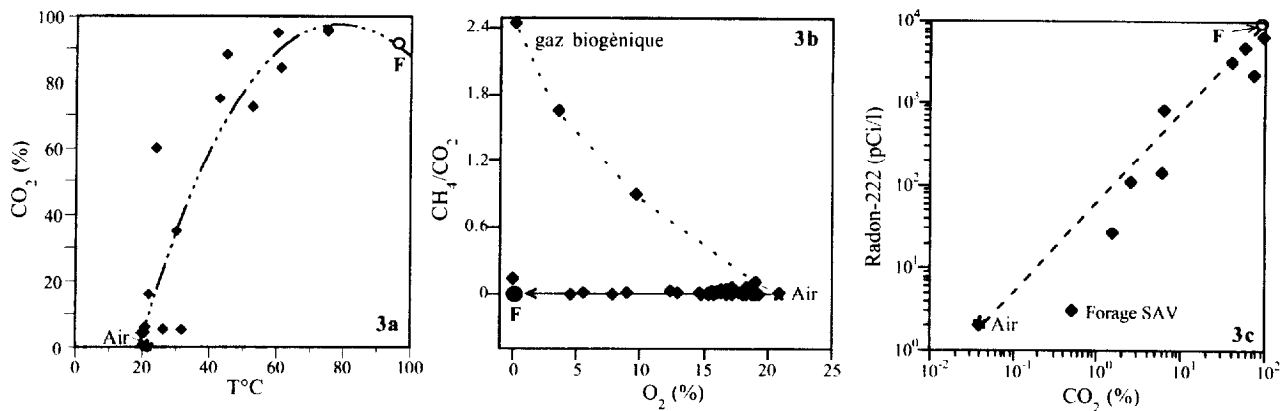


Figure 3. Relations CO_2 - $T(^{\circ}\text{C})$ (3a), CH_4/CO_2 - O_2 (3b) et radon- CO_2 (3c) pour les gaz analysés. Les données indiquent un mélange variable entre l'air infiltré dans le sol et un fluide volcanique analogue au gaz fumerollien (F), quoique légèrement enrichi en CO_2 (3a) et appauvri en radon (3c) lors de son refroidissement dans le sol (condensation de la vapeur, précipitation d' H_2S).

CO_2 - $T(^{\circ}\text{C})$ (3a), CH_4/CO_2 - O_2 (3b) and radon- CO_2 (3c) relationships in soil gases. The data points indicate a variable mixing between air in the soil and a volcanic fluid analogous to the fumarolic gas (F), but depleted in H_2S and slightly in Rn during its cooling upon ascent (vapour condensation).

(a-c) indiquent un mélange variable entre un fluide volcanique unique, analogue au gaz fumerollien, et l'air infiltré dans le sol.

Les anomalies observées dans le sol à l'aplomb de la faille de la Ty sont caractéristiques d'un fort flux gazeux. Elles sont très supérieures à celles rencontrées sur la faille régionale de Montserrat-Marie Galante, à l'est du volcan ($\leq 12\%$ en CO_2 et $\leq 5,8$ ppm en He ; Baubron, 1990), et sont comparables, par exemple, aux anomalies maximales mesurées à Vulcano, en Italie (Baubron et al., 1990 ; Chiodini et al., 1996). Comme à Vulcano et sur d'autres volcans, il est donc possible qu'à la Soufrière une fraction importante des émanations de CO_2 magmatique se pro-

duise sous cette forme. Une prospection systématique des gaz du sol dans la zone sommitale, combinée à des mesures ponctuelles de flux gazeux et à des contrôles isotopiques, devrait permettre de vérifier cette hypothèse.

Enfin, les co-variations de CO_2 et Rn dans le sol (figure 3c) permettent d'envisager un suivi en continu du flux magmatique diffus par l'intermédiaire du radon, à l'aide de sondes (alpha) autonomes enfouies dans le sol (e.g. Baubron et al., 1991). Les anomalies volcaniques « froides » ou de température moyenne identifiées à distance ou/et à proximité de la faille de la Ty offrent des conditions propices pour l'implantation de tels capteurs.

Remerciements. Cette étude a bénéficié de la collaboration efficace et chaleureuse du personnel de l'Observatoire volcanologique de la Soufrière et de soutiens financiers de l'Insu (PNRN, contrat RV 12) et de l'université de Palerme.

5. Références

- Allard P. 1992. Diffuse degassing of carbon dioxide through volcanic systems: observed facts and implications, *Bull. Geol. Surv. Japan*, 279, 7-11
- Allard P., Baubron J.-C., Luongo G., Pece R. et Tedesco D. 1988. Geochemical survey of volcanic soil gas emanations and eruption forecasting: the Vesuvius case, Italy, in : *Proc. Int. Conf. on Volcanoes*, Kagoshima, Japon, 212 (abstract)
- Allard P., Carbonnelle J., Dajlevic D., Le Bronec J., Morel P., Maurenas J.-M., Robe M.C., Faivre-Pierret R., Sabroux J.-C. et Zetwoog P. 1991. Eruptive and diffuse emissions of carbon dioxide from Etna volcano, *Nature*, 351, 387-391
- Allard P., Delibrias G., Dimon B. et Labeyrie J. 1983. Implications of carbon and helium isotopes in volcanic gases from La Soufrière de Guadeloupe, Lesser Antilles (abstract), in : *Proc. IAVCEI Symp. on Volcanic Gases*, Hambourg, 43
- Baubron J.-C., 1990. Prospection géochimique par analyse des gaz du sol en vue de la localisation d'une fracture majeure sous recouvrement : faille Montserrat-Marie Galante, *Rapport BRGM*, ANA SGN 90, 41 p.
- Baubron J.-C. et Sabroux J.-C. 1984. Analyses de gaz dans les sols sur les zones de Bouillante et de Moscou (Guadeloupe), *Rapport BRGM*, 84 SGN 400 GTH, 94 p.
- Baubron J.-C., Allard P. et Toutain J.-P. 1990. Diffuse volcanic emissions of carbon dioxide from Vulcano island, Italy, *Nature*, 344, 51-53
- Baubron J.-C., Allard P., Sabroux J.-C., Tedesco D. et Toutain J.-P. 1991. Soil gas emanations as precursory indicators of volcanic eruptions, *J. Geol. Soc. London*, 148, 571-576
- Chiodini G., Frondini F. et Raco B. 1996. Diffuse emission of CO_2 from the Fossa crater, Vulcano Island, *Bull. Volcanol.*, 58, 41-50
- Delorme H. 1983. Composition chimique et isotopique de la phase gazeuse des volcans calco-alcalins : Amérique centrale et Soufrière de Guadeloupe, *Thèse*, Université Paris 7, 418 p.
- Farrar C.D., Sorey M.L., Evans W.C., Howle J.F., Kerr B.D., Kennedy B.M., King C.Y., et Southon J.R. 1995. Forest-killing diffuse CO_2 emission at Mammouth Mountain as a sign of magmatic unrest, *Nature*, 376, 675-678
- Feuillard M., Allègre C.J., Brandeis G., Gaulon R., Le Mouél, J.-L., Mercier J.-C., Pozzi J.-P. et Semet M. 1983. The 1975-1977 crisis of La Soufrière de Guadeloupe (FWI): a still-born magmatic eruption, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 16, 317-334
- Vincent P., Vatin-Perignon N., Semet M. et Cheminée J.-L. 1979. Le dôme de la Soufrière (Guadeloupe) : son âge et son mode de mise en place, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 288, série D, 51-54
- Zlotnicki J., Feuillard M. et Hammouya G. 1994. Water circulations on la Soufrière volcano inferred by self-potential surveys (Guadeloupe). Renew of volcanic activity ?, *J. Geomag. Geoelectr.*, 46, 797-813