



HAL
open science

**Le puy de Gravenoire et ses coulées, dans
l'agglomération de Clermont-Ferrand (Massif central
français) : un modèle inhabituel d'avalanche de débris,
déclenchée par une éruption strombolienne en climat
périglaciare**

Alain de Goër de Herve, Guy Camus, Didier Miallier, Serge Sanzelle,
Christophe Falguères, Jean Fain, Michèle Montret, Thierry Pilleyre

► **To cite this version:**

Alain de Goër de Herve, Guy Camus, Didier Miallier, Serge Sanzelle, Christophe Falguères, et al.. Le puy de Gravenoire et ses coulées, dans l'agglomération de Clermont-Ferrand (Massif central français) : un modèle inhabituel d'avalanche de débris, déclenchée par une éruption strombolienne en climat périglaciare. Bulletin de la Société Géologique de France, 1993, 164 (6), pp.783-793. halshs-00406479

HAL Id: halshs-00406479

<https://shs.hal.science/halshs-00406479v1>

Submitted on 22 Jul 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Le puy de Gravenoire et ses coulées,
dans l'agglomération de Clermont-Ferrand (Massif central français) :
un modèle inhabituel d'avalanche de débris,
déclenchée par une éruption strombolienne en climat périglaciaire**

par ALAIN DE GOËR DE HERVE*, GUY CAMUS*, DIDIER MIALLIER**, SERGE SANZELLE**,
CHRISTOPHE FALGUÈRES***, JEAN FAÏN**, MICHÈLE MONTRET** et THIERRY PILLEYRE**

Mots clés. – Chaîne des Puys, Limagne, Massif central français, Avalanche de débris, Eruption strombolienne, Trachybasalte, Datation TL, Pergélisol, Aléa volcanique.

Résumé. – Le puy de Gravenoire est un cône de scories édifié au Pléistocène supérieur sur l'escarpement de ligne de faille occidental du rift de Limagne. Il domine de 400 m la ville de Clermont-Ferrand. Son éruption a déclenché, après le début de l'activité, une avalanche de débris de volume inférieur à 0,05 km³, étalée sur 5 × 0,7 km sur la région sud de l'agglomération. La poursuite de l'activité a reconstruit le cône de scories et émis un ensemble de coulées qui recouvrent le dépôt d'avalanche. La lave montre une composition homogène de trachybasalte potassique, subaphyrique. A 4 km de son origine, le dépôt d'avalanche est fait de panneaux dont la nature est encore reconnaissable (block facies), présentant un début de fragmentation et de déformation plastique. Ils ont été empruntés pour partie au substratum du volcan (socle granitique, basalte porphyrique ancien, sédiments bordiers du graben), et pour partie au volcan lui-même (produits phréatomagmatiques initiaux, projections scoriacées, basalte massif). Les paquets de basalte massif, identiques à celui de la coulée qui recouvre le dépôt, étaient encore assez chauds pour engendrer un métamorphisme thermique dans les arènes et les argiles graveleuses qui les emballent. Des figures de brassage et d'injections réciproques entre lave et sédiments montrent que l'avalanche et la coulée étaient simultanément mobiles. Ceci atteste le synchronisme de l'avalanche de débris et de l'éruption. La cicatrice d'arrachement d'une partie du cône est décelable dans une carrière qui exploitait ses scories. Une dizaine de datations ont été effectuées par les méthodes TL et RPE sur les coulées de Gravenoire. En dépit d'une certaine dispersion des résultats, elles permettent d'estimer autour de 60 000 ans l'âge de l'éruption. A cette époque (Pléniglaciaire würmien ancien) la région était soumise à un climat périglaciaire, et l'escarpement pouvait être garni de matériaux meubles figés par un pergélisol. La fusion brutale du pergélisol par la chaleur du magma, sur un versant ébranlé par les explosions initiales, a pu provoquer la débâcle. L'avalanche de débris du puy de Gravenoire a recouvert un territoire sur lequel vivent actuellement 30 000 habitants. Cet exemple doit attirer l'attention sur un type d'aléa jusqu'alors non pris en compte, susceptible d'affecter toute zone habitée en environnement périglaciaire, même pour un volcan de volume modeste, lors d'une manifestation éruptive habituellement peu dangereuse. L'Amérique du Sud nous semble particulièrement concernée.

**The puy de Gravenoire and its flows,
in the agglomeration of Clermont-Ferrand (French Massif central) :
an unusual pattern of debris avalanche, triggered by a strombolian eruption
in a periglacial climate**

Key words. – Chaîne des Puys, Limagne, French Massif central, Debris avalanche, Strombolian eruption, Trachybasalt, TL dating, Permafrost, Volcanic hazard.

Abstract. – The Puy de Gravenoire is a cinder cone built up during Upper Pleistocene on the western fault line scarp of the Limagne rift. It tops the city of Clermont-Ferrand by 400 m. The eruption triggered, after the beginning of activity, a debris avalanche < 0,05 km³ in volume, which spread over a 5 × 0,7 km surface in the southern suburbs. The following activity rebuilt the cinder cone and overflowed a lot of lavas which overlaid the avalanche deposit. The lava displays a homogenous composition of potassic trachybasalt, subaphyric. 4 km away from the source, the debris avalanche deposit consists of still recognizable panels (block facies) which show an outset of fragmentation and plastic deformation. They are partly pulled out of the volcano's bedrock (granitic basement, old porphyritic basalt, sediments from the edge of the graben), and partly from the volcano itself (initial phreatomagmatic products, scoriaceous ejecta, massive basalt). The basalt of the massive megablocks is the same one as the overlying lava flow; it was still hot enough to bake the rapping granitic clayey sands and gravelly mudstones. The features of mixing and mutual injection among lava and sediment show that avalanche and lava flow were simultaneously moving. This proves that the avalanche is really synchronous with the eruption. The avalanche scar is obvious in a quarry which worked the cinder cone. Ten attempts at dating the Gravenoire lava flows were carried out by TL and ESR methods. In spite of relatively dispersed results, we can rate the age of eruption at around 60 000 years. At this time (Würm lower Pleniglacial) the region was subject to a periglacial climate, which could explain the abundance of loose material on the Limagne fault scarp, probably congealed by a permafrost. The heat produced by the eruption likely melted locally the permafrost, while the split bedrock was shaken by the initial explosions; this curiously freed the material and triggered the collapse.

The debris avalanche from Puy de Gravenoire covered an area on which 30 000 people are now living. This example should attract attention on a type of hazard that has so far been ignored, susceptible to affect any inhabited country in a periglacial environment, even related to a small volcano during an usually slightly dangerous eruptive event. South America seems specially concerned.

* Dép. Sciences de la Terre, CNRS et Univ. Blaise Pascal, 5 rue Kessler, Clermont-Ferrand cedex.

** Lab. Physique Corpusculaire, IN2P3, CNRS et Univ. Blaise Pascal, 63177 Aubières cedex.

*** Institut de Paléontologie Humaine, 1 rue R. Panhard, 75013 Paris.

PRÉSENTATION

Le puy de Gravenoire (*étym.* p. des graviers noirs) est un cône de scories pléistocène dominant directement le bourg de Royat, 4 km au sud-ouest de Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme, France). Connue de longue date en raison de sa proximité de l'agglomération clermontoise [Guettard, 1752], ce volcan a fait l'objet d'une monographie très détaillée de Glangeaud [1901], partiellement contredite par Garde [1942].

Bien que rapportable à l'ensemble éruptif de la chaîne des Puys, Gravenoire est implanté 8 km à l'est de la

chaîne : il partage avec le puy de La Bannière à Volvic la particularité de s'être édifié sur la faille méridienne majeure qui sépare le horst granitique du plateau des Dômes et le fossé sédimentaire oligocène de la Limagne d'Allier. Il se place à la jonction d'un segment N010 et d'un segment N165 de cet accident (fig. 1). La ligne de faille est manifestée par un escarpement élevé de 150 à 200 m, profondément entaillé par les vallées du ruisseau de Champeaux, au sud, et de la Tiretaine, au nord (cette dernière empruntée par une coulée basaltique issue du petit puy de Dôme et descendue jusqu'à Chamalières). Le volcan est installé sur l'escarpement, en position interfluviale entre ces deux

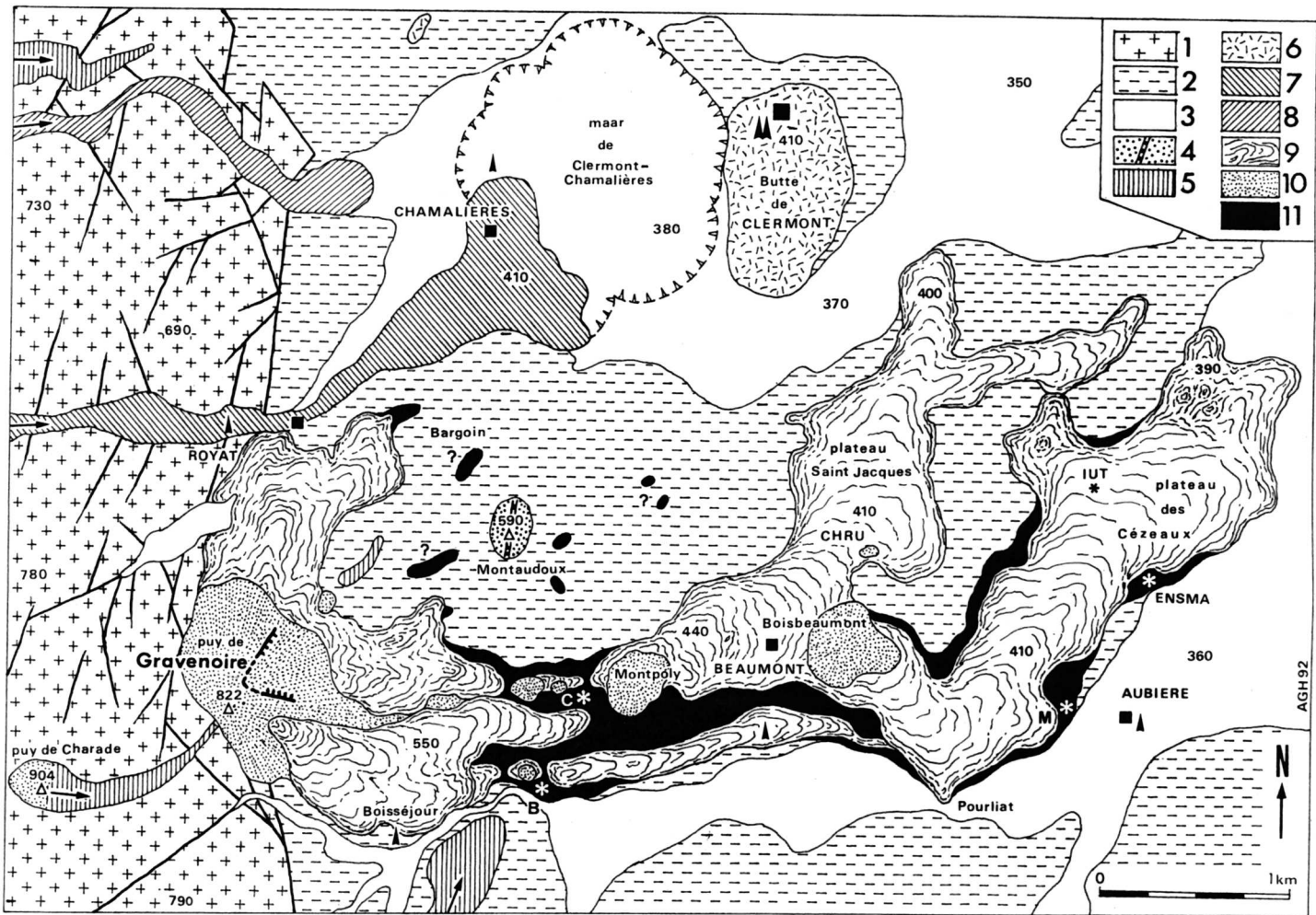


FIG. 1. — L'avalanche de débris et les coulées du puy de Gravenoire, au sud de Clermont-Ferrand.

1 : socle hercynien. 2 : sédiments oligocènes. 3 : alluvions quaternaires. 4 : volcanisme miocène inférieur (diatreme pépéritique, 17 Ma). 5 : volcanisme pliocène supérieur (coulées basaltiques, 3 Ma). 6 : tuf de maar de la Butte de Clermont (160 ka). 7 : coulée du petit puy de Dôme (trachybasalte, 40 ka). 8 : coulée du Pariou (trachyandésite, 8,5 ka); ensemble éruptif de Gravenoire (60 ka). 9 : coulées de lave (trachybasalte). 10 : scories (cône de Gravenoire et conolets sans racine). 11 : avalanche de débris; * points d'observation remarquables de l'avalanche de débris; B = carrefour de Boisséjour, C = la Châtaigneraie, M = le Mirondet.

FIG. 1. — The debris avalanche and the lava flows from Puy de Gravenoire, south of Clermont-Ferrand.

1 : Hercynian basement. 2 : Oligocene sediments. 3 : Quaternary alluvium. 4 : Lower Miocene volcanism (peperitic diatreme, 17 Ma). 5 : Upper Pliocene volcanism (basaltic lava flows, 3 Ma). 6 : maar tuff of Butte de Clermont (160 ka). 7 : Lava flow from petit puy de Dôme (trachybasalt, 40 ka). 8 : Lava flow from Pariou (trachyandesite, 8,5 ka). Eruptive system of Gravenoire (60 ka). 9 : lava flows (trachybasalt). 10 : scoriae (Gravenoire cone, and rootless spatter-cones). 11 : debris avalanche; * outstanding observation points of the debris avalanche; B = Boisséjour crossroads, C = la Châtaigneraie, M = le Mirondet.

gorges, à l'emplacement d'une paléovallée pliocène en inversion de relief fossilisée par une coulée ankaramitique très porphyrique issue du proche puy de Charade. Cette coulée, âgée de 3 Ma [Lippolt *in* Bout, 1966], est tronçonnée et dénivelée par un rejeu pleistocène inférieur des failles bordières de la Limagne [Lageat *et al.*, 1992].

Du pied et du flanc du cône partent plusieurs coulées basaltiques :

— l'une du côté nord, longue d'1 km, dévale vers Royat et la vallée de la Tiretaine ;

— les autres s'étendent sur 6 km vers l'est, portent la ville de Beaumont, puis se séparent en deux langues, et vont coiffer entre Clermont et Aubière le plateau de St Jacques et des Cézeaux, dont la surface domine de 40 à 50 m les plaines alluviales de la Tiretaine et de l'Artière.

A ces coulées orientales sont associés au niveau de Beaumont quatre cônelets scoriacés, successivement regardés comme bouches adventives de Gravenoire [Glangeaud, 1901], lambeaux du cône entraîné par les coulées [Garde, 1942], ou événements éruptifs totalement autonomes [Goër *et al.*, 1991].

La coulée de Royat et le lobe de St Jacques reposent sur les sédiments stampiens, soit directement, soit par l'intermédiaire d'alluvions ou de dépôts de pente. Par contre les coulées de Beaumont et le lobe des Cézeaux surmontent, en continuité sur 5 km de long et 700 m de large, une formation hétéroclite et chaotique, depuis longtemps célèbre en raison des phénomènes thermométamorphiques qu'elle montre au contact du basalte (brique naturelle improprement désignée sous le terme de « porcelanite » dans la littérature régionale). Cette formation a donné lieu à des interprétations diverses : moraine [Julien, 1869], alluvions torrentielles [Glangeaud, 1901], avalanche éruptive « vulcanienne » [Garde, 1942], coulées de solifluxion [Rudel, s.d.], produits phréatomagmatiques évoluant en coulée boueuse (Camus *et al.*, inédit). De récents travaux d'urbanisation, offrant d'exceptionnelles conditions d'observation, nous conduisent à la réinterpréter comme une avalanche de débris déclenchée lors des phases initiales de l'édification de Gravenoire, selon des mécanismes jusqu'à présent non pris en compte dans ce type d'éruption.

I. — GRAVENOIRE, SES « ADVENTIFS » ET SES COULÉES

A) Le volcan de Gravenoire

C'est un cône strombolien de forme relativement atypique, dont le sommet en coupole ne montre aucune dépression cratérique. Du côté sud, le long du circuit automobile de Charade, ses scories reposent sur le substratum granitique arénisé par l'intermédiaire d'un mince dépôt d'origine phréatomagmatique, de 1 à 2 m d'épaisseur, riche en xénoclastes, avec bombes en chou-fleur caractéristiques et lapilli trempés criblés de minéraux granitiques. Ces strates basales représentent le produit du « débouillage » initial, au moment où le magma pénètre dans les terrains superficiels saturés d'humidité. Au nord-ouest, on observe le contact direct du cône de scories sur le socle (granite porphyroïde dit « de Royat » et son cortège de filons aplitiques). Selon

Glangeaud [1901], la moitié orientale de cône repose sur des « arkoses entremêlées de lits argileux verdâtres », faciès de bordure du remplissage du fossé de Limagne, fortement redressées au contact du granite.

Les diverses carrières de « pouzzolanes » qui ont profondément éventré les flancs est et nord de l'appareil permettent d'y reconnaître la dualité de faciès : « cœur de cône », de teinte rouge, et « bas de cône », de teinte noire, caractéristiques de ce type d'appareil [Baudry et Camus, 1972]. Toutefois la répartition de ces produits y révèle une complexité inhabituelle, et diverses discordances ou petites failles, souvent soulignées par des injections laviques ou des dépôts fumeroliens, traduisent une instabilité de l'édifice au cours de sa construction. Dans la carrière occidentale supérieure, deux de ces accidents présentent une importance particulière (fig. 1). L'un est un plan orienté N110 et penté à 70° vers le NE, cicatrisé par un filon basaltique, et de part et d'autre duquel les projections grossières passent brutalement d'un pendage sud à un pendage est ; cette discontinuité disparaît vers le haut, et dans le tiers supérieur du front de taille les couches montrent un pendage régulièrement périclinal. Le second accident, plus discret car mal dégagé, s'observe dans l'aire séparant les deux carrières est et nord : les scories y passent brusquement d'un pendage est à un pendage nord, selon un plan orienté N030 et penté à 75° vers le SE ; comme le précédent il n'affecte pas les strates supérieures. Ces deux discontinuités antithétiques manifestent l'interruption momentanée de l'édification du cône par l'arrachement brutal d'un secteur de 90°, dont l'amphithéâtre a été ultérieurement comblé et cicatrisé.

B) Les spatter-cones

Sur le territoire de la commune de Beaumont, 1,5 à 3 km à l'est de Gravenoire, Glangeaud a attiré l'attention sur la présence de quatre petits édifices scoriacés. Ce sont, d'ouest en est : ceux de la châtaigneraie de Beaumont et de la croupe du Matharet (au dessus du carrefour RN89-CD767), du Montpoly (le plus volumineux : 400 m de diamètre et 30 m de haut, récemment loti), et de Boisbeaumont (actuellement arasé et occupé par un ensemble immobilier). On pourrait être tenté, à la suite de Garde [1942], d'interpréter ces monticules comme des lambeaux arrachés au cône de Gravenoire et entraînés au dos des coulées basaltiques, et de les mettre en relation avec la cicatrice ci-dessus décrite dans la grande carrière orientale. Mais, ainsi que l'avait bien observé Glangeaud, les anciennes carrières encore visibles au Montpoly et dans la châtaigneraie montrent des scories rouges grossières et plus ou moins soudées, relativement homogènes, et régulièrement agencées selon une disposition périclinale ne manifestant aucune perturbation notable (la même disposition pouvait s'observer à Boisbeaumont lors de son urbanisation). Il s'agit incontestablement de spatter-cones autochtones, traduisant des événements éruptifs locaux. Leurs produits sont mêlés en quantité variable de blocs de granite et d'éléments empruntés au substratum argilo-calcaire ou aux alluvions sous-basaltiques.

L'observation, sous et autour de ces accumulations scoriacées, de panneaux hétéroclites diversement basculés et disloqués, ou de contacts verticaux entre basalte et sédi-

ments, nous avait conduits [Goër *et al.*, 1991] à figurer ces spatter-cones comme reposant sur trois structures de type « maar ». Cette interprétation se heurtait toutefois à l'absence des projections phréatomagmatiques correspondantes; surtout, elle ne répondait pas au fait que dans la « carrière des porcelanites de Boisséjour » les sédiments oligocènes apparaissent comme remontés, et non affaissés, vers le centre de la structure. Dans le cadre de l'avalanche de débris ici présentée, le recours à ces trois maars devient inutile.

La plupart des auteurs ont tenu ces quatre spatter-cones pour événements adventifs de Gravenoire, et donc étroitement associés à lui. Mais les valeurs très discordantes obtenues par la datation des basaltes (de 40 000 à 80 000 ans) avaient récemment conduit [Goër *et al.*, 1991] à les regarder comme des appareils totalement indépendants, de Gravenoire et les uns des autres, et successivement responsables de l'émission des coulées de St Jacques, des Cézeaux et de Beaumont-bourg. Curieusement, ces événements s'aligneraient selon une direction W-E inconnue dans la tectonique régionale. La discussion des résultats des dix datations actuellement disponibles (voir ci-après) ne permet plus de s'opposer à l'unicité chronologique de tout cet ensemble.

C) Les coulées

Les diverses langues basaltiques émises par le système éruptif de Gravenoire s'étalent sur une superficie de 6 à 7 km². On peut estimer que leur volume se situe autour de 0,15 km³. Cette évaluation ne peut être qu'approximative, car ces laves moulent une topographie complexe et mouvementée, inégalement connue, en sorte que leur épaisseur totale peut passer rapidement de 5 à 30 m (dont un manteau de scories de surface variant de 0 à 12 m).

Glangeaud [1901] et Bentor [1954] ont insisté sur l'homogénéité pétrographique de ces laves, qui ne varient d'un point à l'autre que par leur degré de cristallisation. Cette homogénéité ne s'opposait pas nécessairement à l'hypothèse d'une indépendance chronologique des diverses langues, dans la mesure où il s'agit d'un type pétrographique particulièrement banal dans la chaîne des Puys (ainsi la coulée de Royat, issue du petit puy de Dôme, de 20 000 ans plus jeune, qui s'étire en contrebas de Gravenoire dans la vallée de la Tiretaine, a exactement la même composition).

Aucune étude minéralogique nouvelle n'en ayant été effectuée, nous emprunterons à Bentor [1954] leur description. Leur couleur varie du gris-perle au noir. La loupe n'y montre que quelques petits phénocristaux (moyenne 0,8 mm) de pyroxène et périclase, plus rarement de plagioclase. Sur des critères optiques, ces phénocristaux sont identifiés comme : augite titanifère, olivine Fa₂₀₋₂₈, et labrador-bytownite An₆₄₋₇₂. La pâte est constituée principalement de microlites de labrador An₅₀₋₅₇ et de minces prismes de pyroxène, peu d'olivine, opaques (ilménite et magnétite), et aiguilles d'apatite. Dans les faciès les mieux cristallisés, les interstices sont occupés par de très petits cristaux d'oligoclase, orthose, très peu de néphéline et peut-être de la noséane (?). De la composition minéralogique quantitative et d'une analyse chimique antérieure, Bentor conclue à : « *trachybasalte foidifère* ».

Bull. Soc. géol. Fr., 1993, n° 6

TABLE I. – Composition chimique moyenne et norme CIPW des laves de Gravenoire (moyenne et écart-type sur 17 analyses). Correction Fe₂O₃/FeO : Le Maître, [1976] (volcanique). Analyses F. Cantagrel, I.C.P. Clermont-Fd, 1991.

Table I. – *Chemical average composition and CIPW norm of Gravenoire lavas (average and standard deviation of 17 analysis). Fe₂O₃/FeO correction : Le Maître.*

	moy. 17an.	écart-type		norme
SiO ₂	47,67	0,57	Or	10,05
Al ₂ O ₃	16,15	0,21	Ab	25,55
Fe ₂ O ₃	12,21	0,45	An	22,8
MgO	5,77	0,13	Ne	2,75
CaO	9,53	0,25	Di_Wo	8,18
Na ₂ O	3,62	0,14	Di_En	4,87
K ₂ O	1,7	0,14	Di_Fs	2,89
TiO ₂	2,49	0,1	Fo	6,66
MnO	0,2	0,01	Fa	4,36
P ₂ O ₅	0,75		Mt	4,62
H ₂ O ⁺	0,13	0,21	Ilm	4,73
H ₂ O ⁻	0,07	0,07	Ap	1,78
Total	100,29		Total	99,23
Nom IUGS :			DI	38,35
<i>Potassic trachybasalt</i>				

Afin de contrôler cette homogénéité, nous avons effectué 17 analyses chimiques nouvelles, à partir d'un échantillonnage prélevé : dans les scories de Gravenoire et des quatre spatter-cones de Beaumont, en divers points de l'ensemble des coulées, ainsi que dans les panneaux emballés dans l'avalanche de débris sous-jacente. Le tableau I fournit la composition moyenne de ces 17 échantillons, ainsi que la norme correspondante, et les écarts-types pour chaque élément, qui se révèlent effectivement très faibles. Dans la classification des laves alcalines de Maury [1976], avec un indice moyen de différenciation (D.I.) de 38,7, la lave se place dans les hawaïites potassiques encore proches des basaltes. Dans le diagramme TAS de Le Bas *et al.* [1986], toutes les analyses sont groupées dans le champ des *trachybasaltes*, domaine *potassique* car K₂O > (Na₂O-2). Ces analyses confirment que la composition du magma n'a pas varié au cours d'une éruption unique, probablement brève, et que les panneaux englobés dans l'avalanche de débris appartiennent bien à la même émission que la coulée qui les surmonte.

Remarque. – Contre les rebords ou dans les creux initiaux de la surface de « cheyre » des plateaux de St Jacques et des Cézeaux, se sont accumulés irrégulièrement, sur un à quelques mètres d'épaisseur, des limons argilo-calcaires à caractères loessiques, qui mettent localement sous scellés quelques décimètres de cendres phréatomagmatiques millimétriques vannées, retombées distales d'une éruption non identifiée dans la chaîne des Puys. L'ensemble de ces produits éoliens est particulièrement bien développé au sommet de la coupe-type du Mirondet décrite ci-dessous.

II. – AGE DE L'ÉRUPTION

L'âge de l'ensemble Gravenoire – St Jacques – Cézeaux est demeuré longtemps surestimé. Les documents paléontologiques sont maigres et ont déjà été discutés par Glangeaud [1901]. Sous la coulée basaltique le long de la RN

89 à Beaumont, il a été signalé un tibia de *Bos* et une dent d'*Equus* [Girod, 1891], éléments de datation nettement insuffisants. Par ailleurs, en face d'Aubières, « les fentes de la coulée de lave, remplies par des argiles sableuses de ruissellement », ont fourni à Pommerol [1880] des ossements de *Bos primigenius*, de cheval, de renard et de marmotte (*Arctomys Lecoqi*). Ce dernier point a été confirmé récemment : lors de l'aménagement des égouts le long du boulevard Pochet-Lagaye, l'un de nous (Goër et Poidevin, inédit) a découvert, dans une puissante poche de limons loessiques accumulés contre le bord de la coulée des Cézeaux, des terriers, dents, ossements et plusieurs crânes entiers de marmottes et de campagnols des neiges (*Microtus nivalis*). La seule certitude était donc que cette coulée est antérieure à la fin du dernier pléniglaciaire.

Sur des arguments morphologiques apparaissant aujourd'hui comme très discutables, Glangeaud [1901] plaçait cet épisode volcanique « au commencement du Quaternaire ». Si la plupart des auteurs ont retenu un âge relativement ancien (à l'exception de Garde, [1942] qui admet un âge « monastirien, au début de la dernière période de l'ère quaternaire », c'est principalement sur le fait que les coulées de St Jacques et des Cézeaux donnent l'impression d'une notable inversion de relief. En réalité ces coulées, de même que l'avalanche de débris sous-jacente, ont nappé un interfluve complexe, mais en deux points au moins il est patent que leur rebord ne domine que de très peu les plaines alluviales de la Tiretaine (+ 5 m au Pont-de-Naud à Clermont) et de l'Artière (+ 2 m dans la zone artisanale de Pourliat). L'hypothèse de Garde était donc tout à fait plausible. Seules les méthodes récentes de datation devaient la confirmer, mais toutefois la grande variabilité des résultats laissait planer un doute sur leur validité.

Datation de l'éruption par la thermoluminescence (TL) et par la résonance paramagnétique électronique (RPE)

Le nombre de datations, déjà publiées ou inédites, de coulées de lave attribuées dans cette étude au volcan de Gravenoire, s'élève aujourd'hui à 10 – sans compter un essai de datation de tephra situés stratigraphiquement au-dessus d'une coulée (tabl. II). Il apparaît un éventail assez large de résultats, s'étendant de 29 000 à 82 000 ans. Une revue de ces différentes valeurs permettra de dégager une moyenne, après discussion et éventuellement révision de marges d'incertitudes trop optimistes.

Nous trouvons d'abord deux âges (1) et (2) obtenus par Guérin [1983], d'après la TL de phénocristaux de plagioclase extraits de la lave elle-même, suivant une technique mise au point au laboratoire de Gif-sur-Yvette [Guérin et Valladas, 1980]. Un prélèvement a été effectué sur le plateau de St Jacques au niveau du CHRU de Clermont, et l'autre sur la pente nord de Gravenoire au-dessus de Royat. Les deux âges, respectivement $82,3 \pm 4,9$ ka et $56,8 \pm 5,5$ ka, sont à première vue fort éloignés l'un de l'autre, et même difficilement compatibles si l'on prend en compte les incertitudes annoncées (en TL l'incertitude donnée correspond généralement à un écart-type). En fait, compte-tenu du recul que l'on peut avoir aujourd'hui en matière de datation par TL, et de toutes les sources d'erreur potentielle qui ont pu être mises en évidence, on peut considérer une incertitude de 6 % de l'âge pour une période aussi ancienne (résultat (1)) peu réaliste, et envisager une valeur plus proche de 10 ou 12 %. Dans ces conditions, la compatibilité des deux âges présente une probabilité plus acceptable.

Viennent ensuite deux mesures (3) et (4) obtenues sur des grains de quartz provenant de matériaux recuits par des

TABLE II. – Récapitulation des essais de datation des coulées du système volcanique de Gravenoire. Les méthodes utilisées sont la TL « bleue » (TLB), la TL « rouge » (TLR), et la résonance électronique de spin (ou résonance paramagnétique électronique, RPE). Les erreurs données correspondent à un écart-type. Les paléodoses données en RPE sont, dans les deux cas, la moyenne des paléodoses obtenues respectivement avec le signal Al et le signal Ti.

TABLE II. – Recapitulation of dating attempts of the lava flows from Gravenoire volcanic system. The used methods are the « blue » TL (TLB), the « red » TL (TLR), and the electronic spin resonance (or electronic paramagnetic resonance, RPE). The RPE paleodoses are, in the two cases, the mean of the paleodoses respectively obtained with the Al signal and the Ti signal.

référence texte	référence laboratoire	site	nature de l'échantillon	minéral utilisé	granulométrie μm	dose d'irradiation annuelle ($\mu\text{Gy/an}$)	paléodose Gy	âge ka	technique	publication
1	CP 102	St-Jacques	basalte	plagioclase		$3,97 \pm 0,20$	$326,5 \pm 10,0$	$82,3 \pm 4,9$	TL	Guérin (1983)
2	CP 100	Royat	basalte	plagioclase		$4,69 \pm 0,29$	$266,8 \pm 19,6$	$56,8 \pm 5,5$	TL	Guérin (1983)
3	Cler 6	Gravenoire	granite	quartz	315 - 500	$5,65 \pm 0,60$	162 ± 13	$28,7 \pm 4,0$	TLB	Miallier (1982) Raynal et al. (1985)
4	Cler 13	Beaumont	sable cuit	quartz	315 - 500	$4,45 \pm 0,5$	183 ± 15	41 ± 6	TLB	Miallier (1982) Raynal et al. (1985)
5	Cler 112	Boisséjour (scierie)	sol cuit	quartz	200 - 315	$2,28 \pm 0,14$	137 ± 14	60 ± 7	TLR	Pilleyre et al. (1992)
6	Cler 111	Aubières	sol cuit	quartz	500 - 1000	$2,66 \pm 0,18$	192 ± 15	$72,0 \pm 7,5$	TLR	Pilleyre et al. (1992)
7	Cler 215	Aubières (Le Mirondet)	sol cuit	quartz	200 - 315	$4,92 \pm 0,50$	277 ± 13	$56,3 \pm 7,0$	TLR / RPE	Miallier et al. (1992)
8	Cler 213	Beaumont (la Châtaigneraie)	sol cuit	quartz	200 - 315	$2,94 \pm 0,30$	160 ± 5	$54,4 \pm 5,7$	TLR / RPE	Miallier et al. (1992)
9	Cler 13	Beaumont	sable cuit	quartz	50 - 200	$4,86 \pm 0,49$	326 ± 23	67 ± 8	RPE	Falguères et al. (1989)
10	Cler 111	Aubières	sol cuit	quartz	50 - 500	$3,22 \pm 0,32$	240 ± 22	75 ± 10	RPE	Falguères (inédit)
11	Cler 210	Les Cézeaux (rue Pasteur)	téphra	quartz	100 - 200	$2,85 \pm 0,12$	129 ± 14	$45,3 \pm 5,3$ $20 - 80$	TLB TLR	Pilleyre (1992)

coulées [Miallier, 1982; Raynal *et al.*, 1985]. La première ($28,7 \pm 4,0$ ka) est relative à un nodule de granite de quelques centimètres échantillonné sous une coulée, vers le milieu de la carrière nord de Gravenoire, dans la brèche de progression au contact de la coulée et du socle. La seconde (41 ± 6 ka) concerne un sable cuit au contact de la lave, prélevé dans l'ancienne carrière dite «des porcelanites de Boisséjour», 120 avenue du Mont-Dore à Beaumont. Ces deux âges sont nettement plus jeunes que les autres, et particulièrement le premier. Pour les auteurs, il est très vraisemblable que cette discordance est à attribuer, non à un épisode volcanique plus récent, mais bien plutôt à un problème lié à la méthode de datation. Ces deux résultats ont été obtenus à partir de la TL bleue du quartz, dont on a quelque raison de supposer qu'elle a souvent tendance à sous-estimer les âges au delà de quelques dizaines de milliers d'années [Pilleyre, 1991]. De plus, l'échantillon (3) se présentait dans un contexte dosimétrique très défavorable, à savoir : une matrice (granite) fortement hétérogène en ce qui concerne la répartition des radioéléments, et un encaissant perméable largement drainé, ces deux causes pouvant être à l'origine d'erreurs non négligeables sur le débit de dose d'irradiation naturelle utilisé dans le calcul de l'âge.

Les autres âges TL (5), (6), (7) et (8) ont été obtenus d'après la mesure de la TL rouge du quartz, selon une nouvelle technique qui semble bien adaptée à la datation jusqu'à quelques centaines de milliers d'années au moins [Miallier *et al.*, 1991, Pilleyre *et al.*, 1992]. Les deux derniers (7) et (8) ont été doublés par des mesures de RPE. Ils se rapportent tous les quatre à des grains de quartz extraits d'argiles sableuses cuites par une coulée. L'échantillon (5) (60 ± 7 ka) a été prélevé au cours d'un sondage effectué à la pelleuse au pied de l'épaisse coulée de la scierie du Bois de la Vallée à Boisséjour. L'échantillon (6) ($72 \pm 7,5$ ka) provient d'un affleurement dégagé au cours de travaux de voirie entre Aubièrre et Beaumont. Le (7) ($56,3 \pm 7,0$ ka) provient du lotissement du Mirondet à Aubièrre, et enfin le (8) ($54,4 \pm 5,7$ ka) d'une coupe observée en 1991 au sommet de la rue de la Veyre à Beaumont, à proximité de la clinique «la Châtaigneraie». On remarque une concordance très satisfaisante entre ces différents résultats. Celle-ci est d'autant plus significative que les taux de radioactivité naturelle varient dans des proportions importantes d'un site à l'autre (entre (7) et (8) par exemple), ce qui fait que les résultats intermédiaires sont assez différents les uns des autres.

La méthode de datation par RPE, qui se développe depuis plusieurs années en étroite relation avec la TL à laquelle elle s'apparente, commence à fournir des résultats prometteurs sur le quartz, en particulier dans le domaine du volcanisme [ex. Yokoyama *et al.*, 1986; Buhay *et al.*, 1992], après avoir été surtout appliquée à des matériaux carbonatés ou à milieux organiques (ossements, dents, coquilles). Deux échantillons (9) et (10) correspondant aux mesures de TL (4) et (6) ont été traités séparément et mesurés par la technique de la RPE. Les résultats obtenus, respectivement 67 ± 8 ka (9) (Falguères, inédit) et 75 ± 10 ka [Falguères *et al.*, 1989] sont en bon accord avec l'ensemble des résultats précédents. Dans ces travaux, le calcul des doses annuelles d'irradiation repose (en partie seulement pour (10)) sur les mêmes sources que les âges TL. La comparaison entre la TL et la RPE sur ces sites fait l'objet de

recherches en cours et leur publication donnera des détails sur les datations (7) et (8) : elle repose sur des mesures en parallèle par les deux méthodes, sur les mêmes échantillons de quartz, préparés et irradiés en une seule fois [Miallier *et al.*, 1993].

Puisque les observations de terrain et leur interprétation, ainsi que la remarquable homogénéité chimique des laves, conduisent à attribuer toutes les coulées datées à un événement unique, on obtiendra la meilleure approximation de l'âge de cette éruption en faisant la moyenne des résultats obtenus. Bien que l'ensemble soit à première vue assez dispersé, on peut vérifier que la distribution ne s'écarte pas significativement d'une loi normale (test de Shapiro-Wilk), ce qui permet de calculer la valeur moyenne et son écart-type, soit : $59,4 \pm 5,3$ ka. Comme il a été souligné plus haut, et compte-tenu du grand nombre de paramètres en jeu, la détermination des incertitudes en TL est un exercice particulièrement délicat [Aitken, 1985]. C'est pourquoi nous n'avons pas jugé réaliste de pondérer les âges par les incertitudes proposées. Ceci est justifié *a posteriori* par un coefficient de variation (écart-type de la série de mesures), 26,7 %, plus élevé que celui qu'on aurait dû obtenir au vu de ces incertitudes. Par ailleurs, il est satisfaisant de constater que la nouvelle technique adoptée par l'équipe de TL du LPC de Clermont-Ferrand, la TL rouge du quartz, donne des résultats assez regroupés.

Une datation utilisant aussi la TL rouge du quartz a été obtenue par Pilleyre [1991] sur des grains de quartz extraits d'un niveau de tephra situé stratigraphiquement au dessus de la coulée des Cézeaux. Le prélèvement a été effectué dans un talus de la rue Pasteur en 1989. Il s'agit de cendres phréatomagmatiques, constituées par un mélange de granulés basaltiques et de minéraux granitiques, issues d'une éruption non identifiée dans la chaîne des Puys, et protégées par des limons loessiques en divers points du plateau (cf remarque ci-dessus). Les mesures ont soulevé des difficultés d'extrapolation des courbes de croissance de la TL en fonction de la dose d'irradiation – qui ne sont pas rares dans ce type de matériau – autorisant seulement la détermination d'une fourchette chronologique très large, 20-80ka. La datation des coulées de Gravenoire proposée ci-dessus permet d'avancer que l'âge de ces tephra est plutôt dans la partie récente de la fourchette, ce qui n'est pas incompatible avec le résultat obtenu en TL bleue sur les mêmes quartz : $45,3 \pm 5,3$ ka [Pilleyre, 1991].

III. – LE DÉPÔT D'AVALANCHE DE DÉBRIS

Il s'agit d'une formation, repérée en une douzaine d'endroits de Boisséjour à Aubièrre, jadis observable et connue de longue date sur 500 m le long de l'avenue du Mont-Dore (RN 89) à Beaumont, où son caractère chaotique et surtout très hétéroclite a donné lieu aux interprétations les plus variées. Il était dans la logique de Julien [1869] de la qualifier de «moraine glaciaire», comme il le faisait simultanément pour les lahars mont-doriens de Perrier, près d'Issoire, avec lesquels cette formation présente de nombreuses analogies. Glangeaud [1901] parle de «delta torrentiel», et décrit une «formation alluviale inférieure à gros galets de granite, granulite et basalte», surmontée d'une «formation argilo-sableuse supérieure (...) pétrie de coquilles de cypris» (il s'agit-là d'un faciès caractéristique de l'Oligocène local),

où s'intercale une couche de 0,25 m d'épaisseur formée de projections basaltiques noires (qu'il attribue aux premières éruptions de Gravenoire). Rudel [s.d.] y voit une somme de coulées de solifluxion périglaciaires. Nous avons nous-mêmes initialement (Camus *et al.*, inédit) vu dans cette formation de Beaumont une coulée boueuse en relation avec les éruptions phréatomagmatiques ayant donné naissance à l'hypothétique maar de Boisséjour-Beaumont (voir § I.B). La réinterprétation ici-proposée en termes d'avalanche de débris – phénomène désormais bien connu en volcanologie, depuis l'éruption du Mt St Helens (18 mai 1980), lors de déstabilisations brutales du flanc d'un édifice éruptif – permet de relier entre elles en un ensemble cohérent les multiples « anomalies » affectant, de Boisséjour à Aubière, tant la coulée basaltique que son substratum.

A) Lithologie

C'est dans la tranchée de la rue du Dr Sahut, nouvellement percée (1991) pour desservir le lotissement pavillonnaire « le Parc du Mirondet » à Aubière, que cette formation peut être étudiée de façon particulièrement démonstrative, le long d'une coupe continue d'une centaine de mètres de longueur et 5 m de hauteur en moyenne. Tous les matériaux qui composent le dépôt proviennent du puy de Gravenoire, distant de 4 km, et de son soubassement.

1) *Les produits issus du volcan lui-même* sont de trois types :

— *des bombes en chou-fleur*, emballées dans des amas de produits phréatomagmatiques dont la stratification, bien que déformée, est reconnaissable ;

— *des lapilli scoriacés noirs* (« faciès de saupoudrage »), en lentilles épaisses de 10 cm env., souvent déformées « en zig-zag » ;

— *des mégablocs de basalte* massif, pétrographiquement et chimiquement identique à celui de la coulée surincombante, de taille métrique à décimétrique. Les plus volumineux rubéfient sur tout leur pourtour la matrice qui les emballent (en sorte que l'un d'entre eux apparaît au premier abord comme une intrusion filonienne). Ils étaient donc chauds lors de la mise en place du dépôt [Melières et Person, 1978] : la formation d'hématite nécessite une température supérieure à 600°C.

2) *Les produits de son soubassement* sont de plusieurs natures :

— *des roches granitiques*. Elles forment au Mirondet l'essentiel de la masse : aplite filonienne (dominante) et granite porphyroïde « de type Royat », en blocs décimétriques anguleux (aplite) ou émoussés (granite) dans une matrice argilo-sableuse de même origine (arène). Ces blocs sont groupés en amas, métriques ou plurimétriques, qui présentent entre eux ou avec les autres éléments (sauf les mégablocs de basalte massif) des contacts contournés témoignant de déformations plastiques mutuelles ;

— *des blocs* (ici petits et rares) de basalte porphyrique (« ankaramite ») altéré, empruntés à la coulée pliocène du puy de Charade ;

— *des sables argilo-graveleux feldspathiques*, faciès de bordure du remplissage sédimentaire de la Limagne, en masses homogènes déformées à stratification fruste encore

décelable, ou en passées diffuses alimentant la matrice de l'ensemble ;

— *des argiles* de teinte crème, avec plaquettes disjointes de marnes fissiles à ostracodes, produits de l'altération des sédiments du stampien supérieur (g2), qui n'affleurent que 3 km plus à l'ouest, à proximité de la faille bordière. Dans la partie basse de la coupe, ces argiles alternent avec les graviers feldspathiques en lentilles diversement déformées et redressées, montrant entre elles un début de brassage.

En résumé, le dépôt observé au Mirondet présente un faciès typique « block and matrix » [Glicken, 1986]. Un kilomètre plus à l'aval, dans des fouilles effectuées pour la construction de l'ENSMA, on observe une évolution très nette vers un dépôt de type « matrix faciès », où les composants tendent à se mélanger en une masse homogénéisée, à l'exception de quelques blocs de basalte très résistants. En ce point, l'avalanche de débris a incorporé des masses argilo-calcaires blanchâtres provenant de l'altération superficielle des marnes chattiennes (g3) sous-jacentes.

La composition globale observée au Mirondet n'est pas pleinement représentative de l'ensemble de la formation. En d'autres points, les granites peuvent être très minoritaires, et les panneaux de marnes à ostracodes, ou de calcaires marneux à limnées du proche substratum, peuvent prédominer sur les argiles graveleuses de bordure (Beaumont RN89, lotissement de Montpoly). D'autre part le basalte porphyrique de Charade, très discret au Mirondet, peut ailleurs constituer des mégablocs décimétriques plus ou moins disloqués (Montpoly, forages de l'IUT aux Cézeaux).

B) Morphologie

Les forages carottés effectués sur le plateau des Cézeaux à l'occasion de l'aménagement du complexe universitaire scientifique (BRGM 1964 et GEOSOL 1967-1968), dont 8 seulement ont traversé la coulée basaltique sur toute son épaisseur (30m en moyenne), n'ont pas révélé à sa semelle un soubassement de morphologie collinaire chaotique (« hummocky surface ») caractéristique d'un dépôt d'avalanche de débris. Seul fait exception le « haut-fond » repéré à l'emplacement de l'IUT (forages GEOSOL GT7 et GT8), sous lequel le basalte se réduit à une couche de 5 à 6 m principalement formée de lave très scoriacée et de scories meubles. Ce « haut-fond » est constitué de mégablocs du basalte porphyrique de la coulée pliocène du puy de Charade (les plus orientaux actuellement connus), reposant sur des sédiments hétérogènes et désordonnés qui comportent : des argiles plastiques à passées sableuses, plaquettes marneuses et fragments de bois, des calcaires siliceux, et des sables argileux feldspathiques à fissures cimentées par de la calcite rouge, en paquets discordants diversement pentés. Bien que le substratum oligocène n'ait pas été atteint (forage arrêté à 9 m), nous pouvons interpréter ce haut-fond comme un très gros « hummock » de 25 m de hauteur.

En dehors du site de l'IUT, la topographie infrabasaltique du plateau des Cézeaux (nous ne disposons pas de sondages profonds ailleurs) ne semble guère différer de celle de la surface de la coulée (dont la planéité régulière est en partie attribuable à une longue anthropisation). L'épaisseur du basalte ne varie que de 29,7 à 32,8 m – ce qui conduit à mettre en doute l'existence d'une paléovallée telle qu'imaginée par

les anciens auteurs. L'absence apparente d'irrégularités notables peut résulter de la conjonction de trois facteurs :

- la trop grande dispersion des forages profonds ;
- une hauteur des hummocks inférieure à 3 m ; cette possibilité est d'autant plus vraisemblable que le dépôt d'avalanche (« alluvions ») semble ici très étalé : son épaisseur n'atteint pas 3 m dans les deux seuls forages qui aient atteint le substratum marneux oligocène (autochtone ?).

- la décapitation des hummocks originels par l'épanchement de la coulée qui a suivi (voir ci-dessous). L'observation de l'avalanche de débris du Mt St Helens (USA, 1980) montre en effet que de tels monticules sont indépendants des mégablocs de roche dure, et présentent des pentes très raides même lorsqu'ils sont constitués de matériaux meubles ou très tendres. Le rabotage ici invoqué est attesté par la présence de fréquents copeaux allochtones dispersés au sein de la coulée, la plupart constitués de matériaux argileux totalement cuits et transformés en brique.

C) Interprétation

La présence, au sein du dépôt d'avalanche de débris, de panneaux de basalte encore chauds lors de la mise en place, suggère que cette avalanche s'est produite précocément dans le cours de l'éruption. Le cône était partiellement formé, puisqu'elle a affecté à la fois les dépôts phréatomagmatiques initiaux et les projections scoriacées (« stromboliennes ») ultérieures, et une coulée était en train de s'épancher. Les deux discontinuités visibles dans la grande carrière orientale de Gravenoire, qui forment un dièdre de 90° ouvert vers l'est, manifestent la cicatrice du secteur du cône entraîné par cet événement.

Dans la coupe aménagée lors de l'extension (1991) de la clinique « La Châtaigneraie » à Beaumont (1,5 km de l'origine), des amas de nature variée (blocs d'aplite et de granite, panneaux d'ankaramite, masses d'argiles feldspathiques) sont emballés dans un empilement d'unités de coulée lavique très scoriacée. Ils sont profondément rubéfiés, la cuisson des argiles peut y être très poussée et accompagnée de belles figures de prismation périphérique. Nous les interprétons comme des copeaux rabotés à la partie haute de hummocks non encore consolidés lors du passage de la coulée. La coulée actuellement visible s'est donc mise en place immédiatement après l'avalanche de débris qu'elle a fossilisée. Le dépôt d'avalanche avait d'ailleurs vraisemblablement à l'origine une extension latérale plus vaste, mais il ne subsiste plus que là où il est protégé par la coulée. En particulier, du côté sud, il est peu probable que l'avalanche n'ait pas envahi une partie de la vallée de l'Artière entre Beaumont et Aubière. Du côté nord, les panneaux de la coulée ankaramitique de Charade décrits par les anciens auteurs de part et d'autre du puy de Montaudou (notamment au dessus du parc Bargoin) pourraient en représenter des témoins sur l'autre versant.

A la surface du plateau basaltique lui-même, principalement dans la région de Beaumont, subsistent de véritables « fenêtres », marquées ou non dans la morphologie, où le dépôt d'avalanche a été incomplètement nappé par la coulée basaltique ultime ; le cimetière de Beaumont semble situé sur une telle fenêtre. En plusieurs points (face au cimetière de Beaumont, pied est du Montpoly), des tranchées de fon-

dation de maisons en construction nous ont montré des structures cylindriques, d'amplitude décimétrique, où des marnes désorganisées sont injectées vers le haut, en perçant verticalement – voire en rebroussant – le toit de la coulée à la façon de diapirs. La même explication s'impose pour le contact vertical entre sédiments chaotiques et basalte observable dans la classique « carrière des porcelanites de Boisséjour » (point B fig. 1) – que nous avons antérieurement interprété comme rebord de diatrème [Camus *et al.*, 1983]. De petites injections sédimentaires dans la coulée, accompagnées d'un thermométamorphisme intense, constituent par ailleurs de véritables « filons de brique » en plusieurs points du plateau des Cézeaux. Ces phénomènes impliquent une mobilité simultanée des deux milieux superposés, boueux et lavique, dont la liaison est si intime que, au sommet de la coupe-type du Mirondet (et il en est de même autour du Montpoly), il devient arbitraire de fixer une limite entre l'avalanche à panneaux de lave chaude et la coulée de lave à paquets de sédiments cuits.

Dans ce contexte, il n'est plus possible d'interpréter comme « bouches adventives » de Gravenoire [Glangeaud, 1901], *a fortiori* comme événements autonomes et chronologiquement indépendants [Goër *et al.*, 1991], les quatre spatter-cones de la châtaigneraie, le Matharet, Montpoly et Boisbeaumont. Pourtant l'organisation interne de ces monticules exclut l'explication allochtone de Garde [1942]. On doit donc les regarder comme des « conelets sans racine », produits par des explosions phréatiques (« éruptions secondaires ») liées à la vaporisation, sous l'effet de la chaleur de la coulée, de l'eau contenue dans le dépôt d'avalanche de débris. De tels conelets sans racine ne diffèrent donc pas fondamentalement de ceux, très classiques, qui jonchent la surface de la coulée du Tartaret à Murols (Puy de Dôme) – fréquemment comparés à ceux du lac Myvatn en Islande. D'autres intumescences plus discrètes de la coulée des Cézeaux (le belvédère de Lachaux, le creux de l'Enfer), pourraient avoir une origine comparable ; la vaporisation d'eau sous-basaltique étant par ailleurs attestée par l'existence de cavernes (certaines rencontrées en sondage) à divers niveaux de la coulée.

D) Conclusion

On peut estimer la superficie préservée de l'avalanche de débris à 3,5 km², son volume étant de l'ordre de 0,03 km³. Le volume initial a pu atteindre 0,05 km³. Une part notable de ces matériaux, majoritaire – voire exclusive – en quelques points (La Châtaigneraie, Le Mirondet) est de nature ou d'origine granitique. Au moment de l'éruption, c'est donc une masse importante de matériaux meubles, résultant de la désagrégation et de l'altération superficielles des granites et aplites, qui était disponible au niveau de l'escarpement de faille de Limagne à l'emplacement de Gravenoire, et qui a pu être libérée instantanément. Une telle situation ne peut se concevoir que dans un contexte climatique bien déterminé.

La discussion des datations, en apparence discordantes, obtenues par TL et RPE en divers points de l'ensemble étudié, nous a conduit à retenir pour vraisemblable un âge de 60 000 ans. Nous sommes alors dans le Pléniglaciaire würmien ancien. A cette époque, les hauts sommets auvergnats étaient totalement englacés, et le territoire ici concerné sou-

mis à un régime périglaciaire sévère. Une telle ambiance était susceptible, sur l'escarpement de faille, de libérer une grande quantité de cryoclastes et d'altérites, et de les figer dans ou sous un pergélisol. Alliée à la déstabilisation de l'escarpement par la montée magmatique et l'ébranlement lié aux explosions phréatomagmatiques initiales, la chaleur dégagée par l'éruption a dû engendrer rapidement la fonte locale de ce pergélisol, provoquant la débâcle de ces formations meubles sous le volcan en cours d'édification, entraînant l'éroulement d'une partie du cône et de son substratum granitique et sédimentaire. L'émission de la coulée s'effectuant simultanément, c'est tout l'ensemble de ces matériaux qui se mêlent pour constituer l'avalanche de débris, enrichie vers l'aval, au fur et à mesure de sa progression sur la Limagne, par des emprunts aux marnes oligocènes et aux alluvions qui les recouvraient localement. Après cet épisode qui a dû être quasi-instantané, l'éruption a repris son cours normal et, tandis que le cône se reconstruisait, la lave a continué à s'épancher sur la surface du dépôt d'avalanche de débris encore mobile et gorgé d'eau.

IV. – DISCUSSION ET GÉNÉRALISATION

Le volume de matériaux déplacés par l'avalanche de Gravenoire (entre 0,03 et 0,05 km³) est certes très modeste si on le compare aux catastrophes majeures observées sur les grands stratovolcans andésitiques. En effet, selon l'inventaire établi par Siebert *et al.* [1987], le volume des grandes avalanches de débris historiques se situe le plus souvent entre 0,5 et 3 km³ (2,5 km³ pour celle du Mt St Helens en 1980); et il a pu dans quelques cas exceptionnels atteindre 20 à 30 km³ (ex. Shasta, Californie ou Popocatepetl, Mexique). Ce volume modeste apparaît toutefois non négligeable lorsqu'on constate qu'il recouvre un secteur actuellement urbanisé où vivent environ 30 000 personnes. Or l'intérêt de ce que nous pouvons appeler « l'événement de Gravenoire » réside essentiellement dans son originalité par rapport aux modèles habituellement décrits.

Le déclenchement des grands glissements de flanc sur des édifices volcaniques complexes et volumineux est principalement attribué à trois types de causes [Siebert *et al.*, 1987] :

- une phase éruptive paroxysmale magmatique (*type Bezymianny*, Kamchatka, 1956 – ou *St Helens*, Washington, USA, 1980);

- une phase éruptive paroxysmale phréatique (*type Bandai-san*, Japon, 1888);

- l'éroulement d'un édifice fragile sans éruption, ou lors d'une éruption dans le voisinage (*type Unzen*, Japon, 1792).

A ces types majeurs, on doit en ajouter deux autres, concernant des édifices monogéniques ne pouvant engendrer que des glissements de faible volume :

- le *type Chaos Crags* (Californie, 1650 env.) : trois avalanches (total : 0,15 km³) sont parties d'un groupe de dômes dacitiques à la suite, soit de séismes, soit d'une éruption de vapeur, soit plus probablement de l'intrusion d'un dôme plus jeune [Crandell *et al.*, 1974]. C'est probablement ce qui s'est produit au Sarcouy, dans la chaîne des Puy (France) [Goër *et al.*, 1991];

- le *type Bagana* (Papouasie-Nlle Guinée, 1989) : un cône de scories instable a été emporté par sa propre coulée de lave [SEAN Bull., 1989]. C'est ce qui semble s'être déroulé au Chambon, dans le Bas-Vivarais (France) (Goër et Camus, inédit), antérieurement à la phase phréatomagmatique qui a déclenché le lahar décrit par Berger [1975] : dans ce cas, l'instabilité du cône est imputable à la très forte pente sur laquelle il s'est édifié, sans qu'il soit nécessaire d'invoquer un contexte climatique particulier (et ce bien que l'éruption du Chambon se soit produite, comme celle de Gravenoire, au cours du Pléniglaciaire würmien).

Nous n'avons pas trouvé dans la littérature évocation de modalités comparables à celles déduites de cette étude. L'événement de Gravenoire pourrait donc constituer un type nouveau.

Les aléas habituellement pris en compte lors d'une éruption « strombolienne » se limitent à :

- coulées de lave (rarement rapides dans ce type d'éruption);

- retombées de lapilli et cendres (généralement limitées au voisinage du cône de scories, mais parfois beaucoup plus étendues et abondantes, notamment lorsqu'une phase hydro-magmatique précède l'édification du cône);

- et, éventuellement, nuées déferlantes basales si une intervention d'eau de surface ou de subsurface est susceptible de perturber le déroulement de l'éruption.

Ce à quoi il convient d'ajouter le risque de débâcle de glace, accompagnée ou non de coulées boueuses, lorsque l'éruption survient à travers un glacier de montagne.

Dans le cas de Gravenoire, en dehors de toute présence d'un glacier – que l'altitude ne permettait pas – nous avons attribué un rôle essentiel à la fusion d'une masse importante de glace interstitielle (permafrost), facteur à notre connaissance non pris en compte jusqu'à présent dans les causes possibles de déclenchement d'une avalanche de débris lors d'une éruption. Contrairement à la fusion d'un glacier, qui nécessite un édifice éruptif de grand volume – stratovolcan – (hors les régions de climat extrême, dépourvues de population), la fonte d'un pergélisol peut être déclenchée par une éruption modeste engendrant un édifice monogénique comme un cône de scories « strombolien ». La carte du globe ne manque pas d'agglomérations humaines installées dans un contexte morphoclimatique comparable à ce que pouvait être la région de Clermont-Ferrand au Pléniglaciaire würmien, et où ce type d'aléa volcanique ne nous semble pas négligeable.

En utilisant le recensement régulier des éruptions volcaniques (*Bull. of the Global Volcanism Network, Bull. of Volcanic eruptions, SEAN Bull.*), nous avons tenté une approche statistique des appareils ayant connu depuis 1975 une activité caractérisée par l'émission de coulées de débris *s.l.* (« lahars », « debris flows », « mud flows ») ou par une débâcle glaciaire. Un seul a enregistré une avalanche de débris *s.s.*, décrite comme telle (St Helens, 1980). Ces appareils sont au nombre de 33, sur un total de 930 env. éruptions recensées, soit 3,5 %. Un peu plus de la moitié d'entre eux (18), en majorité situés en zone intertropicale, ont connu des lahars liés à des pluies, des éruptions phréatiques ou des vidanges de lac de cratère. Les 15 autres, situés en contexte climatique froid, ont mis en jeu une interaction

de laves ou de pyroclastites avec de la glace ou de la neige. Parmi ces derniers :

— 10 sont situés entre 42° et 60° de latitude nord ; ils se répartissent entre le Japon (Hokkaïdo), le Kamchatka, les îles Aléoutiennes, l'Alaska et le nord-ouest des USA ;

— 3 sont situés entre 39° et 60° de latitude sud : Hudson, Villarica et Llaima, au Chili ;

— 2 sont coiffés de glaciers de haute altitude en zone intertropicale : Ruiz (Colombie) et Sabancaya (Pérou).

Compte-tenu de la population faible ou nulle de la plupart des régions concernées dans l'hémisphère nord (Aléoutiennes, Alaska, Kamchatka), il nous apparaît que c'est principalement l'Amérique du sud – et en premier lieu le Chili – qui risque de connaître des événements de nature comparable (et d'amplitude éventuellement très supérieure) à ceux que nous avons évoqués au puy de Gravenoire. C'est en effet là que l'on trouve réunis le plus grand nombre de volcans, avec des éruptions fréquentes, à proximité d'agglomérations humaines, dans un contexte périglaciaire de haute altitude ou/et de haute latitude.

Références

- AITKEN M.J. (1985). – Thermoluminescence dating. – Academic Press, Londres, 359 p.
- BAUDRY D. & CAMUS G. (1972). – Les projections volcaniques de la chaîne des Puys et leurs utilisations. – *Bull. BRGM*, **11**, 2, 1-53.
- BENTON Y. (1954). – La chaîne des Puys (Massif central français). Recherches géologiques et pétrographiques. – Thèse Sci. Paris. – *Bull. Serv. Carte Géol. France*, **242**, 684-691.
- BERGER E. (1975). – Dynamisme et pétrologie du volcanisme récent du Vivarais ; caractères particulier des appareils de la Vestide du Pal et du Chambon (Ardèche, France). – *C.R. Acad. Sci.*, Paris, **281**, D, 1, 507-510.
- BOUT P. (1966). – Problèmes du volcanisme. I – Les méthodes de datation des formations éruptives. – *Rev. d'Auvergne*, **80**, 1, 61-67.
- BUHAY W.M., CLIFFORD P.M. & SCHWARZ H.P. (1992). – ESR dating of the Rotoiti breccia in the Taupo volcanic zone, New Zeland. – *Quat. Sc. Rev.*, **11**, 267-271.
- Bull. of Volcanic eruptions.* – Volc. Soc. Japon, IAVCEI éd. – **26** (1989), **27** (1990), **28** (1991).
- Bull. of the Global Volcanism Network.* – **15** (1990), **16** (1991), **17** (1992).
- CAMUS G., GOËR de HERVE A. de, KIEFFER G., MERGOIL J. & VINCENT P.M. (1983). – Volcanologie de la chaîne des Puys (Massif central français). – Carte à 1/25 000, notice expl. 112 p., 2^e éd. – PNRVA, Montlosier, 63970 Aydat.
- CRANDELL D.R., MULLINEAUX D.R., SIGAFOOS R.S. & RUBIN M. (1974). – Chaos Crags eruptions and rockfall-avalanches, Lassen volcanic National Park (California). – *US Geol. Surv. J. Res.*, **2**, 49-59.
- FALGUÈRES C., YOKOYAMA Y. & QUAEGBEUR J.P. (1989). – Datation par la résonance de spin électronique (ESR) de sédiments quaternaires. – *Cah. du Quat.* **7**, Actes des symposiums 11 et 17 de la 11^e RST, Clermont-Ferrand 1986, 39-52.
- GARDE G. (1942). – Les anciens volcans de Gravenoire et de Charade (près de Clermont-Ferrand). – *Bull. Soc. géol. Fr.*, 4-5-6, 261-270.
- GIROD P. & GAUTIER P. (1891). – Découverte d'un squelette humain contemporain des éruptions volcaniques quaternaires du volcan de Gravenoire. – *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 15 mai 1891.
- GLANGEAUD P. (1901). – Monographie du volcan de Gravenoire, près de Clermont-Ferrand. – *Bull. Serv. Carte Géol. France*, **XII**, 82, 145-184.
- GLICKEN H. (1986). – Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St Helens volcano. – Unpub. PhD dissertation, Univ. California Santa Barbara.
- Global volcanism 1975-1985. – Mc Clelland ed., Smithsonian Inst. (SEAN) publ. – Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., USA, 655 p.
- GOËR de HERVE A. de, CAMUS G., BOIVIN P., GOURGAUD A., KIEFFER G., MERGOIL J. & VINCENT P.M. (1991). – Volcanologie de la chaîne des Puys (Massif central français). – Carte à 1/25 000, notice expl. 128 p., 3^e éd. – PNRVA, Montlosier, 63970 Aydat.
- GUÉRIN G. (1983). – Thermoluminescence des plagioclases, méthode de datation du volcanisme. – Thèse Sci., Paris 6, 260 p.
- GUÉRIN G. & VALLADAS G. (1980). – Thermoluminescence dating of plagioclases. – *Nature*, **286**, 697-699.
- GUETTARD J.E. (1752). – Mémoire sur quelques montagnes de la France qui ont été des volcans. – *Mém. Acad. Sci.* pour 1752, 27 (pub. 1756).
- JULIEN A. (1869). – Des phénomènes glaciaires dans le plateau central de la France et en particulier dans le puy de Dôme et le Cantal. – Thèse Sci. Montpellier. – A. Parent, Paris, 105 p.
- LAGEAT Y., GOËR de HERVE A. de, CHANTEPIE M. & CANTAGREL J.M. (1992). – Les apports du volcanisme à la connaissance de l'évolution morphologique : l'exemple de la région clermontoise. – CERAMAC, Clermont-Fd (sous presse).
- LE BAS M.J., LE MAITRE R.W., STRECKEISEN A. & ZANETTIN B. (1986). – A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. – *J. Petrol.*, **27**, 3, 745-750.
- MAURY R. (1976). – Contamination (par l'encaissant et les enclaves) et cristallisation fractionnée de séries volcaniques alcalines continentales (Massif central français) et océaniques (Pacifique central) : l'origine des laves acides. – Thèse Sci., Paris, 11, 455 p.
- MÉLIÈRES F. & PERSON A. (1978). – Genèse de smectites ferrières par altération deutérique de la base de coulées volcaniques du Massif central français. – *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, **2**, **20**, 5, 389-398.
- MIALLIER D. (1982). – L'usage des détecteurs solides de traces dans le cadre de la datation par thermoluminescence. – Thèse 3^e cycle, Clermont-Ferrand 2, 110 p.
- MIALLIER D., FAIN J., MONTRET M., PILLEYRE T., SANZELLE S. & SOUMANA S. (1991). – Properties of the red TL peak of quartz relevant to thermoluminescence dating. – *Nuclear tracks and radiation measurements*, **18**, 89-94.

