

Présence d'un sol fersiallitique développé sur gneiss et fossilisé par une coulée basaltique dans le massif du Cantal

M. Gaiffe⁽¹⁾, J. Dejou⁽²⁾, B. Kübler⁽³⁾ et M. Caillier⁽⁴⁾

(1) 35, rue des Brosses, 25000 BESANÇON, France

(2) 1, rue des Raux, 15250 JUSSAC, France

(3) Université de Neuchâtel, 11 rue Emile Argand, CH 2007 NEUCHÂTEL, Suisse

(4) Université Laval, Département des sols, SAINTE-FOY, Québec, G1K 7P4, Canada

RÉSUMÉ

Sur le versant droit de la vallée de l'Authre, tout près de Vercuères (Cantal), à une vingtaine de kilomètres au N-E d'Aurillac, on observe un niveau rouge de 80 à 100 cm développé sur gneiss. Il est lui-même fossilisé par une coulée basaltique située à la base de la puissante formation des brèches trachyandésitiques d'âge miocène qui occupent l'ensemble du versant.

La couleur de cette formation est rouge vif: 2,5 YR 3/6 dans la zone 10-40 cm et 2,5YR4/8 à sa base (60-80 cm). Ses principales caractéristiques sont les suivantes: pH basique par suite de la présence de calcite secondaire due à la percolation des eaux au travers des brèches et du basalte sus-jacents; phase 0-20 µm supérieure à 45 % dans l'ensemble du profil et constituée de minéraux argileux 2/1 et 1/1; complexe d'échange saturé; évolution géochimique globale marquée par le départ de Na⁺ et K⁺ et par un enrichissement en Ca²⁺ et Mg²⁺ provenant du basalte.

Il existe une filiation génétique très nette entre gneiss, zone d'altération de cette roche et niveau rouge, ce qui justifie l'appellation de sol pour ce dernier. Ses caractéristiques permettent de le situer dans le domaine fersiallitique, parmi les Fersialsols Calciques. Ce paléosol pourrait correspondre à un horizon B épais, après troncature de l'horizon A.

A notre connaissance, il est le premier observé sur substrat métamorphique dans le Cantal, tous ceux décrits à ce jour étant développés sur basaltes miocènes.

Mots clés

Paléosol fersiallitique – Gneiss – Miocène – Cantal -Minéralogie

SUMMARY**OCCURRENCE OF A FERIALLITIC SOIL DEVELOPED ON GNEISS AND FOSSILIZED BY A BASALTIC LAVA FLOW IN THE CANTAL MASSIF**

Numerous paleopedological red horizons were described on or between basaltic lava flows in the strato-volcano of the Cantal. Recently, a red soil, developed on gneiss, was discovered near Vercuères. It presents the following levels: the non-weathered gneiss (R) is covered by a gneissic arena, then the red formation (2,5YR 4/8) with weathered pebbles that become smaller and less common towards the upper part. This soil is covered by a 1 m thick basaltic lava flow.

There is a progressive increase of fine particles size fraction (silt and clay) from the gneiss to the top of the soil. Throughout the profile, the pH is higher than neutral and the exchange complex is saturated. These observations can be explained by the water percolating through the basalt, that contains a high amount of Ca^{2+} , Mg^{2+} and also some calcite.

Mineralogical and geochemical evolution of the material in the soil profile were also investigated by XRD, in order to provide an overview of the pedological dynamics.

In the $< 2 \mu\text{m}$ fraction, smectite decreases from the top to the bottom whereas kaolinite increases. The presence of calcite, found in this fraction only, indicates probably a pedological origin.

The whole soil mineralogy indicates a discontinuity between the upper layers, dominated by smectite with no kaolinite, and the lower ones where smectite decreases in relation to the increase of kaolinite and K-feldspar. Another discontinuity in the quartz and micas content, could indicate an allochthonic origin for some of the material.

The geochemical evolution, from the rock to the top of the soil was compared with that of other soils in the Cantal area, developed on basalt. Parker's index is lower in the soil developed on gneiss than in those developed on basalt, but the secondary enrichment in Ca and Mg, coming from the overlying basalt layer did facilitate an important lowering of the index.

This red soil, older than 10,1 MY, and different by its gneissic substrate from the other red soils from Cantal of similar age, demonstrates the climatic extension of fersiallitisatation during this period. In addition, this soil that appears to correspond essentially to a thick B horizon, presents some original features: a potential pollution by exogenous elements, a continuous enrichment by the percolating water and, consequently, a fersiallitisatation that remains limited and non typical, with a maximal amount of kaolinite in the lower part.

Key-words

Fersiallitic paleosol – Gneiss – Miocene age – Cantal – Mineralogy.

RESUMEN**PRESENCIA DE UN SUELO FERIALÍTICO DESARROLLADO SOBRE GNEIS Y FOSILIZADO POR UNA COLADA BASÁLTICA EN EL MACIZO DEL CANTAL**

El corte se localiza sobre la vertiente derecha del valle del Authre, a proximidad de Vercuères (20 km al NE de Aurillac, Cantal). Se observa un nivel rojo de 80 a 100 cm. desarrollado sobre gneis y fosilizado por una colada basáltica situada a la base de la formación potente de las brechas traquiandesíticas de edad mioceno que ocupan la totalidad de la vertiente.

De color rojo vivo 2,5YR3/6 en la capa 10-40 cm y 2,5YR4/8 en profundidad (60 – 80cm), esta formación presenta las principales características siguientes: un pH básico a causa de la presencia de calcita secundaria debida a la percolación de las aguas a través de las brechas y del basalto sobre yacente; una fase 0 - $2\mu\text{m}$ superior a 45% en la totalidad del perfil y constituida de minerales arcillosos 2/1 y 1/1; un complejo de intercambio saturado; una evolución geoquímica global marcada por la salida de Na^+ y K^+ y por un enriquecimiento en Ca^{++} y Mg^{++} que provienen del basalto.

Existe una filiación genética muy neta entre el gneis, la zona de alteración de esta roca y el nivel rojo, lo que justifica la apelación de suelo por este último. Sus características permiten situarlo en el dominio fersialítico, en los "Fersialsols" cálcicos. Este fenómeno podría corresponder a un horizonte B de grande espesor, después truncado de los horizontes A.

A nuestro conocimiento, este nivel rojo es el primero observado sobre substrato metamórfico en el Cantal, todos los descritos hasta ahora están desarrollados sobre basaltos miocenos.

Palabras claves

Paleosuelo fersialítico, gneis, Mioceno, Cantal, mineralogía.

Les niveaux rouges développés directement sur basaltes miocènes ou formant des lits intrabasaltiques entre des coulées de laves ont été décrits par plusieurs auteurs dans le Massif Central français. Leur distribution géographique s'avère très vaste puisqu'ils ont été observés depuis la région de Clermont-Ferrand jusqu'au centre du massif volcanique du Cantal (Ehrart, 1940; Chesworth *et al.*, 1981 et 1983; Dejou *et al.*, 1983; Pierre, 1989; Pierre et Dejou, 1990). Ils se rencontrent également dans l'Aubrac et le Velay (Colin, 1966; Pierre, 1989) ainsi que dans le massif volcanique des Coirons en Ardèche (Grangeon, 1950; Moineau, 1966 et 1972; Camus et Kieffer, 1980).

Si la morphologie de ces niveaux rouges présente dans son ensemble des analogies indiscutables, leur genèse se révèle différente d'un site à l'autre. Pierre (1989) a proposé trois modes pour leur formation et distingue: i/ des paléopédogénèses surtout fersiallitiques, mais parfois ferrallitiques, développées à la suite de l'altération météorique d'une lave, ii/ des altérations également météoriques de produits pyroclastiques reposant directement sur une coulée basaltique ou disposés en lits intrabasaltiques, sans que la roche volcanique compacte soit affectée par cette météorisation, enfin iii/ des red-partings, pour reprendre le terme retenu par Barth (1950) et plus tard par Bout (1953, 1978), c'est à dire des formations rouges qui ne dérivent pas de la météorisation d'une coulée massive mais

qui tirent leur origine d'une altération hydrothermale du matériau basaltique.

Des travaux routiers, tout près de Vercuères, au centre du Cantal, à une vingtaine de kilomètres au nord-est d'Aurillac (figure 1), ont mis à jour une couche d'un rouge vif. Contrairement à toutes les formations similaires décrites à ce jour, elle n'est pas développée sur basalte mais sur gneiss. Elle constitue l'objet de cette étude.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les données pédologiques

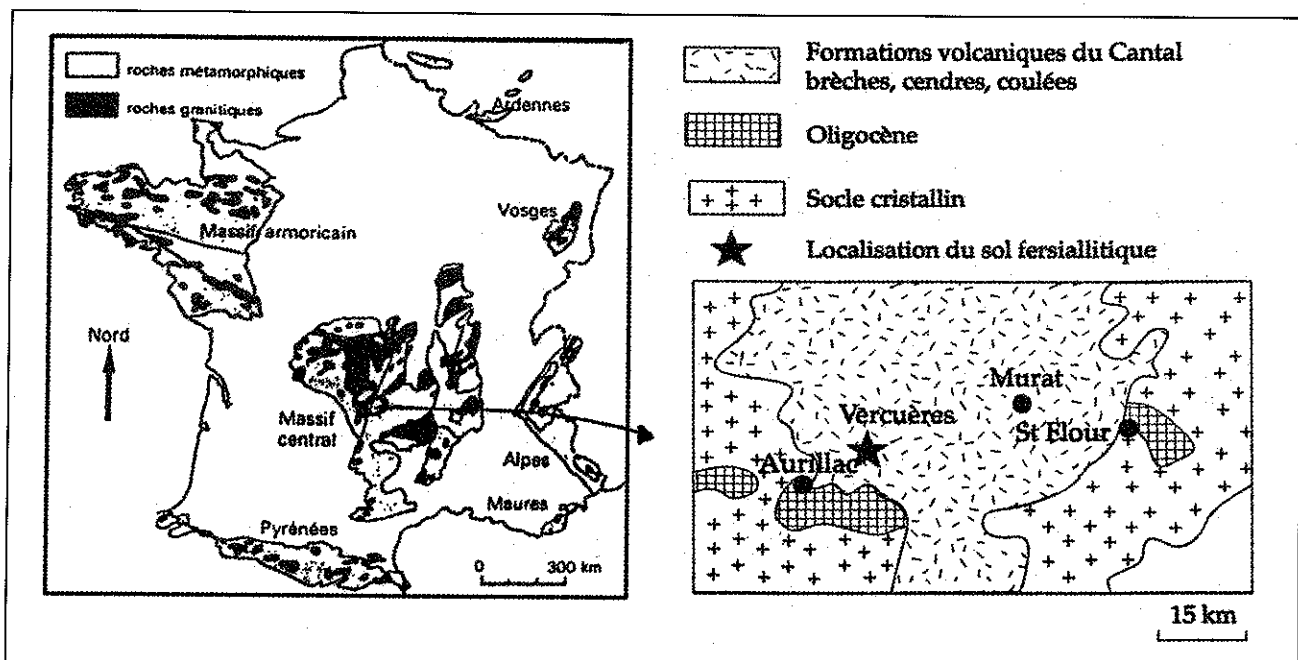
Le paléosol rouge a été décrit et analysé selon les méthodes classiques (couleur code Munsell; pH eau en suspension terre-eau 1/2,5; matière organique (= C x 1,72) dosée par voie sèche au carmographe Wösthoff; granulométrie à la pipette de Robinson; cations échangeables extraits à l'acétate d'ammonium et dosés par photométrie de flamme; CEC méthode Metson.

Les analyses totales

Les analyses totales des roches et des différents niveaux du paléosol ont été effectuées par spectrophotométrie d'ab-

Figure 1 - Croquis de situation.

Figure 1 - Schema of situation



sorption atomique après attaque HNO_3 des poudres.

Les études minéralogiques

Pour interpréter les assemblages de minéraux argileux il faut les situer dans la minéralogie du sol total. Ce dernier, séché et broyé a été réduit en une poudre homogène $< 40 \mu\text{m}$, pressée sur buvard tendre dans un porte-objet, sous 20 bars pendant une minute, avant analyse au diffractomètre Scintag XRD 2000.

Après agitation du sol total dans l'eau pendant 12 heures, les fractions fines $2-16 \mu\text{m}$ et $< 2 \mu\text{m}$ ont été isolées par centrifugation et décantation (Pochon, 1978). Les suspensions ont ensuite été déposées sur les porte-objets. La fraction $< 2 \mu\text{m}$ a été saturée aux vapeurs d'éthylène-glycol. Les diffractogrammes ont fourni deux séries de données, les hauteurs et les surfaces absolues des pics (Kübler, 1987).

Pour les minéraux en grains, généralement bien cristallisés, les hauteurs des pics se sont révélées assez précises pour une quantification.

Les méthodes géochimiques

L'évolution géochimique globale au cours de la pédogenèse, depuis la roche-mère jusqu'à la zone sommitale du paléosol, a été suivie grâce au diagramme de Parker (1970). La composition d'un niveau donné y est exprimée par un indice, qui ne prend en compte que les cations totaux, Ca, Mg, K et Na, exprimés en millièmes et considérés par cet auteur

comme les plus mobiles. Il y adjoint les énergies de liaison qui lient ces mêmes cations avec l'oxygène. Cet indice est défini comme suit :

$$I = \left[\frac{\text{Ca}}{0,7} + \frac{\text{Mg}}{0,9} + \frac{\text{K}}{0,25} + \frac{\text{Na}}{0,35} \right] \times 100$$

La différence entre la valeur de l'indice de la roche-mère et celle de la zone supérieure du sol est d'autant plus élevée que l'évolution géochimique du profil est plus forte.

MORPHOLOGIE ET PHYSICO-CHIMIE DU NIVEAU ROUGE ET DES DEUX ROCHES

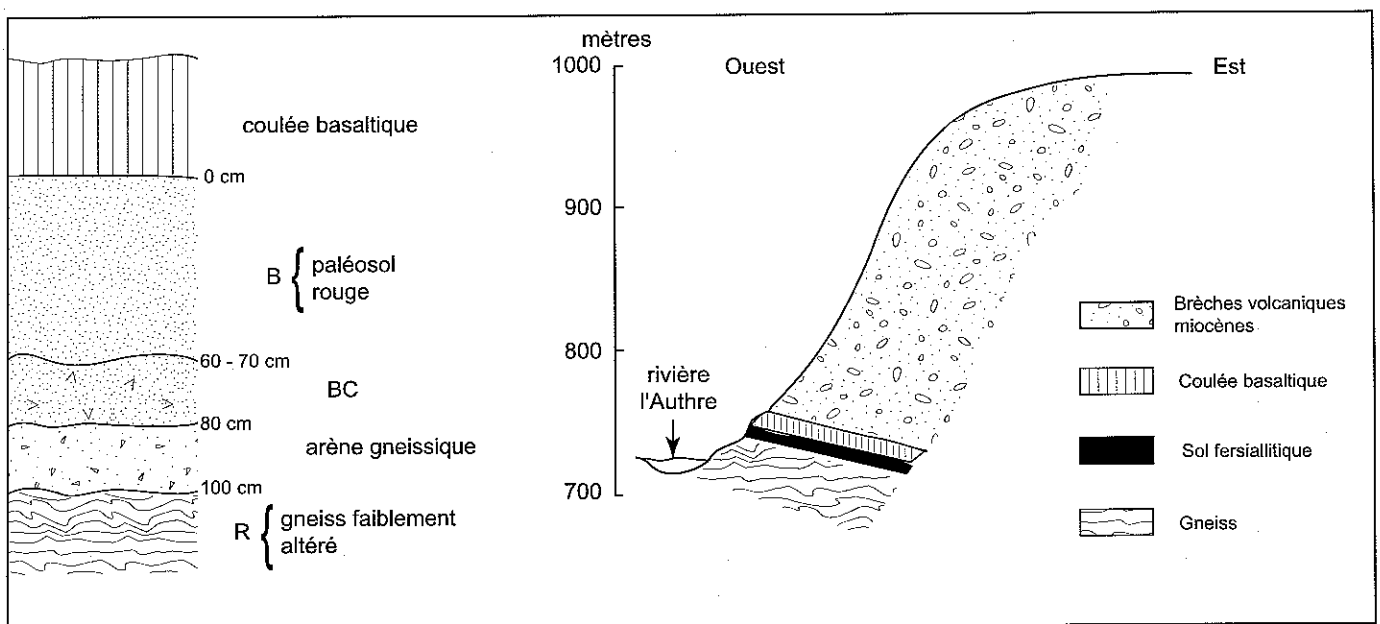
Le niveau rouge

Description du profil

Le profil de Vercuères, qui se développe sur 80 cm environ, apparaît relativement uniforme (*figure 2*). Cependant sa couleur très vive varie de 2,5YR3/6 dans les 40 premiers centimètres à 2,5YR4/8 dans les 40 centimètres suivants. La structure est polyédrique, un peu plus massive au sommet qu'à la base du profil, par suite du tassement provoqué par la coulée basaltique qui coiffe le solum. La texture est argileuse jusqu'à 60-70 centimètres. L'activité biologique est faible et on n'observe pas de racines. On peut considérer que ce niveau corres-

Figure 2 – Le profil du paléosol et sa situation dans la coupe du versant droit de la vallée de l'Authre

Figure 2 – Paleosol profile and place in the right side of slope in the Authre valley



pond à un horizon B, l'horizon A ayant été tronqué par le passage de la coulée basaltique.

Faisant suite à l'horizon B, l'horizon sous-jacent BC (60-70 à 80 cm) est moins argileux et contient quelques fragments de gneiss altérés. Il fait la transition avec l'horizon C (80-100 cm), qui est une arène gneissique très altérée.

La roche-mère R est un gneiss faiblement altéré, affleurant de façon limitée dans la région (Larroque, 1975).

Dans ce site, la filiation génétique : gneiss, zone d'altération et niveau rouge est très nette, ce qui justifie l'hypothèse d'un processus pédogénétique à l'origine de cette formation.

Ce paléosol est recouvert par une coulée basaltique d'environ un mètre d'épaisseur (basalte de Thuron) qui n'a provoqué qu'un très faible métamorphisme thermique dans la partie sommitale du profil (1 à 2 cm), alors qu'on connaît dans le Cantal des exemples où l'influence de la coulée se manifeste sur une profondeur variable de 10 à 30 centimètres (Col d'Aulac, Pierre et Dejou, 1990). Ce basalte est lui-même surmonté par la puissante formation des brèches trachyandésitiques miocènes qui occupent l'ensemble du versant de la vallée de l'Authre sur une hauteur de plus de 200 mètres (figure 2).

Analyses physico-chimiques du paléosol (tableau 1)

L'analyse granulométrique de l'horizon B (0-60 cm) indique des taux d'argile (< 2 µm) et de limons grossiers (20-50 µm) pratiquement identiques. Par contre, ceux des fractions 2-20 et 50-200 µm sont plus variables.

Dans l'horizon BC (60-80 cm), on note une baisse du taux d'argile et une augmentation des particules grossières (200-2000 µm).

Il est remarquable d'enregistrer partout des pH basiques et de plus en plus élevés au fur et à mesure que l'on descend dans le profil. De plus, la saturation du complexe d'échange est complète, avec un taux important de Ca²⁺ et un taux de Mg²⁺ échangeable qui lui est presque équivalent. La capacité d'échange cationique est en corrélation avec les taux d'argiles, diminuant sensiblement dans l'horizon BC, moins pourvu en phase < 2 µm.

Les roches (tableau 2)

Le gneiss

La composition minéralogique approchée du gneiss, roche-mère du paléosol, a été établie à partir de l'analyse chimique, en retenant les formules générales de ses minéraux constituants, identifiés grâce au microscope polarisant (Deer *et al.*, 1965). De structure granoblastique, il est riche en quartz, tandis que les plagioclases, de type albite-oligoclase, l'emportent de peu sur les feldspaths potassiques. Muscovite et biotite sont d'importance quasi-identique. Il faut noter que cette roche-mère n'est pas parfaitement saine, son altération naissante étant marquée par la séricitisation partielle des plagioclases et la chloritisation discrète des biotites. Une telle composition est proche de celle des gneiss du versant droit de la vallée de l'Authre (Larroque, 1975).

Le basalte

Dans le basalte fossilisant le sol, on note l'importance de Ca, Mg et Fe, tandis que la teneur en SiO₂ le rapproche des ankaramites. On remarque aussi sa richesse en verre et la pré-

Tableau 1 – Analyses physico-chimiques du sol rouge

Table 1 – Physico-chemical analysis of the red soil

Niveau du prélèvement cm	Granulométrie %						pH eau KCl	M.O. %	Complexe adsorbant m.éq/100 g					
	SG	SF	LG	LF	A	Total			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	CEC	100S/ CEC
0-10	35,1	12,3	4,2	18,6	29,7	99,9	7,3 (6,4)	0,1	17,7	14,5	0,6	0,15	28,8	sat
10-20	27,5	8,5	5,5	29,0	28,3	98,8	7,5 (6,8)	0,1	19,9	16,9	0,6	0,17	32,4	-
20-40	26,3	15,5	4,5	23,5	28,2	98,0	7,4 (7,1)	0,1	21,4	18,8	0,6	0,17	36,9	-
40-60	32,2	18,2	2,5	19,8	26,5	99,2	8,9 (7,2)	0,3	17,6	15,2	0,6	0,16	29,4	-
60-80	39,7	12,5	5,5	23,5	18,3	99,5	8,4	- (7,1)	11,4	9,9	0,4	0,13	20,7	-

Tableau 2 – Analyse chimique et composition minéralogique approchée du gneiss et du basalte de Verrières-Thuron (Cantal)**Table 2** – Chemical analysis and approximate mineralogical composition of gneiss and basalt of Verrières – Thuron

Éléments						
	Gneiss (roche-mère)	Basalte (couverture)		Gneiss	Basalte	
SiO ₂	67,35	42,60	Apatite	0,20	Phénocristaux	16,7
Al ₂ O ₃	15,80	15,10	Minéraux opaques	2,10	Olivine	12,6
TiO ₂	1,70	0,03	Biotite	9,10	Clinopyroxène	0,8
Fe ₂ O ₃	4,44	9,45	Muscovite	10,10	Plagioclases	0,9
FeO	0,27	3,71	Plagioclases	20,00	Minéraux opaques	2,4
MnO	0,10	0,05	Orthose	16,50		
CaO	0,50	10,78	Al ₂ O ₃ restant	2,20	Mésostase	83,4 %
MgO	0,30	8,23	Quartz	36,50	Calcite	2,2
K ₂ O	4,20	0,81	H ₂ O	0,60	Plagioclases	35,0
Na ₂ O	2,10	3,02			Olivine	1,4
P ₂ O ₅	0,10	0,31			Clinopyroxène	25,0
H ₂ O ⁺	1,52	5,05			Minéraux opaques	9,4
H ₂ O ⁻	0,10	0,91			Verre	10,4
Total	98,48	100,05	Total	97,30	Total	100,1

sence de calcite secondaire dans la mésostase. Mais celle-ci figure aussi parmi les phénocristaux, sous forme d'îlots de 0,5 à 1 cm de diamètre, disséminés dans la roche et donnant une effervescence à HCl. La présence de cette calcite explique le pH élevé du sol sous-jacent et la saturation complète de son complexe adsorbant.

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DU PALÉOSOL

Fraction 0-2 µm

Quel que soit le niveau du paléosol, on identifie une raie fondamentale à 13,8 Å (figure 3), très intense dans les 40 premiers centimètres et qui diminue progressivement. Elle traduit la présence d'un minéral argileux 2/1. Viennent ensuite les raies de l'illite, à 9,9 Å (forte), 4,92 Å (moyenne), 3,3 Å (forte), puis 2,48 et 1,99 Å (faibles).

La kaolinite est absente dans le niveau 0-10 cm et n'apparaît que de façon timide entre 10 et 20 cm. Par contre, elle augmente progressivement à partir de ce niveau (raies à 7,1 et 3,56 Å) pour atteindre son intensité maximale entre 60 et 80 cm. On note aussi une raie à 3,03 Å, attribuable à la calcite,

présente dans l'ensemble du profil.

Le traitement à l'éthylène-glycol (figure 4) provoque le gonflement de la raie fondamentale à 16,6 Å, suivie des raies à 8,3 et 5,5 Å, ce qui traduit la présence d'un interstratifié smectite-illite (Robert, 1975).

Fraction 2-16 µm (figure 5)

On retrouve un interstratifié smectite-illite avec sa raie à 13,8 Å, moins intense toutefois que dans la fraction < 2 µm dans les mêmes niveaux (0-60 cm). Elle diminue nettement dans l'horizon 60-80 cm. L'illite est également identifiée, tout comme la kaolinite, à partir de l'horizon 20-40 cm. L'intensité du pic à 7,1 Å augmente vers la base du profil, tout en demeurant relativement faible. Il s'ajoute ici le quartz, présent dans tous les niveaux mais mieux représenté toutefois dans la partie sommitale, entre 0 et 20 cm.

Sol total (figure 6)

On décèle les mêmes minéraux argileux, accompagnés des minéraux primaires : quartz abondant dans tout le profil, plagioclases (raie à 3,2 Å), biotite (raie à 1,54 Å), hématite (raies à 2,69 – 2,59 et 1,66 Å). La calcite secondaire est identifiée par sa raie à 3,06 Å.

Figure 3 – Diagrammes X des fractions < 2 µm "normales"

Figure 3 – X diagrams of < 2µm "normal" fraction

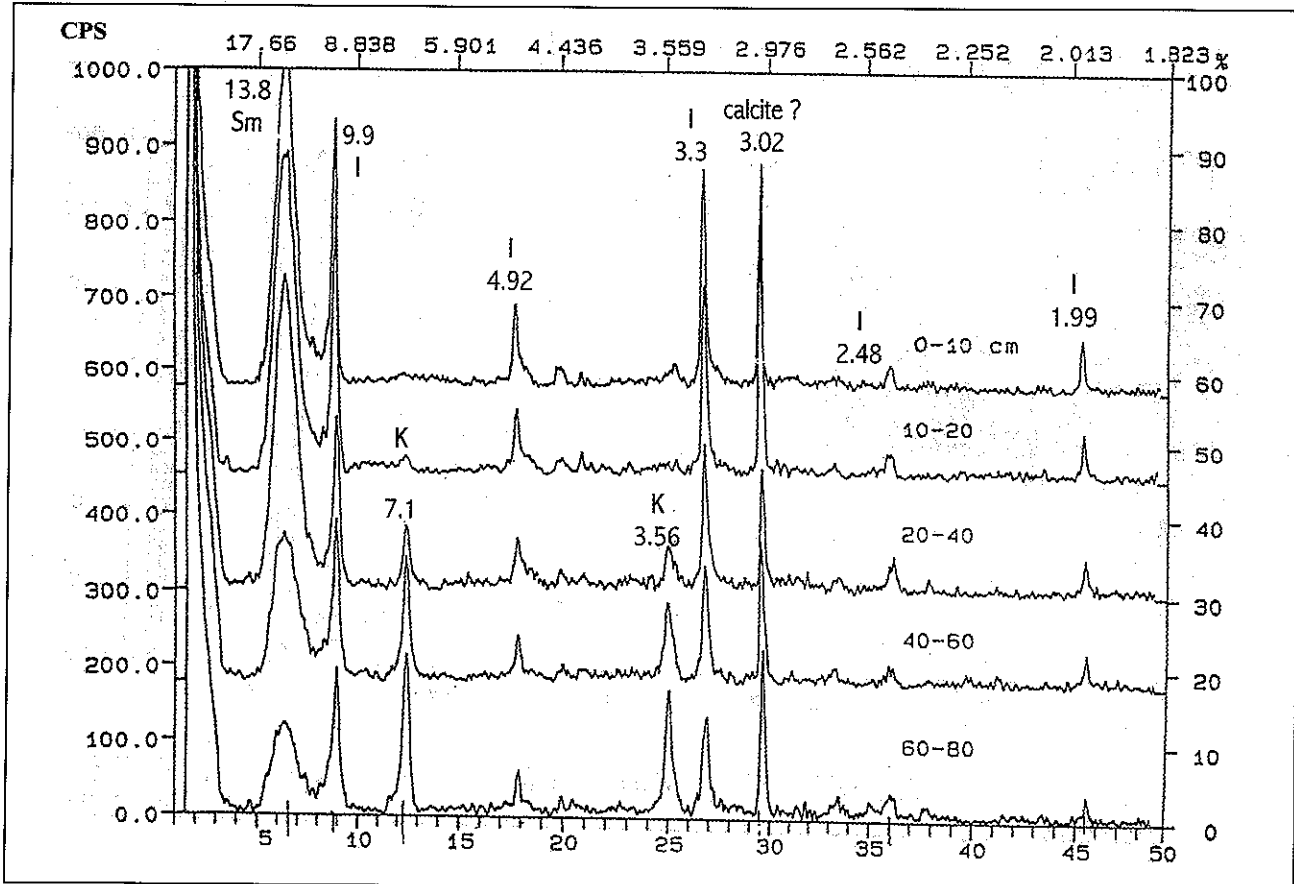


Tableau 3 – Analyses chimiques totales du sol rouge de Vercuères et du gneiss sous-jacent

Table 3 – Total chemical analysis of the red soil of Vercuères and the underlying gneiss

Profondeur (cm)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	Total
0-20	57,25	16,44	0,75	6,30	0,03	0,10	1,35	0,70	0,07	2,25	0,85	8,40	5,40	99,89
20-40	54,40	15,80	0,80	7,40	n.d.	-	1,50	0,80	0,05	2,10	0,60	10,80	5,60	99,85
40-60	50,80	20,70	0,70	8,10	0,18	-	1,20	0,70	0,05	2,50	0,80	8,94	4,76	99,43
60-80	50,20	22,20	0,50	8,40	0,29	-	0,80	0,60	0,05	3,40	1,20	7,56	3,23	98,43
Gneiss	67,35	15,80	1,70	4,44	0,27	0,10	0,30	0,50	0,10	4,20	2,10	1,52	0,10	98,48

ÉVOLUTION GÉOCHIMIQUE DU PROFIL

L'analyse chimique du gneiss et de 4 niveaux du sol (tableau 3) permet de noter, au cours de la paléopédogenèse, les transformations suivantes :

- désilicification variable, avec la perte en SiO₂ la plus faible dans le niveau 0-20 cm (15 %) et la plus forte dans le niveau 60-80 cm (25,3 %);
- stabilité de Al (qui s'accroît de façon relative);

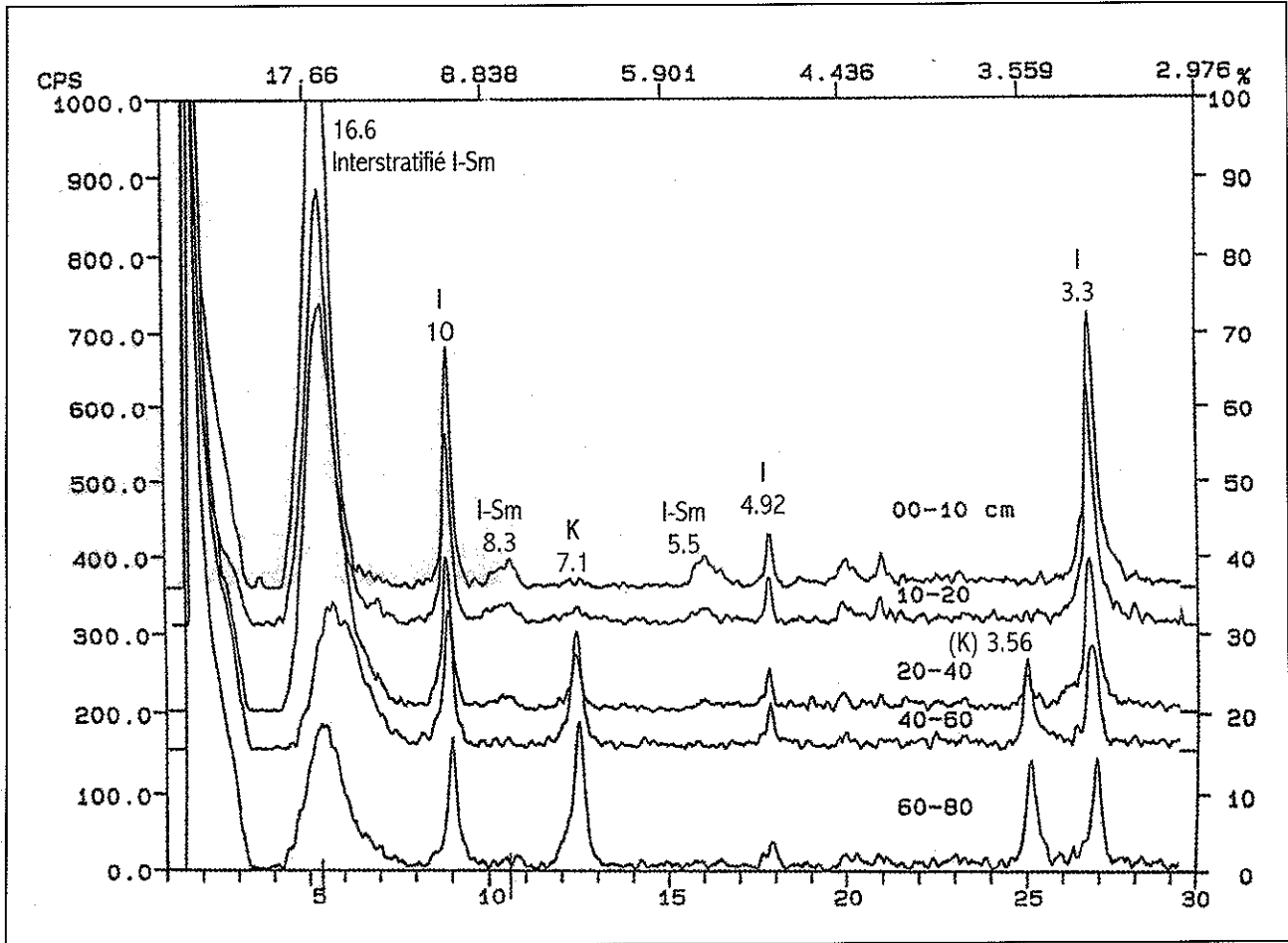
- concentration du fer sous forme Fe³⁺ et totale transformation de Fe²⁺ en Fe³⁺

- enrichissement en Ca²⁺ et surtout en Mg²⁺, ce qui est l'opposé des processus classiques dans les pédogenèses fersiallitiques;

- pertes importantes de K⁺ (47,5 %) et Na⁺ (64 %);

- forte hydratation liée à la genèse des minéraux argileux secondaires.

Figure 4 – Diagrammes X des fractions < 2 µm, traitées à l'éthylène-glycol
 Figure 4 – X diagrams of < 2µm fractions saturated by ethylene glycol



On a représenté sur la *figure 7* les variations de l'indice I de Parker, du gneiss au sommet du sol. Ces variations sont comparées, sur le même graphique, à celles d'un andosol et d'un sol fersiallitique sur basalte du Cantal.

L'évolution du sol de Vercuères, pour importante qu'elle soit, est moins accusée que pour les deux autres. Au début de la pédogenèse le gneiss a un indice plus faible ($I = 57$) que les basaltes ($I \geq 85$) riches en Ca et Mg. Mais l'enrichissement secondaire du sol de Vercuères en ces deux éléments contribue au maintien d'un indice voisin de 30, supérieur à celui des sols fersiallitiques régionaux.

AGE DU PALÉOSOL

Quelques datations absolues obtenues par la méthode K/Ar sont connues dans la région (Bellon, 1971). L'une d'entre elles concerne le basalte de Vercuères-Thuron recouvrant le paléo-

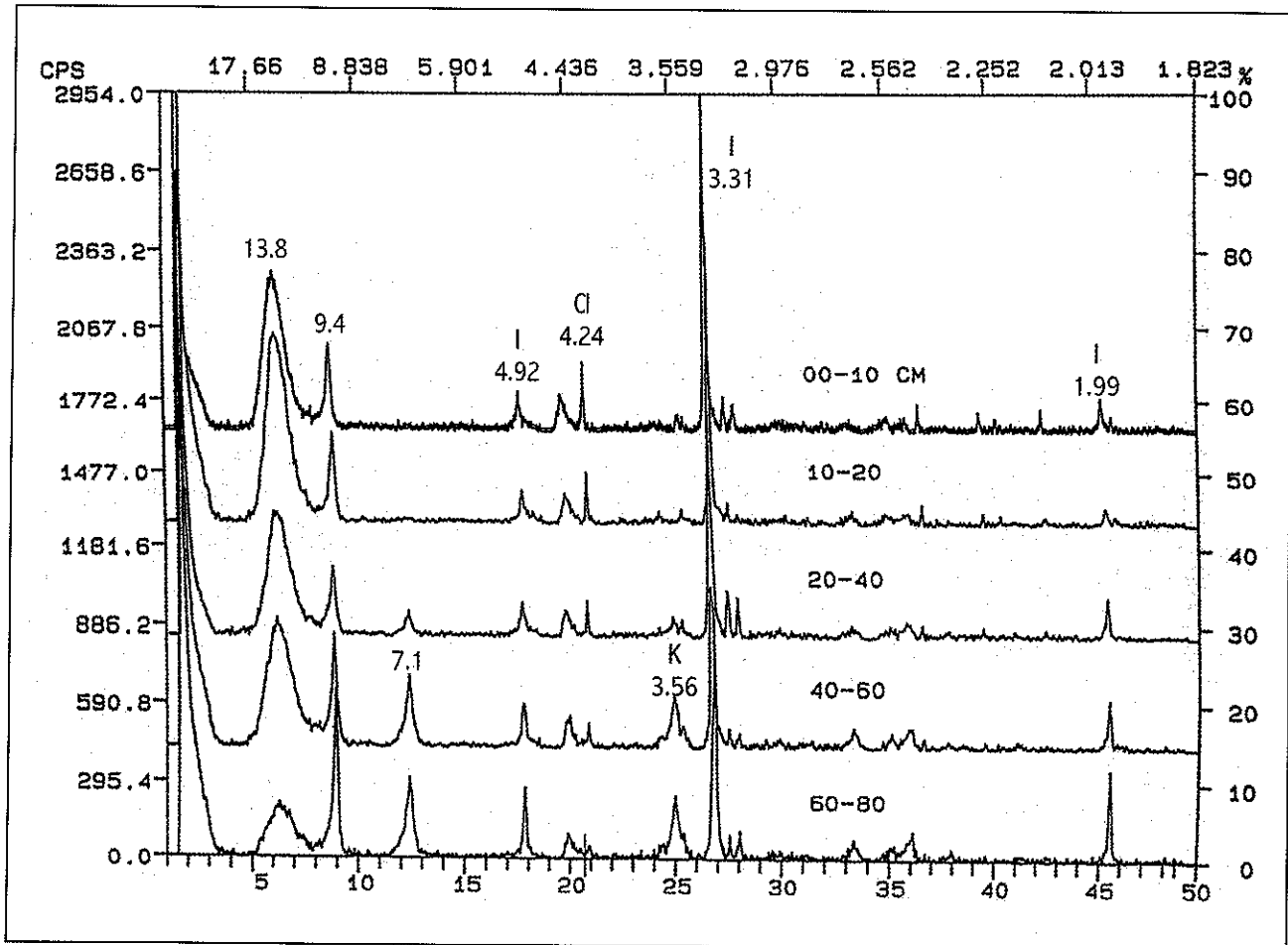
sol fersiallitique et les autres les brèches trachyandésitiques inférieures surmontant le basalte et prélevées à Niac et à Saumiac, à une vingtaine de kilomètres à l'ouest de Vercuères. Le basalte a été daté de $10,1 \pm 0,3$ MA, tandis que les brèches ont un âge compris entre 8,7 et 10 MA.

On peut donc estimer que le sol rouge s'est formé antérieurement à 10,1 MA, probablement au miocène, compte tenu des analogies frappantes qu'il présente avec les autres niveaux rouges observés sur basaltes dans le Massif Central. A cette époque, le climat était plus chaud et plus contrasté que le climat actuel, à l'origine de pédogenèses brunifiantes (Coinçon *et al.*, 1975; Derruau, 1988).

Il faut toutefois souligner que l'évolution géochimique s'est poursuivie après la mise en place de la coulée basaltique, caractérisée notamment par le lessivage des cations mobiles Ca^{2+} et Mg^{2+} issus de la lave, modifiant de la sorte la composition du complexe d'échange du paléosol.

Figure 5 – Diagrammes X des fractions 2-16 µm non traitées

Figure 5 – X diagrams of 2-16 µm fractions, air dry



CONCLUSIONS

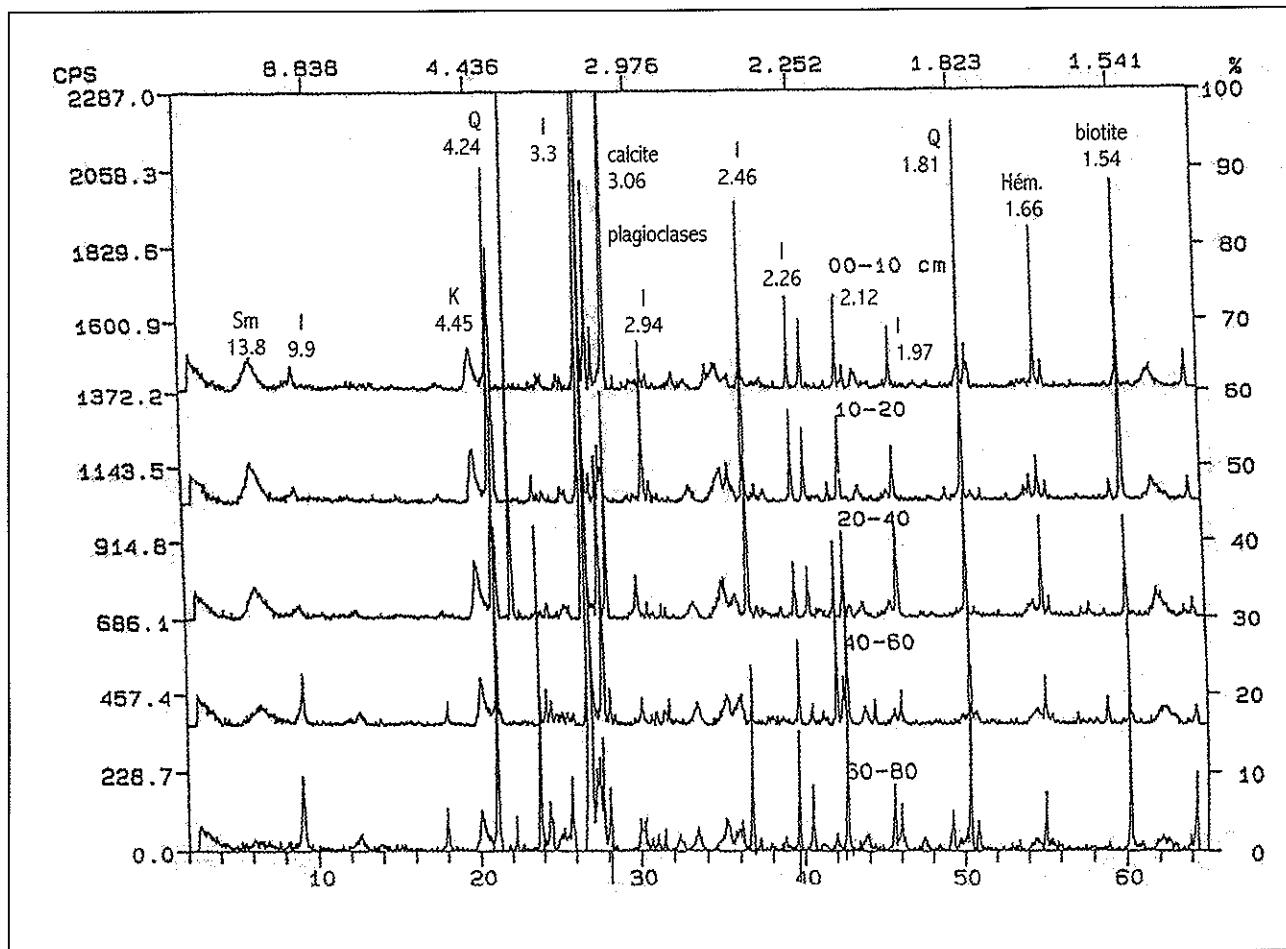
Le niveau rouge de Verduères s'avère un paléosol peu différencié, constitué d'un horizon B profond, suivi d'horizons BC et C, l'horizon sommital ayant été vraisemblablement tronqué lors de la mise en place de la coulée basaltique.

La pédogenèse est de nature fersiallitique, associée à une altération avec néogenèse de minéraux argileux 2/1 et 1/1. Cependant, la persistance de minéraux primaires du gneiss-roche-mère, feldspaths et micas, dans tous les horizons du profil, atteste que cette fersiallisation n'a pas été complète.

Par ailleurs, l'évolution géochimique du paléosol s'écarte fortement de celle des sols fersiallitiques classiques du Massif Central par les points suivants : pH basique, CEC saturée, importance des cations Ca et Mg dans le complexe d'échange. Ces éléments dérivent du basalte coiffant le sol, Ca provenant de la calcite secondaire et Mg de l'olivine, réputée très vulné-

nable, et peut-être en partie du pyroxène. Il en résulte que l'on peut ranger ce profil dans les Fersialsols Calciques (Référentiel Pédologique, 1995). D'autre part, l'apport de Mg a contribué à accroître la synthèse de la smectite (Harder, 1972). Celle-ci se serait formée, au moins en partie, postérieurement à la kaolinite. La diminution de la smectite du haut vers le bas du profil et l'augmentation de la kaolinite vers la base sont aussi des caractéristiques qui ne se trouvent pas, d'ordinaire, dans un processus fersiallitique. Dans les autres sols rouges intrabasaltiques du Cantal, comme au col d'Aulac, la kaolinite est mieux représentée que la smectite au sommet du profil (Chesworth *et al.*, 1983). Peut-être faut-il invoquer à Verduères l'impact de la coulée basaltique créant un tassement plus important dans la zone sommitale du profil, avec pour corollaire, la genèse d'un milieu plus confiné, favorable à la genèse du minéral 2/1. Au contraire, dans la partie basale du profil, le drainage plus accusé aurait facilité la synthèse de la kaolinite.

Figure 6 – Diagrammes X du sol total (< 2 mm), non traité
 Figure 6 – X diagrams of the whole soil (< 2mm), air dry



Enfin l'évolution géochimique globale se distingue encore de celle des sols fersiallitiques locaux par deux caractéristiques: maintien d'une partie de Na et K et enrichissement en Ca et Mg. Elle a pu à la fois être limitée dans son ensemble par l'arrivée des matériaux volcaniques qui ont soustrait le sol aux agents atmosphériques et qui l'ont enrichi ensuite en Ca et Mg.

Les sols fersiallitiques et parfois ferallitiques du Massif Central présentent des analogies morphologiques et géochimiques avec ceux développés sur des roches-mères de composition voisine, en Ecosse (Godard *et al.* 1961), en Irlande (Reffay *et al.*, 1970) et aux Canaries (Tejedor Salguero, 1978; Rodríguez-Rodríguez *et al.*,; Pomel, 1983). Ceci témoigne de l'extension des conditions climatiques favorables à une pédogenèse à sesquioxydes de fer, depuis l'Europe jusqu'au large de l'Afrique. D'autre part, des sols à horizons FS, comparables au nôtre, se forment également sous climat méditerranéen sur

d'autres substrats, notamment sur matériaux fluvioglaciers de la vallée du Rhône où ils sont datés du Mindel-Güntz (Bornand, 1972).

A notre connaissance, le sol fersiallitique de Verrières est le premier à être décrit sur substrat métamorphique dans le Cantal. La pédogenèse à sesquioxydes de fer du miocène n'est donc pas l'apanage des matériaux volcaniques, comme l'avait signalé Pierre (1989). Mais ceux-ci apparaissent plus sensibles à ce type d'évolution, eu égard à leur richesse en fer total. Il convient désormais de prospecter d'autres sites dans le Cantal, sur substrats différents du basalte, de façon à mieux cerner l'extension et les modalités des processus fersiallitiques et ferallitiques.

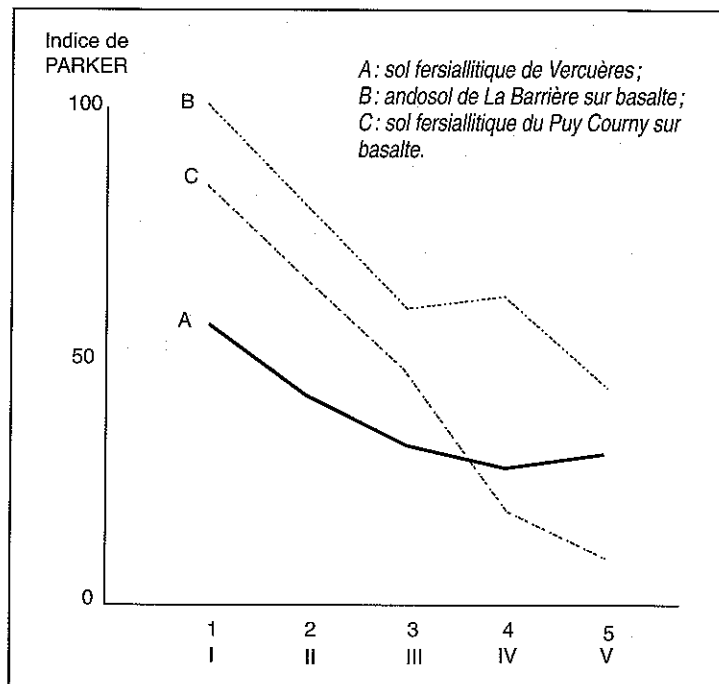
REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le Dr Thierry Adatte, de l'Institut de

Figure 7 – Diagrammes de Parker pour différents sols du Cantal. 1/ gneiss de référence de Verrières, 2/ paléosol (60-80 cm) 3/ 40-60 cm, 4/ 20-40 cm, 5/ 0-20 cm. I à V : niveaux équivalents des sols de La Barrière et du Puy Courny

Figure 6 – Parker's diagrams for different soils of Cantal. (1) reference gneiss of Verrières, paleosol horizons: (2) 60 – 80 cm; (3) 40 – 60 cm; (4) 20 – 40 cm; (5) 0 – 20 cm.

I to V: Analogous levels of soils from la Barrière and Puy Courny



Géologie de Neuchâtel, pour la réalisation particulièrement soignée et maintes fois répétée des diffractogrammes X et pour son avis éclairé dans leur interprétation.

BIBLIOGRAPHIE

- Barth T.F.W., 1950- Volcanic geology, hot springs and geysers of Ireland. Carn. Inst. Washington, publ. 587, 151 pp.
- Bellon H., 1971- Datation absolue des laves d'Auvergne par la méthode K/Ar. Thèse 3^e cycle, Univ. Orsay, 58 pp.
- Bornand M., 1978- Altération des matériaux fluvio-glaciaires. Genèse et évolution des sols sur terrasses quaternaires dans la moyenne vallée du Rhône. Thèse doct. es sciences, Montpellier, 329 p., 11pl. hors texte.
- Bout P., 1953- Etudes de géomorphologie dynamique en Islande. Act. Scient. et Industrie, n° 1197, Hermann, Paris, 216 pp.
- Bout P., 1978- Problèmes de volcanisme en Auvergne et Velay. Chronique de la revue d'Auvergne, imprimerie Watel, Brioude, 326 pp.
- Camus G. et Kieffer G., 1980- Les couches rouges (red-partings) du massif volcanique des Coirons (Ardèche, France). Géol. méditerranéenne, VII (2), 193-197.
- Chesworth W., Dejou J. et Larroque P., 1981- The weathering of basalt and relative mobilities of the majors elements at Belbex, France. Geochimica et Cosmoch. Acta, 45, 1235-1243.
- Chesworth W., Dejou J., de Kimpe Ch., Macias-Vasquez F., Cantagrel J.-M., Larroque P., Garcia-Paz C., 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, série Pédologie, XX (3), 189-208.
- Coinçon R., Tardy Y. et Godard A., 1975- Les renseignements d'ordre morphogénique et paléoclimatiques apportés par l'étude des bassins à l'ouest de la Margeride. Rev. Geomorph. Dynam., 25, 81-91.
- Colin F., 1966- Etude géologique du volcanisme basaltique de l'Aubrac (Massif Central français). Mém. BRGM, 62, 250 pp.
- Deer W.A., Howie R. A et Zussman J., 1964- Rock forming minerals, vol. 1,2,3,4. Longmans, Londres.
- Dejou J., de Kimpe Ch., Larroque P., Mayenobe C. et Moynac P., 1983- Caractérisation et évolution chimique superficielle d'un massif granitique fossilisé par des formations volcaniques près du Falgoux (Cantal). Rev. Sc. nat. d'Auvergne, 49, 19-29.
- Derruau M., 1988- Précis de géomorphologie, 7^e ed., Masson, 533 pp.
- Ehrart H., 1940- Sur l'altération des basaltes miocènes du Cantal et sur la nature des sols qui en dérivent. C.R. Acad. Sci. Paris, 210, 537-539.
- Godard A. Paquet Hélène et Millot G., 1961- Contribution à l'étude de quelques paléosols du nord de l'Ecosse. Bull. serv. carte géol. Alsace-Lorraine, Strasbourg, t. 14, fasc. 4, p 101-109.
- Grangeon P., 1950- Sur une couche d'altération climatique miocène dans la région du Coiron. C.R. Acad. Sci. Paris, 248, 1370-1372.
- Harder H., 1972- The role of magnesium in the formation of smectite minerals. Chem. Geol. 10 (1), p. 31-39.
- Kübler B., 1987- Approche quantitative à partir de diagrammes de diffraction X, pour l'essai de dosage des minéraux en grain et des argiles dans les sols. Cahiers de l'Institut de Géologie de Neuchâtel, Suisse, série AX, 8 pp.
- Larroque P., 1975- Contribution à la géologie du Cantal. Le versant droit de la moyenne vallée de l'Authre et la région d'Ayrens. Thèse 3^e cycle Univ. Paris-Sud-Orsay, 234 p. + 32 annexes.
- Moinereau J., 1966- Etude des sols et des paléosols du Bas Vivarais. Thèse 3^e cycle, Paris, 164 pp.
- Moinereau J., 1972- Origine et géochimie des niveaux rouges du plateau des Coirons en Ardèche. Rev. Géogr. phys. et Géologie dyn., XIV (1), 85-94.
- Parker A., 1970- An index of weathering for silicate rocks. Mineral. Magaz., 501-504.
- Pierre G., 1989- Les altérites fossilisées par les coulées de lave, valeur paléoclimatique et implications géomorphologiques: l'exemple de l'Auvergne, de l'Aubrac et du Velay. Thèse Univ. Paris I., 174 pp.
- Pierre G. et Dejou J., 1990- Nature et genèse des formations rouges intraba-

- saltiques et limite de leur signification paléoclimatique (Cantal, Velay, Massif Central français). *Rev. Géomorph. dynam.*, Strasbourg, XXXIX (3), 81-96.
- Pochon M., 1978- Origine et évolution des sols du Haut-Jura suisse. Phénomènes d'altération des roches calcaires sous climat tempéré humide. Thèse Sciences, Neuchâtel, 190 pp.
- Pomel R.G., 1983- Les Iles Canaries: Fuerteventara, Lanzarote, Tenerife. Livret-guide de l'excursion du Comité de Géogr., Commission de Géomorph. des reliefs volcaniques, 358 pp.
- Référentiel pédologique, 1995- Techniques et pratiques, AFES, INRA, 332 p.
- Reffay A., 1972- Les montagnes de l'Irlande septentrionale. Contribution à la géographie physique de la montagne atlantique. Thèse doct. es sciences, Univ. Grenoble, Imprimerie Allier, Grenoble, 614 pp.
- 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. *Ann. Agro.*, 26 (4), 363-399.
- Rodríguez-Rodríguez A., Tejedor Saiguero Maria-Luisa, Fernandez Caldas E., 1979- Suelos fersialíticos sobre cenizas volcanicos. Características morfológicas y físico-químicas. *An. Edaf. y Agrobiología*, Madrid, t. XXXVIII, n° 9-10, p. 1608-1624.
- Tejedor-Saiguero Maria-Luisa, Quantin P. et Fernandez Caldas E., 1978- Climatosequencia de la región meridional de l'île de Ténérife (Canaries). 2^e partie, Caractéristiques minéralogiques; interprétation et classification.