

**VOLCANOLOGIE.** — *Découverte d'une caldéra majeure associée au champ géothermique Los Azufres (Mexique).* Note de Evelyne Pradal et Claude Robin, présentée par Maurice Roques.

La Sierra Los Azufres ( $\approx 140 \text{ km}^2$ ) domine un massif volcanique d'environ  $700 \text{ km}^2$ , composé de dômes dacitiques et rhyolitiques, de coulées de nature calco-alcaline et de formations pyroclastiques acides, reposant sur un soubassement andésitique. Quatre séries de coulées pyroclastiques à cendres et ponces, intercalées de laves basiques, ont été reconnues. Leur émission est à l'origine d'un effondrement sub-circulaire de plusieurs centaines de mètres suivi d'autres moins importants, qui affectent la zone centrale du complexe. La caldéra formée a environ  $20 \text{ km}$  de largeur, elle est cernée par un système de fractures concentriques plus larges délimitant des zones d'effondrements dans le soubassement. Des dépôts lacustres occupent l'intérieur de la caldéra et ces dépressions externes. Dans ce contexte structural, le champ géothermique est la conséquence d'une résurgence qui affecte la sierra Los Azufres.

**VOLCANOLOGY.** — Evidence of a major caldera structure related to the Los Azufres geothermal centre (Mexico).

The Sierra Los Azufres ( $\approx 140 \text{ km}^2$ ) towers over a volcanic complex ( $\approx 700 \text{ km}^2$ ) consisting of dacitic to rhyolitic domes, calc-alkaline lava-flows and siliceous pyroclastic products, overlying an andesitic basement. Four series of ash and pumice flows, alternating with lava-flows, were recognized inside and outside the massif. Their successive outpourings induced the collapse of the central part of the complex, followed by minor faulting, reaching several hundreds meters. The caldera, about  $20 \text{ km}$  wide, is surrounded by concentric fracture zones which affect the basement. Volcanoclastic deposits (cinerites) were observed inside the caldera and in basins around the complex. In this context, the Sierra Los Azufres, where the active geothermal center is lying, appears as the resurgent zone. Thus, this geothermal field is related to a caldera of resurgent type.

Le champ géothermique Los Azufres ( $19^{\circ} 47' \text{ N} - 100^{\circ} 38' \text{ W}$ ) se situe à  $200 \text{ km}$  à l'Ouest de Mexico. En raison de son importance, le gouvernement mexicain en a décidé l'étude et l'exploitation depuis 10 ans. Une cinquantaine de puits ont été forés, dont la moitié sont producteurs avec une capacité d'environ  $100 \text{ MW}$ . La zone présentant des manifestations hydrothermales de surface — émission de vapeur, solfatares, sources chaudes — couvre  $40 \text{ km}^2$  entre  $2800$  et  $3100 \text{ m}$  d'altitude. Elle correspond à la partie haute de la Sierra Los Azufres, de  $10 \text{ km}$  sur  $14$ , orientée W-E. Cette sierra domine un complexe volcanique quaternaire essentiellement composé de dômes de rhyolites et de dacites, de formations basiques calco-alcalines et de produits pyroclastiques acides, reposant sur un soubassement andésitique plus ancien ([1], [2]). Cet ensemble d'environ  $700 \text{ km}^2$  occupe le centre de la zone d'effondrement tectonique W-E Cuitzeo-Maravatio de  $2000 \text{ m}$  d'altitude moyenne (fig. 1). Les bordures nord et sud de cette dépression sont constituées par d'épaisses séries calco-alcalines miocènes.

Outre des études régionales ([1], [2]), de nombreux levés de surface et des travaux concernant la mise en valeur du champ géothermique ont été effectués ([3] à [8]).

En ce qui concerne la Sierra Los Azufres *sensu stricto*, 6 datations des andésites montrent des âges compris entre 14 et 1 M.a. ([4], [7], [8]). Deux phases rhyolitiques majeures, responsables de la mise en place de deux séries de dômes, auraient eu lieu vers  $0,8-1 \text{ M.a.}$  (3 datations entre  $1,03 \pm 0,02$  et  $0,84 \pm 0,02 \text{ M.a.}$ ) et vers  $0,2-0,15 \text{ M.a.}$  [7]. Une mesure K-Ar sur le complexe de dômes et coulées dacitiques de San Andres, qui constitue le rebord est de la sierra, a donné  $0,33 \pm 0,07 \text{ M.a.}$  [7]. Contrairement aux dômes les plus jeunes, les dômes anciens et le Cerro San Andres sont recoupés par des failles normales. Les plus importantes, orientées E-W, mettent la sierra en relief par rapport au reste du massif.

Le contexte volcanologique dans lequel se place de champ géothermique n'était pas connu, et aucune explication satisfaisante n'était apportée à la présence de cet important

gisement lié à des dômes sur un soubassement andésitique surélevé. L'ensemble des pyroclastites avait été interprété comme d'épaisses séries de retombées aériennes associées à la mise en place des dômes [2]. Dobson signale toutefois l'existence de coulées pyroclastiques cendreuse autour de la sierra, dont le lieu d'origine serait la région de Los Azufres [7].

MISE EN ÉVIDENCE D'UNE STRUCTURE CALDÉRIQUE COMPLEXE. — La structure de type caldéra de Los Azufres a été mise en évidence par : (a) L'observation d'un rempart interne globalement circulaire et d'un système discontinu de fractures affectant les andésites de base sur le pourtour du massif. (b) La découverte de plusieurs unités de nappes de cendres et ponces. (c) L'étude de dépôts volcano-sédimentaires.

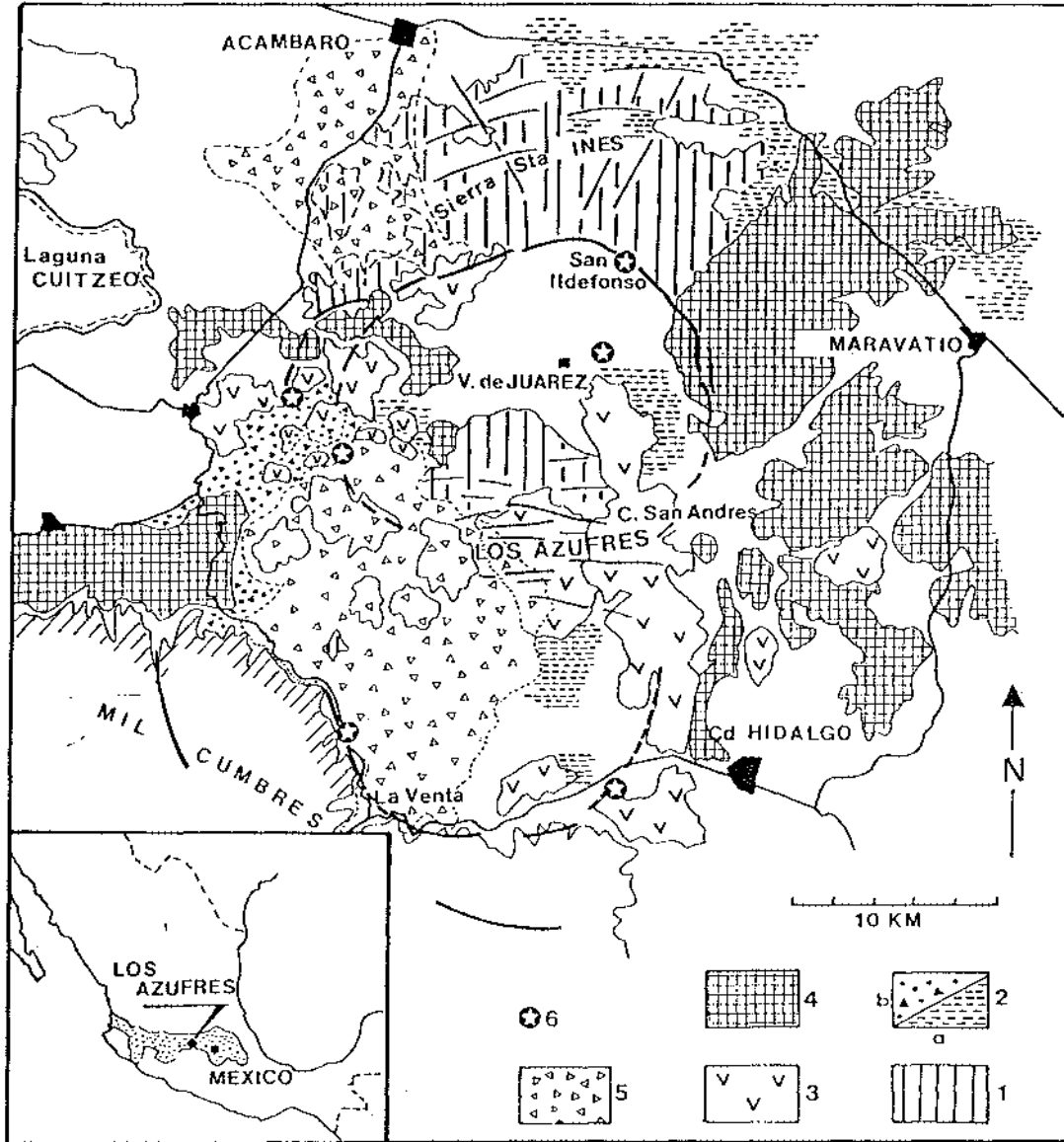
1. *Les zones d'effondrement.* — Un accident volcano-tectonique borde en demi-cercle la plaine de Valle de Juarez. Au Nord-Est, au Nord et à l'Ouest, cette limite lobée intersecte les formations andésitiques de base dont les pendages sont centrifuges. Le dénivelé entre le sommet des andésites (2600-2750 m) et la plaine est généralement compris entre 150 et 250 m. Dans le secteur ouest de la dépression, les andésites affleurent vers 2250 m. Compte tenu de l'accumulation de coulées pyroclastiques et du dépôt de séries volcano-sédimentaires à l'intérieur de la structure, l'effondrement doit dépasser 400 m. La partie non visible du rempart pour former une cuvette grossièrement elliptique d'environ 15 km sur 20, correspond au secteur sud-ouest occupé par des dômes, et au versant nord de la Sierra Los Azufres, surélevée par le jeu des failles Est-Ouest.

Autour du massif, des fractures concentriques et quelques accidents radiaires s'associent à l'effondrement central : au Nord, ils affectent les andésites de la sierra Santa Ines avec des rejets de 150-200 m. Au Sud-Ouest, un accident comparable est à l'origine d'un rempart courbe de 250 à 300 m de hauteur et de 7 km de long, que suit le rio El Real, dans les formations miocènes de Mil Cumbres. Au Sud, le contact entre ces dernières et des andésites plus jeunes de la base du complexe se fait par l'intermédiaire de la zone de fractures normales de La Venta. Le rempart formé par l'accident de La Venta est partiellement ennoyé par une série volcano-sédimentaire. Les sédiments ont eux-mêmes été décalés par des réajustements de cette zone sensible lors de phases volcano-tectoniques postérieures (rejets de plusieurs dizaines de mètres). Ce dernier point est corroboré par l'intersection de coulées provenant du Cerro San Andres par une autre faille courbe au

#### EXPLICATIONS DE LA PLANCHE

Carte schématique de la structure caldérique de Los Azufres. 1, andésites de base; 2, coulées pyroclastiques anciennes : 2a, zones d'affleurement des écoulements à cendres, ponces et obsidienne « anciennes » au Nord, au Nord-Est et au Sud; 2b, écoulements à ponces renfermant des scories basaltiques (versant ouest); 3, dômes antérieurs à la dernière période de volcanisme ignimbritique, dacites et rhyolites; 4, volcanisme basique indifférencié; 5, coulées pyroclastiques récentes : Formations Cieneguillas (au Sud) et Acambaro (au Nord); 6, affleurements de cinérites.

*Geologic sketch map of the Los Azufres Caldera Structure.* 1, andesite lava-flows from the base of the complex; 2, "ancient" pyroclastic flow deposits: 2a, areas in the North, North-east and South, showing outcrops of pyroclastic deposits (ash deposits with pumices and obsidian); 2b, ash and pumice flows containing basaltic scoria-blocks, from the western side; 3, dacite and rhyolite domes emplaced prior to the last ignimbritic series (Cieneguillas and Acambaro series); 4, basaltic and andesitic series (lava-flows associated with cones and maars); 5, younger pyroclastic-flows and domes: Cieneguillas (South) and Acambaro (North) Formations; 6, outcrops of cinerites.



Nord-Ouest de Ciudad Hidalgo. Les accidents de La Venta et Cd Hidalgo délimitent une dépression circulaire dans laquelle se sont accumulés les derniers épanchements de cendres et ponces émis au niveau du rebord sud de la caldéra.

2. *Les coulées pyroclastiques de cendres et ponces.* — Quatre formations de coulées de cendres et ponces ont été reconnues : (a) Deux formations dites « anciennes » — surmontées d'une épaisse série sédimentaire continentale qui les remanie, sont rattachées aux phases rhyolitiques qui ont donné les dômes anciens. Elles sont toutefois séparées l'une de l'autre par des coulées basiques et la mise en place de petits appareils basaltiques, de sorte que la deuxième formation est peut-être nettement plus jeune que les épanchements de base. (b) Deux unités « récentes » reposent sur les sédiments continentaux.

Les coulées de cendres les plus anciennes se sont principalement épanchées sur les flancs nord, nord-est et est du complexe, ainsi que vers le Sud (fig. 1). Les cendres fines, renferment des ponces (2 à 6 cm en moyenne) et de petits blocs d'obsidienne noire. Sur le flanc Sud de la Sierra Los Azufres les blocs d'obsidienne, les ponces et les fragments d'une roche vitreuse flammée composent pour 25 % une coulée de plus de 15 m d'épaisseur. Un autre épanchement présente 20 à 30 % de ponces décimétriques (jusqu'à 40 cm de diamètre). L'épaisseur des formations du Nord est difficile à estimer car on n'observe en général que le toit des écoulements cendreux sous des retombées aériennes de ponces qui leur sont associées. Des dépôts identiques ont été reconnus dans le secteur sud-est de la caldéra entre 2 500 et 2 700 m en direction de la zone soulevée de la Sierra Los Azufres.

La deuxième série de nappes s'est mise en place à l'Ouest et au Nord-Ouest, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur de la structure. Il s'agit de coulées cendreuses à ponces et blocs expansés de rhyolites, renfermant en quantité des scories basaltiques. Elles affleurent sous les dépôts continentaux et sous de nouvelles formations de basaltes émises près de la zone des fractures bordières.

Les unités pyroclastiques récentes sont également au nombre de deux. Les écoulements les plus importants par leur volume constituent la formation Cieneguillas qui a en partie comblé la dépression de La Venta. Elle est constituée de coulées de cendres de 6 à 10 m d'épaisseur moyenne qui peuvent totaliser 80 m en certains endroits (contact avec les andésites observé). Associée à de nombreux niveaux de retombées aériennes, cette formation s'étend sur environ 150 km<sup>2</sup>. Son lieu d'émission est la bordure sud et sud-ouest de la caldéra, recouverte ensuite par les dômes de rhyolite postérieurs à la fracturation E-W. Les dômes correspondent à d'épaisses extrusions visqueuses de 100 à 200 m de hauteur, formant des collines aplaties. La région au sud d'Acambaro est nappée par de vastes épanchements rhyolitiques de cendres, ponces et obsidiennes, dont l'épaisseur dépasse 20 m dans une carrière au Sud de la Ville. On peut suivre ces formations sur les pentes nord-ouest du massif jusqu'à une zone proche du rebord de la caldéra et parallèle à celui-ci, jalonnée de filons d'obsidienne. Ces écoulements montrent une réactivation de la bordure nord-ouest de la structure, il y a probablement peu de temps.

3. *Les dépôts lacustres.* — En plus des dépôts lacustres reconnus à l'extérieur dans les dépressions formées par les failles externes, plusieurs affleurements ont été étudiés en divers points de la caldéra. Ces séries recouvrent la majeure partie de la plaine de Valle de Juarez. L'affleurement le plus représentatif est celui de San Ildefonso où les 16 premiers mètres du remplissage volcano-sédimentaire ont été observés dans une barranca perpendiculaire à la faille bordière de la caldéra.

En suivant le ravin en direction du centre de la plaine, on constate un épaissement des couches, associé à des variations de pendage et au biseautage des bancs de cinérites

du côté du rempart. Les pendages diminuent progressivement (de 17 à 0°) vers l'intérieur de la caldéra et du bas vers le haut de la série, de sorte qu'en s'éloignant du village, seuls les niveaux supérieurs horizontaux affleurent. Cela montre que la subsidence du plancher s'est poursuivie pendant la sédimentation.

CONCLUSION. — Il reste à préciser les relations entre les unités pyroclastiques reconnues et les différents groupes de dômes. Les relations dans le temps entre le volcanisme acide explosif et les formations basaltiques posent aussi de nombreuses questions d'ordre stratigraphique et magmatologique. Un échantillonnage a été réalisé dans ce sens.

Après cette étude préliminaire il est toutefois possible de définir le contexte volcanologique dans lequel est situé le champ géothermique Los Azufres et de proposer une solution quant à son origine :

1. Il est inclus dans une caldéra (environ 20 × 15 km) qui est la conséquence de grandes phases de volcanisme ignimbritique. Celles-ci sont au moins au nombre de deux, probablement trois (nappes de ponces anciennes, coulées du versant ouest renfermant des scories basaltiques, et formations beaucoup plus jeunes de Cieneguillas et Acambaro). Cette structure est comparable aux grandes caldéras américaines ou au complexe de Los Humeros-Teziutlan, à l'Est de Mexico ([9], [10]). Comme à Los Humeros [9] et comme à Timber Mountains dans le Nevada [11], on observe un système de fractures externes affectant une région plus étendue.

2. Cette structure fait partie des *caldéras résurgentes* [12]. Le bombement qui affecte la Sierra Los Azufres est à l'origine du champ géothermique. Il s'est essentiellement produit avant la mise en place des derniers dômes; toutefois, les nombreuses manifestations en surface — et la forte crise sismique qu'a connue cette zone en 1872? — font penser que la résurgence n'est peut être pas terminée.

Les résultats de terrain ont été obtenus au cours d'une mission financée par le P.I.R.P.S.E.V. (C.N.R.S.-I.N.A.G.). Notre mission a été grandement facilitée par les chercheurs du département Géothermie de la Comisión Federal de Electricidad à Morelia, et particulièrement les ingénieurs H. Alonso, A. Razo et A. Negrin.

Remise le 23 septembre 1985.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L. SILVA MORA, *Thèse Doctorat Ingénieur*, Univ. Aix-Marseille-III, 1979, 145 p.
- [2] A. DEMANT, *Thèse Doctorat d'État*, Univ. Aix-Marseille-III, 1981, 259 p.
- [3] A. GARFIAS et A. GONZALEZ, Rapport interne, Comisión Federal de Electricidad, Morelia, 1978, 42 p.
- [4] F. AUMENTO et A. GUTIERREZ, Rapport interne, n° 3-80, Comisión Federal de Electricidad, Morelia, 1980, 66 p.
- [5] S. DE LA CRUZ, J. AGUILA, D. ORTEGA et J. M. SANDOVAL, Rapport interne, n° 9-82, Comisión Federal de Electricidad, Morelia, 1982, 41 p.
- [6] N. COMBREDET, *Thèse Doctorat 3<sup>e</sup> Cycle*, Univ. Paris-VI, 1983, 180 p.
- [7] P. F. DOBSON, *Thesis Master of Science*, Univ. Stanford, 1984, 58 p.
- [8] F. CAMACHO, Rapport interne, n° 6-79, Comisión Federal de Electricidad, Morelia, 1979, 18 p.
- [9] C. ROBIN, *Thèse Doctorat d'État; Ann. Sc. Univ. Clermont-II*, n° 70, fasc. 31, 1981, 503 p.
- [10] H. FERRIZ et G. MAHOOD, *J. Geophys. Res.*, 89-B10, 1984, p. 8511-8524.
- [11] R. L. CHRISTIANSEN, P. W. LIPMAN, P. P. ORKILD et F. M. BYERS, *Geological Survey Prof. Paper* 525-B, p. 43-48.
- [12] R. L. SMITH et R. A. BAILEY, *Geol. Soc. Amer. Memoir*, 116, p. 613-662.

Centre de Recherches volcanologiques, Université de Clermont-II - C.N.R.S.,  
5, rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand.