

Les formations pyroclastiques du strato-volcan du Cantal sont-elles liées à une vaste caldéra centrale ? Apport des dynamismes volcaniques*

Richard PLATEVOET (1)
Jean-Luc SCHNEIDER (1)
Christian LEFÈVRE (1)
Pierre NEHLIG (2)

Are the pyroclastic formations of the Cantal stratovolcano (France) related to the collapse of a caldera? Constraints from the study of volcanic dynamics

Géologie de la France, n° 4, 1999, pp. 77-91, 2 fig., 1 tabl., 1 pl. photo.

Mots-clés : Strato-volcan, Pyroclastite, Cantal.

Key words: Stratovolcanoes, Pyroclastics, Cantal, France.

Résumé

Le strato-volcan du Cantal (Massif central français) s'édifie entre 13 et 3 Ma. Au cours de cette évolution, des formations pyroclastiques de nature pétrographique intermédiaire ou évoluée (trachyandésites, trachytes, rhyolites) se mettent en place par des processus variés. La formation la plus ancienne des basaltes infracantaliens renferme des faciès de déferlantes hydroclastiques qui résultent de violentes explosions. La majeure partie des formations pyroclastiques correspond à des ignimbrites déposées dans les vallées qui rayonnaient autour d'un cône situé au cœur de l'édifice volcanique, et sont principalement associées à l'ensemble trachyandésitique anti-avalanches de débris, aux niveaux volcano-sédimentaires et à la formation des coulées de débris. Des dépôts de retombées pyroclastiques sont présents dans le domaine distal de même que des formations pyroclastiques remaniées. L'ensemble de ces faciès volcanoclastiques témoignent de nombreux épisodes éruptifs explosifs d'ampleur variable. L'essentiel des dépôts ignimbritiques déposés au pied

du cône central résulte d'explosions d'ampleur modeste à caractère polyphasé qui sont peu compatibles avec l'effondrement d'une vaste caldéra centrale ; le modèle développé pour les Monts Dore n'est donc pas applicable au Cantal. En revanche, les faciès pyroclastiques distaux et partiellement remaniés témoignent de la dynamique du vaste talus volcanoclastique du volcan.

Abridged English version

With an area of some 2500 km² and a volume of about 1000 km³, the Cantal stratovolcano (Fig. 1) is the largest edifice of the alkaline volcanic province constituting the French Massif Central (Brousse, 1972, 1975, 1977, 1980, 1989; de Goër de Herve, 1980) - a province that probably developed in response to a mantle plume (Granet et al., 1995). Data from a new geological synthesis by BRGM, as well as from previous work, indicate that the volcanic edifice was formed through the accumulation of extrusive and pyroclastic materials (Brousse and Lefèvre, 1990) during several growth phases

between 13 and 3 Ma (Bellon et al., 1972; Baubron and Demange, 1977; Cantagrel, 1995). Periodic flank collapses (Bourdier et al., 1989; Cantagrel, 1995; Schneider and Fisher, 1998) led to the emplacement of large volumes of debris-avalanche deposits around 6.7 Ma. This evolution was accompanied by the emplacement of pumice-rich pyroclastic interbeds, known as nappes de ponces, that are distributed throughout the volcano's stratigraphy. Composed mainly of intermediate and evolved magmatic products (trachyandesite, trachyte, rhyolite), these pyroclastic formations are exposed principally in deep glacial valleys close to the centre of the volcano, but also occur in more distal areas of the volcanoclastic apron. Previous studies postulated that the pyroclastics were produced during the collapse of a large caldera located in the central part of the Cantal volcano (Vatin-Pérignon and Michel, 1966; Vatin-Pérignon, 1968; Aubert et al., 1982).

Various emplacement mechanisms have been recognized for the pyroclastics (Fig. 2). Most of the deposits, comprising

* Manuscrit reçu le 28 août 1998, et accepté le 12 décembre 1999.

(1) Université des Sciences et Technologies de Lille, Laboratoire de Sédimentologie et Géodynamique, CNRS-UMR 8577, Bâtiment S.N. 5, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex, France.

(2) Bureau de recherches géologiques et minières, Direction de la Recherche, BP 6009, 45060 Orléans cedex 2, France.

coarse, poorly sorted, pumice-rich lapilli tuff, were emplaced by pyroclastic flows, and a type section is given at the Peyre del Cros in the Aspre valley (Guérin, 1966; Brousse and Lefèvre, 1966). Two superimposed massive pyroclastic layers display all the characteristics of ignimbrite deposits (Sparks et al., 1973) with ground-surge and ash-cloud-surge deposits (Sparks and Walker, 1973; Crowe et al., 1978; Fisher, 1979) at the base and top. Other pyroclastic deposits with similar features, display lateral facies variations such as in the Alagnon valley where a proximal, partly welded, ignimbrite at Passadou and Pierre Taillade grades laterally downslope into a non-welded massive and matrix-rich deposit at Gare des Pommiers (Milesi, 1976); the abundant matrix is considered to be the result of abrasion of the vitric material during transport (Freundt and Schmincke, 1992). The thickness and distribution of the pyroclastic flow deposits strongly suggest that they correspond to high-aspect-ratio ignimbrites (sensu Walker, 1983) that filled valleys radiating out from the centre of the stratovolcano. Similar non-welded deposits occur at La Gandilhon and Le Mignalou (Impradine valley), Moulin de Drils and Plateau du Limon (Santoire valley; Watelet, 1977), Ferme d'Aubart (Petite Rhue d'Eybes valley; Watelet, 1977), Falaise du Chauvier (Petite Rhue de Cheylade valley; Manceau, 1967; Maury, 1968) and Les Costes (Mars valley).

Surge deposits resulting from violent hydroclastic explosions occur within the basaltic complex (the basaltes infracantaliens formation) that marks the beginning of the Cantal volcanic activity at Massebeau (Alagnon valley). Hydroclastic surge deposits with characteristic cross bedding are present at Collandres (Véronne valley) and Ebulit (Petite Rhue d'Eybes valley; Godin, 1997).

Pyroclastic fallout deposits have been recognized in relatively distal parts of the Cantal volcanoclastic apron. At Puy Courny, near Aurillac (Jordanne valley), these deposits were previously interpreted as sands (Brousse et al., 1975), but the presence of glass shards and planar bedding strongly suggests a pyroclastic origin. Fallout deposits are also associated with pyroclastic flow deposits at Plateau du Limon (Santoire valley), Collandres (Véronne valley) and Recouderc (Chevade valley; Maurizot-Blanc, 1974).

Remobilized pyroclastic material, generally corresponding to coarse pumice-rich tuff, is commonly associated with the primary volcanoclastic deposits. It is usually enriched in non-juvenile lithic clasts, contains subrounded to rounded particles, and displays depositional sequences having the characteristics of alluvial deposits. Typical remobilized deposits interbedded with primary pyroclastic deposits and breccias are present at Col Saint-Georges and Seilhols-Haut (Aspre valley), Saint-Martin Cantalès (lower Maronne valley) and close to Chapelle Saint-Antoine (Chevade valley). This facies association is typical of distal volcanoclastic aprons (Palmer and Neall, 1991).

The Cantal stratovolcano thus displays a large diversity of pyroclastic formations, emplaced during both the eruptive periods (primary deposits) and inter-eruptive periods (reworked deposits). The primary deposits mostly result from dense pyroclastic flows with welded deposits occurring exclusively in the proximal central part of the cone structure. Pyroclastic surge deposits are associated with the ignimbrites (e.g. at Peyre del Cros and Les Costes). Fallout deposits are less common, probably because of their smaller volume and their ease of erosion, whereas hydrovolcanic surge deposits are rare and reflect discrete and space-limited phreatovolcanic activity.

The diversity of mineral parageneses in the studied pyroclastic layers suggests that they were emplaced during a series of events, implying a temporal evolution of the magmatic system. Crystal fractionation is inferred from previous work on contemporaneous basaltic and trachyandesitic lava flows (Maury and Brousse, 1978; Downes, 1984, 1989; Liotard et al., 1988; Collomb and Pilet, 1996).

Although pyroclastic deposits occur at all stratigraphic levels of the Cantal stratovolcano, the volcano underwent several flank collapse events during its evolution. Consequently, it is difficult to establish a volcano-lithostratigraphy based on the pyroclastic layers for all the sectors of the volcano. Nevertheless, it is possible to place some horizons within this evolutionary pattern. Thus the Massebeau hydroclastic surge deposits appear to be the oldest. Some layers such as the Passadou and Pierre Taillade welded ignimbrites are reworked within debris avalanche

deposits, and other layers such as the Puy Courny tephra and the Collandres fallout and surge deposits are overlain by debris avalanche deposits. All these deposits are therefore related to a first growth phase of the volcano. Other pyroclastic layers, such as the Peyre del Cros, Aubart, and Moulin de Drils pyroclastic flow deposits, overly debris avalanche breccias and would be contemporaneous with a second growth phase. Finally, tephra are interbedded within the coulée de débris (debris flow) formation and are characterized by smaller volumes than the older deposits.

We can therefore conclude that the volcanoclastic deposits of the Cantal stratovolcano result from numerous explosive events of variable intensity. Most of the pyroclastic flow deposits fill palaeovalleys and thus reflect small-magnitude eruptions. Our field data also strongly suggest that the pyroclastic materials were not emitted from the central part of the volcano during caldera collapse. Consequently, the hypothesis of a large pumiceous ignimbrite eruption, comparable to those observed in the Mont Dore volcanic complex (Mossand et al., 1982), cannot be applied to the Cantal stratovolcano. On the contrary, we consider the emplacement of the pyroclastic materials to be mainly related to the evolution of a stratovolcano with the development of a central cone, as indicated by the polyphasic character of the explosive activity.

The most proximal facies, very thick and partially welded in places, were emplaced at the base of this central cone. The median facies spread outward onto the volcanoclastic apron and are characterized by the association of pyroclastic flows and fallout deposits with reworked alluvial and laharcic facies, as usually observed on aprons (Rodolfo and Arguden, 1991; Palmer and Neall, 1991; Smith, 1991). Finally, the volcanoclastic materials in the most distal parts of the apron are exclusively reworked. A major topographic control must therefore be considered for the emplacement of the pyroclastic flow deposits, which brings the concept of a large caldera in the centre of the Cantal volcano into question.

Introduction

Le massif volcanique du Cantal qui occupe une vaste surface du Massif central

français est un immense strato-volcan (fig. 1) édifié entre 13 et 3 Ma (Bellon *et al.*, 1972 ; Brousse, 1972, 1975, 1977, 1980, 1989 ; de Goër de Herve, 1980). Il appartient à la province alcaline du Massif central français dont l'origine serait liée au fonctionnement d'un panache mantellique (Granet *et al.*, 1995).

Le strato-volcan du Cantal s'édifie au cours de plusieurs phases qui impliquent une croissance par accumulation de produits effusifs et pyroclastiques (Brousse et Lefèvre, 1990) et des périodes de destruction associées à la mise en place de volumineux dépôts d'avalanches de débris (Bourdier *et al.*, 1989). Les épisodes éruptifs explosifs ont conduit au dépôt de matériaux pyroclastiques, parfois volumineux, interprétés lors de travaux antérieurs comme résultant de la mise en place d'une grande « nappe de ponces » du même type que celle qui a été proposée pour les Monts Dore (Brousse et Lefèvre, 1966 ; Guérin, 1966). Dans un tel schéma, il convient de supposer l'existence d'une vaste caldéra centrale d'effondrement comme cela fut proposé par Vatin-Pérignon (1968) et Aubert *et al.* (1982).

L'objectif du présent travail est de proposer une nouvelle interprétation volcanologique des formations pyroclastiques du massif cantalien mises en place par des mécanismes variés. Nous tenterons de replacer ces formations dans l'évolution du strato-volcan et de discuter l'existence de la caldéra centrale. La terminologie adoptée pour la description des dépôts est celle de Schmid (1981).

Contexte géologique et lithostratigraphie

Le Cantal occupe une surface d'environ 2 500 km² et son volume atteint 1 000 km³. Le volcan s'est construit pendant une période relativement longue de 10 Ma environ, entre 13 Ma et 3 Ma (Bellon *et al.*, 1972 ; Baubron et Demange, 1977 ; Cantagrel, 1995).

Une synthèse géologique du Cantal menée en parallèle avec ce travail par le BRGM permet de dégager les grands stades d'évolution suivants du volcan cantalien et de proposer une nouvelle dénomination des unités lithostratigraphiques.

A la base, on rencontre des coulées et des projections basaltiques d'âge miocène résultant d'une activité strombolienne dispersée (13 Ma ; 9,5 Ma) sur le substratum varisque et les bassins sédimentaires oligocènes. C'est la formation des *basaltes infracantaliens*.

A partir de 9,7 Ma, se construit un édifice central d'environ 25 km de diamètre, essentiellement trachyandésitique, intrudé par des produits volcaniques différenciés (trachytes, rhyolites). Il s'agit des formations de l'ensemble *trachyandésitique anti-avalanches*. La construction de l'édifice se poursuit jusqu'à 6,7 Ma et est perturbée par de grandes déstabilisations sectorielles (*avalanches de débris*) qui mettent en place, en périphérie de l'édifice volcanique, une épaisse unité chaotique de brèches (Bourdier *et al.*, 1989 ; Cantagrel, 1995 ; Schneider et Fisher, 1998).

Cette brèche est généralement surmontée par de nombreux horizons pyroclastiques interstratifiés dans des *niveaux volcano-sédimentaires*. Ils sont eux-mêmes surmontés par une épaisse unité de conglomérats : *les coulées de débris*. Ceux-ci résultent de processus de type laharique qui mettent en place des coulées de débris et de boue au toit des avalanches de débris. Ces remobilisations de matériel volcanique se produisent alors que la construction du cœur de l'édifice se poursuit par l'émission d'épaisses coulées de laves et de nuées ardentes trachyandésitiques visibles sur toutes les crêtes du cœur du Cantal (Chavaroche, Cabrespine...) et par l'intrusion de dômes phonolitiques dans le centre et au nord de l'édifice : épisode des *phonolites intrusives et des trachyandésites sommitales*.

L'activité éruptive se termine vers 3 Ma par la mise en place de volumineux épanchements basaltiques qui recouvrent l'ensemble du massif. Ce sont les *basaltes supracantaliens*. L'érosion de cette formation conduit à l'individualisation de vastes plateaux basaltiques (planèzes) entre de profondes vallées glaciaires.

Des dépôts pyroclastiques se rencontrent à tous les niveaux stratigraphiques de l'édifice volcanique du Cantal. Seuls les dépôts les plus significatifs seront décrits. La figure 2 présente les coupes des principales formations étudiées dans ce travail.

Description et interprétation des formations pyroclastiques

Les dépôts pyroclastiques étudiés permettent de mettre en évidence divers mécanismes de mise en place. Nous avons pu distinguer principalement des dépôts d'écoulements pyroclastiques (coulées de cendres et de ponces), de déferlantes et de retombées. Certains faciès volcanoclastiques résultent également de phénomènes de remaniement.

Les dépôts d'écoulements pyroclastiques

Les dépôts interprétés comme résultant d'écoulements pyroclastiques correspondent pour l'essentiel à des tufs grossiers mal classés, riches en ponces, cristaux et éléments lithiques. Bien que la majeure partie des affleurements de ces faciès correspondent à des séquences de dépôt incomplètes, certains affleurements permettent d'observer des variations verticales et les dépôts des déferlantes pyroclastiques associées aux coulées de ponces et de cendres principales. D'autre part, il est possible de mettre en évidence des variations latérales de faciès dans les dépôts.

Description d'une coupe-type : la Peyre del Cros (vallée de l'Aspre)

Dans la haute vallée de l'Aspre, à la hauteur du village de La Bastide du Fau, au pied de La Peyre del Cros, affleurent dans le ravin de la Chevaspre, des nappes ponceuses dont l'épaisseur cumulée atteint 50 m environ. Il s'agit de l'affleurement le plus caractéristique car le plus complet des dépôts d'écoulements pyroclastiques du Cantal. Recouvert par des dépôts de coulées de débris, il présente les caractères d'un ensemble ignimbrétique (Brousse et Lefèvre, 1966).

La coupe est présentée en figure 2F. On distingue deux niveaux superposés aux caractéristiques différentes (pl. 1, photo B) :

- une séquence basale de 6 m d'épaisseur minimum (nappe 1) riche en ponces et cristaux mais pauvre en éléments lithiques ;

- une séquence sus-jacente de 12 m d'épaisseur minimum (nappe 2), beaucoup

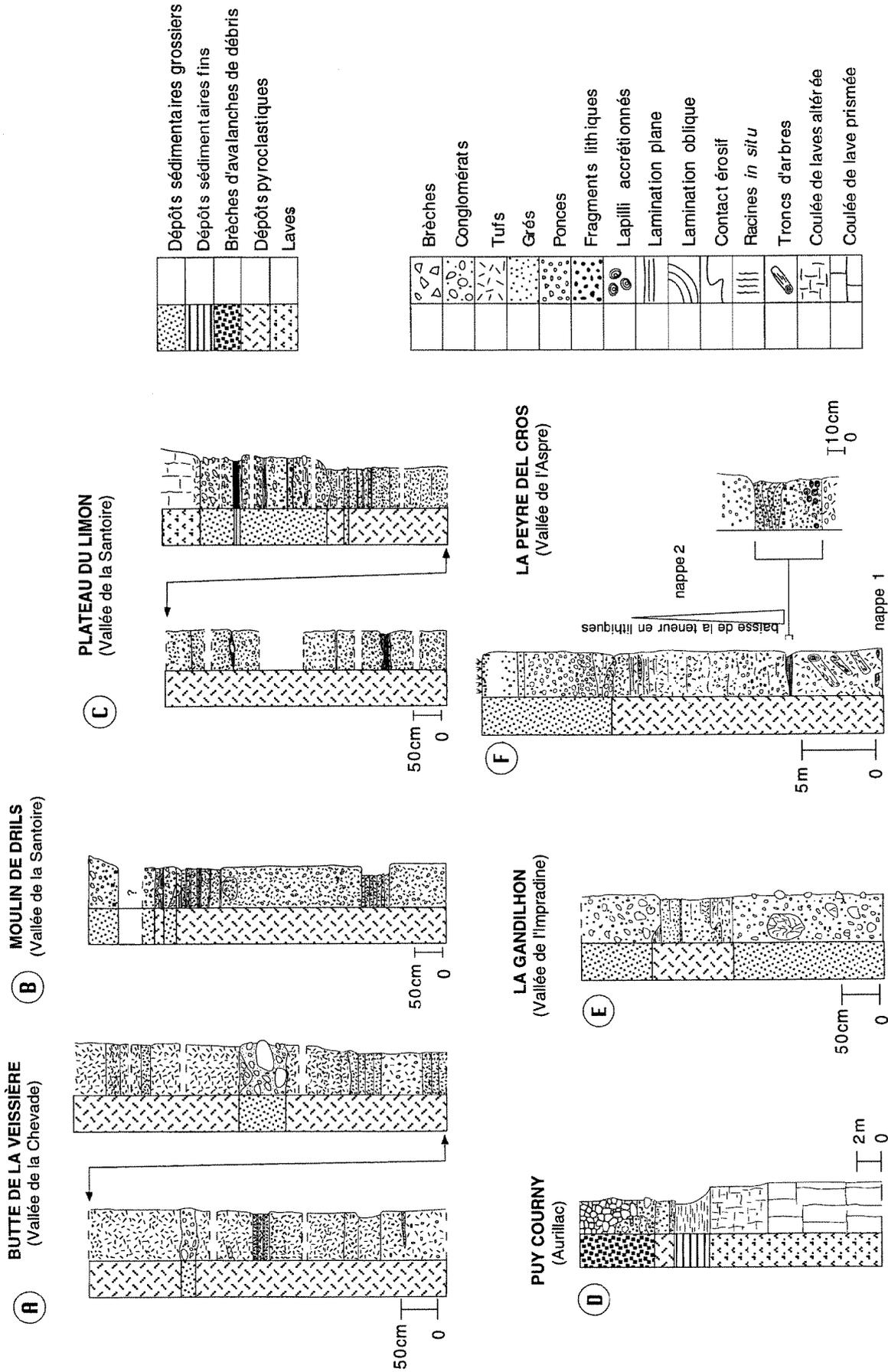


Fig. 2. - Coupes synthétiques des principaux affleurements de formations pyroclastiques du volcan du Cantal.

Fig. 2. - Synthetic measured sections of the main outcrops of pyroclastic formations of the Cantal volcano.

plus riche en éléments lithiques. Elles sont séparées par un niveau peu épais de tufs cendreaux finement stratifiés. Au sommet, un conglomérat à faciès de lahar qui présente des passées plus gréseuses repose en discordance sur la nappe 2.

Description des dépôts

La « nappe 1 » forme un dépôt massif et mal classé qui correspond pour l'essentiel à un tuf à lapilli grossier riche en ponces. Les fragments lithiques de grande taille sont peu abondants. Ce dépôt renferme de nombreux troncs d'arbres carbonisés qui ont parfois une taille plurimétrique et dont certains montrent en surface des traces de dilacération liées à l'abrasion au cours du transport au sein de la masse pyroclastique. A l'échelle microscopique, le tuf renferme des petites ponces grises à bulles aplaties, des cristaux isolés de plagioclase et de biotite, de la titanite parfois incluse dans les ponces et des éléments lithiques à texture microlitique ou microlitique porphyrique, l'ensemble flottant dans une matrice vitreuse altérée sombre.

Le sommet du dépôt de « la nappe 1 » montre un niveau de tuf cendreaux de 60 cm d'épaisseur qui présente un litage ondulant. Il renferme des lapilli accrétonnés de diamètre centimétrique dans une matrice de cendres qui inclut également de petites ponces, des microcristaux de feldspath et de rares biotites.

Les dépôts de la « nappe 2 » présentent à leur base un niveau de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur, constitué de tufs fins montrant des rides progradantes soulignées par l'alternance de lits enrichis en cristaux et de lits enrichis en ponces (pl. 1, photo C).

Pétrographiquement, il s'agit d'un tuf vitreux contenant des éléments lithiques (basalte), de nombreuses ponces à bulles étirées et des cristaux isolés de feldspath et de biotite.

La masse principale de la « nappe 2 » est caractérisée par une base à granoclasement inverse. Une lamination devient plus apparente vers le sommet et est marquée par la présence de rares poches riches en éléments lithiques. L'examen microscopique révèle la présence de clastes microlitiques, de ponces à bulles étirées (fragmentation pyroclastique *s.s.*),

des cristaux isolés de feldspath et des biotites plissées. La titanite est présente notamment dans ce qui pourrait correspondre à une *flamma*.

Interprétation des dépôts

En raison de leur grande épaisseur, de leur mauvais classement et de leur lamination fruste, les nappes 1 et 2 résultent du dépôt de coulées pyroclastiques denses : ce sont des ignimbrites. Leur température de mise en place doit être relativement faible comme l'atteste l'absence de structures indiquant une soudure franche.

Les tufs cendreaux fins présents au sommet de la « nappe 1 » résultent du dépôt d'une déferlante de nuage de cendres (*ash cloud surge*). Ils contiennent des lentilles riches en ponces comparables à celles que l'on observe au sommet des épaisses nappes ignimbritiques telles que les ignimbrites du Bandelier Tuff dans la caldeira de Valles au Nouveau-Mexique par exemple (Crowe *et al.*, 1978) et sont également typiques des déferlantes qui accompagnent les coulées pyroclastiques riches en ponces (Fisher, 1979).

Les rides progradantes du niveau de base de la « nappe de ponces 2 » indiquent un phénomène de traction accompagnant un fort taux de décantation compatible avec un mécanisme de déferlante de fond (*ground surge*, Sparks et Walker, 1973 ; Fisher, 1979). Le contact avec la « nappe de ponces 2 » sus-jacente n'est pas érosif et suggère le caractère globalement non turbulent au cours de l'écoulement de la masse pyroclastique de la « nappe 2 ». En revanche, les caractéristiques faciologiques des dépôts de la déferlante de fond, comme la présence de la lamination ondulante et des rides chevauchantes par exemple, témoignent de l'importance de la turbulence à la semelle de l'écoulement pyroclastique.

Les autres dépôts

D'autres dépôts pyroclastiques du Cantal peuvent être interprétés comme résultant de coulées pyroclastiques car ils présentent des caractères analogues à ceux reconnus dans la coupe de la Peyre del Cros. Cependant, des variations ont été observées et sont fonction principalement de l'importance des dépôts et de leur position dans l'édifice volcanique.

Les dépôts renferment toujours une forte proportion de ponces, parfois de grande taille (1-10 cm), des cristaux juvéniles (plagioclases, rares feldspaths alcalins, ortho- et clinopyroxènes, amphiboles, biotites, *cf.* tabl. 1) et une teneur variable en éléments lithiques. Ils sont généralement épais, mal classés et d'aspect massif, bien que des laminations frustes puissent être présentes en sommet de séquence.

Nous les présentons maintenant en insistant sur les variations verticales et latérales des faciès.

Les dépôts de la vallée de l'Alagnon

Les formations pyroclastiques qui affleurent dans la vallée de l'Alagnon sont représentées principalement par d'épais dépôts de coulées pyroclastiques constitués de deux faciès principaux :

- un faciès proximal parfois soudé dans le domaine amont ;
- un faciès distal non soudé vers l'aval de la vallée.

Le faciès proximal

Présent dans la haute vallée de l'Alagnon, ce faciès montre une puissance estimée à 200 m (Milesi, 1976). A la hauteur du viaduc ferroviaire du Passadou, à la Pierre Taillade (le long de la RN 122, entre Laveissière et le buron des Belles Aigues, en rive droite de l'Alagnon) et à Fraisse-Haut, les formations pyroclastiques sont en partie déplacées au sein de brèches d'avalanches de débris. Des formations en place ont été reconnues sous les brèches d'avalanches de débris dans le ravin qui remonte vers le sud à la hauteur du viaduc du Passadou.

La série étudiée à la Pierre Taillade au niveau du mémorial érigé à la gloire des FFI montre deux unités pyroclastiques superposées. De la base au sommet, on observe :

- une unité pyroclastique inférieure qui correspond à un tuf ponceux présentant des indices de soudure. Il renferme des éléments lithiques de laves à texture microlitique, aux limites estompées, dans une matrice riche en cristaux de feldspath et de clinopyroxène de grande taille avec quelques amphiboles ;

	Clinopyroxène	Orthopyroxène	Amphibole	Biotite	Titanite	Feldspath	Divers
Dépôts de coulées pyroclastiques							
La Peyre del Cros (vallée de l'Aspre) (unité inférieure)	0	0	0	3 (p)	2	Pl (p)	
La Pierre Taillade (vallée de l'Alagnon) (unité inférieure)	3	0	1	1 (p)	0	Pl (p)	
Ancienne gare des Pommiers (vallée de l'Alagnon)	2	0	2 (p)	1 (p)	2	Pl (p)	
La Gandilhon (vallée de l'Impradine)	2 (p)	2 (p)	3 (p)	1 (p)	0	Pl (p)	
Le Mignalou (vallée de l'Impradine)	1	0	1 (p)	3 (p)	0	Pl (p)	
Moulin de Drils (vallée de la Santoire)	0	0	0	3	1	Pl (p)	
Ferme d'Aubart (vallée de la Petite Rhue d'Eybes)	0	0	0	3	2	Pl (p)	
Falaise du Chauvier (vallée de la Petite Rhue de Cheylade)	3 (p)	0	3	1 (p)	0	Pl (p)	
Plateau du Limon (vallée de la Santoire)	3 (p)	0	3	2 (p)	0	Pl (p)	
Les Costes (vallée du Mars)	0	0	0	3	1	Pl (p)	
Dépôts de déferlantes hydrovolcaniques							
Massebeau (vallée de l'Alagnon)	2	0	3	0	0	Pl	Ol - Qtz
Collandres (vallée de la Véronne)	2	0	0	0	0	Pl	Qtz
Ebulit (vallée de la Petite Rhue d'Eybes)	0	0	0	2	1	Fk	Qtz
Dépôts de retombées pyroclastiques							
Le Puy Courny (vallée de la Jordanne) (tuf gris)	2	0	1	1	0	Fk - (Pl)	
Le Puy Courny (vallée de la Jordanne) (tuf blanc)	0	0	2	1	2	Fk - (Pl)	
Plateau du Limon (vallée de la Santoire)	3	0	1	1	0	Pl	
Recouderc (vallée de la Chevade)	1	0	3	0	0	Pl	
Dépôts pyroclastiques remaniés							
Col St Georges (Haute vallée de l'Aspre)	0	2	0	2 (p)	1	Pl	
Seilhols-Haut (Haute vallée de l'Aspre)	1	2	0	2 (p)	1	Pl	
Saint-Martin Cantalès (vallée de la Maronne)	2	1	2	0	0	Pl - (Fk)	
Chapelle St Antoine (Vallée de la Chevade)	2	0	1	0	0	Pl	

Tabl. 1.- Minéralogie comparée des formations pyroclastiques étudiées.

0 : non observé, 1 : présent, 2 : abondant, 3 : très abondant, (p) : présent dans les ponces, Fk : sanidine, Pl : plagioclase, Ol : olivine, Qtz : quartz.

Table 1.- Comparative mineralogy of the studied pyroclastic formations.

- un vitrophyre qui marque l'interface entre les deux unités pyroclastiques. Fortement soudé, il renferme de très nombreux phénocristaux automorphes de plagioclase et d'amphibole, et des clinopyroxènes moins nombreux. L'examen microscopique révèle l'importance de la déformation liée à une compaction à haute température. A l'affleurement, la roche présente un dense réseau de diaclases qui suggère une prismation d'origine thermique ;

- une unité pyroclastique supérieure formée d'un tuf ponceux finement stratifié de même texture et de même composition minéralogique que l'unité pyroclastique inférieure. La matrice est cependant plus claire et les indices de soudure y sont plus marqués (*fiamme*).

Les caractéristiques propres à ces faciès suggèrent un dépôt à haute température : ce sont des ignimbrites soudées. Leur superposition, ainsi que la présence d'un vitrophyre intercalaire, indiquent la

succession de deux épisodes explosifs provenant d'une même source volcanique dans un bref intervalle de temps. De plus, l'épaisseur importante de l'ensemble des dépôts et leur répartition cartographique sont caractéristiques d'une mise en place en fond de vallée (*high-aspect ratio ignimbrite*, Walker, 1983).

Le faciès distal

Aux environs de Chambeuil, au-dessus de l'ancienne gare des Pommiers, on

observe un dépôt pyroclastique peu induré d'une puissance voisine de 10 m qui se place stratigraphiquement au-dessus de l'appareil basaltique de Chambeuil (au sud-est) et sous les brèches inférieures (Milési, 1976). Il s'agit d'un tuf massif à lapilli grossiers très riche en ponces sub-arrondies renfermant des biotites. On observe la présence d'éléments lithiques sombres aphanitiques anguleux à sub-arrondis pouvant atteindre 4 à 5 cm. La morphologie des clastes et l'arrondi des ponces témoignent apparemment d'une abrasion pendant l'écoulement pyroclastique. De même, l'importante proportion de matrice fine du dépôt résulterait de cette abrasion, ce qui est courant dans les dépôts d'écoulements pyroclastiques (Freundt et Schmincke, 1992). Un niveau de tufs blancs fins et lités de 1,50 m d'épaisseur présent au sommet de la coupe pourrait correspondre à un dépôt de retombées pyroclastiques postérieur à la phase paroxysmale de l'éruption.

La Gandilhon (vallée de l'Impradine)

Une série volcanoclastique affleure en rive gauche de l'Impradine en contrebas du hameau de La Gandilhon (fig. 2E). Le niveau pyroclastique s'interstratifie entre deux brèches mal classées à éléments anguleux à subarrondis. La brèche de base renferme des clastes volcaniques parfois éclatés. Le niveau pyroclastique correspond à un ensemble de séquences de tufs massifs riches en éléments lithiques à la base et qui s'enrichissent en cristaux vers le sommet. Les éléments lithiques présentent une texture grenue (granite, gabbro) et de nombreux cristaux fracturés ont été observés : feldspaths parfois corrodés, amphiboles, clino- et orthopyroxènes, très peu de biotite. Dans la séquence principale, interprétée comme un dépôt de coulée pyroclastique, les éléments lithiques et les cristaux sont piégés dans une matrice vitroclastique qui présente des indices de soudure indiqués par la compaction des échardes de verre.

Le Mignalou (vallée de l'Impradine)

D'épais dépôts pyroclastiques riches en ponces affleurent en rive gauche de l'Impradine en contrebas de la ferme du Mignalou (fig. 1). Ils forment une barre décamétrique sur une distance de 200 m. La coupe révèle la présence d'au moins deux séquences pyroclastiques séparées

par une lentille conglomératique de 40 à 50 cm d'épaisseur, à éléments mal classés et anguleux dont le diamètre varie de 2 à 3 cm. Les dépôts renferment de la biotite et de gros éléments lithiques subanguleux à subarrondis dont la taille peut dépasser 12 cm et qui se concentrent selon un litage plan fruste également souligné par des concentrations de ponces ou d'éléments lithiques pouvant résulter de ségrégations par densité. L'examen microscopique révèle la présence, dans une matrice cendreuse claire, de nombreuses ponces à vésicules arrondies qui suggèrent l'absence d'une soudure. Certaines d'entre-elles peuvent inclure des biotites ou des amphiboles. La matrice renferme également de nombreux cristaux de feldspath, des biotites déformées, quelques amphiboles et quelques pyroxènes.

La présence d'une intercalation conglomératique suggère une interruption de l'activité volcanique séparant la mise en place des deux unités pyroclastiques superposées.

Moulin de Drils (vallée de la Santoire)

Une succession de niveaux pyroclastiques affleure au niveau du pont situé près du moulin daté de 1807 du village de Drils (fig. 2B). Une séquence de tufs à lapilli grossiers présentant une matrice cendreuse et généralement riches en ponces, parfois fraîches et renfermant des biotites, affleure à la base de la coupe. Ce niveau pyroclastique est très pauvre en éléments lithiques. Ils peuvent être arrondis dans certaines passées. Les cristaux isolés, assez peu abondants, sont des feldspaths et des biotites.

Ferme d'Aubart (vallée de la Petite Rhue d'Eybes)

Un dépôt pyroclastique affleure sur 8 m d'épaisseur environ près de la ferme d'Aubart en rive gauche de la petite Rhue d'Eybes (Watelet, 1977). Ce dépôt correspond pour l'essentiel à un tuf à lapilli à ponces et éléments lithiques. La matrice contient de nombreux clastes lithiques arrondis à structures microlitique, microlitique porphyrique ou microgrenue, des ponces fraîches, de nombreux cristaux de feldspath. La biotite est le seul minéral ferro-magnésien observé. La roche est également assez riche en titanite, certaines en inclusions dans les ponces. Ce

dépôt présente d'étroites analogies avec le dépôt de coulée pyroclastique présent à la base de la coupe du Moulin de Drils.

Falaise du Chauvier (vallée de la Petite Rhue de Cheylade)

Les formations pyroclastiques de la moyenne vallée de la Petite Rhue affleurent au niveau de la falaise du Chauvier à l'est du village de Cheylade (Manceau, 1967), mais également en rive gauche à Rochemonteix (Maury, 1968). Les tufs surmontent des brèches et le substratum basaltique infracantalien dont l'équivalent en rive gauche de la vallée a fourni un âge de 12,5 +/- 5 Ma (Bellon *et al.*, 1972). La nappe de tuf est recouverte d'une alternance de niveaux conglomératiques grossiers à faciès de dépôts de lahars et de niveaux cendres plus fins. Le tout est surmonté par les basaltes supracantaliens qui forment la planèze du plateau du Limon.

L'horizon pyroclastique de 5 m de puissance environ est constitué de très grosses ponces aphyriques ayant donné un âge de 6,7 +/- 0,2 Ma (Bellon *et al.*, 1972). La séquence de dépôt ne présente pas d'organisation interne particulière. Pétrographiquement, les particules vitreuses montrent des parois de bulles arrondies et renferment des plagioclases et des biotites. De nombreux cristaux de taille variable de plagioclase, d'amphibole automorphe et de clinopyroxène, flottent dans la matrice cendreuse de verre altéré.

Plateau du Limon (vallée de la Santoire)

Des tufs, déjà décrits par Watelet (1977) sous le nom de tufs lités intercalaires supérieurs, ont été observés et étudiés au niveau de la coupe du Plateau du Limon (fig. 2C) qui surplombe le village de Drils en rive gauche de la Santoire. Deux portions de coupe ont été levées mais sont séparées par une interruption liée aux mauvaises conditions d'affleurement.

Dans la coupe, on observe des séquences mal classées de tufs à lapilli à ponces et lithiques subarrondis riches en amphiboles et clinopyroxènes. La séquence élémentaire qui peut être établie pour ces dépôts montre un granoclassement normal et l'existence d'un horizon de tuf cendres fin au sommet. Ces caractéristiques faciologiques suggèrent un dépôt

par des écoulements pyroclastiques denses riches en ponces. L'éluvation des particules fines au cours de l'écoulement génère un nuage riche en cendres dont le dépôt donne naissance aux niveaux fins. Le caractère graduel ou tranché des contacts entre ces tufs fins et les termes grossiers de base, et l'existence sporadique de litages frustes en sommet de séquence, peuvent être liés aux variations du comportement hydrodynamique des écoulements pyroclastiques (pl. 1, photo E). En effet, les variations de l'énergie et du régime de l'écoulement peuvent se traduire par l'apparition de discontinuités intra-séquences.

Les Costes (vallée du Mars)

Au niveau de la ferme des Costes le long du CD 63 qui mène de la Peubrélic au Col d'Aulac, on rencontre une épaisse séquence pyroclastique (20 m) qui est intercalée entre une brèche d'avalanche de débris et les basaltes des planèzes. Il s'agit d'un tuf massif à lapilli riche en ponces et éléments lithiques mais qui présente au sommet une discrète lamination ondulante soulignée par l'alternance de niveaux de tufs cendrés fins et de tufs cendrés plus grossiers. Le tuf renferme des éléments lithiques arrondis à structure microlitique ou grenue et de nombreux cristaux isolés et cassés de feldspath, des biotites, et des titanites, qui flottent dans une matrice sombre très argileuse (matériel vitreux altéré).

L'aspect massif de l'épais niveau de base est caractéristique du corps principal d'un dépôt d'ignimbrite (couche 2, Sparks *et al.*, 1973). De plus, le niveau sommital à lamination oblique correspond à un dépôt de déferlante pyroclastique qui accompagne les écoulements pyroclastiques denses et qui résulte d'une élutriation des particules fines au cours de l'écoulement ("*ash-cloud surge*", Fisher, 1979).

Les dépôts de déferlantes

Hormis les dépôts de déferlantes directement associés à la mise en place des coulées pyroclastiques, ces faciès sont rares dans le Cantal. Ils résultent alors de phénomènes ponctuels liés à une activité hydroclastique. Des dépôts de ce type ont été reconnus à Massebeau, Collandres et à Ebulit.

Massebeau (vallée de l'Alagnon)

Les formations pyroclastiques les plus anciennes reconnues dans le Cantal affleurent aux environs de Massebeau dans la cuvette de Murat (lit du Bournandel, vallée de l'Alagnon). Il s'agit de projections scoriacées qui se placent à la même altitude que les *basaltes infracantaliens* dans ce secteur du volcan, ce qui laisse supposer la contemporanéité des deux formations (Maurizot-Blanc, 1974 ; Milési, 1976). La faible extension de l'affleurement ne permet pas d'établir avec certitude une séquence de dépôt. Il s'agit d'un tuf à lapilli, à scories basaltiques et cristaux d'olivine, d'augite et d'amphibole, bien stratifié en bancs décimétriques, contenant beaucoup d'éléments lithiques parfois décimétriques de granite et de basalte provenant du substratum varisque et des formations basaltiques infracantaliennes. Nous interprétons ce dépôt comme le produit d'une déferlante hydrovolcanique remaniant des fragments du socle varisque et du substratum volcanique (basaltes et olivines).

Collandres (vallée de la Véronne)

A l'entrée sud du village de Collandres, à la hauteur du cimetière, affleure une brèche d'avalanche de débris. Elle surmonte un horizon pyroclastique composite constitué de trois niveaux. Au-dessus d'un terme basal fortement altéré, la séquence intermédiaire dont la base est érosive, est formée d'un tuf cendré grossier riche en ponces, d'épaisseur variable (de 20 à 40 cm) et finement stratifié (pl. 1, photo D). Elle renferme des petites poches aplaties de matériel clastique plus grossier. Sa caractéristique majeure est la présence de faisceaux de litages obliques. Ces structures rappellent des rides chevauchantes et indiquent la coexistence d'une traction et d'une décantation importante au moment du dépôt. La géométrie de ces structures suggère un écoulement vers le nord.

L'examen pétrographique révèle la forte teneur en ponces et en scories basaltiques à faible densité de vésicules. Les cristaux de plagioclase et de pyroxène sont abondants dans certains niveaux.

Nous interprétons ce niveau de tuf intermédiaire à rides chevauchantes comme un dépôt de déferlante hydroclastique.

Ebulit (vallée de la Petite Rhue d'Eybes)

Au-dessus du dépôt de la coulée pyroclastique d'Aubart, près de la ferme d'Ebulit, affleure une succession de faciès volcanoclastiques qui sont essentiellement des dépôts de déferlantes hydroclastiques et de retombées stromboliennes très vraisemblablement associées à un petit cône latéral parasite du strato-volcan cantalien comme en témoigne l'épanchement d'une coulée de basalte à mégacristaux de pyroxène au sommet de la succession pyroclastique (Godin, 1997). Ces dépôts de déferlantes sont finement laminés et présentent de nombreuses figures d'érosion intraséquences et des rides témoignant d'une traction au sein de l'écoulement turbulent.

Les dépôts de retombées pyroclastiques

Puy Courny (vallée de la Jordanne)

La coupe de la carrière du Puy Courny près d'Aurillac (fig. 2D) expose, au-dessus des calcaires oligocènes, une épaisse coulée basaltique dont la partie supérieure est fortement altérée. Datée de 7,3+/-0,4 Ma (Bellon *et al.*, 1972), elle n'appartiendrait pas au complexe des basaltes infracantaliens. La coulée est recouverte par un horizon épais (3 m) d'argile rouge que Brousse *et al.* (1975) considèrent comme un niveau-repère dans toute la région méridionale du Cantal surmonté de deux niveaux de tufs blanc et gris décrits comme du « sable » dans les travaux antérieurs. Ces niveaux ont livré une faune pontienne datée de 7,5 à 7 Ma (Brousse *et al.*, 1975). Les dépôts de téphra sont surmontés d'une brèche d'avalanche de débris (pl. 1, photo A). Les téphra présentent à leur sommet des traces de racines de plantes fossilisées en position de vie ce qui signifie qu'il existe un hiatus entre l'activité explosive qui conduit au dépôt des tufs et la mise en place de la brèche d'avalanche de débris.

L'observation microscopique des tufs révèle, dans une matrice colorée renfermant des échardes de verre, de petits clastes microlitiques, quelques ponces écrasées et des cristaux éclatés de sanidine aux formes anguleuses. Sont également présents des amphiboles, quelques biotites et des pyroxènes assez abondants exclusi-

vement dans le tuf gris. Par contre, la titanite est assez abondante dans le tuf blanc.

Le litage plan fin et la faible épaisseur de ces dépôts suggèrent une origine par des retombées pyroclastiques.

Plateau du Limon (vallée de la Santoire)

Outre des dépôts interprétés comme résultant d'écoulements pyroclastiques, on rencontre des séquences peu épaisses (2-10 cm) qui renferment parfois des blocs avec figures de charges à leur base et des drapages de matériel cendreux fin à leur sommet et qui peuvent être interprétés comme des dépôts de retombées pyroclastiques (fig. 2C).

Collandres (vallée de la Véronne)

Un tuf de 2 m d'épaisseur affleure à l'entrée sud du village de Collandres à la hauteur du cimetière sous une brèche d'avalanche de débris. A la base, on observe un tuf cendreux fin très altéré en argiles.

Un niveau (0,60-1,30 m) de tuf cendreux grossier riche en ponces qui présente une lamination plane marque le sommet de la séquence. Le tuf sommital, en raison du litage plan qui le caractérise, correspond très probablement à un dépôt de retombées pyroclastiques.

Recouderc (vallée de la Chevade)

On reconnaît des dépôts pyroclastiques ponceux au pied de la Butte de La Veissière, aux environs du hameau de Recouderc. Il s'agit du « niveau ponceux supérieur » de Maurizot-Blanc (1974). Leur position lithostratigraphique élevée dans la série des *coulées de débris* les place souvent directement sous les basaltes planéziens. L'épaisseur cumulée est estimée à une vingtaine de mètres. L'affleurement étudié (fig. 2A) situé à la base du versant ouest de la butte de La Veissière, montre une alternance de séquences constituées à la base de niveaux clairs de tufs plus ou moins grossiers à lapilli riches en ponces et cristaux et au sommet de niveaux de tufs fins de couleur chocolat, à cristaux et rares ponces dispersées. Dans cet ensemble, s'intercalent des passées conglomératiques discontinues à galets ou à blocs arrondis, présentant un aspect chenalisé.

Au microscope, les tufs fins apparaissent très altérés. On reconnaît cependant des fantômes d'olivine iddingsitisée dans certains clastes lithiques émoussés et des cristaux isolés d'amphibole. Les niveaux de tufs plus grossiers contiennent de nombreux cristaux d'amphibole et de feldspaths plagioclases.

Nous interprétons ces dépôts comme une alternance de niveaux de retombées pyroclastiques et de dépôts resédimentés.

Dépôts pyroclastiques remaniés

Un certain nombre de séquences de dépôts constituées de matériaux pyroclastiques présentent une organisation qui indique un remaniement postérieur à l'éruption par des processus sédimentaires.

Col Saint-Georges - Seilhols-Haut (haute vallée de l'Aspre)

A l'est du col Saint-Georges, le long du CD 42 et dans les environs de Seilhols-Haut (CD 39) affleurent des tufs grossiers à ponces. Ces tufs reposent directement sur une brèche à éléments arrondis qui peut appartenir aux dépôts des *coulées de débris*. Ils renferment des éléments lithiques variés (andésite porphyrique à pyroxène, basalte à fantômes d'olivine iddingsitisée, granite, tachylite), des ponces à bulles étirées, des cristaux isolés de plagioclase, quelques biotites, des orthopyroxènes, de la titanite. L'organisation en bancs peu épais limités par des surfaces d'érosion à cachet sédimentaire, suggère qu'il s'agit de dépôts pyroclastiques remaniés, mais très certainement de manière limitée comme en témoigne la subsistance de nombreuses ponces et des biotites peu altérées.

Saint-Martin Cantalès (basse vallée de la Maronne)

A la sortie du village de Saint-Martin Cantalès, le long du CD 6, une coupe montre des niveaux de tufs situés sous les brèches d'avalanche de débris. Les tufs renferment des ponces très arrondies et sont riches en cristaux d'amphibole et peuvent contenir quelques sphènes et de petits éléments lithiques variés de forme arrondie. Certains niveaux cendreux plus fins à faisceaux de litages obliques sont pré-

sents dans la coupe. Toutes ces caractéristiques plaident en faveur d'un remaniement après un épisode explosif important.

Chapelle Saint-Antoine (vallée de la Chevade)

Un niveau ponceux de couleur blanche d'épaisseur estimée à une vingtaine de mètres peut être suivi de façon continue sur toute la rive gauche de la Chevade, depuis la Denterie jusqu'à Murat. Il occupe une position lithostratigraphique très basse dans la série des *coulées de débris* (Watelet, 1977). Les dépôts pyroclastiques reposent parfois sur des brèches. Ils correspondent à des tufs organisés en séquences de dépôts cendreux gris à beige d'épaisseur centimétrique à métrique alternant avec des niveaux lenticulaires ponceux blancs (Maurizot-Blanc, 1974). Ces dépôts sont riches en clinopyroxènes. La présence de galets arrondis de scories dans certains niveaux laisse supposer des mélanges avec du matériel volcanoclastique remanié ou épicyclastique. Ces lentilles ne correspondraient donc pas à des dépôts volcanoclastiques primaires.

En revanche, certains niveaux de tufs fins et blancs plus riches en amphiboles, présents au sommet de la série (en contrebas de la Chapelle Saint-Antoine, le long du CD 680), s'organisent en niveaux d'apparence plus continue et semblent correspondre à des dépôts primaires. Ces tufs sont surmontés par des brèches. L'interstratification des dépôts pyroclastiques primaires et remaniés dans un ensemble où les passées conglomératiques sont nombreuses, est typique des environnements distaux de talus volcanoclastiques des strato-volcans (Palmer et Neall, 1991).

Discussion

Les formations pyroclastiques du strato-volcan cantalien présentent une remarquable diversité. On rencontre en effet, des faciès mis en place au cours d'épisodes éruptifs explosifs et des faciès resédimentés après leur dépôt préalable au cours des éruptions. D'un point de vue pétrographique, l'ensemble des dépôts pyroclastiques semble correspondre à des termes intermédiaires ou évolués dans l'évolution magmatique du volcan. On observe une succession de périodes d'activité éruptive explosive qui participent à l'édification du strato-volcan.

Diversité des mécanismes éruptifs

L'essentiel des faciès primaires est représenté par des dépôts de coulées pyroclastiques denses. Il s'agit d'accumulations de matériaux grossiers, riches en ponces, présents à différents niveaux de l'édifice volcanique. On reconnaît localement des formations partiellement soudées (Passadou, Pierre Taillade, Peyre del Cros) peut-être en raison de leur position au cœur de l'édifice volcanique. Des fragments de tufs soudés à *fiamme*, d'aspect analogue mais d'origine non déterminée incertaine, ont été observés dans des dépôts d'avalanches de débris dans les vallées de l'Authre, de la Jordanne et de la Cère. Des dépôts de déferlantes pyroclastiques sont associés aux dépôts ignimbritiques, à leur base ou à leur sommet (déferlantes de fond et de nuage de cendres).

Les dépôts qui résultent de retombées pyroclastiques sont moins abondants et présentent des épaisseurs faibles ; les matériaux peuvent être facilement remaniés. Pour cette raison, leur degré de préservation est relativement médiocre. Cependant des dépôts caractéristiques de retombées sont présents par exemple dans la coupe du plateau du Limon ou de la butte de La Veissière.

On rencontre également des dépôts de déferlantes hydrovolcaniques à Massebeau, à Collandres et à Ebulit qui attestent d'une activité phréatomagmatique certainement très limitée dans l'évolution du volcan cantalien.

Diversité minéralogique des faciès

Les paragenèses observées (tabl. 1) indiquent une diversité de compositions minéralogiques des niveaux étudiés. Certains dépôts de coulées pyroclastiques sont riches en biotites. Dans d'autres, ce sont les clinopyroxènes et les amphiboles qui abondent. L'orthopyroxène, plus rare, n'a été observé que dans l'un d'entre eux. La titanite n'est pas toujours présente et son abondance varie. Certains dépôts de déferlantes hydroclastiques sont caractérisés par la présence de minéraux provenant de la fragmentation explosive de niveaux sous-jacents antérieurs : abondance d'olivine provenant des *basaltes infracantaliens* à Massebeau, abondance de quartz de socle à Ebulit. La présence de sanidine abondante

ne caractérise que les deux niveaux de retombées pyroclastiques du Puy Courny que l'on peut cependant distinguer par la présence du clinopyroxène (tuf gris) ou de la titanite (tuf blanc). Enfin, l'orthopyroxène caractérise, en association ou non avec le clinopyroxène, les dépôts pyroclastiques remaniés de la haute vallée de l'Aspre et de la basse vallée de la Maronne.

Ces différences ne sont pas en faveur d'un événement explosif majeur unique, mais d'une succession d'éruptions plus modestes. Cependant, si l'on fait exception des tufs de Massebeau, l'étude minéralogique en cours semble indiquer une certaine homogénéité de composition chimique des minéraux analysés dans les différents dépôts étudiés, en faveur de l'hypothèse d'une succession d'éruptions regroupées dans le temps qui participent à une phase de croissance majeure du strato-volcan.

Diversité de position stratigraphique des formations pyroclastiques

Les dépôts pyroclastiques étudiés se situent à tous les niveaux stratigraphiques de l'édifice volcanique du Cantal. Cependant, compte tenu du fait que le volcan a subi d'importants phénomènes de glissements sectoriels (avalanches de débris) au cours de son histoire, il apparaît difficile d'établir une évolution lithostratigraphique simple applicable à tous les secteurs du volcan, les mêmes marqueurs stratigraphiques n'étant pas présents partout. Une classification des dépôts peut néanmoins être établie sur des critères lithostratigraphiques (position par rapport aux dépôts d'avalanches de débris) et des corrélations peuvent être tentées à partir des paragenèses juvéniles observées.

Le dépôt pyroclastique le plus ancien a été rencontré à Massebeau. De par sa localisation et son faciès, il apparaît contemporain ou immédiatement postérieur à la mise en place des basaltes infracantaliens.

Parmi les autres dépôts étudiés, certains sont situés sous les dépôts d'avalanches de débris et leur sont donc antérieurs. Ils participent à un premier épisode de croissance du strato-volcan (*ensemble trachyandésitique anté-avalanches*). C'est ainsi que dans la vallée de l'Alagnon, les ignimbrites partiellement

soudées du cœur de l'édifice (viaduc du Passadou, Pierre Taillade, Fraisse-Haut) sont en partie remaniées par une avalanche de débris qui recouvre le dépôt non soudé de l'ancienne gare des Pommiers. Il pourrait, de par sa minéralogie très proche de celle des ignimbrites proximales en constituer un équivalent distal. Les deux dépôts de retombées pyroclastiques du Puy Courny qui correspondent de par leurs minéralogies respectives à deux éruptions successives et le dépôt de déferlante de Collandres sont également antérieurs à des avalanches de débris. Le dépôt de coulée pyroclastique de La Gandilhon apparaît quant à lui original de par sa situation entre deux brèches et sa minéralogie (présence de clino- et d'orthopyroxène). A ces formations, s'ajoutent les niveaux visibles dans l'entablement du Plomb du Cantal, du Puy Bataillouze et de l'Elancèze. Ces faciès de dépôts de nuées ardentes essentiellement trachyandésitiques accompagnent également d'épais empilements de coulées de laves.

D'autres dépôts pyroclastiques correspondent à une phase d'édification immédiatement postérieure aux dépôts d'avalanches de débris car ils reposent directement sur les brèches. Ces niveaux correspondent à une période de l'évolution du volcan au cours de laquelle on assiste à une activité explosive intense mais dont la durée vraisemblablement limitée ne peut être contrainte que par des datations radiochronologiques précises (travaux en cours). Il s'agit très certainement d'une seconde phase de croissance majeure de l'édifice volcanique. L'étude minéralogique de ces dépôts de coulées pyroclastiques permet d'établir certaines corrélations. Un premier ensemble peut être défini par la présence exclusive de biotite associée à de la titanite abondante (La Peyre del Cros ; Aubart ; Moulin de Drils ; tabl. 1). Un second ensemble regroupe les dépôts de coulées pyroclastiques de la falaise du Chauvier et du Plateau du Limon très riches en clinopyroxènes et amphiboles associés à un peu de biotite. Enfin, le niveau pyroclastique du Mignalou se distingue des précédents par l'abondance de la biotite accompagnée d'un peu d'amphibole et de clinopyroxène mais en absence de titanite.

Enfin, on reconnaît également des dépôts pyroclastiques intercalés dans l'ensemble supérieur des *coulées de débris*

mais de volumes inférieurs aux précédents. Une grande partie de ces niveaux présente des indices de remaniement et les dépôts se distinguent par leur minéralogie (Col Saint-Georges, Seilhols-Haut, Saint-Martin Cantalès caractérisés par l'orthopyroxène associé ou non au clinopyroxène ; Chapelle St Antoine caractérisée par le clinopyroxène et l'amphibole). Des faciès primaires de retombées pyroclastiques (Recouderc ; La Chapelle Saint-Antoine) leur sont parfois associés. Ces dépôts peu épais et répétés témoignent d'une activité polyphasée de faible ampleur mis à part dans la vallée du Mars (Les Costes) où affleure une épaisse séquence pyroclastique sous les *basaltes supracantaliens*.

Evolution volcano-structurale

Malgré les problèmes stratigraphiques qui subsistent, il semble que le strato-volcan du Cantal s'édifie au cours de plusieurs périodes d'intense activité explosive.

Les données de terrain semblent contredire l'existence dans le Cantal d'une « nappe de ponces » unique, d'extension régionale, établie sur le modèle élaboré pour les Monts Dore (Brousse et Lefèvre, 1966). Dans un tel modèle, il convient d'invoquer la formation d'une caldéra centrale dont l'effondrement s'accompagnerait de l'émission d'importants volumes d'ignimbrites (Vatin-Pérignon et Michel, 1966 ; Vatin-Pérignon, 1968 ; Aubert *et al.*, 1982).

Nos données ne plaident pas en faveur de l'existence d'une telle caldéra. En effet, les horizons pyroclastiques sont interstratifiés dans la majeure partie des unités lithostratigraphiques du volcan, à l'exception peut-être de l'ensemble des basaltes planéziens où les faciès effusifs dominent largement. Ces tufs correspondent à des épisodes explosifs sporadiques successifs et parfois polyphasés comme en témoignent les interruptions dans les séquences de dépôts. Un contrôle topographique sur le déplacement des écoulements pyroclastiques de faible volume est attesté par la localisation d'épaisses accumulations dans des paléovallées ("*high-aspect ratio ignimbrites*" de Walker, 1983).

L'existence de paragenèses minérales différentes dans les dépôts pyroclastiques suggère également l'origine diverse des dépôts. Ces paragenèses différentes

témoignent de la croissance d'un cône central en liaison avec l'évolution des liquides magmatiques. Une différenciation magmatique importante résultant d'un processus de cristallisation fractionnée a été mise en évidence dans les formations effusives basaltiques et trachyandésitiques (Maury et Brousse, 1978 ; Downes, 1984, 1989 ; Liotard *et al.*, 1988 ; Collomb et Pilet, 1996).

Par conséquent, il semble plus opportun d'envisager l'évolution d'un strato-volcan avec développement d'un cône central dont les éruptions effusives et explosives successives conduisent à sa croissance et à l'alimentation en matériel volcanoclastique du talus environnant. Ce strato-cône aurait également alimenté les avalanches de débris et aurait culminé à une altitude de l'ordre de 4 000 m au-dessus du niveau de la mer (Cantagrel, 1995 ; Schneider et Fisher, 1998). Dans un tel cas de figure, les données géophysiques (résistivité, levers aéromagnétiques, Aubert *et al.*, 1982) mettraient plutôt en évidence des structures différentes, telles que des bassins sédimentaires préexistants, mais pourraient également témoigner d'une altération hydrothermale du socle liée aux intrusions volcaniques. Enfin, le modèle appliqué aux Monts Dore et au Sancy pour expliquer l'origine des formations pyroclastiques (dont la « Grande Nappe », Brousse et Lefèvre, 1966) et qui invoque la formation de caldéras d'effondrement (Mossand *et al.*, 1982) ne peut pas être appliqué au volcan cantalien. Ce modèle proposé pour les Monts Dore est d'ailleurs remis en question par Cantagrel et Briot (1990).

Les dépôts mis en place au cours des phases explosives peuvent être remaniés postérieurement à leur dépôt au niveau d'un talus volcanoclastique de géométrie aréolaire dont les caractéristiques habituelles sont décrites par Smith (1991), et qui s'étend au pied du cône central. Dans le Cantal, d'un point de vue géométrique, on peut mettre en évidence une organisation des faciès volcanoclastiques dans l'ensemble du volcan. Etant donné les volumes relativement importants de matériaux pyroclastiques mis en place, nous proposons qu'ils aient été émis à partir du domaine central de l'édifice. Cependant, la présence de petits cônes latéraux à activité explosive n'est pas à exclure ; par exemple, les dépôts d'Ebulit en témoignent (Godin, 1997).

Comme dans de nombreux strato-volcans, les faciès s'organisent et s'associent suivant leur distance à la source (Vessels et Davies, 1978). Dans le domaine central, proche de la source, les dépôts pyroclastiques correspondent pour l'essentiel à d'épaisses ignimbrites, parfois soudées (Peyre del Cros, Pierre Taillade). Il s'agit très vraisemblablement de faciès de remplissages de vallées comme en témoigne leur localisation géographique et leur fabrique magnétique qui indique leur écoulement radial autour du cœur du volcan (Godin, 1997 et travaux en cours).

Dans le domaine médian, les dépôts pyroclastiques peuvent encore former des accumulations non soudées comme les dépôts du Chauvier ou des Costes par exemple. Ces faciès pyroclastiques sont associés à des dépôts de retombées, parfois fossilifères, mais également à des accumulations de matériaux volcanoclastiques remaniés par des processus fluviaux (tuffites) et à des dépôts conglomératiques de lahars. Ces dépôts de lahars indiquent l'existence d'un relief important au niveau du cœur de l'édifice. Une architecture comparable des dépôts de lahars a été reconnue sur le volcan Mayon, Philippines par Rodolfo et Arguden (1991). Ainsi, l'organisation des faciès du domaine médian est compatible avec celle d'un talus volcanoclastique associé au fonctionnement d'un strato-volcan continental (Palmer et Neall, 1991 ; Smith, 1991).

Dans le domaine distal, le plus éloigné de la source, les dépôts volcanoclastiques sont exclusivement constitués de matériaux remaniés. Ainsi, dans le secteur de Saint-Martin Cantalès situé à 30 km du cœur du volcan, on observe des dépôts à cachet fluvial qui renferment des ponces très arrondies par l'abrasion au cours de leur remaniement.

Les faciès des domaines médians et distaux contribuent à la formation du talus volcanoclastique. En définitive, la structure du volcan cantalien résulterait d'une succession de phases de croissance et de destruction d'un cône central sans développement d'une caldéra centrale.

Remerciements

Nous tenons à remercier Mr le Professeur R.V. Fisher pour son aide sur le terrain, M. Boquet pour la préparation des

coupes lithologiques synthétiques, P. Dorn pour la préparation des lames minces et J. Carpentier pour la réalisation des tirages photographiques. Ce document est une synthèse des études sur le terrain des formations pyroclastiques du Cantal réalisées durant les étés 1995 et 1996 et financées par le Laboratoire de Sédimentologie et Géodynamique (CNRS-UMR 8577) de l'Université des Sciences et Technologies de Lille et en partie par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières dans le cadre du lever de la carte géologique de France (J.L.S.). Nous remercions les deux lecteurs anonymes dont les remarques constructives ont permis d'améliorer le manuscrit ainsi que Mr le Dr. G. Manby pour la relecture de l'anglais.

Références

- Aubert M., Dupis A., Lenat J.F., Roux J., Senaud G. (1982) - Structure of the Cantal strato-volcano, French Central Massif, from electric, magnetelluric soundings and aeromagnetic data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **12**, 77-99.
- Baubron J.C., Demange J. (1977) - Chronologie absolue de quelques formations volcaniques du centre du strato-volcan du Cantal (Massif central français). Méthode potassium-argon. Implications volcanologiques. Rapport BRGM 77 SGN 268 MGA/GTH, inédit, 30 p.
- Bellon H., Brousse R., Lambert A., Cornen G., Le Garrec M.J., Maury R., Pesme M.F., Blais S., Larroque P., Baudeigne L. (1972) - Longue activité volcanique du massif du Cantal, de 21 à 3,8 millions d'années. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, Paris, **274**, 2409-2412.
- Boule M. (1896) - Le Cantal miocène. *Bull. Serv. Carte géol. Fr.*, **8**, 54, 213-248.
- Bourdier J.L., Goër de Herve A., (de), Rançon J.P., Vincent P.M. (1989) - Volumineux dépôts d'avalanches de débris sur les versants sud et ouest du massif du Cantal. Implications stratigraphiques et volcano-structurales. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, Paris, **309**, (2), 2127-2133.
- Brousse R., coord. (1972) - Carte géologique de France 1/50 000, feuille Riom-es-Montagnes, n° 764, BRGM éditions.
- Brousse R., coord. (1975) - Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille Vic-sur-Cère, n° 812, BRGM éditions.
- Brousse R., coord. (1977) - Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille Pleaux, n° 787, BRGM éditions.
- Brousse R., coord. (1980) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille Aurillac, n° 811, BRGM éditions.
- Brousse R., coord. (1989) - Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille Mauriac, n° 763, BRGM éditions.
- Brousse R., Lefèvre C. (1966) - Nappes de ponces du Cantal et des Monts Dore, leurs aspects volcanologiques, pétrographiques et minéralogiques. *Bull. Soc. géol. Fr.*, **7**, **8**, 223-246.
- Brousse R., Lefèvre C. (1990) - Le volcanisme en France et en Europe limitrophe. Guides géologiques régionaux. Masson, Paris, 262 p.
- Brousse R., Heintz E., Park F., Bellon H. (1975) - Gisement, faune et géochronologie du Puy Courny (Cantal, France). *Géol. Méditer.*, (2), **3**, 135-142.
- Cantagrel J.M. (1995) - Avalanches et coulées de débris dans un volcan complexe intraplaque : vers un nouveau schéma volcano-structural du massif du Cantal (Massif central, France). *Bull. Soc. géol. Fr.*, **166**, **3**, 285-293.
- Cantagrel J.M., Briot D. (1990) - Avalanches et coulées de débris : le volcan du Guéry ; où est la caldéra d'effondrement dans le massif des Monts Dore ? *C.R. Acad. Sci. Fr.*, Paris, **311**, (2), 219-225.
- Collomb A., Pilet S. (1996) - Pétrographie et minéralogie de la zone centrale du massif volcanique du Cantal (Massif central, France) : évolution par cristallisation fractionnée ; origine des pyroxènes verts des basaltes alcalins. Diplôme de Minéralogie, Université de Lausanne, 159 p.
- Crowe B.M., Linn G.W., Heiken G., Bevier M.L. (1978) - Stratigraphy of the Bandelier Tuff in the Pajarito Plateau. Applications to waste management. Los Alamos Sci. Lab. Report, LA-7225-MS, 57 p.
- Downes H. (1984) - Sr and Nd isotope geochemistry of coexisting alkaline magma series, Cantal, Massif Central, France. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **69**, 321-334.
- Downes H. (1989) - Magma mixing in undersaturated alkaline volcanics, Cantal, Massif Central, France. *Mineral. Mag.*, **53**, 43-53.
- Fisher R.V. (1979) - Models for pyroclastic surges and flows. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **6**, 305-318.
- Frcundt A., Schmincke, H.U. (1992) - Abrasion in pyroclastic flows. *Geol. Rundsch.*, **81/2**, 383-389.
- Godin B. (1997) - Etude de formations volcano-clastiques du volcan miocène du Cantal. Mémoire de Maîtrise, inédit, Université de Lille I, 24 p.
- Goër de Herve A., de (1980) - Le Cantal. In: Lorenz, C. (coord.), Géologie des Pays Européens, France, Belgique, Luxembourg, Dunod éd., Paris, 107-112.
- Granet M., Wilson M., Achauer U. (1995) - Imaging a mantle plume beneath the French Massif Central. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **136**, 281-296.
- Guérin H.M. (1966) - Contribution à la géologie du Cantal : les confins de la Haute Vallée de l'Aspre. D.E.S., Univ. Orsay-Paris Sud, 58 p.
- Liotard J.M., Briot D., Boivin P. (1988) - Petrological and geochemical relationships between pyroxene megacrysts and associated alkali-basalts from Massif Central (France). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **98**, 81-90.
- Manceau M. (1967) - Contribution à la géologie du Cantal : la vallée de la Petite Rhue de Cheylade et ses environs. D.E.S., Université Paris-Sud - Orsay, 96 p.
- Maurizot-Blanc C. (1974) - Etude des formations volcaniques de la cuvette de Murat et de la vallée de la Chevade. Etude pétrographique et pétrochimique des basaltes miocènes et pliocènes de la Planèze de Saint-Flour (Cantal). Thèse 3^{ème} Cycle, Université de Grenoble, 211 p.
- Maury R. (1968) - Contribution à la géologie du Cantal : les hautes vallées de la Petite Rhue et de la Véronne. D.E.A., Univ. Orsay-Paris Sud, 126 p.

- Maury R., Brousse R. (1978) - Présence de pigeonite et d'orthopyroxène dans certaines laves du Massif central français ; leur répartition et leur origine. *Bull. Minéral.*, **101**, 1, 10-21.
- Milesi J.P. (1976) - Dynamisme des écoulements pyroclastiques du Cantal oriental, sur l'exemple de ceux de la vallée de l'Alagnon. Thèse 3^{ème} Cycle, Univ. Grenoble, 197 p.
- Mossand P., Cantagrel J.M., Vincent P. (1982) - La caldéra de Haute Dordogne : âge et limites (Massif des Monts Dore, France). *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), **24**, 4, 727-738.
- Palmer B.A., Neall V.E. (1991) - Contrasting lithofacies architecture in ring-plain deposits related to edifice construction and destruction, the Quaternary Stratford and Opunake Formations, Egmont Volcano, New Zealand. *Sedim. Geol.*, **74**, 71-88.
- Rodolfo K.S., Arguden A.T. (1991) - Rain-lahar generation and sediment-delivery systems at Mayon Volcano, Philippines. In: Fisher R.V., Smith G.A. (Eds), "Sedimentation in Volcanic Settings", SEPM Special Publication n° 45, 71-87.
- Schmid R. (1981) - Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments : Recommendations of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geology*, **9**, 41-43.
- Schneider J.L., Fisher R.V. (1998) - Transport and emplacement mechanisms of large volcanic debris avalanches: Evidence from the northwest sector of Cantal Volcano (France). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **83**, 1-2, 141-165.
- Smith G.A. (1991) - Facies sequences and geometries in continental volcanoclastic sediments. In: Fisher R.V., Smith G.A. (Eds), "Sedimentation in Volcanic Settings", SEPM Special Publication n° 45, 109-121.
- Sparks R.S.J., Self S., Walker G.P.L. (1973) - Products of ignimbrite eruptions. *Geology*, **1**, 115-118.
- Sparks R.S.J., Walker G.P.L. (1973) - The ground surge deposit: a third type of pyroclastic rock. *Nature*, **241**, 62-64.
- Vatin-Pérignon N., Michel R. (1966) - Présence d'une fosse d'effondrement volcano-tectonique dans la partie centrale du massif du Cantal. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), **8**, 2, 308-310.
- Vatin-Pérignon N. (1968) - Les formations éruptives et la structure de l'édifice volcanique au centre du Cantal (Massif central français). *Bull. Volcanol.*, **32**, 207-251.
- Vessels R.K., Davies D.K. (1978) - Non-marine sedimentation in an active fore-arc basin. In: Ethridge F.G., Flores R.M. (Eds), "Recent and ancient non-marine depositional environments: models for exploration", SEPM Special Publication n° 31, 31-45.
- Walker G.P.L. (1983) - Ignimbrite types and ignimbrite problems. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **17**, 65-88.
- Watelet P. (1977) - Etude volcanologique de la Haute-Vallée de la Santoire (Cantal, Massif central français). Thèse 3^{ème} Cycle, Université de Grenoble, 220 p.

Planche 1/Plate 1

Photographies des dépôts pyroclastiques du Cantal.

Photo A - Dépôts de retombées pyroclastiques du Puy Courmy (vallée de la Jordanne). Le faciès est finement laminé. Il repose sur l'horizon argileux au-dessus des coulées basaltiques et est surmonté de dépôt d'avalanche de débris (AD).

Photo B - Dépôts des coulées pyroclastiques de la Peyre del Cros (vallée de l'Aspre). On remarque le caractère mal classé des dépôts (éléments lithiques dispersés). Le sommet de la «nappe 2» est finement lité en raison de la présence d'un dépôt de déferlante de nuage de cendres (ash cloud surge, flèche).

Photo C - Dépôts de déferlante de fond à la base de la «nappe 2» de la Peyre del Cros. Remarquer le litage et la présence d'une ride progradante (flèche).

Photo D - Dépôts de retombées pyroclastiques à Collandres (vallée de la Véronne). Ils drapent un niveau argileux (A). Cet horizon pyroclastique est surmonté par des dépôts d'avalanches de débris.

Photo E - Dépôts de coulée pyroclastique du Plateau du Limon («niveaux volcano-sédimentaires», vallée de la Santoire). Remarquer les variations granulométriques importantes des dépôts en relation avec le caractère discontinu de la puissance de l'écoulement pyroclastique.

Photographs of the pyroclastic deposits of Cantal volcano.

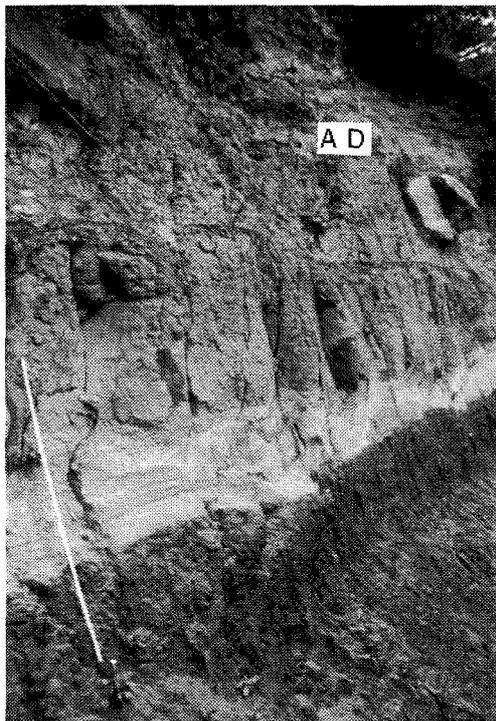
Photo A - Ash fall deposits in Puy Courmy (Jordanne valley). They are finely bedded and lie on a clay-rich horizon related to the weathering of underlying basaltic lava flows. Debris avalanche deposits occur at top of the tephra (AD).

Photo B - Pyroclastic flow deposits of the Peyre del Cros (Aspre valley). Note the poor sorting of the deposits (scattered lithic fragments). The finely bedded aspect of the top of "nappe 2" is related to the presence of an ash-cloud surge deposit (arrow).

Photo C - Ground surge deposit at the base of "nappe 2" in Peyre del Cros. Note the bedding and the presence of a prograding ripple (arrow).

Photo D - Ash fall deposits in Collandres (Véronne valley). They drape a clayey layer (A) and are overlain by debris avalanche deposits.

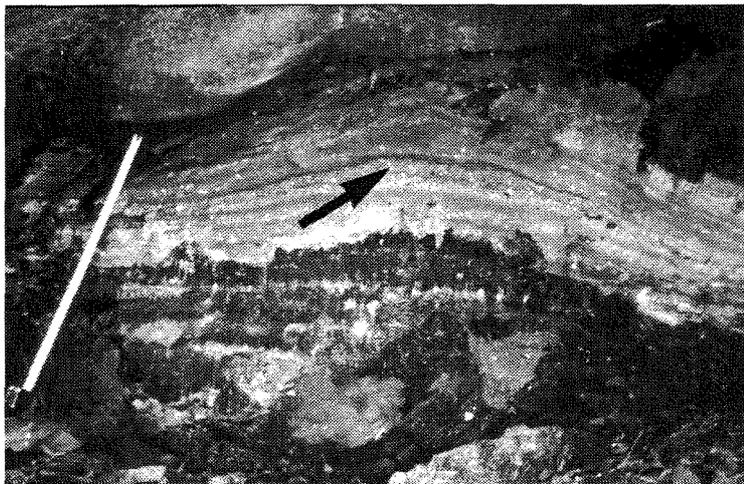
Photo E - Pyroclastic flow deposits in Plateau du Limon (niveaux volcano-sédimentaires formation, Santoire valley). Note the important changes in grain-size of the deposits related to hydrodynamic pulses during the pyroclastic flow.



A 10 cm



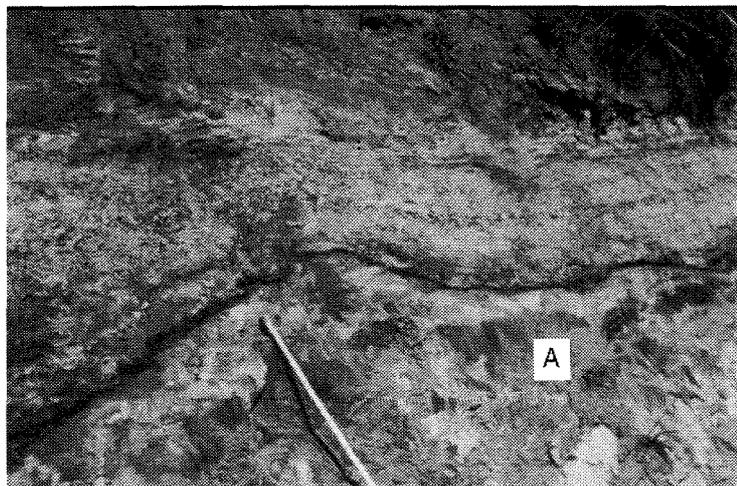
B 1 m



C 20 cm



E 25 cm



D 10 cm

CHER LECTEUR
VOTRE ABONNEMENT SE TERMINE AVEC CE NUMÉRO

Afin de ne pas risquer une interruption dans l'envoi de votre revue, renvoyez-nous au plus tôt votre bulletin d'abonnement 2000.

Tarif d'abonnement 2000	France		Etranger	
	Francs	Euros	Francs	Euros
Hydrogéologie , 4 numéros	650	99	700	106
Géologie de la France , 4 numéros	650	99	700	106
Chronique de la Recherche minière , 4 numéros	650	99	700	106
Les 3 revues (abonnement groupé) 12 numéros	1 800	274	1 900	290

Les frais d'affranchissement par voie de surface sont compris dans les tarifs d'abonnement. Pour un cheminement accéléré, la surtaxe aérienne est facturée en sus.

Les abonnements sont pris pour 12 mois (4 numéros) et coïncident avec le début de l'année civile. Le renouvellement des abonnements étant fait sur demande expresse, aucune annulation n'est recevable.

✕ -----

ABONNEMENT 2000 à retourner aux **EDITIONS BRGM**
3 avenue Claude Guillemin
BP 6009
45060 ORLÉANS CEDEX 2 - France
Tél. (33) 02.38.64.30.28

Revues	Prix unitaire		Quantité	Montant	
	FF	€		FF	€
Hydrogéologie					
Géologie de la France					
Chronique de la Recherche minière					
3 revues (abonnement groupé)					
VOTRE MODE DE PAIEMENT AU CHOIX			Montant de la commande		
<input type="checkbox"/> Chèque postal	Avec votre carte Signature		Surtaxe aérienne		
<input type="checkbox"/> Virement bancaire	de paiement		(60 FF ou 9 €)		
<input type="checkbox"/> Chèque bancaire	(n'oubliez pas d'inscrire votre n° et de signer)		TOTAL		
Carte bancaire	Date d'expiration		Chèque à établir à l'ordre de		
<input type="checkbox"/> Visa	de votre carte bancaire [] []		EDITIONS BRGM		
<input type="checkbox"/> Eurocard					
<input type="checkbox"/> Mastercard					

Votre règlement peut être effectué par virement bancaire :

Compte Société Générale Orléans
Code banque : 30003
Code guichet : 01540
Numéro de compte : 000 200 27669
Clé RIB : 86

Adresse d'expédition _____ Adresse de facturation _____

PLEASE NOTE THAT YOUR SUBSCRIPTION ENDS WITH THIS ISSUE

To renew your subscription and continue receiving your journal, please complete and return the form below as soon as possible.

2000 subscription rates	France		Abroad	
	FRF	Euro	FRF	Euro
Hydrogéologie - Hydrogeology , 4 issues	650	99	700	106
Géologie de la France <i>Geology of France and surrounding areas</i> , 4 issues	650	99	700	106
Chronique de la Recherche minière <i>Chronicle of Mineral Research and Exploration</i> , 4 issues	650	99	700	106
All 3 journals (joint subscription), 12 issues	1 800	274	1 900	290

Postage and packaging (surface mail) are included in the subscription fees. A surcharge is made for air-mail delivery.

Please note that subscriptions are for a complete calendar year (4 issues) and cannot be cancelled during this period.

✕ -----

2000 SUBSCRIPTIONS to be addressed to

EDITIONS BRGM
 3 avenue Claude Guillemin
 BP 6009
 45060 ORLÉANS CEDEX 2 – France
 Tel. +33 (0)2.38.64.30.28

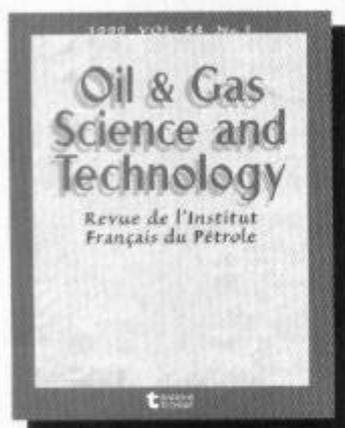
Journals	Unit price		Quantity	Total	
	FRF	€		FRF	€
Hydrogéologie - Hydrogeology					
Géologie de la France <i>Geology of France and surrounding areas</i>					
Chronique de la Recherche minière <i>Chronicle of Mineral Research and Exploration</i>					
All 3 journals (joint subscription)					
MODE OF PAYMENT			Order total		
<input type="checkbox"/> Post Office cheque <input type="checkbox"/> Credit transfer <input type="checkbox"/> Bank cheque Credit card <input type="checkbox"/> Visa <input type="checkbox"/> Eurocard <input type="checkbox"/> Mastercard	By credit card Signature		Air-mail surcharge (60 FRF / 9 €)		
	(remember to include your card number and signature)		TOTAL		
	Expiry date <input type="text"/> <input type="text"/>		Cheques to be made out to: EDITIONS BRGM		

By credit transfer:

Compte Société Générale Orléans
 Bank code: 30003
 Branch code: 01540
 Account number: 000 200 27669
 Identity: 86

Delivery address _____

Invoicing address _____



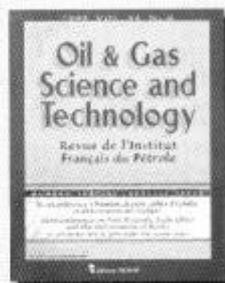
Oil & Gas Science and Technology

REVUE DE L'INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE publie des articles intéressants tout l'éventail des disciplines et domaines liés à la recherche, à la production, au traitement et à l'utilisation du pétrole, du gaz naturel et des autres sources d'énergie et de matières premières. Ces articles sont issus en partie de l'activité scientifique et technique de l'IFP ; ils peuvent aussi témoigner des résultats obtenus par les ingénieurs, scientifiques et techniciens de sociétés françaises ou étrangères, et des chercheurs, universitaires et spécialistes

de tous pays et de toutes disciplines.

Unique revue française existant dans ces domaines, elle a acquis sa réputation auprès d'un vaste lectorat, pour devenir aujourd'hui une référence internationale.

Numéros spéciaux*



• L'anisotropie sismique (Actes du huitième atelier international sur). N° 5, 1998.

• Euroconférence "Pression de pore, effets d'échelle et déformation des roches". N° 6, 1999.

Abonnement (1 an, 6 numéros)

Abonnement uniquement à une année complète, de janvier à décembre.

Prix de l'abonnement :

Année 2000 : U.E. : €259,16 / 1700 FF
Autres pays : €274,40 / 1800 FF

Prix de vente au numéro

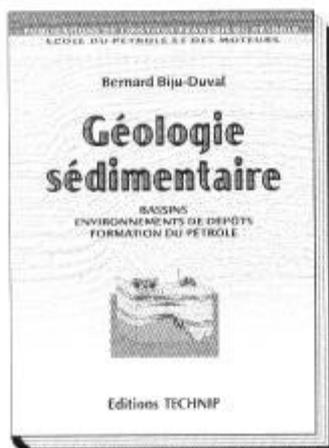
(1946-2000, y compris les numéros spéciaux*) : €45,73 / 300 FF

Géologie sédimentaire

Bassins, environnements de dépôts, formation du pétrole

Clair et abondamment illustré, ce manuel présente les bases et le langage de la géologie sédimentaire et développe les nouveaux concepts utilisés en exploration. B. Biju-Duval.

Relié, 736 p. €99,09 / 650 FF



Quel pétrole demain ?

Des réponses pragmatiques et objectives à l'une des grandes interrogations du siècle à venir.

A. Perrodon. Broché, 112 p. €24,39 / 160 FF

Log Data Acquisition and Quality Control

A new edition of Theys' title, expanded and dedicated as always to practical and detail stages of field petrophysical data quality control.

Ph. Theys. 2nd edition. Hardcover, 480 p.

€74,70 / 490 FF

Géophysique des bassins sédimentaires

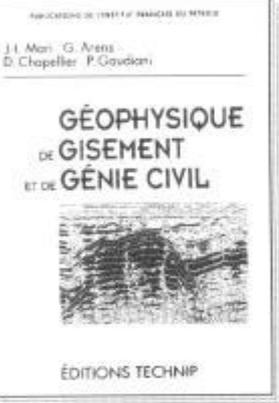
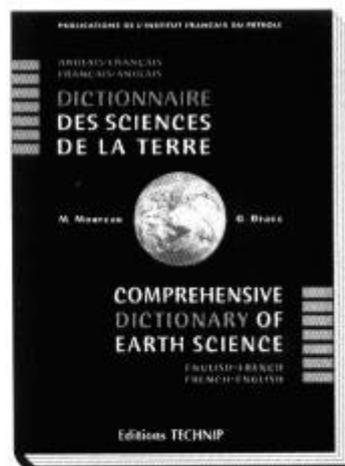
Un ouvrage complet et didactique sur les méthodes géophysiques : leur évolution et leur mise en application. G. Henry. Relié, 464 p. €118,91 / 780 FF

Dictionnaire des sciences de la Terre

Anglais - Français Français - Anglais

Ce dictionnaire de plus de 37000 entrées fournit toutes les informations nécessaires pour comprendre un mot ou une expression sans avoir recours à aucune autre source.

M. Moureau, G. Brace. Relié, 1168 p. €147,88 / 970 FF



Géophysique de gisement et de génie civil

Un ouvrage qui allie remarquablement synthèse et exemples d'application.

J.-L. Mari, G. Arens, D. Chapellier, P. Gaudiani. Relié, 488 p. €96,04 / 630 FF

Applied Petroleum Geochemistry

"A most timely volume, supplying an up-to-date review of petroleum geochemistry concepts, techniques and practical applications". M.L. Bordenave Ed. Hardcover, 538 p. €125,01 / 820 FF

Geodynamic Evolution of Sedimentary Basins

F. Roure, N. Ellouz, V.S. Shein, I.I. Skvortsov Eds. Paperback, 500 p. €103,67 / 680 FF

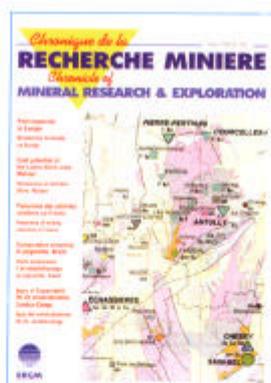
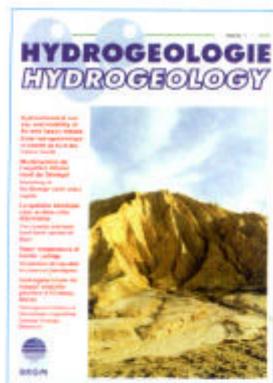
Géophysique de gisement et de génie civil sur CD-ROM

Mac / PC
en français et en anglais



Présentée de façon claire et didactique les méthodes de géophysique (sismique de surface, sismique de puits, radar et diagrapies) et leurs applications aux études de gisement et à de nombreux cas de génie civil.

J.-L. Mari, D. Chapellier. Usage individuel : €121,96 / 800 FF — Usage multiposte : €304,90 / 2000 FF



Revue scientifique et technique, Hydrogéologie est destinée aux spécialistes de l'eau souterraine : chercheurs conduisant des travaux sur les processus hydrodynamiques et géochimistes, modélisateurs, ingénieurs et praticiens de la prospection, de l'exploitation et de la gestion des nappes. Dédiée à un seul objet, l'eau souterraine et ses interfaces, Hydrogéologie publie des travaux concernant aussi bien les milieux de climat tempéré que les zones tropicales et arides.

Les articles peuvent porter sur des avancées dans la connaissance fondamentale et son application, des présentations de nouveaux outils, des études de cas ou encore des synthèses thématiques ou régionales. Régulièrement, la revue publie des numéros thématiques. Elle procède également à des analyses d'ouvrages et à des présentations de séminaires et colloques.

Hydrogeology is a scientific and technical journal aiming at groundwater specialists, including researchers studying hydrodynamic processes, and geochemists, modellers, engineers and technicians prospecting for, exploiting or managing groundwater. Entirely devoted to groundwater and related subjects, Hydrogeology publishes papers on topics in temperate as well as in tropical and arid zones.

Papers may cover advances made in fundamental knowledge and their applications, introduce new tools, discuss case histories or review particular themes or regions. The journal publishes entire issues devoted to specific themes on a regular basis. It also presents book reviews and covers seminars and conferences.

Prix de vente au numéro :

Année en cours et année précédente : 190 F (29 €)

Année antérieure (réduction de 50 %) : 95 F (14 €)

Règlement par chèque bancaire libellé au nom des Éditions BRGM - B.P. 6009 45060 Orléans cedex 2

Abonnement 2000 :

Abonnement par revue :

Abonnement aux 3 revues, 12 numéros

Chèque à établir à l'ordre de : Éditions BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, BP 6009, 45060 Orléans cedex 2, France

La Chronique de la recherche minière s'adresse aussi bien aux scientifiques qui font progresser les connaissances fondamentales sur la géologie des gîtes minéraux qu'aux géologues d'exploration.

Les contributions proposées à la revue doivent être inédites et traiter de sujets relatifs aux gisements de métaux et de minéraux industriels (descriptions de gisements, synthèses régionales ou thématiques, case histories de découvertes) et à leur prospection (méthodes et outils d'exploration) ; elles peuvent également concerner les méthodes de traitement et l'économie minière.

A côté des articles scientifiques, les communications scientifiques et techniques sont destinées à favoriser la publication rapide de résultats nouveaux sur des sujets qui n'ont pas encore fait l'objet d'études scientifiques détaillées (par exemple une découverte de gisement), ou pour présenter de courtes contributions sur des sujets techniques d'intérêt général.

The Chronicle of Mineral Research and Exploration is a journal aiming at both researchers studying the fundamental geology of mineral deposits and at exploration geologists.

Contributions to the journal must not have been previously published and should cover topics relating to metalliferous and industrial mineral deposits (descriptions of deposits, regional and thematic reviews, case histories of discoveries) and their investigation (methods and tools used); contributions will also be welcome on methods of processing and on mining economics.

In addition to scientific papers, the journal publishes scientific and technical communications aimed at enabling rapid publication of new results relating to work that has not yet been the subject of detailed scientific study (for example, the discovery of a deposit), or at providing short contributions on technical subjects of general interest.

Destiné aux chercheurs, enseignants, praticiens, tout public français ou étranger, Géologie de la France a pour vocation de diffuser les résultats de travaux relevant de toutes les disciplines des Sciences de la Terre et concernant le territoire français et les régions voisines.

Ces travaux peuvent relever de la connaissance géologique de base, correspondre à des actions de recherche ou être liés à des opérations de géologie appliquée.

L'objectif est d'appréhender tous les aspects de la géologie du substrat comme ceux de la surface. La prise en compte des régions voisines traduit le souci de ne pas être lié à des limites administratives mais de favoriser la compréhension d'ensembles géologiques cohérents.

Géologie de la France est ouvert à tous, auteurs français et étrangers. La revue accueille tout à la fois des articles importants et des notes brèves.

Geology of France is a journal aiming at researchers, teachers, those to whom the knowledge of geology is essential to their work and the general interested public in France and elsewhere. It is devoted to the publication of results of projects related to all disciplines of the Earth Sciences, both in France and in the surrounding regions.

Papers may cover fundamental geological knowledge, or be related to specific research or applied geology programmes.

The aim is to cover all aspects of both sub-surface and surface geology. By including surrounding regions, studies can take into account entire geological entities without the restriction of national boundaries.

The journal welcomes contributions from both French and other authors, both full-length papers and short notes.

ISSN 0246-0874 © Éditions BRGM - B.P. 6009
45060 Orléans cedex - France
Direction de la publication : Gérard Sustrac
Dépôt légal : 2^{ème} trimestre 2000
Imprimerie : BRGM, Service Reprographie



9 780246 087409