

L'âge et la paléogéographie des sédiments cénozoïques du Massif central déterminés grâce à la typologie des zircons*

*Age and Paleogeography of Cenozoic sediments
in the French Central Massif given by zircon typology*

Josette TOURENQ⁽¹⁾, Jean-Pierre PUPIN⁽²⁾

Mots-clés : Typomorphisme, Zircon, Roche clastique meuble, Oligocène, Néogène, Origine, Paléogéographie.
Massif central

Résumé

Les zircons conservent à travers plusieurs cycles sédimentaires une forme minéralogique déterminable, grâce à leur grande résistance mécanique et chimique.

L'analyse typologique établit des types de zircons (S1, S2, etc) obtenus en fonction du développement respectif des faces du prisme (100) ou (110) par rapport aux faces des pyramides (211) ou (101). Elle permet de caractériser les populations de zircons en attribuant, à chaque roche, un "point moyen" basé sur les indices $\bar{I}A$ et $\bar{I}T$.

Connaissant ces caractères, les zircons provenant de roches différentes se retrouvent aisément dans les formations sédimentaires.

Pour remonter aux sources des formations sédimentaires qui occupent les bassins des Limagnes et de la Sologne bourbonnaise, nous avons d'abord examiné les zircons des différents types de granites hercyniens du Massif central ainsi que ceux des épanchements volcaniques du Massif des Monts-Dore.

Les formations détritiques étudiées sont d'âge oligocène à pliocène supérieur. L'Oligocène est représenté par des dépôts détritiques qui constituent le faciès de bordure de l'Oligocène carbonaté terminal en Limagne. La Formation de Vendat est d'âge burdigalien. Ces deux formations sont caractérisées par des zircons alcalins et calco-alcalins de répartition variée. La Formation des Sables et Argiles du Bourbonnais est datée du Reuverien au Prétigilien par la présence de zircons volcaniques typiquement montdoriers.

La distribution de ces différents types de zircons au sein des formations permet de déduire des conditions paléogéographiques des dépôts.

Abstract

Zircons are fairly resistant to chemical and mechanical attack and they thus preserve their mineralogical characteristics for a long time in the sediments. Typological analysis of their parent rocks has been carried out on the French Central Massif Hercynian granites and on the Mont-Dore volcanic projections. It is therefore possible to reconstruct the paleoenvironment of the Oligocene detrital formations (in the Limagnes and the Sologne bourbonnaise), of the Miocene Vendat Formation and of the Bourbonnais Sand and Clays Formation dated, by volcanic zircons, from the Reuverian to the Pretiglian (Upper Pliocene).

Introduction

Grâce à notre appui permanent à la cartographie géologique détaillée du nord et de l'est du Massif central depuis une vingtaine d'années, nous disposons d'un très grand nombre de roches diverses examinées, issues d'affleurements et de sondages. Dans les Limagnes et la Sologne bourbonnaise (fig. 1), les principales formations détritiques étudiées ici sont les dépôts "bordiers" des fosses d'âge oligocène à aquitainien, la Formation de Vendat (Miocène) et la Formation des Sables et Argiles

du Bourbonnais (Pliocène supérieur). Ces formations détritiques continentales ont été essentiellement nourries par des granites hercyniens et des roches effusives paléozoïques et cénozoïques de l'est du Massif central, en particulier des Monts-Dore.

A partir de l'étude de ce matériel systématiquement réparti, nous avons testé et proposé différentes méthodes d'application des minéraux lourds, en particulier de l'étude des zircons et de leur typologie, à la résolution de problèmes stratigraphiques et/ou paléogéographiques.

* Manuscrit reçu le 1^{er} décembre 1992, accepté le 1^{er} mars 1993.

(1) Université de Paris VI, Département de Géologie sédimentaire, Case 116, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05.

(2) Université de Nice, Z.I.R.C., Institut de Géologie, Laboratoire de pétrologie - minéralogie, Parc Valrose, 06108 Nice cedex 02.

Méthode d'étude

Le zircon, dont la période de cristallisation varie largement à l'intérieur de la phase magmatique des roches pluto-volcaniques, possède des caractères (couleur, forme, inclusions, etc.) qui dépendent directement de la composition originelle et de l'histoire de refroidissement du magma (Groves, 1930, Pupin, 1976, 1980, 1988 et 1992).

Fréquemment, le zircon constitue une fraction importante des cortèges minéralogiques dans les sédiments, grâce à sa grande résistance aux agents chimiques et mécaniques. Sa dureté est de 7,5 dans l'échelle de Mohs et sa résistance à l'abrasion de 265 dans l'échelle de Freise (1931). Il conserve donc souvent une forme minéralogique déterminable même après sa reprise au cours de plusieurs cycles sédimentaires (Poldervaart, 1955).

L'analyse typologique (Pupin, 1976) permet de retrouver les origines des différentes populations de zircons dans les sédiments, à partir de leurs caractères

dans les roches mères, même dans des séries ayant subi un métamorphisme léger à moyen (Chouiter et Guillou, 1988). La typologie est basée sur le développement respectif des faces du prisme (100) ou (110) entre elles et des faces des pyramides (101) ou (211) entre elles. Les populations de zircons sont établies pour une roche ou un sédiment à partir de 60 à 250 individus. Elles sont définies par deux indices : I.A (correspondant au développement des pyramides) et I.T (correspondant au développement des prismes).

Cette méthode est différente de celle utilisée par les géologues indiens (Murthy, 1968, Nair et Narayanaswamy, 1984) et certains auteurs américains (Wilson, 1981), basée sur le calcul du RMA (Reduced Major Axis) de H. Larsen et A. Poldervaart (1957). Le RMA est calculé à partir de la longueur moyenne (X), de la largeur moyenne (Y) des cristaux et tracé graphiquement après calcul de la tangente de la pente de la droite de régression. Les données dimensionnelles des zircons sont alors exprimées sous forme de lignes droites, comparables mathématiquement de manière objective. Une autre méthode de représentation quantitative de la

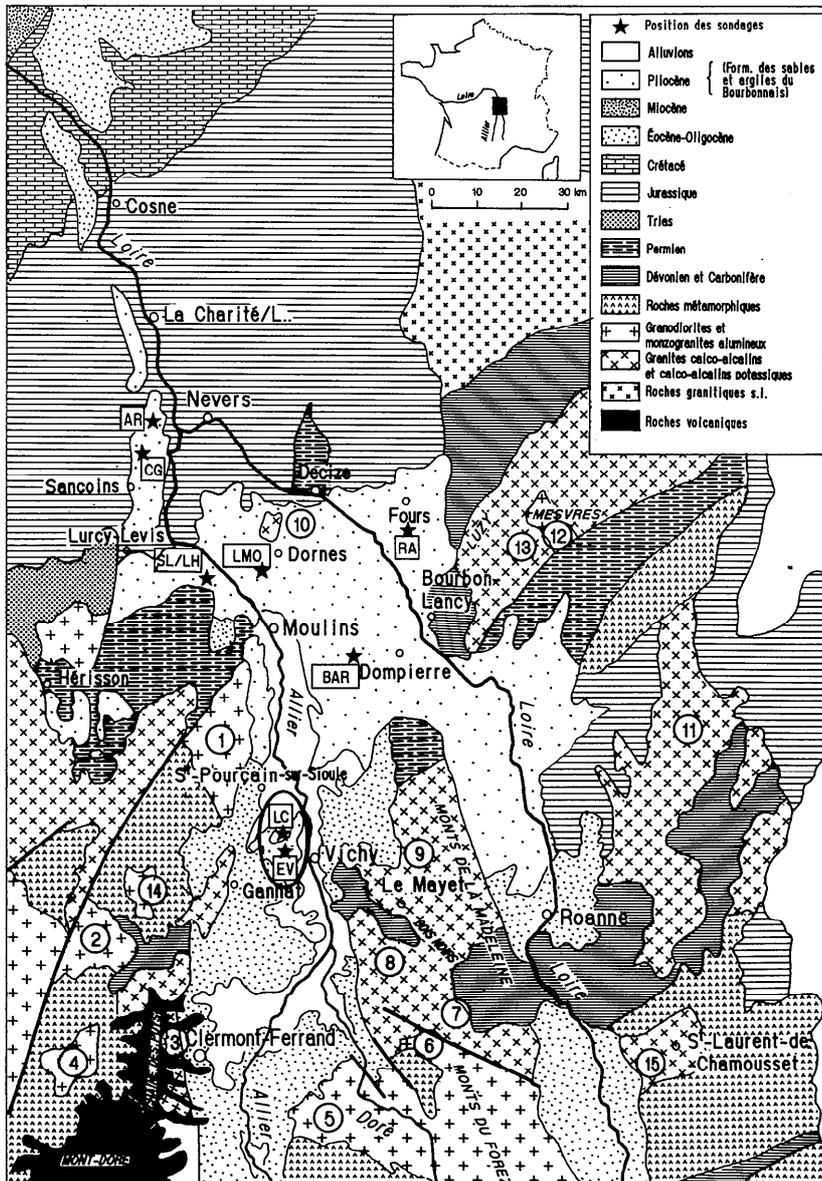


Fig. 1 - Localisation des formations sédimentaires cénozoïques de Limagne et des roches granitiques et volcaniques des bassins versants. *granodiorites et monzogranites alumineux anatectiques* : 1: Tréban ; 2: Chateauf-neuf-les-Bains ; 4: Gelles ; 5: St-Dier ; 6: L'Hermitage ; 12: Mesvres ; 14: Pouzol-Servant. *granites calco-alcalins et calco-alcalins potassiques* : 3: Royat ; 7: Saint-Julien-la-Vêtre ; 8: Bois Noirs ; 9: Mayet-de-Montagne ; 10: Neuville-les-Decize ; 11: Saint-Maurice-Chateau-Neuf ; 13: Luzy ; 15: Saint-Laurent-Chamousset. dans le cadre ovale, localisation de la Formation de Vendat.

Fig.1 - Location of the Cenozoic sedimentary formations of Limagne and of the volcanic and granitic rocks in the river basins. *granodiorites and anatectic aluminous monzogranites*: 1: Tréban ; 2: Chateauf-neuf-les-Bains ; 4: Gelles ; 5: St-Dier ; 6: L'Hermitage ; 12: Mesvres ; 14: Pouzol-Servant. *calc-alkaline and K-calc-alkaline granites* : 3: Royat ; 7: Saint-Julien-la-Vêtre ; 8: Bois Noirs ; 9: Mayet-de-Montagne ; 10: Neuville-les-Decize ; 11: Saint-Maurice-Chateau-Neuf ; 13: Luzy ; 15: Saint-Laurent-Chamousset. in the oval inset, location of the Vendat Formation.

morphologie des zircons est proposée par A. Matsuura et Y. Aoki (1989). Elle nécessite le calcul, très "lourd", des distances du centre de chacune des faces du cristal par rapport au centre d'une face de référence.

Cependant, l'expérience montre que la méthode typologique comparée aux résultats obtenus par les statistiques dimensionnelles est la seule, à ce jour, à permettre l'établissement d'une classification génétique des roches magmatiques.

Dans les sédiments, les zircons d'origine granitique se reconnaissent à la loupe binoculaire par leur couleur blanchâtre ou lilas, leur absence de limpidité due à de très nombreuses inclusions et une zonation importante, visible au microscope optique. Au MEB, on constate que leur surface est souvent écaillée ou piquetée et que les cristaux sont fracturés. Par contre, les zircons du volcanisme récent (pliocène à quaternaire) ont un état de surface très différent de celui des zircons granitiques : les faces cristallines sont très lisses, les arêtes fraîches et sans traces de chocs. Ils sont reconnaissables à leur forme automorphe, généralement trapue, leur grande limpidité, leur couleur généralement rose, leurs gradins de croissance en creux ou en relief, leurs lacunes de croissance, leur groupement cristallin, leurs inclusions nombreuses et variées (par exemple les inclusions vitreuses abondantes) très différentes de celles de zircons granitiques, enfin leur absence de zonage lié à leur jeune âge (Turco et Pupin, 1982). Les populations de zircons volcaniques des formations pyroclastiques montdorienne montrent souvent des cristaux fragmentés lors des phénomènes éruptifs. Les caractères des zircons des roches effusives du Paléozoïque sont très proches de ceux des roches magmatiques calco-alcalines ou calco-alcalines potassiques correspondantes (fig.10 in Pupin, 1980) et donc, difficiles à distinguer. Cependant les inclusions vitreuses ou aciculaires, les lacunes de croissance plus nombreuses, les corrosions magmatiques et la grande automorphie permettent souvent de les séparer.

Les caractères des zircons dans les "roches-mères"

Dans les granites hercyniens du Massif central

Ces granites sont subdivisés en granodiorites, monzogranites et leucogranites alumineux (groupe des granites anatectiques) et en granites calco-alcalins et calco-alcalins potassiques (Pupin, 1980 et 1988) (fig.1). L'analyse typologique des zircons de ces deux groupes (Pupin, 1981 et 1985) montre que les indices sont très voisins dans un même groupe mais bien distincts d'un groupe à l'autre (tabl. 1).

Les granites alumineux sont caractérisés par des zircons de type S₁, S₂, S₃ et S₇ qui représentent 50 % des zircons sur la quinzaine de types présents dans chaque granite (tabl. 2).

Les granites calco-alcalins sont essentiellement définis par les types S₁₈, S₁₉, S₂₀ et S₂₄ (tabl. 3).

Il en résulte donc une répartition en deux nuages bien différenciés (fig. 2).

Localisation	n° sur fig. 1	I.A	I.T
granodiorites, monzogranites et leucogranites alumineux			
Tréban	1	329	369
Chateauneuf-les-Bains	2	313	360
Gelles	4	307	350
Saint-Dier	5	299	333
L'Hermitage	6	338	256
L'Hermitage	6	320	273
Mesvres	12	253	336
Pouzol-Servant	14	393	325
granites calco-alcalins et calco-alcalins potassiques			
Royat	3	444	583
St-Julien-la-Vêtre	7	523	606
Bois-Noirs	8	508	478
St-Priest-La-Prugne	8	459	584
Mayet-de-Montagne	9	524	576
Neuville-les-Decize	10	448	620
St-Maurice-Chateauneuf	11	520	594
St-Maurice-Chateauneuf	11	491	615
Luzy	13	552	585
St-Laurent Chamousset	15	537	537

Tabl. 1 - Indices A et T des zircons des granites hercyniens de la partie centrale et nord-orientale du Massif central (d'après J.P. Pupin 1985).

Table 1. - A and T indices of zircon populations from Hercynian granites in the central and north-eastern part of the French Central Massif (from Pupin 1985).

N° sur fig. 1	types de zircons									
	S1	L1	S2	L2	S3	L3	S6	S7	S13	Total
1			20					24	9	55
2	14		27		8			10		59
4	12		34				9	15		61
5	18		30		15			18		81
6			9	29	13	21				72
12	25	14	18					9		66

Tabl. 2 - Les types dominants de zircons dans les leucogranites alumineux, les monzogranites et les granodiorites du nord et du nord-est du Massif central.

Table 2 - The most frequent types of zircons in the aluminous leucogranites, monzogranites and granodiorites from north and north-east of the French Central Massif.

Dans les épanchements volcaniques des Mont-Dore

J.P. Pupin (1983) et I. Gagnol (1987) distinguent, parmi les roches des Mont-Dore à zircons, les trachytes quartzifères, les rhyolites intracalceira, les trachyandésites et les nappes de ponces.

N° sur fig. 1	types de zircons									
	S14	L15	S17	L18	S19	L20	S23	S24	S25	Total
3			12	14	11		7	7		51
7					13	11		16	17	47
8				20	12		10			42
9	11	14			27	14				66
10				20	21		17	17		75
11					32			24		54
11				7	14	12	7	15		55
13		6			16	15		11	6	54

Tabl. 3 - Les types dominants de zircons dans les granites calco-alcalins et calco-alcalins potassiques du nord et du nord-est du Massif central.

Table 3 - The most frequent types of zircons in the calc-alkaline and K-calc-alkaline granites from north and north-east of the French Central Massif.

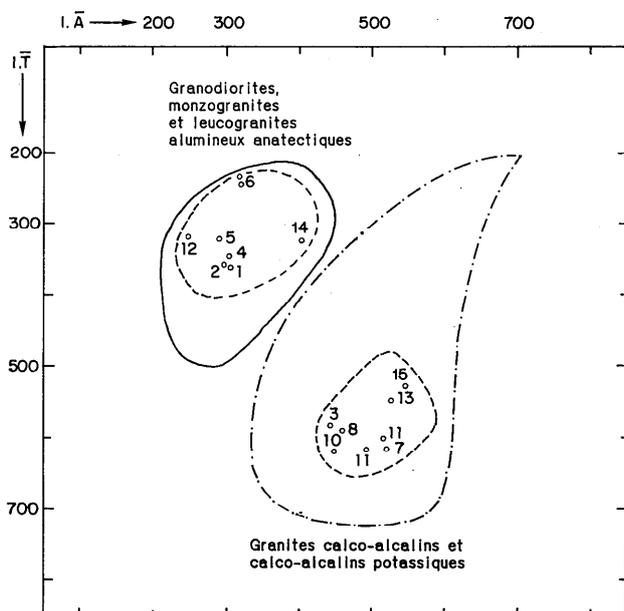


Fig. 2 - Position dans le diagramme typologique des populations de zircons des principaux granites du Massif central.

granodiorites et monzogranites alumineux anatectiques : 1 : Treban ; 2 : Chateaufneuf-les-Bains ; 4 : Gelles ; 5 : Saint-Dier ; 6 : L'Hermitage ; 12 : Mesvres ; 14 : Pouzol-Servant.
granites calco-alcalins et calco-alcalins potassiques : 3 : Royat ; 7 : St-Julien-la-Vêtre ; 8 : Bois Noirs ; 9 : Mayet-de-Montagne ; 10 : Neuville-les-Decize ; 11 : Saint-Maurice-Chateau-Neuf ; 13 : Luzy ; 15 : Saint-Laurent-Chamousset.

Fig. 2 - Location on the typological diagram of the zircon populations from the main granites in the French Central Massif.

granodiorites and anatectic aluminous monzogranites : 1 : Treban ; 2 : Chateaufneuf-les-Bains ; 4 : Gelles ; 5 : Saint-Dier ; 6 : L'Hermitage ; 12 : Mesvres ; 14 : Pouzol-Servant.
calc-alkaline and K-calc-alkaline granites : 3 : Royat ; 7 : Saint-Julien-la-Vêtre ; 8 : Bois Noirs ; 9 : Mayet-de-Montagne ; 10 : Neuville-les-Decize ; 11 : Saint-Maurice-Chateau-Neuf ; 13 : Luzy ; 15 : Saint-Laurent-Chamousset.

Dans cet ensemble, seules les nappes de ponce ont joué un rôle important et pratiquement exclusif dans l'alimentation de certaines des formations détritiques étudiées. En conséquence, seuls leurs localisations (fig.4), leurs indices (tabl.4) et leur répartition dans le diagramme typologique (fig.3) sont donnés ici.

Localisation des échantillons (fig. 4)	I.Ā	I.T
L'eau salée (1)	473	624
Vendeix (2)	419	649
Vendeix (2)	437	594
La Bourboule (4)	435	630
Les Etouaires (5)	450	656
Les Etouaires (6)	439	700
Sablou de Lossa (7)	458	665
Sablou de Lossa (8)	425	655
Sablou de Lossa (9)	438	671
Les Planchettes (10)	471	637
Les Arnats (11)	471	662
Mareuge (12)	514	617
Mareuge (13)	499	625

Tabl. 4 - Indices A et T des zircons des nappes de ponces du Mont-Dore.

Table 4 - A and T indices of zircons in the pumice layers of Mont-Dore

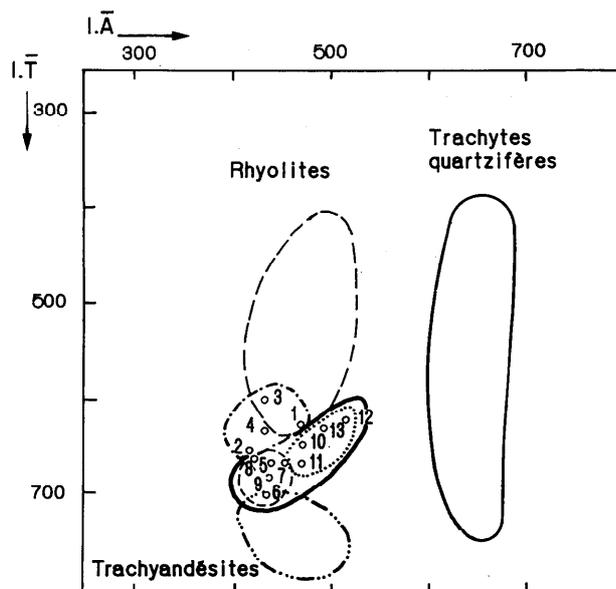


Fig. 3 - Les différents types de roches volcaniques mont doriennes et la position des populations de zircons des nappes de ponce du Mont-Dore dans le diagramme typologique. 1 : L'Eau Salée ; 2 et 3 : Vendeix ; 4 : La Bourboule ; 5 à 9 : région de Perrier ; 10 à 13 : région nord et nord est.

Fig. 3 - The different types of volcanic rocks of the Mont-Dore and the distribution of zircon populations from the Mont-Dore pumice layers in the typologic diagram. 1 : L'Eau Salee ; 2 et 3 : Vendeix ; 4 : La Bourboule ; 5 à 9 : Perrier area ; 10 à 13 : north and north-east area.

Les caractères des zircons dans les formations détritiques

L'Oligocène

L'Oligocène terminal est très développé en Limagne. Il est représenté par des calcaires sur une très grande

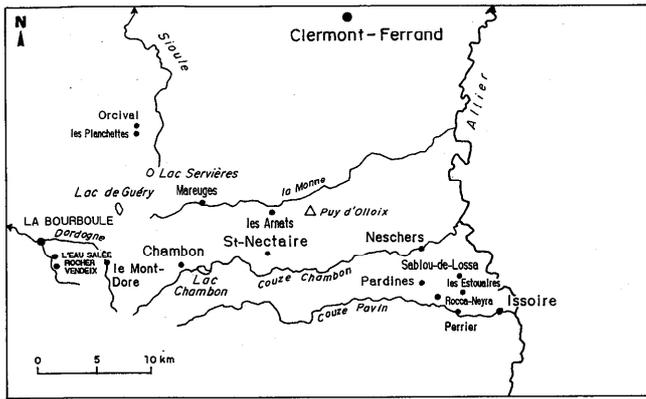


Fig. 4 - Localisation des zones de prélèvements dans les nappes de ponces du Mont-Dore.

Fig. 4 - Location of the sample zones in the pumice layers of the Mont-Dore.

épaisseur qui passent latéralement à des sables dits "de bordure" où sont répartis les récifs de calcaires "en choux-fleurs" (Donsimoni et Giot, 1977).

La composition minéralogique de ces dépôts détritiques est très variable. On constate globalement que :

- à l'ouest de l'Allier (région de Vichy, Gannat, Saint-Pourçain) (fig. 1) les sables oligocènes contiennent 30 à 80 % de minéraux du métamorphisme (en particulier de la staurotite). La population de zircons est relativement monogénique, originaire d'un socle métamorphique composé de gneiss anatectiques à sillimanite, éventuellement de quelques gneiss granulitiques et d'orthogneiss d'origine principalement calco-alcaline (fig. 5). Le type de zircon dominant est le S₁₂ (éch. 586-73, carte de Gannat à 1/50 000).

- à l'est de l'Allier et sur les deux rives de la Loire (Bourbon-Lancy, Fours, fig. 1), l'Oligocène détritique contient 80 à 90 % de zircons. Cette population très homogène est constituée uniquement de zircons de types calco-alcalins (fig.5).

La Formation de Vendat

Découverte au cours des levées de la carte à 1/50000 de Vichy (Dadet *et al.*, 1979), cette formation affleure essentiellement sur cette carte en rive ouest de l'Allier.

Par comparaison avec la minéralogie des sables de la région de Clermont-Ferrand, il a été proposé de lui attribuer un âge burdigalien et de distinguer la partie inférieure de la Formation, à minéraux du métamorphisme dominants, de la partie supérieure à zircons dominants (Tourenq, 1989).

Cette distinction se retrouve dans l'analyse typologique des zircons (fig. 5) :

- la partie inférieure est très riche en zircons anatectiques (54 à 73 %)
- la partie supérieure contient une population pratiquement monogénique de zircons calco-alcalins (tabl. 5).

Quelques jalons de la Formation de Vendat, vers le nord, dans la région de Moulins et dans celle de Lurcy-Levis, sous la Formation du Bourbonnais, ont été

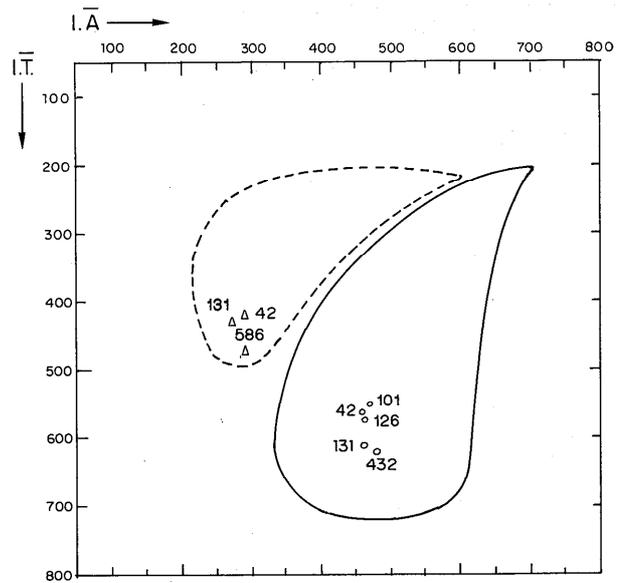


Fig. 5 - Les zircons de l'Oligocène et de la Formation de Vendat dans le diagramme typologique. n°432 Oligocène oriental n° 586 Oligocène occidental n°42 et 131 Formation de Vendat, niveau inférieur n° 101 et 126 Formation de Vendat, niveau supérieur.

- Δ zircons des granites d'anatexie
- O zircons des granites calco-alcalins
- le domaine des granites d'anatexie
- le domaine des granites calco-alcalins

Fig.5 -The zircons from the Oligocene and from the Vendat Formation in the typological diagram n°432 eastern Oligocene n° 586 western Oligocene n°42 et 131 Vendat Formation, basal horizon n° 101 et 126 Vendat Formation, upper horizon.

- Δ zircons from anatectic granites
- O zircons from calc-alkaline granites
- the area of anatectic granites.
- the area of calc-alkaline granites

découverts. Ces dépôts sont à matériel métamorphique dominant ce qui évoque la partie inférieure du dépôt mais l'analyse typologique est plus nuancée (éch. 10 et 12 LM, tabl. 5).

La Formation des Sables et Argiles du Bourbonnais.

La Formation des Sables et Argiles du Bourbonnais s'étale sur 6000 km² du sud de Vichy au nord de Nevers sur les deux rives de la Loire et de l'Allier (fig. 1). Elle se subdivise en trois membres successifs : les Sables Inférieurs, les Argiles Noires et les Sables Supérieurs. Son épaisseur peut atteindre 50 mètres.

La présence de zircons volcaniques constitue la caractéristique principale de la Formation des Sables et Argiles du Bourbonnais. Alors que ces zircons n'existent ni dans l'Oligocène détritique ni dans la Formation de Vendat, dans tous les sondages ayant traversé la Formation du Bourbonnais, tous les niveaux au-dessus et au-dessous des Argiles Noires en contiennent (2 à 71 %).

Les analyses typologiques permettent de localiser leur origine dans les ponces et cinérites des Monts-Dore (fig. 6). Dans la Formation du Bourbonnais, par ailleurs presque complètement azoïque, ces zircons volcaniques jouent donc le rôle de marqueur stratigraphique au même titre que dans les corrélations téphrostrati-

N° Ech	Localisation	zircons volc. (montdor)	zircons calco-alcalins			zircons anatectiques			nbre zirc. comptés	non déterminés
			%	I.Ā	I.T̄	%	I.Ā	I.T̄		
carte Vichy										
niveau supérieur										
126	St-Remy Le Clapier	0	100	473	566	0			100	0
101	St-Didier Ribeauvalet	0	92	470	550	2			58	6
niveau inférieur										
42	Vendat-Bourg	0	37	466	569	54	289	421	100	9
131	St-Remy Le Clapier	0	21	462	610	74	274	431	100	6
carte Lurcy-Levis										
niveau supérieur?										
10	LM	0	68	446	591	28	304	415	100	4
12	LM	0	74	424	612	19	285	420	105	7

Tabl. 5 – Analyse typologique des zircons dans la Formation de Vendat. Comparaison entre les niveaux inférieur et supérieur.
 Table 5 – Typologic distribution of zircons in the Vendat Formation. Comparison between upper and basal horizons.

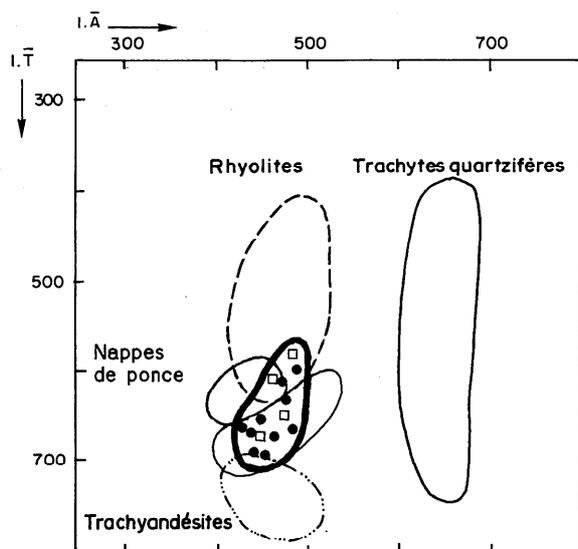


Fig. 6 – La répartition des populations de zircons volcaniques des Sables et Argiles du Bourbonnais dans le diagramme typologique. Noter la relation étroite avec le nuage des points des nappes de ponce du Mont-Dore.
 Fig. 6 – The distribution of the zircon populations from the Bourbonnais Sands and Clays Formation in the typological diagram. Note the close relationship to the cluster of the pumice layers of the Mont-Dore.

graphiques où J. Winter (1982) les qualifie d' "indices cristallographiques fossiles".

Ils sont accompagnés dans les sédiments de zircons calco-alcalins (1 à 73 %) et de zircons anatectiques (8 à 68 %) (fig. 7).

a) Répartition lithostratigraphique

- Au centre du bassin où les trois niveaux lithostratigraphiques sont bien marqués, la répartition des différents types de zircons semble aléatoire. On peut trouver

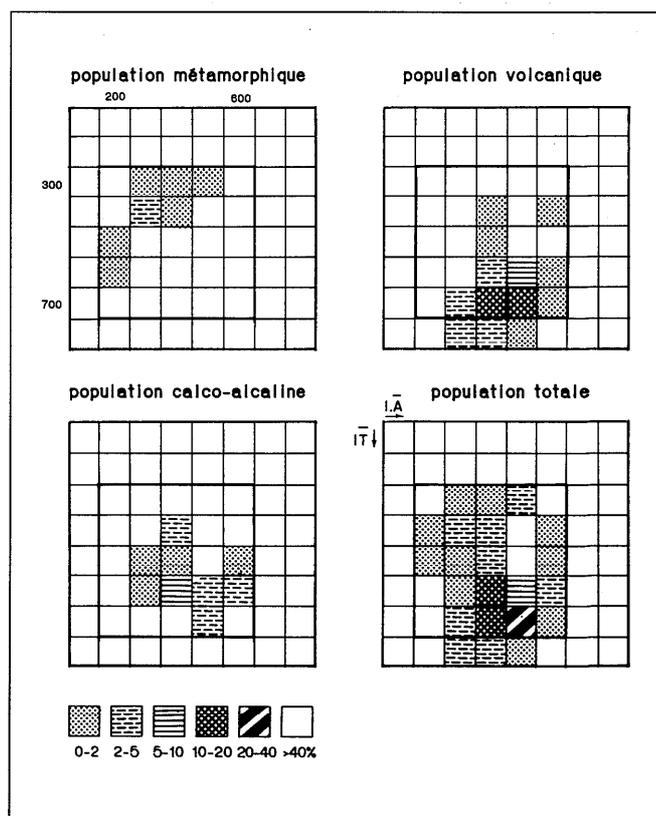


Fig. 7 – Exemple de diagramme typologique avec la population totale et les sous-populations volcanique, anatectique et calco-alcaline dans l'échantillon n°41 du sondage des Barreaux (BAR), carte de Moulins à 1/50 000.
 Fig. 7 – Example of typological diagram with the entire population and partial volcanic, anatectic, and calc-alcaline populations in sample n°41 from the drilling of the Barreaux (BAR), map 1/50 000 of Moulins.

en alternance des niveaux très riches en zircons volcaniques (plus de 50 %) et d'autres où les zircons calco-alcalins dominant. Les zircons anatectiques sont toujours faiblement représentés. Le sondage des Barreaux (Bar) sur la carte Moulins à 1/50 000 (fig. 1 et tabl. 6) est un exemple très représentatif de cette distribution.

– Sur les bordures du bassin, l'absence du niveau repère des Argiles Noires rend plus difficile la distinction entre les Sables Supérieurs et les Sables Inférieurs et on constate que les zircons anatectiques sont mieux représentés que dans le centre du bassin .

b) Répartition géographique

– Au sud, dans la région de Vichy et de Saint-Pourçain, les zircons volcaniques sont toujours présents en

abondance (tabl. 7). Cette abondance s'explique par la proximité des dépôts des Mont-Dore. Dans un des sondages étudiés (Espinasse-Vozelle -EV-, fig. 1), les zircons d'origine anatectique (avec présence fréquentes de sous-types V-VZ et SZ) sont analogues à ceux décrits par l'un des auteurs (J.P.Pupin) dans les granites à cordiérite du Velay localisés au sud-est.

– Au nord, dans la région de Lurcy-Levis et de Sancoins, située à une centaine de km du Massif du Mont-Dore, les zircons volcaniques peuvent être encore abondants (sondages SL/LH, TT, SC, CG et AR, tabl. 7 et fig. 1). Dans le sondage d'Argenvières (AR), l'échantillon prélevé dans le niveau qui représenterait les Argiles Noires est formé de sphènes et de zircons volcaniques pour 60 % du cortège de minéraux lourds.

N° Ech	Niveaux lithostrati.	zircons volcaniques (montdoriers)			zircons calco-alcalins			zircons anatectiques			% non déterminé	nbre zircons comptés
		%	I.Ā	I.Ī	%	I.Ā	I.Ī	%	I.Ā	I.Ī		
1	S.Sup.	55	449	675	24	462	576	9	322	377		
15	Argiles Noires	11	480	580	75	500	535	6	400	350	8	73
22	S. Inf.	22	460	607	72	479	584	1			5	100
26	"	87	472	654	11	460	560	1			1	100
41	"	50	459	648	24	478	628	7	271	314		

Tabl. 6 – La répartition des différents types de zircons dans le sondage des Barreaux (carte Moulins à 1/50 000 x: 687,375, y: 167,225).
 Table 6 – Distribution of the different types of zircons in les Barreaux core (Moulins 1/50 000 map x: 687,375, y: 167,225).

N° Ech	Carte de localisation	zircons volcaniques (montdoriers)			zircons calco-alcalins			zircons anatectiques			nbre zircon comptés	% non déterminé
		%	I.Ā	I.Ī	%	I.Ā	I.Ī	%	I.Ā	I.Ī		
E.V. 73	Vichy	61	443	695	22	442	558	13	258	416	150	4
L.C. 119	Vichy	45	469	671	41	476	583	9	313	375	112	5
LMO 2	Dornes	10	537	675	56	455	623	28	271	432	100	6
S.L. 9	Lurcy-Levis	71	427	664	19	450	628	8	400	350	100	2
L.H. 10	"	3	450	650	60	471	595	35	292	446	80	2
T.T. 1	Sancoins	29	485	665	1			68	300	431	100	2
S.C. 23	"	27	474	639	41	458	608	23	305	410	100	9
C.G. 4	"	49	445	663	32	440	577	17	287	440	100	2
C.G. 18	"	61	468	613	19	450	612	16	300	421	100	4
A.R. 4	Nevers	61	490	600	5	520	580	32	300	410	100	2
R.A. 9	Bourbon-Lancy	2			73	454	594	10	300	389	100	15

Tabl. 7. – Répartition des différents types de zircons dans la Formation des Sables et Argiles du Bourbonnais en fonction de la localisation géographique des échantillons (du sud vers le nord du sondage E.V au sondage A.R. et du sud vers le nord-est pour le sondage R.A. voir localisation fig. 1).

Table 7. – Distribution of the different types of zircons in the Bourbonnais Sands and Clays Formation according to the geographic location of the samples (from south to north for the E.V. core to the A.R. core and from south to north-east for the R.A. core, see location fig. 1).

Les zircons anatectiques, où les sous-types VZ SZ et V existent toujours, peuvent provenir des roches métamorphiques du bassin de la Sioule (fig. 4) dont l'érosion amène en même temps staurotite et grenat abondants retrouvés dans le reste du cortège minéralogique.

- A l'est, dans la région de Fours et de Bourbon-Lancy, le pourcentage de zircons volcaniques diminue très fortement sur toute l'épaisseur des dépôts. Dans le sondage RA (fig. 1 et tabl. 7), ils ne représentent plus que 2 %. La taille des cristaux diminue également et ne dépasse pas 100 μm . Par contre, on trouve fréquemment des cristaux groupés en association.

Résultats paléogéographiques et conclusions

Les zircons provenant des granites calco-alcalins et de leurs équivalents effusifs ont tous des "points moyens" (Pupin et Turco, 1972) très proches (I.Å : 450 à 500, I.T. : 550 à 650). Une comparaison avec l'ensemble des granites du Massif central français montre que seuls certains d'entre-eux possèdent des caractères typologiques analogues. Il s'agit des granites de Royat, Charbonnière-les-Varennes, le Mayet de Montagne, Saint-Julien-la-Vêtre, Noirétable, du microgranite de Saint-Priest, des granites de Saint-Maurice-Chateaufort, Dornes, Fleurie et du microgranite de Gien-sur-Cure (fig. 1). Mis à part les deux derniers, ces granites sont situés à proximité des dépôts étudiés et constituent ainsi une partie des sources possibles.

Dans l'Oligocène détritique, la distinction entre les zircons des dépôts orientaux et occidentaux met en évidence une alimentation très locale, à l'est à partir des granites calco-alcalins, à l'ouest à partir du socle métamorphique. Dans ce grand lac, le ruissellement à partir des bordures proches, fournit le matériel détritique dans lequel se développent les calcaires stromatolithiques en "choux-fleurs". Il ne semble pas y avoir d'arrivée de cours d'eaux puissants, générateurs de courant important amenant la dispersion des sédiments sur une vaste étendue. Ceci est tout à fait compatible avec ce que l'on sait de la sédimentation actuelle dans certains rifts continentaux (Tiercelin *et al.*, 1987).

Dans la base et la partie médiane de la Formation de Vendat, les zircons proviennent presque uniquement des granites d'anatexie et des migmatites. Au sommet les zircons, majoritaires dans le cortège des minéraux lourds, sont quasi-exclusivement calco-alcalins. Cette répartition élimine l'hypothèse, pour le sommet du dépôt, d'une concentration préférentielle en zircons à partir du stock sous-jacent et témoigne au contraire d'un renouvellement complet dans l'origine des apports.

La mise en place des Sables et Argiles du Bourbonnais d'après l'analyse des minéraux lourds et argileux (Tourénq, 1989), s'est faite par un double écoulement de type fluvial : 1) du sud vers le nord par la paléovallée de l'Allier, 2) du sud-est vers le nord-ouest, par la paléovallée de la Loire. Les apports latéraux à partir des bordures ont également joué un rôle important dans son alimentation.

La répartition de la population globale (incluant tous les types de zircons) fait apparaître deux zones de densité supérieure à 70 % (fig. 8). La première est localisée

à l'est, en bordure de la Loire, la seconde correspond à la pointe du Forez et des Monts de la Madeleine. Deux autres secteurs dont l'extension est plus limitée montrent aussi un enrichissement en zircons : la zone qui borde le massif du Tréban au sud-ouest de Moulins et la rive ouest de l'Allier dans la région de Vichy, alimentée par le massif des Bois Noirs.

Ces zircons proviennent essentiellement des granites calco-alcalins et, pour une plus faible part, des granites d'anatexie. Ils mettent en valeur le rôle joué par les bordures du bassin et donc les apports latéraux. En même temps que se produit la subsidence dans les Limagne et la Sologne bourbonnaise, ces roches soumises à une érosion active libèrent une grande quantité de matériaux (à zircons dominants). Ces matériaux, mobilisés par de petits cours d'eaux sur des pentes fortes, sont étalés dans des cônes alluviaux peu développés et enfin repris dans les grands paléo-chenaux de la Loire et de l'Allier.

Les zircons volcaniques, pour leur part, ont une origine typiquement montdorienne. Ils sont totalement absents dans les sables oligocènes et miocènes de la région. Ils permettent ainsi de faire la coupure entre la Formation du Bourbonnais et les dépôts sous-jacents. Leur répartition s'est faite par le chenal du paléo-Allier pour la plus grande part. Mais, associé au transport hydraulique, le vent a également joué un rôle important dans cette mise en place. En effet, la présence de zircons volcaniques à l'est de la Loire actuelle ainsi que dans le bassin de Cosne-d'Allier (Tourénq et Turland, 1982) ne peut s'expliquer que par la dispersion de cendres à l'occasion d'éruptions de type plinien.

Il faut imaginer ces éruptions analogues à celles du Mont Saint-Helens (Etat de Washington, USA 1980) (Christiansen and Peterson, 1981) ou du El Chichon (Mexique 1982).

D'après la répartition spatiale et la taille des zircons dans la Formation du Bourbonnais, la dispersion des cendres montdorienne, suivant les vents dominants, s'est faite du sud au nord, direction globalement concordante avec celle proposée par R. Brousse *et al.* (1966), à partir de la granularité des nappes de ponces du Massif du Mont-Dore.

On constate souvent, au cours des éruptions actuelles, que les manifestations volcaniques violentes, en modifiant les conditions atmosphériques, sont accompagnées et suivies de pluies torrentielles. C'est ce même type de pluies diluviennes qui a peut-être contribué à déblayer très rapidement les cendres et les ponces accumulées sur la périphérie du massif du Mont-Dore. Du fait de l'existence de nuages de cendres et de coulées boueuses, certains niveaux de la Formation du Bourbonnais ont été alimentés en matériel volcanique, ce qui explique la répartition aléatoire apparente des zircons volcaniques. La dispersion, en partie éolienne, de ces zircons volcaniques démontre la quasi-contemporanéité des éruptions du Mont-Dore et de la mise en place des Sables et Argiles du Bourbonnais. On peut donc en déduire, pour la Formation du Bourbonnais, un âge compris entre 3 et 2 Ma (Reuverien à Prétigien) âge compatible avec les résultats palynologiques obtenus sur les quelques très rares échantillons prélevés dans les Argiles Noires (Farjanel, 1985).

Ainsi, l'étude des zircons et de leur analyse typologique dans les formations sédimentaires apporte des

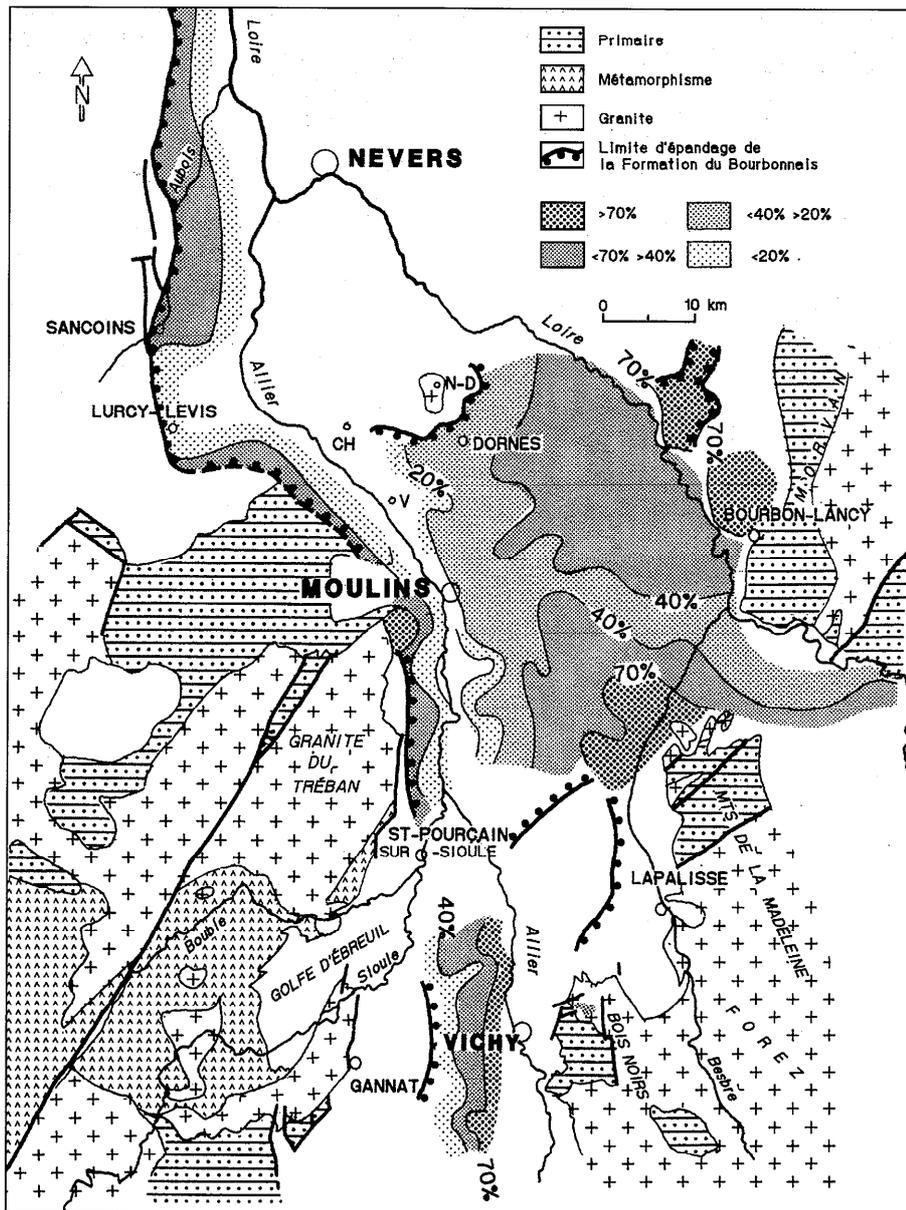


Fig. 8 – Répartition de la population globale (incluant tous les types de zircons) dans la Formation des Sables et Argiles du Bourbonnais.

Fig. 8 – Distribution of the global population (with all the types of zircons) in the Bourbonnais Sands and Clays Formation.

précisions importantes sur le paléoenvironnement, les conditions de mise en place des dépôts, la stratigraphie et l'âge des formations. Il est très important, dans des formations souvent azoïques, de pouvoir utiliser les zircons comme "indices cristallographiques fossiles". L'efficacité de la méthode tient à la possibilité d'associer la typologie aux nombreux autres caractères, principalement internes des cristaux, décelables à l'observation en transmission. Le couplage récent de la typologie avec l'étude géochimique fine des zircons (Pupin, 1992) vient encore renforcer les possibilités de ce marqueur sédimentaire.

Références bibliographiques

BROUSSE R., LEFEVRE C. (1966) – Nappes de ponce du Cantal et du Mont-Dore. Leurs aspects volcanologiques, pétrographiques et minéralogiques. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), 8, pp.223-245.

CHOUTER S., GUILLOU J.J. (1988).– Utilisation de la typologie des zircons détritiques dans la reconstitution paléogéographique des séries sédimentaires métamorphisées. Cas du Protérozoïque et du Paléozoïque inférieur du NW de l'Espagne. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, 307, (2), pp. 1655 - 1662.

CHRISTIANSEN R.L., PETERSON D.W. (1981). – Chronology of the 1980 eruptive activity. In : The 1980 eruptions of Mount St-Helens Washington, *Geol. Surv. Prof. Paper* n°1250 pp. 17-30.

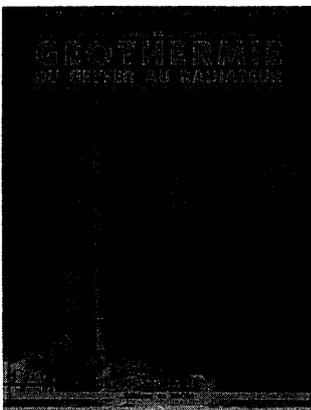
DADET P., CLOZIER L., GIOT D., FLEURY R., BELKASSA R., BATARD F., CARROUE J.P., JAMBRUN M. (1979) . – Notice explicative de la carte géologique Vichy à 1/50 000, BRGM, Orléans.

DONSIMONI M., GIOT D. (1977). – Etude des calcaires concrétionnés lacustres de l'Oligocène supérieur et de l'Aquitanién de Limagne, Massif Central français. *Bull. BRGM, Fr.*, (2), sect. 1, pp. 131-170.

- FARJANEL G. (1985). – Analyse palynologique du sondage des Barreaux (Moulins). Rapport technique du Département Géologie du BRGM n° 85 GEO SED 086.
- FREISE F. W. (1931). – Untersuchung von Mineralen auf Abnutzbarkeit bei Verfrachtung im Wasser. *Tscherm. Min. Petr. Mitt.*, **41**, pp. 1-7.
- GAGNOL I. (1987) – Typologie et géochimie du zircon dans les laves alcalines différenciées. Thèse Géologie Pétrologie, Université de Nice, 228 p.
- GROVES A.W. (1930) – The heavy minerals suites and correlation of the granites of northern Brittany, the Channel Islands and the Cotentin. *Geol. Mag.*, **67**, pp.218-240.
- LARSEN L. H., POLDERVAART A. (1957) – Measurement and distribution of zircons in some granitic rocks of magmatic origin. *Miner. Mag.*, **31**, p. 544-564.
- MATSUURA A., AOKI Y. (1989). – A new method for quantitative representation of zircon morphology. *N. Jb. Miner. Mh.*, H. **7**, pp. 309-319.
- MURTHY M. V. N., SIDDIQUIE H. N., VISWANATHAN T. V. (1968). – Methods of studying zircons. In Zircon, collection of research papers Murthy M. V. N. edit., Geol. Surv. India Misc. Public. n°9, pp.25-47.
- NAIR A.M., NARAYANASWAMY (1984) : Studies on zircon - Host Rock/Sediment Association along Manimala River meanders in Kerala. *Jr. Geol. Soc. India*, **25**, (5), pp. 277-285.
- POLDERVAART A. (1955) – Zircon in rocks 1. Sedimentary rocks. *Amer. J. Sci.*, **253**, pp. 433-461.
- PUPIN J.P. (1976). – Signification des caractères morphologiques du zircon commun des roches en pétrologie. Bases de la méthode typologique. Applications. Thèse doctorat d'état de l'Université de Nice, 394 p.
- PUPIN J. P. (1980) – Zircon and granite petrology. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **73**, pp. 207-220.
- PUPIN J.P. (1981) – Un type de zonalité magmatique dans la chaîne varisque d'Europe occidentale : les granites hercyniens du Massif Central français. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **293**, pp. 597-600
- PUPIN J.P. (1983). – Typologie des zircons des termes saturés intermédiaires et différenciés des séries alcalines du Mont-Dore et de la Chaîne des Puys (Massif Central) *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **269**, (2) pp.761-764.
- PUPIN J.P., (1985). – Magmatic zoning of hercynian granitoids in France based on zircon typology. *Schweiz. Miner. Petro. Mitt.*, **65**, pp. 29-56.
- PUPIN J.P. (1988). – Granites as indicators in paleogeodynamics. *Rend. Soc. Ital. Mineral. Petrol.*, 43-2, pp. 237-262.
- PUPIN J.P. (1992). – Les zircons des granites océaniques et continentaux : couplage typologie-géochimie des éléments en traces. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 163-4, pp. 495-507.
- PUPIN J.P. TURCO G., (1972). – Une typologie originale du zircon accessoire. *Bull. Soc. Min. Crist.*, **95**, pp. 348-359.
- TIERCELIN J.J., VINCENS A. (coordonnateurs), (1987). – Le demi-graben de Baringo-Bogoria, Rift Gregory, Kenya. 30000 ans d'histoire hydrologique et sédimentaire. *Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*, 11-2, 249-540.
- TOURENQ J., TURLAND M. (1982). – Datation et corrélations de formations détritiques azoïques par les minéraux lourds des volcans du Massif Central. Synchronisme du Tertiaire terminal de Cosne-d'Allier et des Sables et Argiles du Bourbonnais. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **275**, pp. 9-12.
- TOURENQ J. (1989). – Les Sables et Argiles du Bourbonnais (Massif central, France). Une formation fluvio-lacustre d'âge pliocène supérieur. Etude minéralogique, sédimentologique et stratigraphique. Documents du BRGM n°174, Editions du BRGM, Orléans, 333 p.
- TURCO G., PUPIN J.P., (1982). – Age et métamorphisme: des facteurs intervenant dans la coloration, le zonage et les surcroissances des zircons. *Réun. Ann. Sci. Terre, Paris*, p. 612 *Soc. Géol. Fr. édit.*
- WILSON Fr. A. (1981). – Preliminary investigation of accessory zircons from volcanic and sedimentary rocks from Clear Lake. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, n°1141, pp.251-259.
- WINTER J.(1982). – Habits of zircon as a tool for precise tephrostratigraphic correlation *In Cyclic and Event Stratification* Einsele Seilacher edit. Springer, pp. 423-428.

LA GÉOTHERMIE du geyser au radiateur

Jean-Michel COUDERT et Florence JAUDIN



Géothermie : le nom peut paraître barbare, il est seulement d'origine grecque : « Gé », qui veut dire Terre et « thermé » qui signifie chaleur. La géothermie concerne donc la chaleur de la Terre. D'où provient-elle, que peut-on en faire, comment peut-on l'utiliser, quel est son avenir, telles sont les principales questions auxquelles ce livre répond.

L'énergie géothermique, cette fausse énergie nouvelle utilisée bien avant le charbon ou le pétrole, est quelque peu méconnue par rapport à l'énergie solaire ou à l'énergie nucléaire. L'impact de l'énergie géothermique, au niveau mondial, ne sera jamais très important mais localement il peut être significatif.

Cet ouvrage se veut plus un point de départ, un livre d'initiation que la somme des connaissances dans le domaine de la géothermie.

Prix 95,00 F + 35 F de frais de port et d'emballage

En vente chez votre libraire habituel ou à défaut aux :

Éditions BRGM, BP 6009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France. Tél. 38 64 30 28
accompagné de votre titre de paiement.