

Sols et paléo-altérites sur roches volcaniques du Cantal (France) :

Exemple du Puy Courny

P. Quantin⁽¹⁾, J. Dejou⁽²⁾, M. Tejedor⁽³⁾ et C. Jimenez⁽³⁾

(1) 5, rue Boileau, 21000 Dijon

(2) 1, rue des Réaux, 15250 Jussac

(3) Departamento de Edafología y Geología Universidad de La Laguna, Tenerife, Espagne

RÉSUMÉ

La coupe du Puy Courny, près d'Aurillac (Massif Central), est un haut lieu de la géologie volcanique cantalienne. Elle comporte à la base une coulée de basanite du Miocène terminal de 7,44 MA (millions d'années), recouverte par un paléosol rouge. Ensuite se succèdent : une série trachytique explosive avec plusieurs strates successives, puis une seconde coulée de basalte datée de 6,48 MA et au sommet un dépôt périglaciaire. Cet article est consacré à l'étude de la composition minéralogique et chimique de chaque matériau des différentes strates de la coupe : basanite et basalte, pyroclastes trachytiques, altérites et sols, ainsi qu'à la discussion des résultats. Ces données permettent l'examen des processus d'altération qui ont affecté les diverses couches volcaniques, soit pré-météoriques, soit météoriques, ainsi que la comparaison de la genèse du BRUNISOL actuel à celle du paléosol rouge.

Mots clés

Basaltes miocènes, paléosol rouge, série trachytique explosive, altérites prémétéoriques et météoriques, BRUNISOL actuel, Cantal

SUMMARY

SOILS AND PALEOALTERITES ON VOLCANIC ROCKS OF CANTAL (FRANCE) : Example of Puy Courny

The cut of Puy Courny, near Aurillac (Massif Central, France), is an eminent site of the Cantalian volcanic geology. That shows, from the bottom, a basalt flow of late Miocene age, 7.44 MY (millions years) old, overlain by a red paleosoil. Then there are successively to the top : trachyte explosive series with several different beds ; a second basalt flow, 6.44 MY old, and at the top a periglacial deposit. This paper deals with the study of the mineralogical and chemical composition of the various materials of each bed of the cut : basanite and basalt, trachytic pyroclasts, alterites and soils, as well as the discussion of the results. The aim of this paper is to infer from these data the alteration processes, either pre-meteoric or meteoric (weathering), and to compare the present BRUNISOL to the red paleosoil genesis.

Key-words

Miocene basalts, red paleosoil, explosive trachytic series, premeteoric and meteoric alterites, present BRUNISOL, Cantal

RESUMEN**SUELOS Y PALEO-ALTÉRITAS SOBRE ROCAS VOLCÁNICAS DEL CANTAL (FRANCIA) : Ejemplo de Puy Courny**

El corte de Puy Courny es uno de los lugares más eminentes de la geología volcánica del Cantal. Está compuesto por los siguientes niveles : en su base, una colada de basanita del Mioceno terminal de 7.44 MA (millones de año) de edad, recubierta por un paleosuelo rojo y encima por una serie explosiva traquítica con varias capas sucesivas, a continuación una segunda colada basáltica de 6.48 MA de edad, y encima uno BRUNISOL (suelo pardo) del Holoceno. En este artículo se estudia la composición mineralógica y química de las diferentes capas del corte, a saber : basanita y basalto, piroclastos traquíticos, altéritas y suelos, y además se discuten los resultados. Los datos obtenidos permiten inferir los procesos de alteración que afectaron las distintas capas volcánicas, premeteóricas o meteóricas, y además realizar una comparación entre la génesis del BRUNISOL actual y la del paleosuelo rojo.

Palabras clave

Basaltos miocénicos, paleosuelo rojo, serie explosiva traquítica, altéritas premeteóricas y meteóricas, BRUNISOL (suelo pardo) actual, Cantal

Dans le Massif Central des paléosols rouges développés sur des basaltes miocènes ont été étudiés par Chesworth *et al.* (1983), puis par Dejou *et al.* (1992). Les sols volcaniques actuels ont fait l'objet d'études approfondies, notamment par Hétier (1975) et par Moineau (1977). La coupe du Puy Courny, haut lieu de la géologie du Cantal, a retenu l'attention des chercheurs dans différents domaines : stratigraphie, pétrographie, paléontologie et pédologie, notamment : Ehrart (1940), Lapadu-Hargues (1963), Bellon *et al.* (1972), Gibert (1973), Park (1973), Brousse *et al.* (1975), Autran et Peterlongo (1980), Pierre et Dejou (1990), de Goër (1995), Gaiffe *et al.* (1999).

Toutefois, lors de la réunion scientifique du programme européen COST 622 («Soils Resources of European Volcanic Systems») en Auvergne (30 mai-3 juin 2001), à la suite des observations des participants il était apparu utile de réétudier cette coupe en détail, notamment à propos des sols et des différents types d'altération des roches volcaniques du Miocène terminal et du sol actuel.

Cette coupe du Puy Courny se situe à proximité de la ville d'Aurillac (*figure 1*), dans la partie sud du strato-volcan du Cantal, d'âge Miocène. Au dessus d'une coulée de basanite datée de 7,44 MA (Brousse *et al.* 1975), on découvre successivement : un paléosol rouge, puis une série de dépôts trachytiques explosifs, coiffés par une seconde coulée basaltique du Miocène terminal, datée de 6,48 MA, et enfin le sol actuel de type BRUNISOL à caractères andiques issu d'un dépôt péri-glaciaire (Cambisol andique), d'âge Holocène.

Le but de cette étude du Puy Courny est donc de préciser la nature des différents matériaux volcaniques de cette chronoséquence complexe, ainsi que les processus et produits de leur altération. Ensuite pourront apparaître de nouvelles hypothèses sur la genèse des sols et des produits d'altération, en observant leur évolution successive depuis la coulée basaltique inférieure du Miocène terminal, vers le paléosol rouge, puis la série de matériaux pyroclastiques trachytiques, la coulée de basalte supérieur et finalement le BRUNISOL actuel (Holocène).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Description de la coupe du Puy Courny

(*figure 2, photos 1 à 4*)

La coupe présente les ensembles et strates successifs de matériaux volcaniques sur une hauteur totale de 21 m environ, à savoir :

I – Basaltes infra et péricantaliens : A la base, la coulée basaltique recouvre les marnes de l'Oligocène qui affleurent à environ 200m de la coupe. Cette série comporte successivement :

1/ une coulée de basanite prismatique, datée de 7,44 MA, épaisse de 23 m, ici visible sur 2 à 3 m seulement ; surmontée en 1.1/

d'une coulée de basalte sphéroïdal, très altéré en produit brunâtre autour des boules, épaisse de 2 à 3 m ;

2/ une altérite verte, dérivée du basalte sphéroïdal très altéré et friable, épaisse de 2,5 à 3 m ;

3/ un paléosol rouge, argileux et compact, supposé dériver de l'altérite verte selon Dejou *et al.* (1992), épais de 2,5 à 2,8 m.

II- Série trachytique explosive du strato-volcan du Cantal

4.1/ une altérite brun-rouge, argilo-sableuse, incluant des petites boules de lave noire altérée, épaisse de 80 cm (paléosol ?) ;

4.2/ une cinérite brune, argilo-sableuse, incluant aussi des petites boules de lave noire altérée, épaisse de 30 cm ;

5/ un sable grossier gris clair, épais de 30 à 50 cm, présumé d'origine volcano-sédimentaire, apparenté (?) à la couche fossilifère étudiée par Brousse *et al.* (1975), présentée au Congrès Géologique International de Paris en 1980, où ont été identifiés des mammifères semblables à ceux de Pikermi en Grèce, datés du Miocène terminal ;

6/ un tuf brun-violacé, altéré et compact, épais de 140 cm ;

7/ un lahar ponceux, de type nuée ardente, de composition hétérogène, et des ponces grossières trachytiques ou trachyandésitiques, et des blocs arrachés du substratum (marnes, quartzites, silex, gneiss et basaltes), épais de 2 à 2,5 m ; ce dépôt n'est pas stratifié et il est un peu altéré ;

8.1/ une brèche de produits pyroclastiques de taille moyenne, non classés ni stratifiés, faiblement altérés et de teinte gris clair, épaisse de 20 cm environ ; surmontée de 8.2/ une zone blanchie, au contact de la coulée basaltique supérieure (effet de fumerolles ?), épaisse de quelques centimètres.

III- Basaltes supra-cantaliens :

9/ une coulée de basalte sphéroïdal, datée de 6,48 MA, avec un cortex « en croûte de pain » altéré, centimétrique, autour et entre les boules (hydromagmatisme ?), épaisse de 2 à 3 m ;

IV- BRUNISOL :

10/ au dessus du basalte supérieur, sol brun foncé, épais de 40 à 50 cm, d'âge Holocène, qui dérive d'un dépôt périglaciaire colluvio-éolien, composé de matériaux volcaniques hétérogènes à blocs et graviers de laves un peu altérés de basaltes, trachyandésites et trachytes du Miocène supérieur et de produits sablo-argileux d'altération.

Echantillonnage

Des échantillons ont été prélevés dans les 10 strates (horizons) de la coupe (*figure 2, N° encadré*), parfois à 2 ou 3 niveaux du même horizon, par exemple : pour la coulée de basalte inférieure, dans la lave prismatique inaltérée et dans la lave sphéroïdale altérée ; pour le paléosol rouge à la base et au sommet ; pour la coulée

basaltique supérieure dans le noyau inaltéré et dans le cortex altéré des boules. L'analyse a été faite sur une poudre de l'échantillon finement broyé et séché à l'air.

Méthodes d'analyse

Les analyses chimiques et minéralogiques décrites ci-après ont été réalisées par le Laboratoire des Sols du Département de Géologie et Pédologie de l'Université de La Laguna de Tenerife (Espagne).

Analyses chimiques

1/ La perte au feu a été obtenue par calcination au four à 1000°C. L'analyse totale des éléments majeurs a été effectuée après fusion par le métaborate-tétraborate de lithium par dosage par spectrométrie d'absorption atomique ; les résultats (*tableau 1*) d'analyse élémentaire ont été exprimés après standardisation en % d'oxydes anhydres ; en outre ont été calculés les rapports entre certains éléments, par exemple Fe/Al, ou certains rapports moléculaires, tels que $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ (Ki) et $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Kr). Ces résultats ont permis de déterminer la composition des familles de matériaux volcaniques originels d'après la méthode de Rittmann (1963, clé n° III).

2/ Propriétés chimiques des altérites et des sols ; les analyses « classiques » suivantes ont été faites (selon les méthodes du Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, España, 1994) : pH eau, KCl et éventuellement Na F ; Bases échangeables et CEC par l'acétate d'ammonium pH 7 ; CaCO_3 ; C organique. En outre, pour déterminer les critères andiques sur le BRUNISOL et 2 altérites (tuf brun violacé et lahar ponceux) : capacité de rétention du phosphore ; Al, Fe et Si extractibles par l'oxalate d'ammonium (Blakemore *et al.*, 1981) et éventuellement par le pyrophosphate de sodium (pH 10).

Analyses minéralogiques

Les analyses minéralogiques ont été obtenues par : diffraction de Rayons X (Co, $\text{K}\alpha$) sur poudre de matériau broyé finement et séché à l'air, pour déterminer les minéraux primaires, les oxydes de fer et éventuellement la calcite ; ensuite la détermination qualitative et semi quantitative des minéraux argileux a été faite sur poudre non orientée, puis sur agrégats orientés (poudre lissée), sans traitement (normal, séché air), ou avec traitement : déshydratation à l'étuve à 105°C, gonflement à l'éthylène-glycol, calcination au four à 500°C. L'interprétation des diagrammes de diffraction de rayons X a été faite suivant les recommandations de Robert (1975). En outre quelques observations ont été faites en Microscopie Electronique par transmission (TEM) sur des extraits d'argiles pour déterminer la forme des particules d'argile (kaolinite, halloysite, illite, smectites).

RÉSULTATS

Composition chimique totale des matériaux en éléments majeurs et mineurs

Composition en éléments majeurs et nature des matériaux volcaniques originels

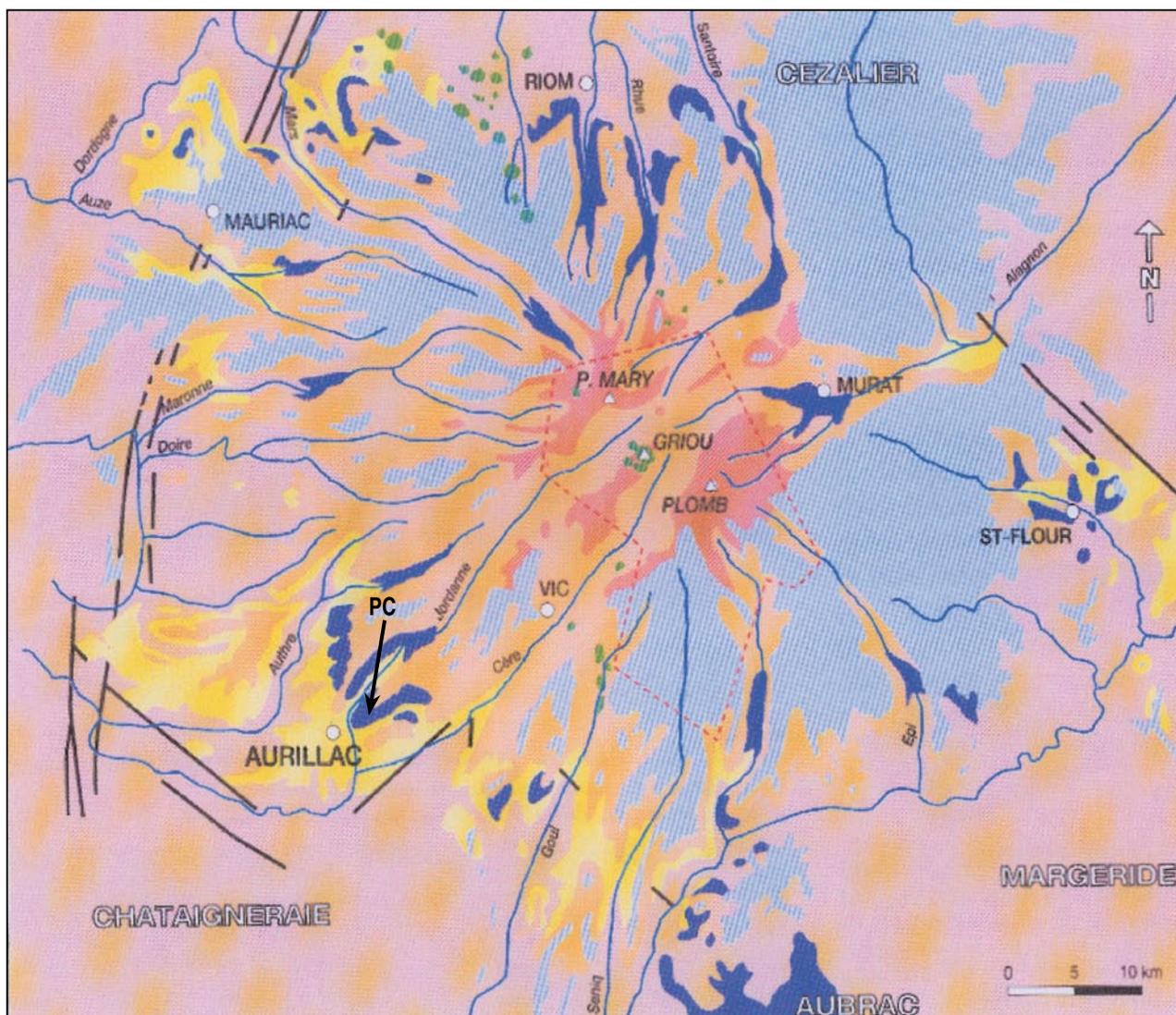
La perte au feu de chaque matériau, le plus souvent inorganique, (*tableau 1*) est généralement un bon indicateur de son degré d'altération, qui est fonction de la composition et de la quantité de minéraux argileux néoformés. Cette perte au feu se situe entre 5 et 10 % dans le basalte « inaltéré » ou peu altéré, tandis qu'elle atteint entre 11 et 17 % dans les autres produits volcaniques plus ou moins altérés, tels que : l'altérite verte, la cinérite brune, le tuf brun violacé, le lahar ponceux et même le cortex des boules du basalte supérieur. Cette perte est étonnamment élevée dans les matériaux paraissant peu altérés *in situ*, où elle atteint 16 à 17 % dans le sable gris clair (volcano-sédimentaire), 13 à 14 % dans le lahar ponceux. Mais dans les sols, matériaux plus altérés, la perte au feu est nettement plus élevée, atteignant près de 20 % dans le BRUNISOL actuel, 21 à 22 % dans le paléosol rouge.

Famille magmatique des matériaux volcaniques originels

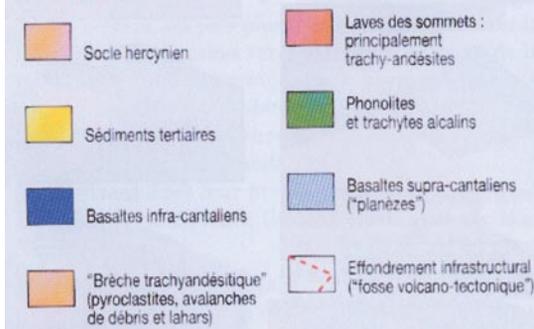
La méthode de Rittmann (1963, clé III) de détermination des familles de matériaux volcaniques, appliquée à l'analyse chimique élémentaire totale (*tableau 1*), a permis, en dépit d'une altération de certains de ces matériaux, de mettre en évidence trois séries magmatiques successives :

1^{re} Série : (1) Basanite infra-cantaliennne ; la composition de l'échantillon au sommet de la coulée s'apparentant à un trachybasalte - (2) Altérite verte dérivant probablement du trachybasalte sous-jacent - (3) Paléosol rouge ; la richesse en silice s'accroissant vers le haut du sol en relation avec la présence de quartz (déterminée par diffraction de rayons X), ce qui suggère une évolution à partir d'un matériau pyroclastique à composition de trachybasalte quartzifère (sakalavite ?) déposé au dessus de l'altérite verte.

2^e Série : Au dessus du paléosol rouge, les dépôts de la série explosive trachytique du Cantal ont pour la plupart une composition de latite quartzifère. Cependant l'altérite brun rouge (4.1), la cinérite brune (4.2) et les graviers de lave noire (4.2 R) sont apparentés à des latites quartzifères sombres, proches de trachyandésites. Tandis qu'au dessus, le sable gris clair (5), le tuf brun violacé (6) et le lahar ponceux (7) sont des latites quartzifères claires proches de rhyodacites. Au sommet de la série, la brèche (8), située en dessous du basalte supérieur, a une composition apparentée à une trachyandésite claire à labrador (non quartzifère).

Figure 1 - Massif volcanique du Cantal et situation de Puy Courny (→PC) près d'Aurillac (d'après de Goër & Mergoïl, 1971).**Figure 1** - Volcanic Massif of Cantal and location of Puy Courny (→PC) near Aurillac (from de Goër & Mergoïl, 1971).

Carte simplifiée du stratovolcan cantalien.



PC Puy Courny

3^e Série : Le basalte supra-cantalien a une composition chimique proche de celle du basalte infracantalien analysé, c'est-à-dire d'un trachybasalte.

4^e Série : Le sédiment périglaciaire, matériau parental du sol holocène actuel, est un mélange des matériaux basaltiques et trachytiques altérés.

Evolution de la composition chimique globale

La teneur en éléments majeurs (en % d'oxydes anhydres, *tableau 1*) et les rapports entre quelques éléments (Fe/Al, Fe/Ti, Mg/Ca, Mg+Ca/Na+K) et les rapports moléculaires Ki ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) et Kr ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$) peuvent être mis en relation avec la nature des matériaux originels, basaltiques ou trachytiques. Par exemple les matériaux basaltiques contiennent moins de Si et plus de Mg,



Photo 1 : coupe partielle montrant de bas en haut: le paléosol rouge recouvert par l'altérite brun rouge et la cinérite brune à galets de lave altérée; le sable gris clair; le tuf brun violacé; le lahar ponceux sous le basalte peu visible
Partial cut showing from the bottom to the top : red fersiallitic paleosol, reddish brown « alterite »; brown « cinerite » with weathered lava gravels; light gray sand; brownish purple tuff; pumiceous « lahar » and basalt

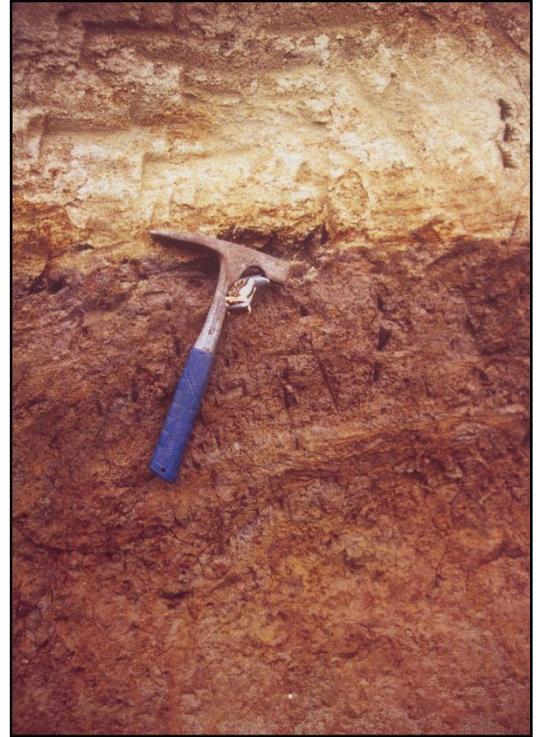


Photo 2 : Altérite verte surmontant le basalte inférieur (détail)
Green « alterite » of trachybasalt (detail)

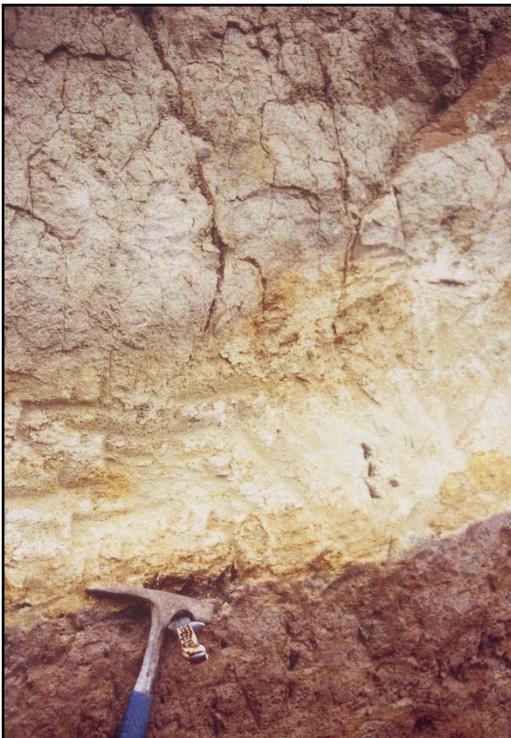


Photo 3 : Cinérite brune recouverte par le sable gris clair et le tuf brun violacé (détail)
Brown « cinerite »; light gray sand; brownish purple tuff

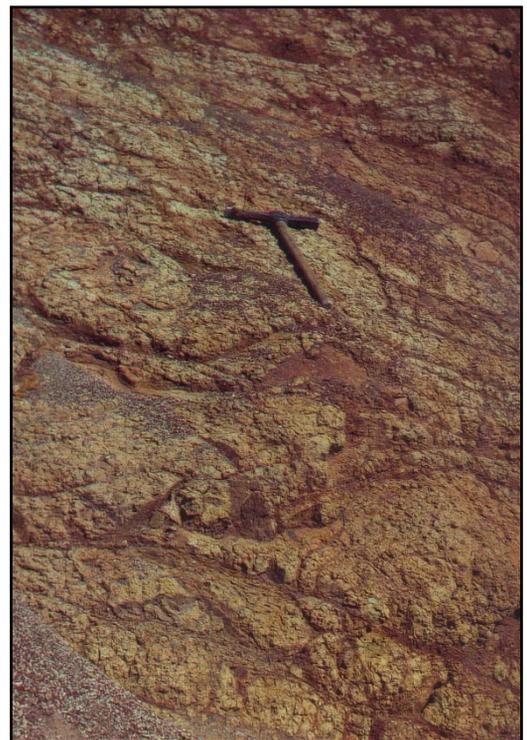


Photo 4 : Détail du paléosol rouge)
Red fersiallitic paleosol (detail)

Figure 2 - Coupe de Puy Courny: matériaux volcaniques, altérites, paléosol et BRUNISOL.

Figure 2 - Cut of Puy Courny: volcanic materials, alterites, paleosol and BRUNISOL (Cambisol).

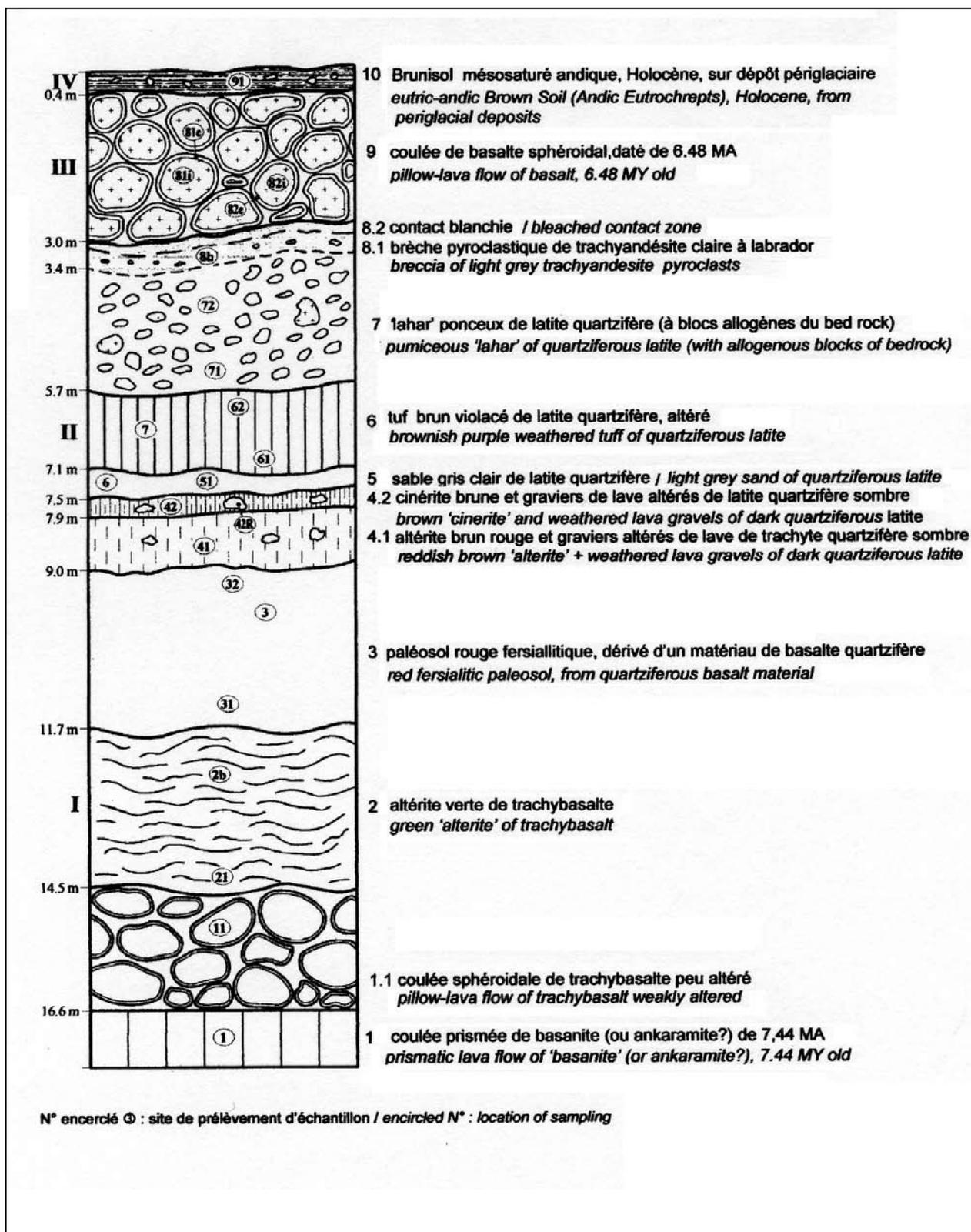


Tableau 1 - Analyse totale d'éléments majeurs, en % de poids anhydre.**Table 1** - Major elements total analysis, in % of anhydrous weight.

Ech. N°	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI *	Fe/Al **	Fe/Ti**	Mg/Ca **	Mg+Ca/Na+K **	Na/K **	Ki ***	Kr
1	45,74	13,47	11,64	0,20	7,55	12,87	2,41	1,69	3,03	1,08	5,76	0,86	3,84	0,59	4,98	1,43	5,77	3,72
11	46,62	14,98	12,61	0,18	5,20	13,05	1,78	1,06	3,38	1,13	8,65	0,84	3,73	0,40	6,42	1,68	5,29	3,44
21	47,61	17,21	17,27	0,12	4,59	5,65	1,24	1,16	3,83	1,32	17,01	1,00	4,51	0,81	4,27	1,07	4,70	2,87
2b	43,98	20,52	20,95	0,16	1,57	3,42	0,78	1,17	4,62	1,65	19,3	1,02	4,53	0,46	2,55	0,67	3,64	2,21
31	42,90	26,61	23,07	0,27	0,67	0,93	0,05	0,14	4,91	0,45	21,16	0,87	4,70	0,72	8,42	0,36	2,74	1,77
3	46,12	25,58	21,44	0,08	0,59	0,83	0,08	0,27	4,55	0,47	21,97	0,84	4,71	0,71	4,06	0,30	3,07	2,00
32	51,75	23,26	19,14	0,12	0,50	0,70	0,07	0,31	3,78	0,36	15,61	0,82	5,06	0,71	3,16	0,23	3,78	2,48
41	56,61	20,95	15,90	0,28	0,73	0,88	0,15	0,46	3,77	0,28	16,6	0,76	4,22	0,83	2,64	0,33	4,59	3,10
42	58,77	14,94	17,64	1,58	0,74	0,99	0,39	0,84	3,91	0,21	13,43	1,18	4,51	0,75	1,41	0,46	6,69	3,82
42R	59,04	14,86	17,45	1,54	0,72	0,99	0,41	0,88	3,90	0,20	13,43	1,17	4,47	0,73	1,33	0,47	6,75	3,86
5	64,90	19,01	4,92	0,05	2,06	1,96	3,17	3,42	0,46	0,05	15,99	0,26	10,70	1,05	0,61	0,93	5,80	4,98
6	54,98	15,94	20,84	1,40	0,68	0,87	0,37	0,81	3,83	0,27	17,41	1,31	5,44	0,78	1,31	0,46	5,86	3,20
62	56,52	21,79	8,96	0,21	1,48	2,98	3,12	2,95	1,95	0,15	10,87	0,41	4,59	0,50	0,73	1,06	4,41	3,49
71	63,62	18,50	8,05	0,09	1,89	2,14	1,51	2,24	1,70	0,27	14,25	0,44	4,74	0,88	1,07	0,67	5,85	4,58
72	61,28	20,23	8,62	0,15	1,75	1,82	1,79	2,47	1,63	0,25	13,18	0,43	5,29	0,96	0,84	0,72	5,15	4,05
8b	55,65	17,37	6,26	0,15	1,37	11,90	2,64	3,11	1,27	0,26	15,82	0,36	4,93	0,12	2,31	0,85	5,45	4,43
81 i	44,17	13,76	12,46	0,26	9,28	12,96	1,32	1,51	3,17	1,12	5,22	0,91	3,93	0,72	7,86	0,87	5,46	3,46
81e	44,14	14,52	15,12	0,26	7,03	12,81	1,01	0,50	3,48	1,15	8,68	1,04	4,34	0,55	13,14	2,02	5,17	3,11
82 i	43,67	16,88	13,36	0,17	6,64	12,82	0,93	0,30	3,85	1,38	9,64	0,79	3,47	0,52	14,63	3,10	4,40	2,92
82 e	45,05	17,97	16,68	0,11	5,23	9,42	0,80	0,45	4,05	1,40	12,98	0,93	4,12	0,56	11,72	1,78	4,26	2,68
91	53,31	17,95	13,27	0,28	4,12	4,64	1,14	1,53	3,08	0,67	19,65	0,74	4,31	0,89	3,28	0,75	5,05	3,43

Poids anhydre : normalisé en %, après soustraction de H₂O (LOI). LOI* : perte au feu en % du poids d'échantillon séché à l'air

** oxydes : Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, MgO, CaO, Na₂O, K₂O. *** rapport moléculaire : Ki = SiO₂/Al₂O₃; Kr = SiO₂/Al₂O₃+Fe₂O₃

Correspondance entre N° d'échantillon et les horizons dans l'ordre du bas vers le haut de la coupe :

Horizon : 1- basalte inférieur -/- Echantillon N°	1 : basalte prismé ; 11 : basalte sphéroïdal	-/- Horizon : 9- basalte supérieur -/- Echantillon N°	81i-82i : noyau inaltéré
2- altérite verte	21 : base, 2b : sommet de l'altérite verte		81e-82e : cortex altéré
3- paléosol rouge	31 : base, 3 : milieu, 32 : sommet du paléosol	10- BRUNISOL	91 : horizon S des BRUNISOLS
4.1- altérite brun rouge ;	41 : altérite brun rouge ;		
4.2- cinérite brune	42 : cinérite brune et 42R : gravier de lave		
5- sable gris clair	5 : sable gris clair		
6- tuf brun violacé	6 : milieu et 62 : sommet du tuf		
7- lahar ponceux	71 : base et 72 : sommet du lahar		
8- brèche de rhyodacite	8b : brèche		

Ca et P que les pyroclastes trachytiques. Cependant la teneur en éléments alcalins et même en Ti est plutôt élevée dans la plupart des matériaux volcaniques des trois séries.

La composition chimique de chaque matériau évolue en fonction de l'intensité de son altération. Ainsi, le paléosol rouge (n° 3), a les valeurs les plus faibles de rapports moléculaires Ki et Kr (respectivement 2,7 et 2,1), ainsi qu'en éléments Mg, Ca, Na et K, et au contraire les plus élevées en Al, Fe et Ti, ainsi que pour la perte au feu (22 %). Ceci indique le stade le plus achevé de l'altération

dans la coupe du Puy Courmy. Cependant au sommet du paléosol (échantillon 3.2) une augmentation en Si (à 52 %) et corrélativement des rapports Ki et Kr (à 3,8 et 2,5) révèlent, non pas une altération moindre, mais un enrichissement en quartz du matériau parental (voir plus loin minéralogie).

En comparaison avec le paléosol rouge, le BRUNISOL (échantillon n° 91), est bien moins altéré, en relation avec des teneurs plus élevées aussi bien en Si (53 %) qu'en éléments alcalins et des valeurs plus grandes des rapports Ki et Kr (5,0 et 3,4), alors que la

Tableau 2 - Analyse totale d'éléments mineurs en ppm de l'échantillon séché à l'air.**Table 2** - Minor elements total analysis in ppm of air dried sample.

Echantillon N°	Horizon, Matériau volcanique	Ba	Sr	Y	Sc	Zr	Be	V
1	basalte inférieur	660	958	30	25	265	2	234
2b	altérite verte	596	245	46	30	329	3	267
3	paléosol rouge	156	69	24	32	389	3	281
6	sable gris clair	345	156	16	3	346	4	35
7	tuf brun violacé	346	83	35	21	415	3	266
8b	brèche	522	281	27	7	324	3	95

perte au feu est presque la même (20 %), à cause probablement de sa teneur en matière organique.

Il est à noter que l'altérite verte (n° 21), développée à partir du basalte inférieur, aussi bien que le sable gris clair (n° 6) et le lahar ponceux (n° 71) conservent la majeure partie de leur silice initiale et de leurs éléments alcalins, en dépit d'une perte au feu élevée (respectivement 17, 16 et 14 %). Ceci suggère une altération *in situ*, presque sans lixiviation de ces constituants, au contraire d'une altération météorique dans un sol, comme le paléosol rouge ou le BRUNISOL.

Eléments mineurs

Quelques éléments mineurs (tableau 2) ont été déterminés sur certains matériaux. Le basalte inférieur, roche basique, a des teneurs élevées en Ba et Sr. L'altérite verte, supposée en dériver, contient autant de Ba, mais 4 fois moins de Sr et un peu plus de Zr et de V. Le paléosol rouge, supposé dériver de l'altérite verte, contient 3,8 fois moins de Ba et 3,6 fois moins de Sr, mais un peu plus de Zr et de V ; cela peut être l'effet de l'altération (ou d'un matériau parental moins basique). Le tuf brun violacé, dérivé d'un pyroclaste trachytique contient 1,7 fois moins de Ba et 3 fois moins de Sr que l'altérite verte, mais un peu plus de Zr. La brèche de trachyandésite à labrador, sous le basalte supérieur, a des teneurs comparables à celles de l'altérite verte en Ba, Sr et Zr, donc d'un matériau plus basique que la série trachytique antérieure.

Composition minéralogique

La composition minéralogique a été déterminée grâce à l'analyse des diagrammes de diffraction de rayons X, certaines observations en microscopie électronique en transmission (MET) et la dissolution chimique différentielle des constituants non cristallins ou paracristallins. Ceci a permis d'identifier et d'évaluer de façon semi-quantitative les minéraux primaires, les minéraux argileux, les oxyhydroxydes de fer, la calcite, l'allophane et la ferrhydrite, dont les résultats sont les suivants.

Minéraux primaires

Le tableau 3 résume l'interprétation des diagrammes de diffraction de Rayons X effectués sur poudre.

Cette analyse contribue à préciser la nature des différents matériaux volcaniques de chaque série, à savoir :

Série I : Basalte infra-cantalien

1. Coulée de basanite : On y trouve beaucoup de labrador et d'augite ; un peu de biotite et de titanomagnétite ; pas d'olivine ni de feldspathoïde ; elle serait donc plutôt apparentée à une ankaramite (Jung 1958).
2. Altérite verte : le labrador, l'augite et la titanomagnétite restent importants à la base de l'altérite, mais l'augite disparaît à proximité du sommet de cet horizon ;
3. Paléosol rouge : les feldspaths et le pyroxène disparaissent, mais la titanomagnétite reste présente ; le quartz apparaît puis augmente depuis 5 à 10 % à la base jusqu'à près de 30 % au sommet du paléosol, montrant une transition sous forme de sakalavite (Jung 1958) entre la série basaltique et les séries trachytiques.

Série II : Explosive et trachytique

- 4.1 et 4.2 Altérite brun rouge et cinérite brune : elles contiennent beaucoup de quartz et seulement des traces de feldspaths et de micas ; mais les graviers de lave (4.2 R), en inclusion, ont une teneur modérée en feldspaths et un peu de micas ;
5. Sable gris clair : il contient beaucoup de quartz et a une teneur modérée en feldspaths ;
6. Tuf brun violacé : il contient beaucoup de quartz et a une teneur modérée en feldspaths ; celle-ci augmente vers le sommet avec apparition d'un peu de mica ;
7. Lahar ponceux : il contient beaucoup de quartz et de feldspaths et un peu de micas ;
8. Brèche : elle contient beaucoup de feldspaths et de micas, mais pas de quartz ;

Dans les dépôts de latite quartzifère (5, 6 et 7), les feldspaths

Tableau 3 - Composition en minéraux primaires, oxydes secondaires et calcite.**Table 3** - Composition of primary minerals, secondary oxides and calcite.

Matériaux volcaniques ou sols successifs		Silice et silicates				Oxydes et calcite				
		Q	F	Au	Mi	Ma	Go	Hé	Fe	Ca
Sol brun-andique	horizon B	+++	++		+	tr			+	
Basalte supérieur	cortex altéré		+	++	+	+				
	cœur inaltéré		++	+++		+				
Lahar ponceux	brèche sup.		++		++					
	milieu	++	++		+					
	base	+++	++		+					
Tuf brun-violet	sommet	+++	++++		+					
	base	++++	++							
Sable blanc pyroclastique		++++	++							
Cinérite brune	lave	++++	++		+					
	cinérite	++++	tr		+	tr				
Altérite brun-rouge		++++				tr	+			
Paléosol rouge	sommet	+++				tr	+	+		
	milieu	+				+	+	+		
	base	+				+	+	tr		
Altérite verte	sommet		+	tr						
	base		+	+		+				tr
Basalte inférieur	boule altérée		++	++	+	+				

tr traces ; + un peu ; ++ moyen ; +++ beaucoup ; ++++ très abondant - Q Quartz ; F Felspaths ; Au Augite ; Mi Micas ; Ma Magnétite ; Go Goethite ; Hé Hématite ; Fe Ferrihydrite ; Ca Calcite

sont un mélange d'anorthose (sodi-potassique) et de plagioclase. Le sable gris clair (5) a une composition similaire à celle du tuf brun violacé qui le recouvre (6) et à celle du lahar ponceux (7) ; ce qui suggère une même origine magmatique, tandis que la brèche (8) est bien différente (absence de quartz) et s'apparente à une trachyandésite claire à labrador.

Série III : Basalte supra-cantalien

9. Coulée de basalte : on y trouve beaucoup de labrador et d'augite, un peu de biotite et de titanomagnétite ; l'absence d'olivine l'apparente donc à une ankaramite ;

Série IV : Dépôts périglaciaires.

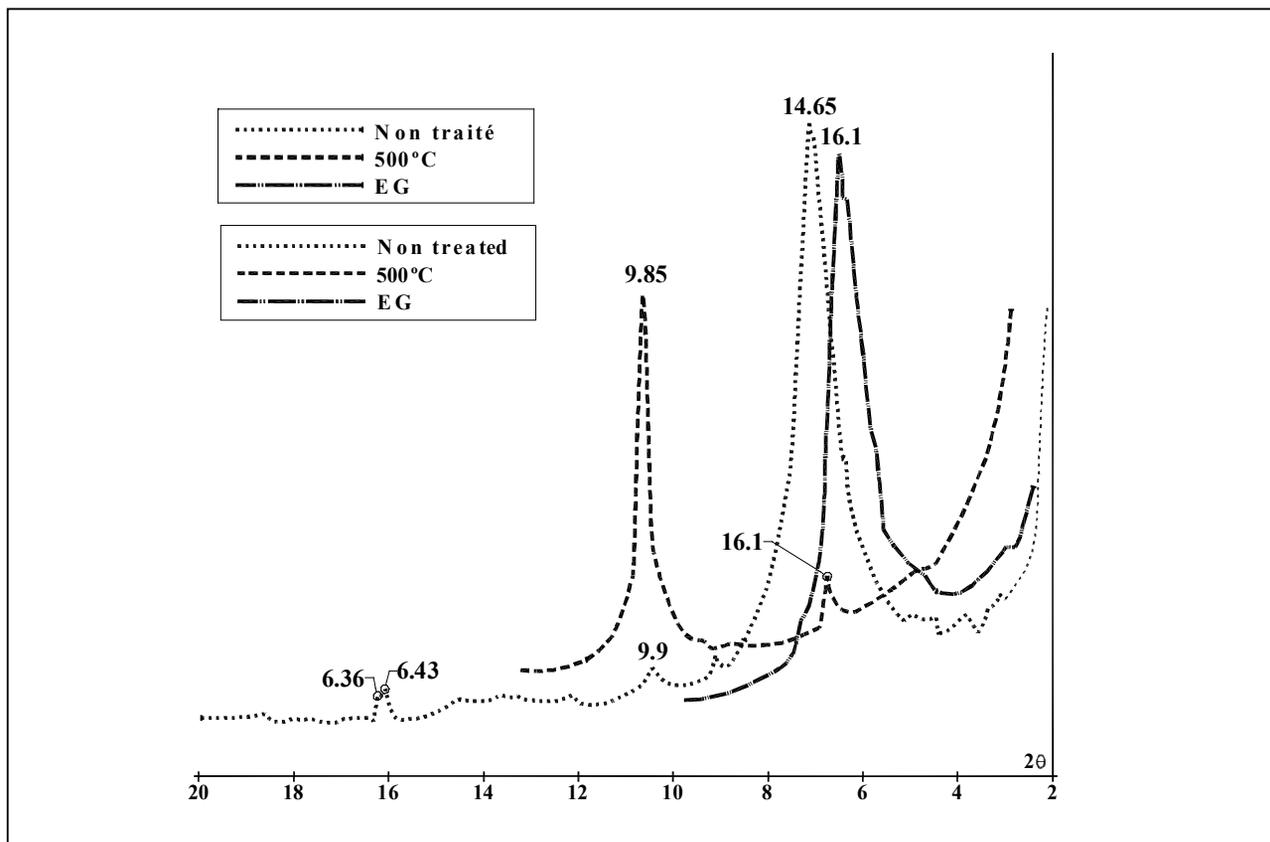
10. BRUNISOL : le sol actuel contient beaucoup de quartz et de feldspaths, un peu de micas et des traces de titanomagnétite ; cette composition suggère un mélange des minéraux primaires des matériaux sous-jacents (basaltes, trachyandésites et latites quartzifères).

En résumé, la composition des minéraux primaires précise l'interprétation de la composition chimique globale, notamment : le basalte inférieur est plutôt apparenté à une ankaramite qu'à une basanite ; le matériau parental du paléosol rouge est un basalte quartzifère, proche d'une sakalavite ; la série trachytique explosive est quartzifère, à l'exception de la brèche entre le lahar ponceux et le basalte supérieur.

Minéraux argileux, oxyhydroxydes secondaires et carbonates

Détermination des minéraux argileux

Quelques figures (figures 3 à 7) montrent des diagrammes de diffraction de rayons X représentatifs de la détermination des minéraux argileux sur des cas exemplaires. Le tableau 4 résume l'interprétation des diagrammes de rayons X sur des agrégats orientés de l'échantillon séché à l'air, puis déshydraté

Figure 3 - Diagrammes de diffraction de rayons X (Co $\kappa\alpha$, en Å) sur agrégat orienté d'argile de l'altérite verte (n°21).**Figure 3** - XRD (Co $\kappa\alpha$, in Å) pattern from oriented clay fraction of the green alterite (n°21).

à 105°C, ou traité à l'éthylène glycol, ou calciné à 500°C. Tous les échantillons étaient naturellement presque saturés en cation Ca^{2+} . Dans le cas des minéraux argileux 2/1, le faible déplacement du pic de diffraction (raie basale 001) de 15 à 16 Å (*figure 3*) après traitement à l'éthylène-glycol, qui manifeste un faible gonflement (H_2O interfoliaire), peut être attribué, s'agissant d'une argile calcique, à la vermiculite (Robert 1975). Un comportement intermédiaire entre vermiculite et smectite a été interprété comme interstratifié vermiculite/smectite (ou une transition d'altération). Dans le cas d'une smectite typique le déplacement de la raie de diffraction 001 après traitement à l'éthylène-glycol est de 14,5 à 18 Å. Mais une argile 2/1 gonflante, caractérisée par une large bande de diffraction de 14 à 17 Å a été considérée comme « désordonnée » (*figure 5*), par exemple dans la cinérite brune, voire « très désordonnée » (*figure 4*), notamment dans le paléosol rouge. Les argiles 1/1 caractérisées par un pic de diffraction étroit, proche de 7,2 Å (raie basale 001) ont été appelées kaolinite désordonnée (*figure 4*) ; dans ce cas de fines plaquettes hexagonales sont observées en MET. Mais avec un large pic de 7,5 à 8 Å, une part de cette argile est considérée comme étant une halloysite déshydratée ; dans ce

cas effectivement des plaquettes enroulées (en fuseau ou en sphère) ont été observées en MET.

Des oxydes secondaires de fer, goéthite et hématite, et de la calcite, ont été déterminés sur les diagrammes de poudre (*tableau 3*).

Enfin, la présence d'alophaane et de ferrihydrite dans le BRUNISOL a été déduite de l'analyse chimique des propriétés andiques par extraction à l'oxalate d'ammonium (*tableau 5*).

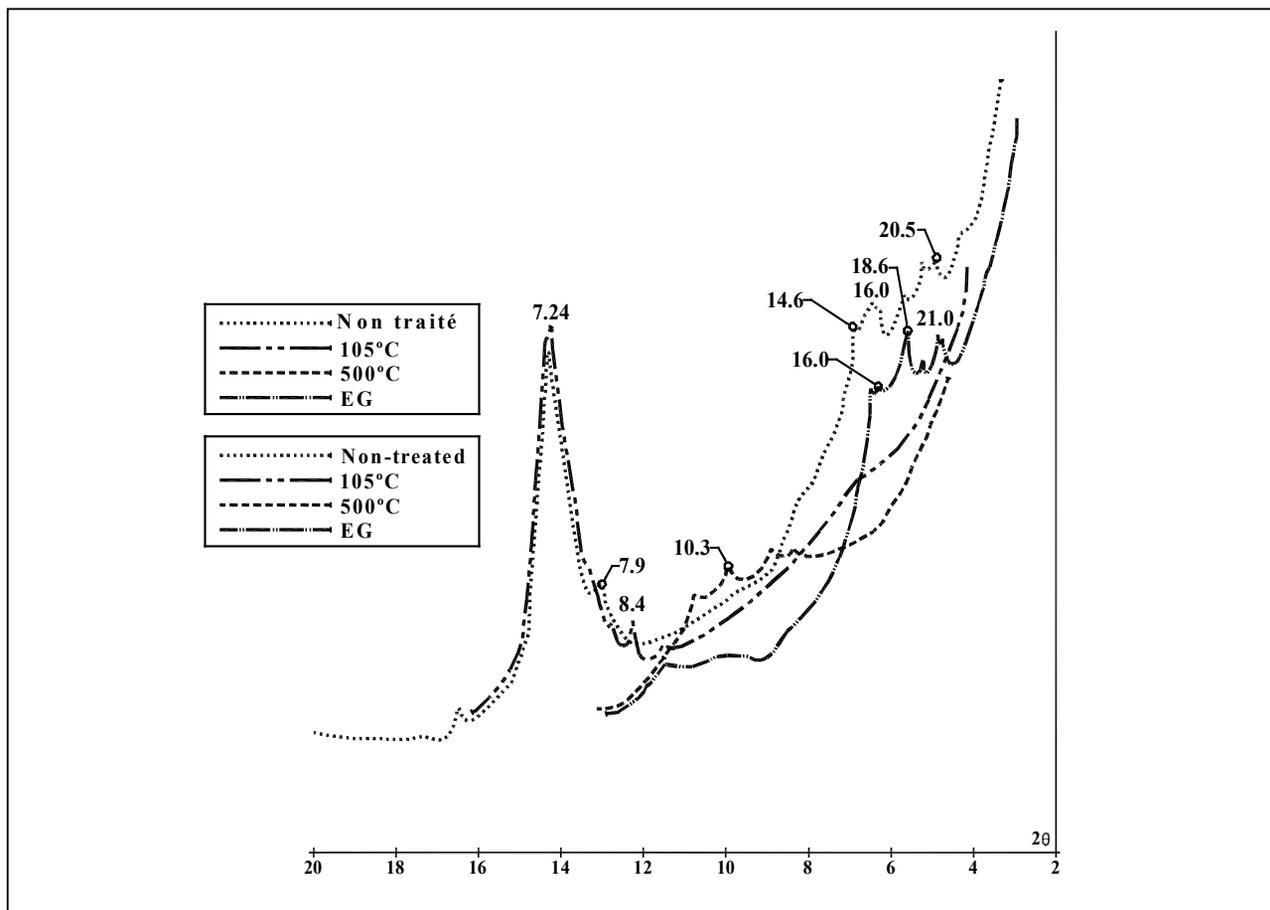
Composition des minéraux argileux dans les altérites et les sols de bas en haut de la coupe

Le *tableau 4* et les *figures 3 à 7* mettent en évidence une succession de plusieurs groupes de minéraux argileux, en suivant la chronoséquence des matériaux volcaniques du bas vers le haut de la coupe du Puy Courny (*figure 2*) :

1^{er} groupe : L'altération initiale du basalte sphéroïdal de la coulée infra-cantalienne est caractérisée par une vermiculite bien cristallisée, qui est très développée (*figure 3*) à la base de l'altérite verte (avec traces de calcite), puis se transforme en un minéral interstratifié vermiculite/smectite et un peu d'halloysite 7 Å au sommet de l'altérite verte.

Figure 4 - Diagrammes de diffraction de rayons X (Co $\kappa\alpha$, en Å) sur agrégat orienté d'argile du paléosol rouge (n°31).

Figure 4 - XRD (Co $\kappa\alpha$, in Å) pattern from oriented clay fraction of the red paleosoil (n°31).



2^e groupe : Dans le paléosol rouge (*figure 4*) l'argile 1/1, constituée d'un mélange de kaolinite désordonnée et d'halloysite 7 Å, est associée à une part modérée de goéthite et d'hématite, ainsi qu'un peu d'une argile 2/1 « très désordonnée ». On note que l'halloysite 7 Å est abondante à la base de l'horizon, alors que la kaolinite désordonnée prédomine à son sommet. Un accroissement de la teneur en quartz accompagne cette évolution.

3^e groupe : Dans les altérites de la série explosive trachytique deux types de composition des minéraux argileux sont caractérisés par :

1. Une vermiculite bien cristallisée dans le sable gris clair et le lahar ponceux (*figure 6*), où elle évolue en interstratifié vermiculite/smectite et un peu d'halloysite à 7 Å vers le sommet du lahar ;
2. Une argile gonflante 2/1 « désordonnée », proche d'une smectite, et un peu d'illite et d'halloysite 7 Å dans la cinérite brune (*figure 5*) et le tuf brun violacé. L'altérite brun rouge contient plus d'halloysite 7 Å que la cinérite brune et en plus un peu de goéthite, montrant une transition vers le paléosol rouge ;

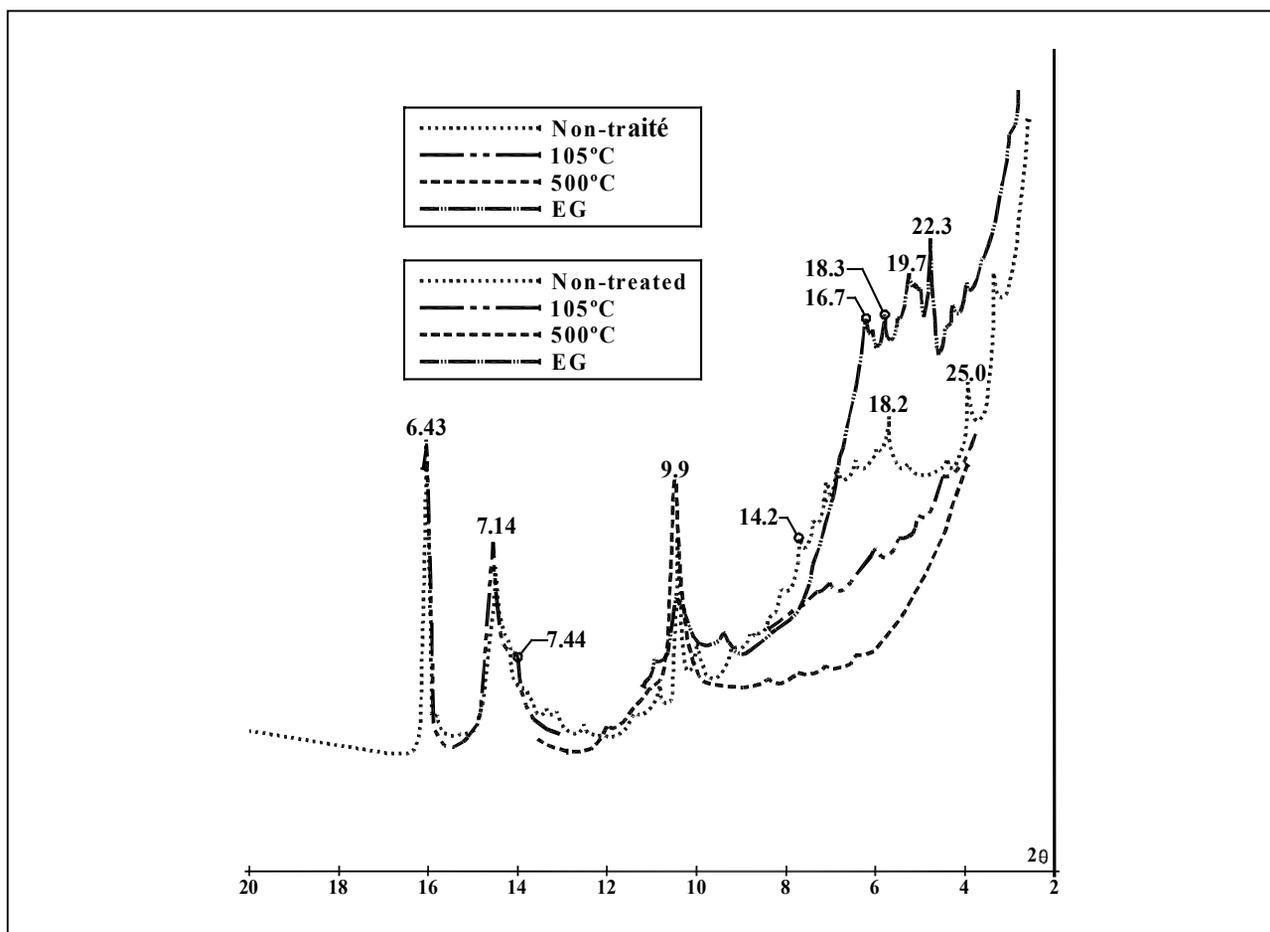
Au dessus du lahar ponceux dans la brèche on observe un mélange d'illite et d'argile 2/1 « désordonnée » ainsi que l'absence de vermiculite ; ce qui distingue cette formation de celle du lahar ponceux.

4^e groupe : Dans le cortex altéré du basalte sphéroïdal de la coulée supra-cantalienne un interstratifié vermiculite/smectite ;

5^e groupe : Dans le BRUNISOL (*figure 7*), on identifie en abondance une argile 2/1 un peu désordonnée, mais très proche d'une smectite, ainsi qu'un peu d'halloysite 7 Å et des traces d'illite. A partir de l'analyse chimique sélective des minéraux non cristallins ou paracristallins dissous par l'oxalate d'ammonium (*tableau 3*), une faible teneur en allophane et ferrihydrite y a été déterminée.

Propriétés chimiques des sols et altérites

Les principales caractéristiques chimiques des altérites et des sols, présentées dans le *tableau 5*, ainsi que certains critères andiques dans le *tableau 6*, sont les suivantes :

Figure 5 - Diagrammes de diffraction de rayons X (Co $k\alpha$, en Å) sur agrégat orienté d'argile de l'altérite de cinérite brune (n° 42.2).**Figure 5** - XRD (Co $k\alpha$, in Å) pattern from oriented clay fraction of the brown cinerite alterite (n° 42.2).

1. pH : Le pH (H_2O) est faiblement acide (6,2) dans le BRUNISOL, tandis qu'il est alcalin (7,5 à 8,8) dans les altérites sous-jacentes et même dans le paléosol rouge (7,6-7,7). Il s'élève jusqu'à 8,6-8,8 à la base de la coupe dans l'altérite verte et le basalte altéré sous-jacent, où il y a des traces de calcite.

2. ΔpH (pH KCl – pH H_2O) : Cette valeur est négative et élevée dans les sols comme dans les altérites. Ceci confirme la présence de minéraux argileux à hautes charges permanentes, tels que vermiculite, smectites et halloysite, même dans le paléosol rouge.

3. pH NaF : La valeur varie de 8,8 jusqu'à 10. Cette valeur est plus élevée en présence d'allophane dans la fraction argileuse ; ainsi dans le BRUNISOL elle est de 9,1 ; mais dans le paléosol rouge et certaines altérites des valeurs de 9,6 à 10 sont probablement dues à des traces de calcite (visibles sur le terrain).

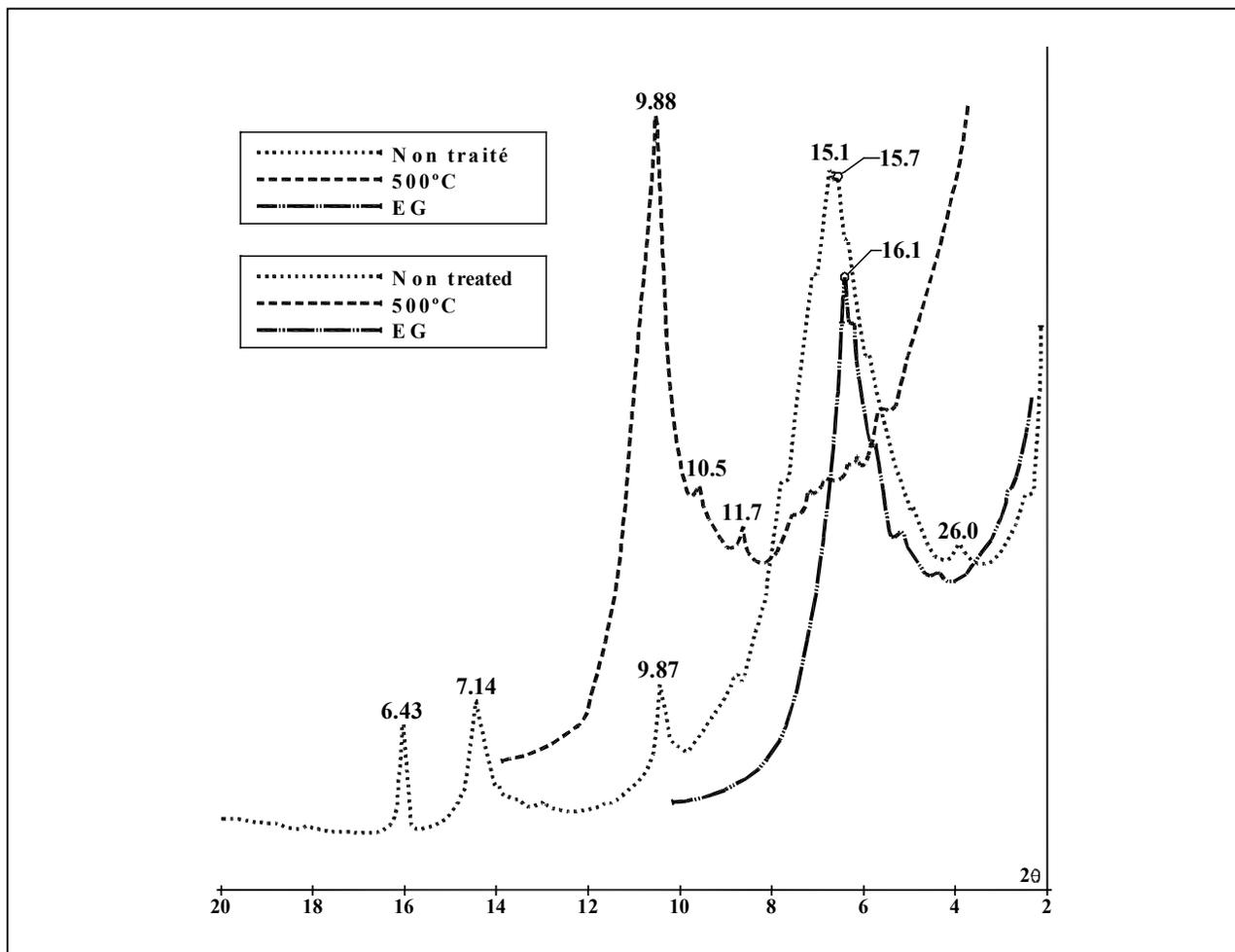
4. Carbone organique : Il est seulement présent dans l'horizon S (seul analysé) du BRUNISOL. On note des traces de carbone dans l'altérite brun rouge (0,18 %) et dans le tuf brun violacé (0,1 %), mais pas dans le paléosol rouge, où du carbone organique n'a pas été détecté !

5. Bases échangeables et CEC : Les valeurs de CEC sont élevées dans presque tous les horizons, aussi bien dans le BRUNISOL que dans le paléosol rouge et toutes les altérites, en relation avec une teneur importante en minéraux argileux à forte charge permanente. La CEC est particulièrement élevée dans les altérites riches en vermiculite : 61 $cmol.kg^{-1}$ pour l'altérite verte ; 39-42 $cmol.kg^{-1}$ pour le lahar ponceux. Elle l'est également dans le BRUNISOL riche en smectites (48,5 $cmol.kg^{-1}$) et même dans le paléosol rouge (39,7 $cmol.kg^{-1}$), où la présence importante d'halloysite est ainsi confirmée. La somme des bases échangeables est élevée dans tous les horizons, ainsi que le taux de saturation en bases : 89 à 98 % dans les altérites, 80 % dans le BRUNISOL et même 72 à 83 % dans le paléosol rouge. Le cation Ca^{2+} est prédominant ; mais il y a une part notable en Mg^{2+} (2-10 $cmol.kg^{-1}$) et en K^+ (06-2,8 $cmol.kg^{-1}$), même dans le paléosol. Ceci suggère une recharge en cations basiques à partir des solutions de sol, consécutive à une altération très active des matériaux volcaniques dans l'ensemble de la coupe. Mg^{2+} et K^+ sont à relier à la présence de smectites et de vermiculite.

6. $CaCO_3$: La fraction altérée de la coulée basaltique inférieure

Figure 6 - Diagrammes de diffraction de rayons X (Co $\kappa\alpha$, en Å) sur agrégat orienté d'argile du lahar ponceux (n° 7).

Figure 6 - XRD (Co $\kappa\alpha$, in Å) pattern from oriented clay fraction of the pumiceous lahar (n° 7).



(éch. n° 11) et de l'altérite verte (éch. n°21) contient respectivement 2,2 et 1 % de calcite sous forme de calcite pulvérulente. Une poudre de calcite a aussi été observée dans la brèche au dessus du lahar ponceux. La présence de calcite poudreuse peut expliquer les valeurs élevées du pH (H₂O) et du pH (NaF) dans l'altérite verte et le basalte altéré sous-jacent.

7. Critères andiques : Dans le BRUNISOL (éch. 9), les critères « andiques », tels que $Al_o + 1/2Fe_o$ proche de 1 % et rétention de P de 49 % (tableau 6), sont proches de la limite inférieure pour admettre un intergrade andique de BRUNISOL. Ce sol contient seulement 0,6 % d'allophane (Si_o 0,16 %), mais aussi près de 2 % de ferrihydrite (Fe_o 1,1 %). En outre il ne contient que des traces de Al_p et de Fe_p, extraits au pyrophosphate de Na susceptibles de provenir de complexes organiques ; mais la présence notable de Si_p extrait par le pyrophosphate suggère que Al_p provient d'une argile en suspension plutôt que d'un complexe organique (O-Al). Dans les altérites, le tuf brun violacé et le lahar ponceux ne

contiennent respectivement que 0,2 et 0,4 % d'allophane, 0,5 et 0,8 % de ferrihydrite.

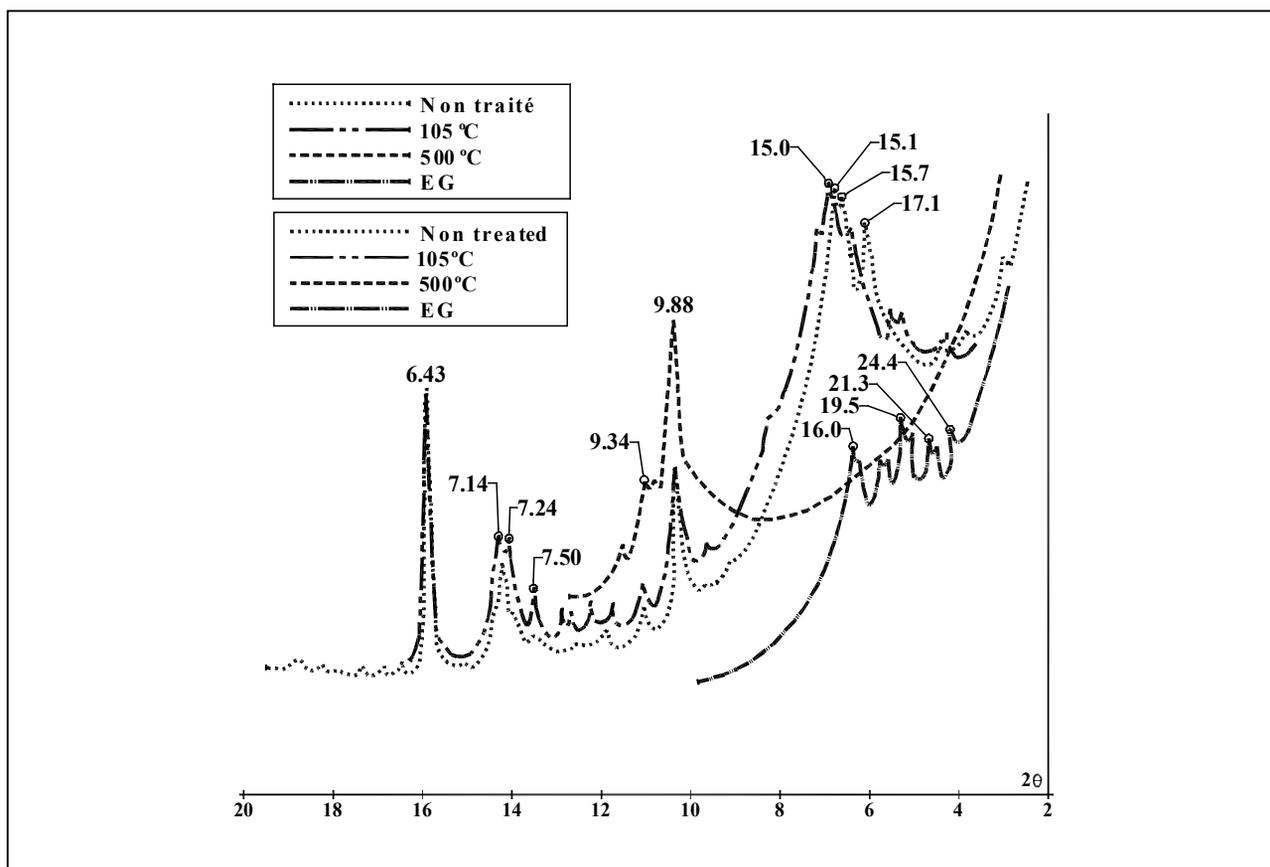
DISCUSSION

Ces nouveaux résultats conduisent à réviser les connaissances antérieures sur les points suivants :

1. la nature et la succession des dépôts volcaniques ;
2. les différents types d'altérites ;
3. le paléosol rouge ;
4. le BRUNISOL actuel.

Nature et succession des dépôts volcaniques

Trois périodes d'activité volcanique peuvent être distinguées dans cette coupe chronoséquentielle des dépôts volcaniques

Figure 7 - Diagrammes de diffraction de rayons X (Co $\alpha\alpha$, en Å) sur agrégat orienté d'argile du BRUNISOL (n° 91).**Figure 7** - XRD (Co $\alpha\alpha$, in Å) pattern from oriented clay fraction of the BRUNISOL (Cambisol) (n° 91).

du Puy Courny durant le Miocène terminal, de 7,44 à 6,48 MA : 1), la coulée basaltique infra-cantalienne ; 2), les séries explosives cantaliennes, de nature pyroclastique, à latites quartzifères ; 3), la coulée basaltique supra-cantalienne.

La première période comporte probablement deux phases : la coulée inférieure, dite de basanite, suivie probablement par un dépôt (pyroclastique) de basalte quartzifère (sakalavite), à l'origine du paléosol rouge. A noter que la partie supérieure de la coulée prismée et du basalte sphéroïdal, à l'origine de l'altérite verte et à la base de la coupe du Puy Courny, est plutôt une ankaramite qu'une basanite.

La deuxième période comporte deux phases explosives principales : d'abord celle de latite quartzifère sombre, proche d'une trachyandésite ; puis celle de latite quartzifère claire. Mais cette série est coiffée par la brèche de trachyandésite claire à labrador (sans quartz), qui fait transition avec le basalte supra-cantalien.

La troisième période se caractérise par une coulée basaltique sphéroïdale, proche d'une ankaramite, présentant un faciès hydro-magmatique.

Le sable gris clair était considéré par Autran et Peterlongo

(1980) comme un épisode sédimentaire fossilifère entre la période infra-cantalienne d'épanchement de la coulée de « basanite » prismée et la période cantalienne explosive et pyroclastique. Mais, en raison de sa situation entre la phase de dépôts de latite sombre et ceux de latite claire, et de sa composition, il s'agit très probablement d'un flux pyroclastique, au début de la phase de latite claire.

L'altérite brun rouge et la cinérite brune, non observées auparavant, étaient confondues avec le sommet du paléosol rouge. Mais elles se distinguent nettement du paléosol rouge sous-jacent par : une couleur plus sombre, une texture litée et friable, et par l'inclusions de lave sombre incomplètement altérée à composition de latite quartzifère. Cette lave contient en abondance du quartz et un peu de plagioclases, ainsi que des minéraux argileux 2/1 gonflants. La cinérite brune contient aussi beaucoup de quartz et de smectite désordonnée, ainsi qu'un peu d'illite et d'hallyosite 7 Å et des traces de feldspath.

Au contraire, le paléosol se caractérise par : une couleur rouge, une texture très compacte et une structure polyédrique, une altération complète des minéraux altérables du matériau

Tableau 4 - Composition semi quantitative des minéraux argileux.**Table 4** - Clay minerals composition.

Matériaux volcaniques ou sols successifs		argiles 1/1		argiles 2/1 di ou trioctaédriques					
		Kd	Ht	I	V	V-Sm	Sm	2/1d	2/1td
BRUNISOL (andique)	horizon S		+	tr			+++		
Basalte supérieur	cortex très altéré			tr		++			
	cortex peu altéré					+			
	cœur inaltéré					tr			
Lahar ponceux	brèche supérieure		tr	++				++	
	milieu		+	+		+++			
	bas			+	++++				
Tuf brun-violet	sommet		+	+				++	
	bas		+	tr				+	
Sable blanc pyroclastique	fossilifère				++++				
Cinérîte brune	lave altérée		+	+				++	
	cinérîte altérée		+	+				++	
Altérîte brun-rouge			++	+				++	
Paléosol rouge	sommet	+++	+						+
	milieu	++	++						+
	bas	++	++						+
Altérîte verte	sommet		+			+++			
	bas				++++				
Basalte inférieur	boule altérée			+	++				

tr traces ; + un peu ; ++ moyen ; +++ abondant ; ++++ très abondant

Kd kaolinite désordonnée ; Ht halloysite à 7 Å ; I illite ; V vermiculite ; V-Sm vermiculite-smectite ; Sm smectite ; 2/1d désordonnée gonflante ; 2/1td très désordonnée

parental et surtout par la composition des minéraux argileux, essentiellement d'argiles 1/1 (kaolinite et halloysite 7 Å), de goethite et d'hématite. Ce fait suggère que le sol rouge a été formé pendant une longue période d'altération en climat chaud et humide, avant la seconde période d'activité volcanique explosive. En outre, en dessous du paléosol rouge dans l'altérîte verte, on observe une transition d'altération de la vermiculite en interstratifié vermiculite-smectite et en halloysite 7 Å. Cependant, parce que le sol rouge contient du quartz en quantité notable dès sa base et croissante vers son sommet, on en conclut qu'il ne dérive ni de l'altérîte verte, ni du basalte infracantalien, mais probablement d'une émission plus tardive d'un basalte quartzifère, sous forme ou d'une lave scoriacée ou d'un matériau pyroclastique, l'un et l'autre plus aisément altérables qu'une coulée de lave compacte.

La période d'altération pour obtenir ce sol rouge compacté peut être estimée en fonction de son épaisseur - (3m) et de sa densité

apparente. Pour un matériau pyroclastique (cendre ou lapilli) très perméable et de faible densité apparente, le temps d'altération a été estimé à 10 000 ans par mètre (Quantin, 1992). Pour y parvenir, pour un matériau compact et de densité apparente 3 fois supérieure tel que le matériau rouge compacté, il faudrait envisager, sachant qu'il s'est produit une perte de 50 à 60 % de matériau originel altérable (hors quartz), une période d'altération d'au moins 100 000 ans, voire plus.

Deux types d'altérîtes

Les altérîtes étudiées conservent la texture initiale du matériau volcanique originel ; elles ne présentent donc pas la structure d'un sol et en outre ne contiennent pas de carbone organique, ou seulement des traces.

Deux types d'altérîtes sont distinguées selon le degré d'ordre ou de désordre de leurs minéraux argileux produits par l'altération

du matériau originel : la première, constituée d'une argile 2/1 ou 2/1 bien cristallisée de type vermiculite ou smectite, appelée « pré-météorique » ; la seconde, appelée « météorique », comportant des argiles 2/1 gonflantes désordonnées, proches de smectites, et un peu d'halloysite 7 Å. En effet, les argiles formées dans les sols en conditions thermodynamiques instables sont rarement bien cristallisées. Ainsi on observe au sommet de l'altérite verte et du lahar ponceux une transformation de la vermiculite bien cristallisée en interstratifié irrégulier vermiculite/smectite et la formation d'halloysite 7 Å.

Altérite prémétéorique

Le cortex altéré du basalte sphéroïdal de la coulée infracantalienne et l'altérite verte sus-jacente, ainsi que le sable gris clair et le lahar ponceux de la série explosive cantalienne, sont caractérisés aussi bien par l'abondance d'une vermiculite bien cristallisée que par la faible modification de la composition chimique relativement au matériau parental et par l'absence de carbone organique. C'est pourquoi l'hypothèse est proposée d'une altération hydrothermale en milieu confiné (sans percolation) consécutive à une éruption hydromagmatique. L'altération en smectite du cortex des boules du basalte supra-cantalien peut être aussi prémétéorique, comme l'a observé Ildefonse (1983) dans le basalte de Belbex (Cantal). Dans ce cas, comme dans celui du basalte sphéroïdal infracantalien et peut-être l'altérite verte et le lahar ponceux, dans un matériau consolidé et très peu perméable, une altération préalable hydromagmatique, si elle a eu lieu, a pu être poursuivie en milieu « confiné » par une altération très lente (quasiment sans percolation, ou très faible, des solutions d'altération). En revanche l'altération de la vermiculite en interstratifié irrégulier vermiculite/smectite et en halloysite 7 Å, aussi bien qu'une modification évidente de la composition chimique (perte de silice et d'éléments basiques) au sommet de l'altérite verte, témoignent d'une altération ultérieure, probablement météorique.

Altérite météorique

Le tuf brun violacé, la cinérite brune et l'altérite brun rouge sont caractérisés par la présence importante d'argile 2/1 gonflante et désordonnée, proche de smectites, ainsi qu'une part notable d'halloysite 7 Å. La présence de tels minéraux argileux désordonnés, comme dans les sols, suggère l'effet d'un processus d'altération progressif sous l'effet d'une lente percolation d'eau de pluie (avec percolation des solutions d'altération). Mais ces altérites ne contiennent pas, ou seulement des traces, de carbone organique et conservent la texture du matériau originel ; ce ne sont donc pas des paléosols.

Paléosol rouge

Il est caractérisé par une altération totale des minéraux altérables (sauf quartz et oxydes stables) en halloysite 7 Å, kaolinite

désordonnée, goethite et hématite, et cependant avec un faible résidu d'une argile 2/1 « très désordonnée ». Cette composition des minéraux argileux, ainsi que la couleur rouge et la structure polyédrique, quoique compacte, sont similaires à celles des sols rouges, proches des sols ferrallitiques, actuellement observés sur des coulées de basalte quaternaires et sous climat tropical humide avec une très courte saison sèche (régime udic de la Soil Taxonomy), par exemple au Vanuatu (Quantin 1992). Dans le cas cité, il s'agit d'un processus d'altération sous un régime de pluie de 2500 à 3500 mm/an et avec une libre percolation des eaux pluviales. Cependant, le manque de carbone organique pose une question : le sol rouge du Puy Courny est-il un paléosol ou non ? Ou bien la matière organique a été complètement minéralisée après 7 millions d'années, ou bien la partie supérieure du sol a été érodée par l'éruption volcanique explosive postérieure, laissant seulement l'altérite (saproлите), qui était située à la partie inférieure du sol ? A noter que la teneur actuellement élevée en bases échangeables du sol rouge est probablement due à un apport récent en cations calco-alcalins à partir des solutions d'altération des altérites et du sol qui le recouvrent.

Le BRUNISOL

Il ne dérive pas du basalte supra-cantalien, mais d'un sédiment colluvio-éolien périglaciaire, déposé à la fin de la dernière glaciation. Ce matériau est un mélange de produits pré-altérés ou météoriques des séries éruptives 2 (latites quartzifères) et 3 (coulées de trachybasaltes et trachyandésites). Il inclut de nombreux graviers et blocs de lave sombre peu altérés des coulées sous-jacentes. Sa composition minéralogique se caractérise par l'abondance du quartz et de divers feldspaths, et un peu de micas dans la fraction sableuse, ainsi que par un mélange en prédominance de smectites un peu désordonnées et un peu d'illite et d'halloysite 7 Å dans la fraction argileuse. Le sol, faiblement acide et saturé à 80 % en bases échangeables, est doté de faibles propriétés andiques ($Al_0+1/2 Fe_0$ proche de 1 % ; rétention de P = 49 %). Ces critères de diagnostic et la présence d'un horizon S structural conduisent à la classification suivante :

- Référentiel Pédologique Français (1995) : BRUNISOL mésosaturé, intergrade andique, d'âge holocène, développé sur un sédiment périglaciaire d'altérites de matériaux volcaniques du Miocène terminal ;
- World Reference Base for Soils Resources, FAO, WRB, 2001 : Eutric Cambisol, (proche d'intergrade andic) ; - FAO, 2006 : Eutric Haplic Cambisol, (proche de Eutric Andic Cambisol) ;
- U.S. Soil Taxonomy, USDA, 1994 : Typic Eutrochrept (proche de andic) ; - USDA, 2003 : Typic Eutrudept (proche de andic).

Des sols semblables, de type Brun eutrophe (CPCS, 1967) à faibles caractères andiques, ont été observés par Moineau (1977) sur les basaltes miocènes du plateau des Coirons, au sud-est du Massif Central, où ils ont subi une érosion périglaciaire. D'autres, en région tropicale humide, au Vanuatu

Tableau 5 - Propriétés chimiques du BRUNISOL, du paléosol rouge et des altérites.**Table 5** - Chemical properties of the BRUNISOL (Cambisol), the red paleosol and the alterites.

Echantillon N°	pH					CaCO ₃ %	C org. %	N %	Capacité d'échange cationique CEC (cmol.kg ⁻¹)						Taux de saturation en bases ΣB/CEC %
	H ₂ O	KCl	ΔpH	NaF 2'	NaF 60'				Ca	Mg	K	Na	Σ Bases		
11	8,8	7,5	1,3	9,8	10,4	2,2	nd	nd	17,3	2,6	0,9	0,2	23,5	21,0	89,4
21	8,6	6,7	1,9	9,9	10,3	1,0	0,03	nd	53,8	4,2	1,4	0,2	60,7	59,6	98,2
2b	7,7	6,2	1,5			nd	0,05	nd	28,9	2,8	0,73	0,14	43,0	32,57	75,7
31	7,6	6,2	1,4	9,6	10,1	nd	0,02	0,02	24,2	3,3	1,0	0,2	39,7	28,7	72,3
3	7,8	6,3	1,5			nd	0,05	0,02	18,1	2,2	0,41	0,09	24,9	20,8	83,5
32	7,7	6,2	1,5	9,6	10,0	nd	0,03	0,02	16,2	2,0	0,7	0,2	22,9	19,1	83,4
41	7,5	6,2	1,3	9,2	9,8	nd	0,18	0,02	20,6	3,3	0,9	0,2	27,1	25,0	92,2
42	7,7	6,4	1,3	9,3	9,6	nd	nd	nd	19,0	2,9	0,8	0,2	25,7	22,9	89,1
6	8,1	6,9	1,2			nd	0,03	nd	31,6	4,6	0,26	0,16	39,7	36,62	92,2
62	8,1	6,4	1,7	10,0	10,4	nd	0,10	0,01	19,5	4,6	0,9	0,2	28,7	25,4	88,5
71	7,7	6,1	1,6	9,6	10,1	nd	0,02	nd	32,0	7,1	1,1	0,3	41,4	40,5	97,8
72	6,7	4,8	1,9	8,8	9,1	nd	0,06	0,01	28,3	6,6	0,6	0,4	39,2	35,9	91,6
91	6,2	4,8	1,4	9,1	9,6	nd	1,70	0,19	25,1	10,4	2,8	0,3	48,5	38,6	79,6

Correspondance entre N° d'échantillon et les horizons dans l'ordre du bas vers le haut de la coupe :

Horizon : 1- basalte inférieur

2- altérite verte

3- paléosol rouge

4.1- altérite brun rouge

4.2- cinérite brune

5- sable gris clair

6- tuf brun violacé

7- lahar ponceux

10- BRUNISOL

nd : non détecté

Echantillon N° : 11- basalte sphéroïdal altéré

21- base et 2b- sommet de l'altérite verte

31- base, 3- milieu et 32- sommet du paléosol

41- altérite brun rouge

42- cinérite brune

6- sable gris clair

62- sommet du tuf

71- base; 72- sommet du lahar

91- horizon S du BRUNISOL

(Quantin, 1992), se sont formés sur des coulées de basaltes miocènes, mais uniquement sur des reliefs fortement rajeunis par une surrection tectonique rapide.

CONCLUSION

Les principales conclusions de cette nouvelle étude de la coupe chronoséquentielle de dépôts volcaniques miocènes du Puy Courmy concernent successivement : les séquences de matériaux volcaniques, les types d'altérites et enfin le sol actuel et le paléosol rouge.

Séquences volcaniques

Elles comportent trois séries successives entre 7,44 et 6,48 MA, au Miocène terminal : la coulée de lave basaltique infra-cantalienne, les éruptions explosives cantaliennes de latites quartzifères et la coulée basaltique supra-cantalienne.

Le sable « gris clair » n'est pas situé entre la première et la deuxième série éruptive et n'est probablement pas d'origine sédimentaire, mais serait un dépôt pyroclastique. La limite entre les deux séries éruptives est probablement au-dessus du paléosol rouge et en-dessous du flux pyroclastique de latite sombre (altérite brun rouge et cinérite brune).

Tableau 6 - Critères chimiques andiques du BRUNISOL et de deux altérites.**Table 6** - Andic chemical criteria of the BRUNISOL (Cambisol) and of two 'alterites'.

Echantillon N°	P rét. %	Extraits Oxalate %				Extraits Pyrophosphate %			
		Al _o	Fe _o	Si _o	Al _o +1/2Fe _o	Al _p	Fe _p	Si _p	Al _p /Al _o
2b		0,17	1,04	0,09	0,69				
3		0,06	0,51	0,21	0,31				
6		0,08	0,19	0,09	0,17				
61		0,11	0,27	0,05	0,24	0,15	0,04	0,44	1,36
7		0,03	0,95	0,01	0,51				
72		0,18	0,41	0,12	0,38	0,12	0,50	1,21	0,66
91	49	0,42	1,10	0,16	0,97	0,22	0,17	0,35	0,52

2b : altérite verte ; 3 : paléosol rouge ; 6 : sable gris clair ; 61 et 7 : base et milieu du tuf brun violacé ; 72 : lahar ponceux ; 91 : BRUNISOL

Altérites de matériaux volcaniques

Présumées non pédogénétiques, elles sont de deux types : prémétéoriques et météoriques.

Les altérations prémétéoriques sont caractérisées par des minéraux argileux bien cristallisés tels que vermiculite ou smectites. Elles se seraient probablement développées en condition hydro-magmatique lors du dépôt, puis peuvent avoir été partiellement soumises à l'altération météorique dans la partie supérieure du dépôt. C'est le cas notamment de l'altérite verte du basalte infra-cantalien et du lahar ponceux de la série explosive cantalienne. Dans le basalte supra-cantalien les smectites du cortex des boules pourraient s'être formées d'abord en condition hydromagmatique, puis très lentement en « milieu confiné » (très faible percolation des solutions).

Les altérations météoriques sont caractérisées par des argiles « désordonnées », telles que smectites désordonnées et halloysite 7 Å. Elles se seraient probablement formées après le dépôt, par un lent processus d'altération *in situ* en condition de lente percolation d'eau de pluie, mais sans formation d'un sol.

Paléosol rouge

Le paléosol rouge est de type fersiallitique, proche du type ferralitique, compte tenu de l'altération totale des minéraux altérables du matériau parental en halloysite 7 Å, kaolinite désordonnée, goéthite et hématite, et en un peu d'argile 2/1 « très désordonnée ». Ce sol s'est développé au Miocène terminal durant une longue période d'altération météorique (probablement plus de 100 000 ans), en condition de climat chaud et humide, avec une courte saison sèche (pluviométrie d'au moins 2 000 mm/an). Le matériau parental n'était probablement pas l'altérite verte du basalte infra-cantalien, mais un trachybasalte quartzifère (sakalavite) et peut-être sous une forme

scoriacée ou pyroclastique, plus facilement altérable qu'une lave massive. Cependant la question demeure ouverte de savoir si ce matériau argileux rouge, apparenté à un sol fersiallitique, est bien un paléosol, sinon une paléo-altérite.

BRUNISOL

Le sol actuel, d'âge holocène, est un BRUNISOL MÉSOSATURÉ, proche d'un intergrade andique. Il s'est développé à partir d'un sédiment périglaciaire provenant des matériaux volcaniques sous-jacents du Miocène terminal, qui ont été préalablement altérés en condition prémétéorique ou météorique, tels que latites quartzifères, trachybasaltes et trachyandésites. Ce sol s'est formé en condition de climat tempéré humide.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement l'équipe du Laboratoire d'analyse des sols du département de Pédologie de l'Université de La Laguna (Tenerife, Espagne), pour sa contribution à l'analyse des matériaux volcaniques et des sols.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES, 1995 - Référentiel pédologique. INRA Ed., Paris, 332 p.
- Autran A. et Peterlongo J.M., 1980 - Ancienne carrière de Puy Courny à Aurillac : Succession des épisodes cantaliens. *In* : Introduction à la géologie du Massif Central, 26° C.G.I., Paris, 1980. Rev. Sci. Nat. Auvergne, Clermont-Ferrand, 45 - pp. 116-117.
- Bellon H., Brousse, R., Lambert A., Corneu, G., le Garel M.J., Maury, R., Pesme M.F., Blais S., Larroque, P. et Beaudaigne P., 1972 - Longue activité du Massif du Cantal, de 21 à 3.8 millions d'années. C.R. Ac. Sc. Paris, 274 -D, pp.2409-2412.
- Blakemore, L.C., Searle, P.L. et Daly, B.K., 1981 - Soil Bureau Laboratory Methods. A : Methods for chemical analysis of soils. New Zealand Soil Bureau Scientific Report 10A. CSIRO, New Zealand.
- Brousse R., Heinz E., Park F.Y. et Bellon H., 1975 - Gisement, faune et géochronologie du Puy Courny (Cantal, France). Géol. Méditerranéenne, II,3 - pp. 135-142.
- Chesworth W., Dejou J., de Kimpe Ch., Macias-Vasquez F., Cantagrel J.M., Larroque P., Garcia-Rodeja E. et Quantin P., 1983 - Etude de paléosols rouges développés sur les basaltes miocènes du Massif Central français. Principales caractéristiques physico-chimiques de ces pédogenèses. Cah. ORSTOM, Pédologie, XX, 3 - pp. 189-208.
- COST Action 622, 2001 - Soil genesis and land use of Auvergne volcanic systems. *In* guide book, workshop in Auvergne, 30 May – 3 June 2001.
- Dejou J., Larroque P. et Pierre G., 1992 - Présence de niveaux rouges sur basaltes ou intercalés entre coulées dans le Massif Central français. Revue Haute-Auvergne, Aurillac, 4 - pp. 302-310.
- De Goër A. et Mergoil J., 1971 - Structure et dynamique des édifices volcaniques tertiaires et quaternaires. Symposium J. Jung : Géologie, géomorphologie et structure profonde du Massif Central français. Plein Air Service Ed., Clermont-Ferrand, pp. 345-376.
- De Goër de Hervé A., 1995 - Le Cantal. *In* : Volcanisme et volcans d'Auvergne. La dépêche scientifique du Parc Naturel Régional des volcans d'Auvergne, n° 8-9 - pp. 32-35.
- Erhart H., 1940 - Sur l'évolution des basaltes miocènes du Cantal et sur la nature des sols qui en dérivent. C.R. Ac. Sc., Paris, 210 - pp. 537-539.
- FAO, WRB, 2001 - Lecture notes on the major soils of the world. World Soil Resources Report n° 94, FAO, Rome, 334 p.
- FAO, IUSS Working Group WRB, 2006 - World reference base for soils resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication. World Soil Resources Report n° 103, FAO, Rome, 128 p.
- Gaiffe M., Dejou J., Kübler B., Bech-Borras J., Mayenoble Ch. et Adatte Th., 1999 - Occurrence of a red paleosol very close to the ferrallitic type developed on a miocenic basanite, at Puy Courny, near Aurillac (Cantal, France). 6th Int. Meeting on soils with Mediterranean type of climate, Trans. Sect. III. Soils genesis - pp. 571-573.
- Gibert J.P., 1973 - Mise en évidence d'une altération de type ferrallitique au Miocène terminal au sud du Cantal. C.R. Ac. Sc. Paris, 277 -D - pp. 545-547.
- Hétier, J.M., 1975 - Formation et évolution des Andosols en climat tempéré. Thèse, Université Nancy I, 185 p.
- ldefonse P., 1983 - Altérations prémétéoriques et altérations météoriques des olivines du basalte de Belbex (Cantal, France). *Int* ; Coll. CNRS Pétrologie des altérations, Paris 1983.
- Jung, J., 1958 - Précis de pétrographie. Roches sédimentaires, métamorphiques et éruptives. Masson et Cie Ed., Paris.
- Lapadu-Hargues, P., 1963 - Les basaltes du Puy Courny près d'Aurillac (Cantal). Etude pétrographique et magmatique. C.R. 89° Congr. Soc. Savantes, Clermont-Ferrand, III - pp. 125 -130.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, 1994 - Métodos Oficiales de Análisis. Tomo III, 662 p.
- Moinereau J., 1977 - Altération des roches, formation et évolution des sols sur basalte, sous climat tempéré humide (Velay, Vivarais, Coirons). Thèse, Univ. Sc. et Tech. Du Languedoc, Montpellier, 139 p.
- Park F.Y., 1973 - Contribution à l'étude du Cantal. Dolomies et trachyandésites dans la région d'Aurillac. Thèse 3^e Cycle, Université d'Orsay, 204 p.
- Pierre G. et Dejou J., 1990 - Nature et genèse des formations rouges intrabasaliques et limite de leur signification paléoclimatique (Cantal et Velay, Massif Central français). Rev. Géomorphologie dynamique, Strasbourg, XXXIX, 3 - pp. 81-96.
- Quantin P., 1992 - Les sols de l'Archipel volcanique des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu). ORSTOM, Paris, Coll. Etudes et Thèses.
- Rittmann A., 1963 - Les volcans et leur activité. Masson, Paris.
- Robert, M., 1975 - Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des rayons X. Problèmes particuliers posés par les minéraux argileux les plus fréquents dans les sols des régions tempérées. Annal. Agro., INRA Paris, 26, 4 - pp. 363-399.
- USDA, 1994 - Keys to Soil Taxonomy, by Soil Survey Staff. U. S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, 6th Edition, 1994.
- USDA, 2003 - Keys to Soil Taxonomy. 9th Edition, 2003, by Soil Survey Staff. USDA, Natural Resources Conservation Service.