

Étude de paléosols rouges développés sur les basaltes miocènes du Massif Central français

Principales caractéristiques physico-chimiques de ces pédogenèses

Ward CHESWORTH (1), Jean DEJOU (2), Christian de KIMPE (3), Felipe MACIAS VASQUEZ (4), Jean-Marie CANTAGREL (5), Pierre LARROQUE (6), Carlota GARCIA-PAZ (4), Eduardo GARCIA-RODEJA (4), Paul QUANTIN (7)

(1) Ontario Agricultural College, Université de Guelph N1G 2W1, Ontario, Canada

(2) INRA, Station d'Agronomie, Domaine de Mondésir, 12, avenue de l'Agriculture, 63039 Clermont-Ferrand Cedex

(3) Station de Recherches Agriculture-Canada, 2560, boulevard Hochelaga, Sainte-Foy G1V 2J3, Québec, Canada

(4) Edafologia, Facultad de Biología, Universidad de Santiago de Compostela, Espagne

(5) Laboratoire de Géologie de l'Université, 5, rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand Cedex

(6) Maison des Volcans, Château Saint-Étienne, 15000 Aurillac

(7) O.R.S.T.O.M., 70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy

RÉSUMÉ

Des pédogenèses, tantôt de type fersiallitique, tantôt à la frontière du type ferrallitique, se sont développées au Miocène sur les basaltes du Massif Central français.

Leurs caractéristiques essentielles peuvent être résumées comme suit : teinte ocre à rouge sur l'ensemble du profil, ameublissement intense de la roche-mère, présence d'argiles 1/1 dominantes et 2/1 en proportion variable dans les phases $< 2 \mu$, minéraux primaires plus ou moins altérés dans les fractions 2-50 μ , contenu variable en gibbsite, taux de saturation supérieur à 50 % dans tous les horizons, évacuation quasi-totale des cations Ca, Mg, K et Na dans la partie sommitale des profils. Ces données sont compatibles avec des pédogenèses de type fersiallitique, tandis que d'autres se rapprocheraient du type ferrallitique. Elles apparaissent comme un processus généralisé dans le Massif Central volcanique et quelques mesures d'âge effectués sur basaltes par la méthode K/Ar le situent au Miocène moyen et terminal entre 21 et 6,5 millions d'années.

L'étude de ces paléosols apporte ainsi de précieuses indications sur les conditions paléoclimatiques de cette époque, marquées par un climat plus chaud que l'actuel et à saisons contrastées.

MOTS-CLÉS : Paléosols fersiallitiques à ferrallitiques — Basalte miocène — Massif Central français.

SUMMARY

PEDOGENESIS, EITHER OF FERSIALLITIC TYPE OR NEAR OF FERRALLITIC ONE, DEVELOPPED IN MIOCENE ON BASALTS OF THE FRENCH MASSIF CENTRAL. MAIN PHYSICO CHIMICAL CHARACTERISTICS OF SOIL FORMATION

Their main characteristics can be summarized as follows: ochre or red in color throughout the profile; intense disintegration of parent rock, presence of 1/1 dominant clay minerals, and 2/1 in variable proportion ones $< 2 \mu$ fractions, more or less weathered primary minerals in the 2-50 μ fractions, variable content of gibbsite, base saturation higher than 50 % in all horizons, almost complete removal of Ca, Mg, K and Na cations in the top of profiles. These results are compatible with pedogenesis of fersiallitic type while others are of ferrallitic type. These appear as

the result of a general process in the volcanic Massif Central region and some measurements, determined on basalts by the K/Ar method, date it back to the middle and late Miocene between 21 and 6,5 millions years.

The study of these paleosols provides important evidence on the paleoclimatic conditions of this age, characterized by a climate warmer than the present one, with contrasting seasons.

KEY WORDS : Fersiallitic to ferrallitic paleosols — Miocene basalt — French Massif Central.

INTRODUCTION

Dans quatre publications récentes, CHESWORTH *et al.* (1981 et 1983), DEJOU *et al.* (1979 et 1982), nous avons fait part de quelques observations sur l'évolution superficielle subie par les basaltes pontiens du bassin d'Aurillac (Cantal) et montré que cette pédogenèse ayant donné des sols de teinte rouge vif se situait dans le domaine fersiallitique. Prolongeant ces travaux et ceux d'autres auteurs qui ont œuvré dans le même secteur géographique (EHRART, 1940 ; GIBERT, 1972 et 1973), nous nous proposons

en nous limitant au domaine volcanique, de montrer l'importance de ce processus développé au Miocène sur matériaux basaltiques de l'Auvergne, notamment dans le Puy-de-Dôme et surtout le Cantal. De nouvelles coupes observées au cœur du Massif cantalien vont compléter les observations antérieures et montrer la diversité de cette pédogenèse, tout en permettant d'en décrire les principales caractéristiques physiques, minéralogiques et chimiques.

1. RÉPARTITION DES PALÉOSOLS ROUGES DÉVELOPPÉS SUR BASALTES EN AUVERGNE

La figure 1 montre que cette répartition est extrêmement large depuis la région de Clermont au nord jusqu'au bassin d'Aurillac au sud où plusieurs profils peuvent être observés dans des sites rapprochés.

Les sols sont développés soit directement sur les coulées basaltiques (exemples : Rochefort-Montagne, Belbex, Saint-Étienne-de-Carlat) ou constituent des lits inter-basaltiques dans les structures de trapp. A cet égard, l'exemple le plus typique retenu pour cette étude est celui du Col d'Aulac, au centre du strato-volcan du Cantal, près du Falgoux, décrit dans la figure 2. La coupe montre 10 coulées successives de basalte ; on observe 6 paléosols d'épaisseur variable dont la partie supérieure peut être thermo-métamorphisée par la coulée suivante et 3 andosols actuels sur les coulées sommitales. La coulée C3 n'a pas donné naissance à un sol, probablement parce que la coulée C4 est arrivée trop rapidement pour qu'une pédogenèse puisse se développer.

La coupe du Suc du Rond, prolongeant celle du Col d'Aulac est également constituée par un empilement de plusieurs coulées basaltiques avec des sols rouges interbasaltiques.

2. MINÉRALOGIE ET ANALYSES DE QUELQUES ROCHES VOLCANIQUES A L'ORIGINE DE CES SOLS (tabl. I)

Les exemples ont été choisis au Col d'Aulac (coulées 4, 6 et 7) et au Suc du Rond (coulées 1,

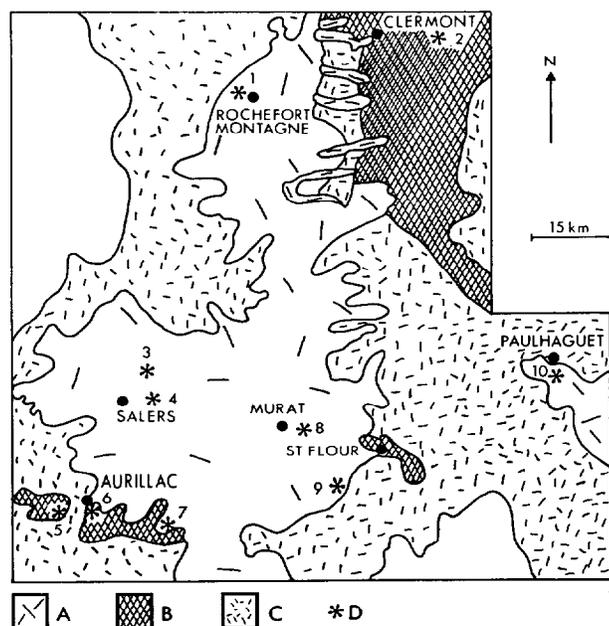


FIG. 1. — Aperçu géologique de l'Auvergne. A — Formations volcaniques : brèches, cendres, coulées. B — Matériaux oligocènes : calcaires, marnes, arkoses, sables. C — Socle cristallin. D — Situation des sols fersiallitiques : 1 — Rochefort-Montagne ; 2 — Dallet ; 3 — Col d'Aulac-Suc du Rond ; 4 — Route Salers-Néronne ; 5 — Belbex ; 6 — Le Puy Courny ; 7 — Saint-Étienne-de-Carlat ; 8 — Route Mural-Saint-Flour ; 9 — Les Ternes

Remarque : Le n° 10 : Paulhaguet est développé sur gneiss (FONSECA, 1974).

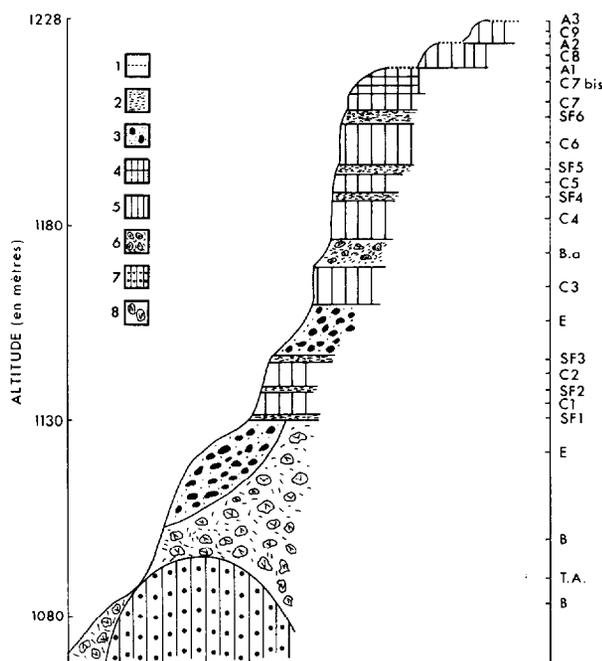


FIG. 2. — Coupe du Col d'Aulac, sur la route du Falgoux à Trizac (Cantal). 1 — Andosols actuels (A₁, A₂ et A₃) ; 2 — Sols fersiallitiques (SF₁ à SF₆) ; 3 — Éboulis de pente ; 4 — Coulée basaltique altérée (C_{7 bis}) ; 5 — Coulées basaltiques plus ou moins fraîches ; 6 — Brèches autoclásticas (B_a) ; 7 — Intrusion de trachyandésite (TA) ; 8 — Brèches volcaniques (B). La description détaillée de la coupe est la suivante : C₉ — Coulée basaltique peu altérée, 4 mètres d'épaisseur, sur laquelle se développe un andosol actuel A₃ ; C₈ — Coulée basaltique peu altérée (5 m), absence de paléosol, mais couronnée par un andosol actuel A₂ ; C_{7 bis} — Coulée très altérée (5 m), surtout dans sa partie supérieure avec un andosol actuel A₁. Peut-être s'agit-il de la même coulée que C₇ ; C₇ — Coulée basaltique (4 m), très beau contact avec le niveau fersiallitique SF₆ ; SF₆ — 6^e sol fersiallitique très rouge de 3 m de puissance, le mieux développé de tous les sols correspondants à la 2^e coupe étudiée ; C₆ — Coulée basaltique (10 m), en piles d'assiettes à la base et constituée de prismes au sommet ; SF₅ — 5^e sol fersiallitique de 2 à 2,5 m, correspondant à la 1^{re} coupe étudiée et formée d'une matrice rouge et d'un mélange de scories. La partie supérieure (0,4 m) est thermométamorphosée par la coulée C₆ ; C₅ — Coulée basaltique (8 m) en piles d'assiettes, ayant donné naissance au sol SF₅ ; SF₄ — 4^e sol fersiallitique très bien développé (2 m) ; C₄ — Coulée basaltique (8-10 m) avec prismes courbes ; B_a — Brèche autoclastique au-dessous de C₄ ; C₃ — Coulée basaltique épaisse (8-10 m), mais fragile. Empilement en piles d'assiette à la base, gros prismes ensuite. C₃ n'a pas donné de paléosol ; E — Éboulis de pente. Empilement en piles d'assiette à la base, gros prismes ensuite. C₃ n'a pas donné de paléosol ; E — Éboulis de pente ; SF₂ — 2^e sol fersiallitique, peu épais (0,5 m) ; C₂ — Coulée basaltique riche en olivine (5-6 m). Affleurement sur une longueur de 50 mètres ; SF₂ — 2^e sol fersiallitique, peu épais (0,5 m) ; C₁ — Coulée basaltique (5-6 m), très vacuolaire à la base, plus massive au sommet ; SF₁ — 1^{er} sol fersiallitique, peu épais (0,4 m) et visible seulement sur une très courte distance : 2 mètres ; E — Éboulis de pente ; B — Brèches volcaniques très hétérogènes, constituant les deux versants depuis le fond de la vallée jusqu'au niveau inférieur des coulées basaltiques, soit plus de 200 mètres de puissance ; T.A. — Coulée de trachyandésite (15 m) interstratifiée dans les brèches

3 et 8). On décèle au microscope dans ces roches volcaniques les mêmes phénocristaux d'augite et d'olivine, celle-ci avec de nombreuses craquelures et souvent bordée d'une couronne rougeâtre d'iddingsite ; dans la mésostase, ces minéraux sont associés aux microlites de labrador et aux opaques très abondants et disséminés dans l'ensemble des préparations.

Cependant on note des différences dans la structure des roches, indiquant que les coulées d'un même trapp ne sont pas identiques. Ainsi la 1^{re} coulée du Suc du Rond contient peu de phénocristaux d'olivine,

contrairement à la 3^e coulée qui en contient beaucoup dans une mésostase très fine, tandis que la 8^e coulée est particulièrement riche en augite. De même, la proportion de verre est aussi très variable. Peu abondant au Col d'Aulac, il est présent dans la 1^{re} coulée du Suc du Rond et peu représenté dans les coulées suivantes de ce site.

Dans le tableau I figurent quelques analyses chimiques de ces roches avec leurs paramètres pétrographiques, très proches de celles examinées dans le Bassin d'Aurillac. Elles appartiennent à une famille s'étendant des basaltes aux basanites, les

TABLEAU I

Composition chimique et paramètres pétrographiques de quelques roches volcaniques du Centre du Cantal

Echantillon	Col d'Aulac			Suc du Rond
	Coulée C4 N°22	Coulée C6 N°61	Coulée C7 N°78	Coulée III SR 30
Analyse et référence	CHESWORTH Guelph (1979)	CANTAGREL- COUTURIE -Labo Géologie Clermont Janvier 1982		
		An. 2294	An. 2301	An. 3342
SiO ₂	42.46	43.30	41.50	44.60
Al ₂ O ₃	12.93	14.50	14.00	14.40
Fe ₂ O ₃	5.24	8.34	7.47	8.95
FeO	6.95	3.84	5.07	3.60
TiO ₂	2.71	2.70	2.20	2.80
P ₂ O ₅	0.66	0.77	0.80	0.62
MnO	0.16	0.19	0.20	0.18
CaO	10.20	10.00	11.10	8.45
MgO	10.25	11.60	11.50	11.00
K ₂ O	1.16	1.30	1.70	1.20
Na ₂ O ⁺	2.12	3.00	3.70	1.90
H ₂ O ⁺	3.95	1.11	0.30	2.00
H ₂ O ⁻	1.30	0.60	0.28	1.70
TOTAL	100.09	101.25	99.82	101.40
Paramètres CPIW	III,5 (3) 4,4 2,3,2,2	III,5 (6) 3,4, 2,3,2,2,	III, 6 (7) 3,4 2,2,2,2,	III, 5', 4,4 2,1,1(2), (1)2
% Néphéline normative	0,3	5,7	15,5	3,2
Paramètres Junß-Brousse				
SAT	-0.7	-11.2	-34.7	-6.6
COL	53.2	50.0	55r3	52.4
Equivalents cationiques				
Si	41.7	40	38.2	42.5
R	33.5	41	44.0	36.6
Identification de la roche	Basalte	Basalte Basanitoféde	Basanite	Basalte à tendance basanitoféde

Remarque: Les coulées successives du Col d'Aulac sont de plus en plus riches en néphéline normative. Certaines roches, notamment n° 22 et SR 30 ont subi un début d'altération marqué par une teneur en H₂O⁺ relativement élevée.

coulées successives du Col d'Aulac étant en particulier de plus en plus riches en néphéline normative ; leur détermination a été faite par référence aux travaux de MACDONALD et KATSURA (1964) et de DE LA ROCHE *et al.* (1980).

Cependant, quelques caractéristiques communes attestent la parenté de tous ces matériaux avec ceux du bassin d'Aurillac : il s'agit de roches basaltiques moyennement alcalines d'après leur situation dans le diagramme de KUNO (1965) appartenant à la série sous-saturée du Cantal selon BROUSSE (1961) et proches des basaltes de la région décrits par l'un de nous (LARROQUE, 1975).

3. MORPHOLOGIE DE QUELQUES PROFILS DU CENTRE DU CANTAL (fig. 3)

Elle est fort dissemblable d'un profil à l'autre comme le montre la figure 3.

La coupe n° 1 du Col d'Aulac développée sur la coulée C4 est relativement complexe. Elle comporte 3 niveaux, la base représentant une zone d'altération profonde de la brèche sous-basaltique, de teinte ocre, avec des matériaux allégés, une matrice rougeâtre abondante et des scories altérés de teinte rose : 7,5 YR 7/4 à brune : 7,5 YR 5/4 ; elle est suivie d'un niveau jaunâtre intermédiaire : 7,5 YR 5/8 à 6/8 et d'un niveau sommital de teinte rouge jaunâtre : 5 YR 5-6/6 due au thermométamorphisme par la coulée C5. En même temps, on observe une structure en strates qui se délittent en plaquettes dans les 40 derniers centimètres du profil et qui est imposée par le poids de la coulée qui le fossilise.

Le sol développé sur la coulée C6, non représenté sur la figure, est également complexe avec un niveau basal rouge, un niveau intermédiaire ocre et 2 niveaux supérieurs rouges.

Par contre, sur la 3^e coulée du Suc du Rond

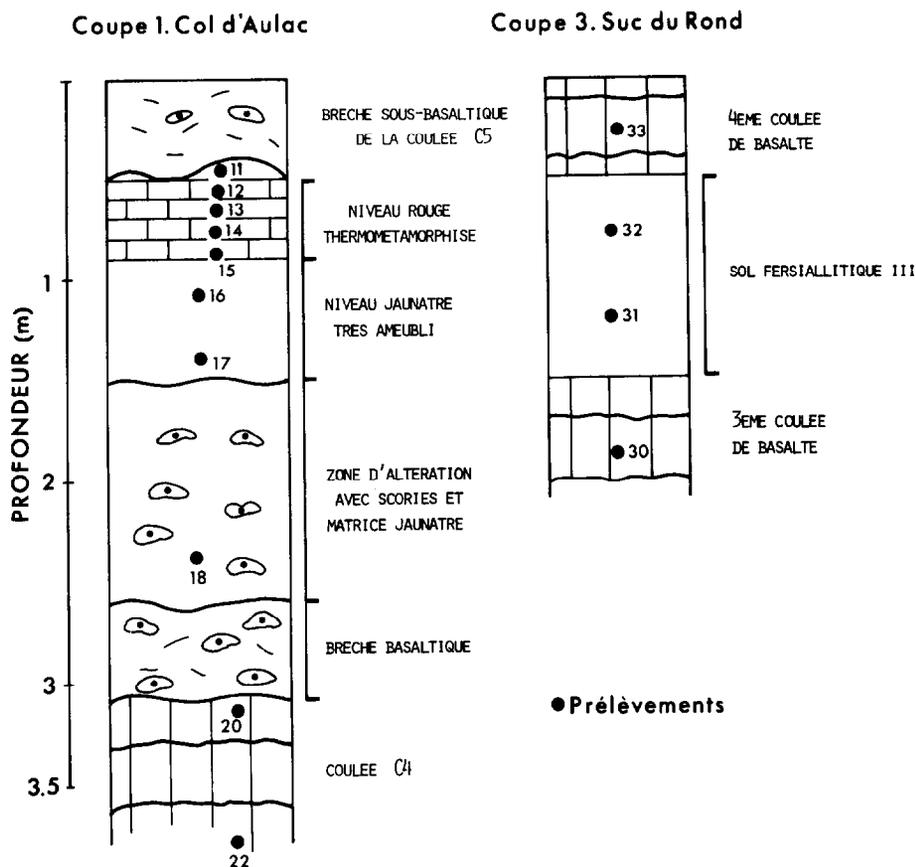


FIG. 3. — Morphologie des sols fersiallitiques du Centre du Cantal. Exemples du Col d'Aulac et du Suc du Rond

(fig. 3), le sol est relativement uniforme et de teinte rouge sombre : 2,5 YR 3/6 à 4/6.

Ainsi, les sols interbasaltiques diffèrent à la fois par leur morphologie, leur couleur et leur épaisseur. Celle-ci varie de 1 à 3 mètres, suivant le temps écoulé entre les venues successives et aussi selon l'intensité de l'érosion susceptible de tronquer une partie des profils. Quant à la partie thermométamorphisée, visible également dans les coupes proches de Salers (Cantal), son épaisseur oscille entre 20 et 50 cm.

4. CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS (fig. 4)

4.1. Granulométrie et taux de saturation

Dans le bassin d'Aurillac, nous avons indiqué que les sols fersiallitiques contenaient dans leur niveau sommital 26 % d'argile < 2 μ à Saint-Étienne-de-Carlat et jusqu'à 54 % à Belbex, ce qui est de l'ordre de grandeur des résultats recueillis

pour ceux développés sur matériaux volcaniques en régions subtropicales et tropicales (BAKKER, 1966 ; SÉGALEN, 1967 ; TERCINIER *et al.*, 1968 ; QUANTIN *et al.*, 1977). Si la morphologie des profils du Centre du Cantal rappelle celle de la région d'Aurillac, leur granulométrie est très différente ; la phase < 2 μ est plus faible au Col d'Aulac, comme l'indique le spectre granulométrique de la figure 4. Au Suc du Rond, les fractions fines ne sont que peu représentées. Ici l'ameublissement de la roche-mère a sans doute été limité par l'arrivée plus ou moins rapide des coulées basaltiques supérieures, jouant alors le rôle d'écran de protection vis-à-vis des agents de l'évolution superficielle, alors qu'il a pu se poursuivre librement autour d'Aurillac, durant un très long laps de temps.

Une faible quantité de matière organique subsiste encore dans ces sols : 0,2 à 0,5 % suivant les niveaux ; les pH mesurés sur 14 échantillons depuis la base jusqu'au sommet de 2 profils du Col d'Aulac oscillent entre 6,1 et 7,0.

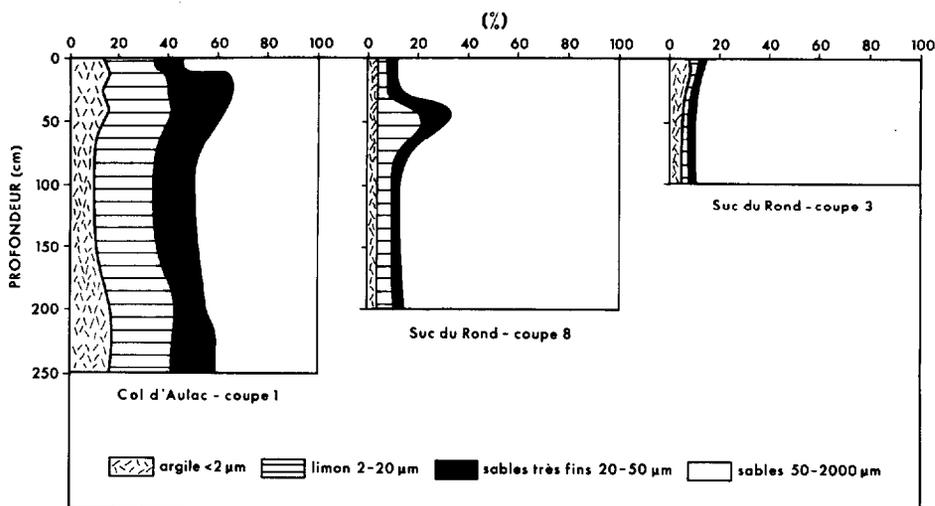


FIG. 4. — Spectres granulométriques de quelques sols fersiallitiques du Centre du Cantal. Exemples du Col d'Aulac et du Suc du Rond

La valeur moyenne du taux de saturation pour 7 échantillons du Col d'Aulac recueillis entre 0 et 100 cm s'élève à 75 % ; elle est de 100 % pour 3 sols interbasaltiques du Suc du Rond, tandis que le taux de Ca échangeable s'établit respectivement à 43,5 et à 74,5 % de la CEC dans les deux sites. En outre, tous les sols contiennent une proportion élevée de fer libre DEB : 7 à 16 % Fe^{2+} .

4.2. Étude de la porosité de 2 basaltes et de leurs sols (fig. 5)

La porosité des roches-mères et des sols qui en sont dérivés a été étudiée à l'aide du porosimètre à mercure où l'on mesure le volume de pénétration de ce liquide en fonction des pressions exercées qui croissent de 0,1 à 3.000 atmosphères. En même temps, le tracé de la dérivée première de la courbe de pénétration permet d'estimer les diamètres des pores les plus fréquemment représentés.

La figure 5 contient les deux types de courbes pour un profil du Suc du Rond et un autre du Col d'Aulac.

La roche du Suc du Rond (SR 80) est un basalte bulleux ayant une porosité calculée à partir des densités réelle et apparente de 6 %, valeur apparemment élevée, mais pouvant s'expliquer par l'abondance des gaz emprisonnés dans la pâte au moment de la mise en place de la coulée. Au contraire le basalte d'Aulac, à grain fin, a une porosité de 0,3 % seulement. Aussi enregistre-t-on un volume de pénétration du mercure plus grand au Suc du Rond, avec des pores de diamètre variable, mais qui

atteignent 12 μ m, alors qu'au Col d'Aulac, ils sont tous inférieurs à 0,003 μ m.

Dans les sols, le volume poreux s'élève de façon considérable, mais dans les deux cas, il est plus important pour les niveaux intermédiaires 70-90 cm et 50-80 cm ; en outre, le volume de pénétration du mercure est plus fort au Col d'Aulac où la porosité calculée atteint 50 % contre 36 % au Suc du Rond. Ceci confirme les données de la granulométrie qui avait révélé un ameublissement des basaltes plus intense à Aulac. La distribution des pores est aussi différente, les diamètres les plus fréquents étant de 10 μ m et 0,005 μ m au Suc du Rond et de 3,2 — 0,07 et 0,005 μ m à Aulac.

Enfin, dans la partie sommitale des deux sols, il y a réduction de la porosité totale : 33 et 43 % respectivement pour le Suc du Rond et Aulac, et corrélativement diminution du volume de pénétration du mercure et de la taille moyenne des pores. On peut rendre compte d'un tel résultat en invoquant le tassement mécanique de l'horizon supérieur par le poids de la coulée qui le coiffe.

5. COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES PHASES FINES DES SOLS : 0-20 μ

La composition minéralogique des phases fines < 2 μ et 2-20 μ extraites de différents niveaux des paléosols, a été étudiée à l'aide de plusieurs techniques :

— dissolution de la phase non cristalline par le réactif de TAMM (acide oxalique + oxalate NH_4^+ à pH = 3,2 et à l'obscurité) ;

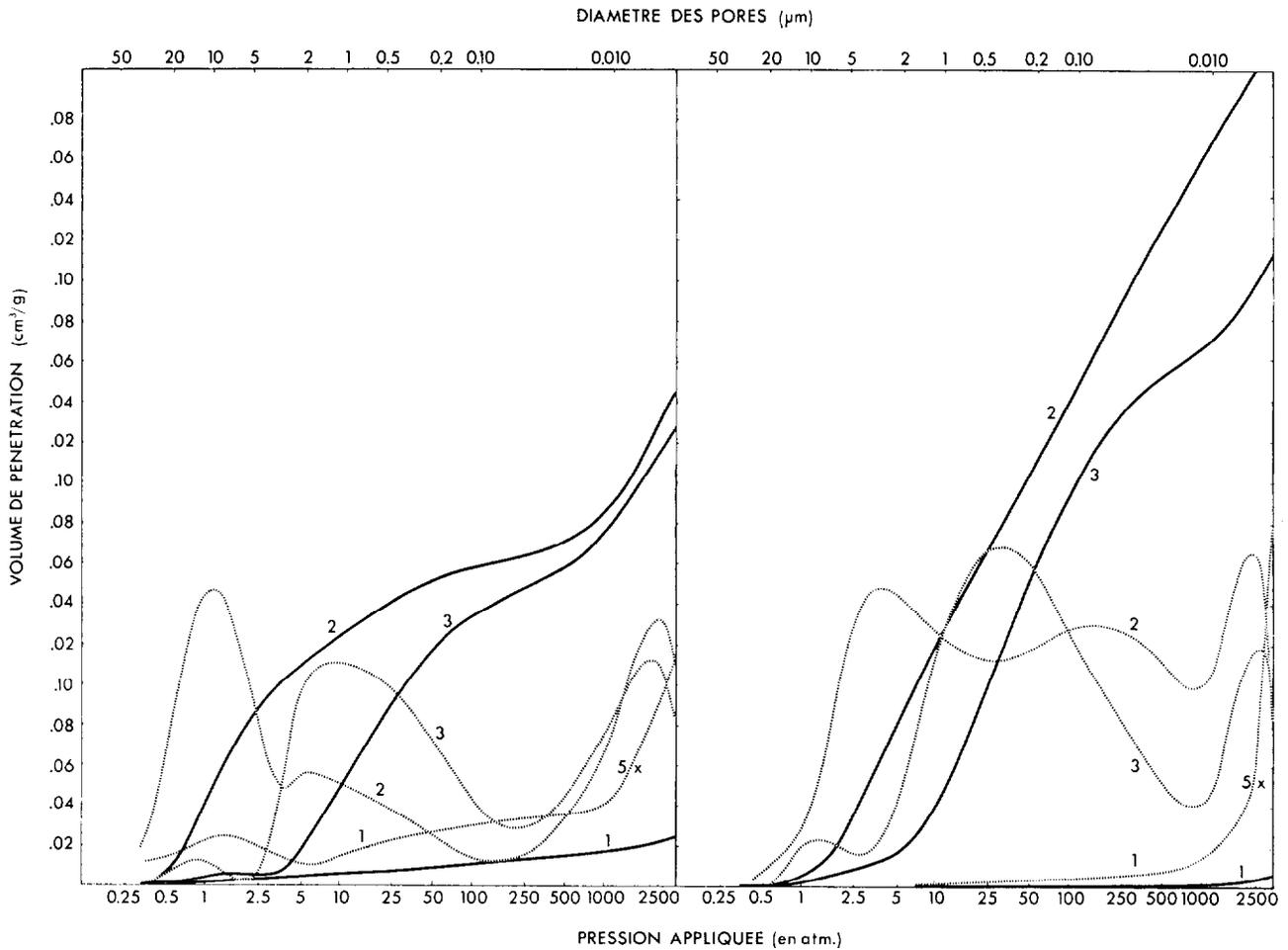


Fig. 5. — Mesure de la porosité par l'estimation du volume de pénétration de mercure en fonction de la pression exercée (courbes en traits pleins) et distribution des pores les plus fréquents (courbes en pointillés). A gauche : Sol fersiallitiques n° 8 du Suc du Rond. 1. Basalte frais — SR 80 ; 2. Niveau 70-90 cm — SR 81 ; 3. Niveau 40-50 cm — SR 82 ; A droite : Sol fersiallitique n° 1 du Col d'Aulac. 1. Basalte frais n° 22 ; 2. Niveau 50-80 cm n° 16 ; 3. Niveau 10-20 cm n° 13

— rayons X avec les trois examens classiques : échantillons naturels saturés Mg^{++} , chauffage à 400° C et traitement par l'éthylène-glycol ;

— analyses thermiques différentielle et thermopondérale ;

— microscopie électronique à transmission (MET) ;

— mesures des surfaces totales par rétention d'éthylène-glycol ;

— analyses chimiques suivant la méthode utilisée au laboratoire de géologie de l'Université de Clermont-Ferrand : on effectue une fusion de l'échantillon au métaborate de strontium dans un creuset de graphite placé dans un four à induction à 1 200 °C durant 5 minutes. La perle formée est dissoute par NO^3H pur ; les dosages des éléments chimiques sont réalisés par absorption atomique.

5.1. Présence d'une phase amorphe dans les fractions fines (tabl. II)

Dans tous les échantillons examinés, et quelle que soit la profondeur du prélèvement, les fractions fines $< 2 \mu$ et $2-20 \mu$ contiennent une phase amorphe essentiellement constituée de SiO^2 , Al^2O^3 et Fe^2O^3 , auxquels s'ajoutent une part de MgO et Na^2O et des oligo-éléments représentés surtout par Cu , Zn et Co .

Mais cette composition est variable d'un profil à l'autre et probablement sous la dépendance du « site » tel que défini par MEUNIER (1977) avec tout son environnement immédiat, et notamment l'intensité du drainage. Ainsi on pourrait rendre compte de la richesse relative en SiO^2 du niveau 30-40 cm dans le profil 1 qui apparaît aussi bien dans

TABLEAU II

Composition de la phase amorphe contenue dans les fractions fines des sols fersiallitiques du Col d'Aulac

Profil	N° 1 sur coulée C4		N° 2 sur coulée C6			N° 1		N° 2		
	< 2μ		< 2μ			2-20μ		2-20μ		
N° échantillon	151	181	221	241	261	152	182	222	242	262
Profondeur (cm)	30-40	220-250	30-60	160-180	270-290	30-40	220-250	30-60	160-180	270-290
Eléments (en %)										
SiO ²	3.80	1.20	0.78	1.12	1.35	3.20	1.00	0.70	0.85	1.45
Al ² O ³	1.70	1.93	1.25	1.70	2.08	1.86	2.00	1.13	1.26	1.89
Fe ² O ³	0.88	0.87	1.54	1.26	1.80	1.16	1.02	1.54	1.20	2.31
MgO	0.32	0.21	0.10	0.14	0.11	0.35	0.02	0.14	0.10	0.19
Na ² O	0.21	0.02	0.35	0.58	0.24	0.24	0.16	0.03	0.04	0.04
MnO	0.01	0.03	0.03	0.02	0.05	0.04	0.04	0.04	0.02	0.08
TOTAL	6.92	4.26	4.05	4.82	5.63	6.85	4.24	3.58	3.47	5.96
SiO ² /Al ² O ³ mol.	3.8	1.06	1.06	1.12	1.10	2.92	0.85	1.05	1.14	1.30
Oligoéléments (en ppm)										
CuO	30	20	22	50	37	24	9	17	30	34
ZnO	32	32	42	42	62	27	42	67	63	98
CoO	36	61	19	20	34	32	44	22	6	60
NiO	11	10	6	9	9	21	16	4	8	10
PbO	21	6	18	56	38	14	1	6	14	6

An. M^{me} CASSEAUT, Labo. TRICHET, Orléans, sept. 1981.

Remarque: Les phases amorphes contiennent H₂O⁺ dont l'estimation approchée peut être faite par le calcul de YOSHINAGA (1966).

la fraction < 2 μ que dans celle de 2-20 μ, et au contraire la pauvreté en cet élément dans le niveau correspondant du profil 2.

Le total de tous les éléments amorphes est compris entre 3, 6 et 6,9 % ; on note une prédominance des éléments Si et Al, constituants des aluminosilicates. Les rapports moléculaires SiO²/Al²O³ sont le plus souvent voisins de 1,0 à l'exception du niveau superficiel du profil 1 où il est beaucoup plus élevé. La valeur proche de 1,0 indique la présence probable d'allophanes (HEMNI *et al.*, 1976).

La teneur en fer amorphe varie entre 1 et 2 %.

5.2. Phases < 2 μ

Pour cette étude, nous avons retenu le sol n° 2 du Col d'Aulac compte tenu de sa profondeur. Les résultats sont explicités dans les figures 6 et 7 et le tableau III.

La composition minéralogique des trois niveaux examinés : 30-60, 160-180 et 270-290 cm se révèle très différente.

A la partie supérieure du profil, on décèle un minéral 1/1 très abondant, plus proche d'une métahalloysite que d'une kaolinite par sa raie fondamentale comprise entre 7,14 et 7,24 Å et une smectite (raie à 14,4 Å gonflant à l'éthylène-glycol) qui n'est que peu représentée. La gibbsite est aussi

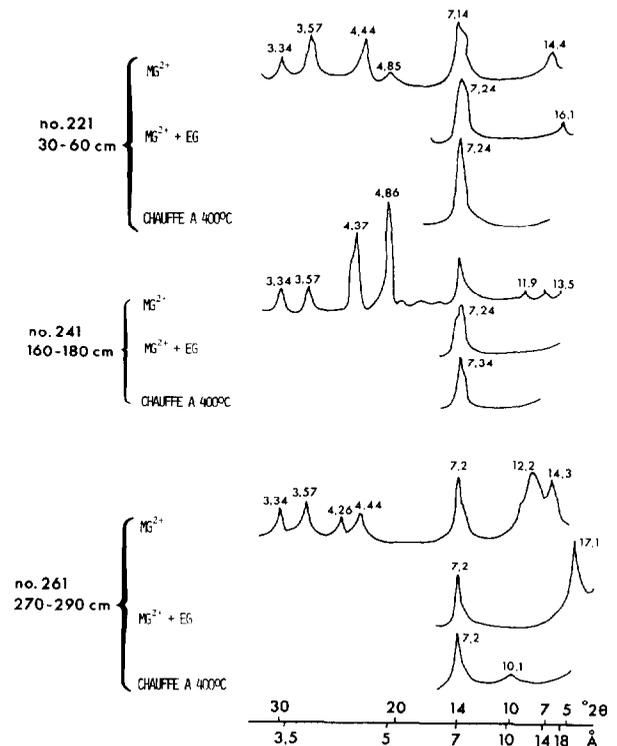


FIG. 6. — Diagrammes RX des fractions < 2 μm du sol fersiallitique n° 2 du Col d'Aulac

identifiée par sa raie à 4,86 Å, mais seulement en traces ; de même la présence de quartz est probable (raie à 3,34 Å de faible intensité, et la raie à 4,26 Å n'est pas visible).

Les mêmes conclusions découlent de l'étude des diagrammes RX de la partie sommitale du profil n° 1 du Col d'Aulac où les niveaux examinés 0-5, 10-20 et 30-40 cm contiennent tous une métahalloysite dominante (raie à 7,34 Å) et une teneur nulle ou très faible de smectite avec en outre un interstratifié irrégulier 10-14 Å de faible amplitude dans la zone 30-40 cm. La gibbsite est également présente partout. Il apparaît ainsi que le thermométamorphisme, très intense dans la zone 0-20 cm et moins actif dans le niveau 30-40 cm, n'a pas apporté de modifications fondamentales dans la composition du cortège argileux.

Dans la zone intermédiaire du profil 2, la métahalloysite est toujours abondante et la gibbsite s'accroît dans de fortes proportions. Le quartz est encore présent. On n'observe plus de smectite mais des traces d'un interstratifié irrégulier 10-14 Å non identifié.

Enfin, à la base du profil, la smectite est la mieux caractérisée et la plus abondante avec un gonflement à 17,1 Å après traitement à l'éthylène glycol et son écrasement à 10 Å au chauffage, tandis que la gibbsite disparaît.

Ces données sont confirmées par les analyses thermiques différentielles où les pics endothermiques à 490-500 °C et exothermiques à 890-915 °C correspondant au minéral 1/1 sont très nets, de même que ceux de la gibbsite à 275-290 °C dans les niveaux 30-60 cm et 160-180 cm. Les courbes thermogravimétriques corroborent aussi ces résultats tout en permettant une estimation approximative des deux minéraux, si l'on affecte la perte totale de l'eau entre 220 et 320 °C à la gibbsite en négligeant les oxyhydroxydes de fer, et celle entre 400 et 600 °C au minéral 1/1. Dans les trois horizons étudiés du profil, la part de gibbsite représente respectivement environ 5,25 et 0 % de la phase < 2 µ et celle de la métahalloysite : 65, 52 et 50 % de cette même phase.

Quelques observations au MET corroborent aussi ces résultats. La métahalloysite, très nette, se présente sous forme de tubes courts, irréguliers et parfois en petits glomérules, plus fréquents dans le profil 2 du Col d'Aulac que dans le profil 1. La gibbsite de la zone intermédiaire est opaque, désordonnée et brisée. Quelques rares plaquettes de micas altérés plus ou moins transparents qui n'avaient pas été identifiées aux RX s'ajoutent au cortex argileux.

Dans les analyses chimiques, les constituants essentiels sont : SiO₂, Al₂O₃, H₂O et Fe₂O₃ dont

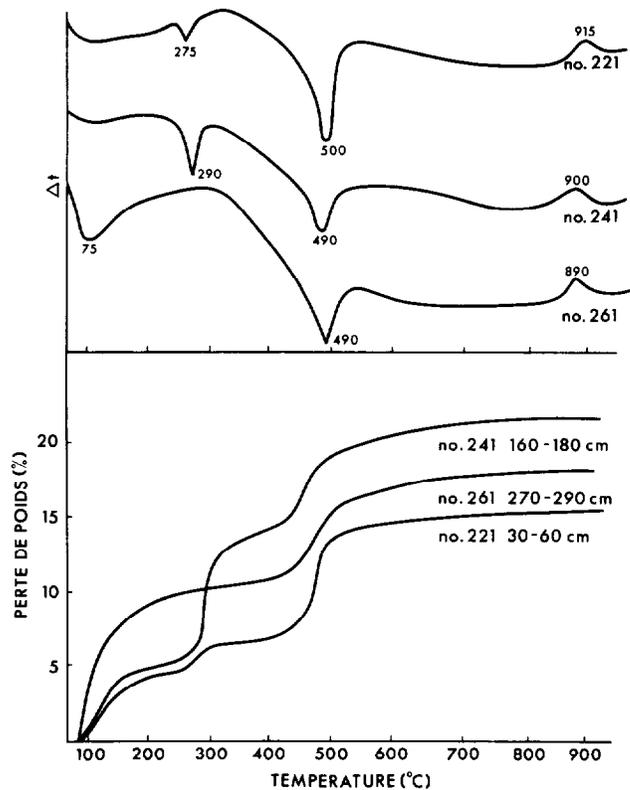


FIG. 7. — Analyses thermiques différentielles et thermogravimétriques des fractions < 2 µm du sol fersiallitique n° 2 du Col d'Aulac

une part importante n'est pas incluse dans les réseaux cristallins. On note des différences de composition dans les échantillons et l'évolution très significative du rapport moléculaire SiO₂/Al₂O₃ ; voisin de 2 au sommet du profil (30-60 cm) où domine la métahalloysite, il est nettement inférieur à 2 dans la zone intermédiaire caractérisée par l'abondance de la gibbsite et supérieur à 2 à la base où la smectite est la plus nette. Les mesures des surfaces totales sont aussi en excellente corrélation avec cette composition minéralogique, la surface la plus grande étant enregistrée dans l'horizon 270-290 cm.

Des résultats similaires sont aussi notés pour le profil n° 1.

Il faut préciser qu'une telle composition, variable suivant les horizons, confirme toute l'importance du « site » qui oriente en définitive les néogénèses secondaires (CLÉMENT *et al.*, 1982). On peut imaginer que la partie inférieure du paléosol, plus riche en smectite, s'est développée directement aux dépens de la coulée basaltique dans un environnement de faible drainage ; la partie médiane correspondrait

Photos obtenues au microscope électronique à transmission. QUANTIN (1984). Phases <math>< 2 \mu</math>

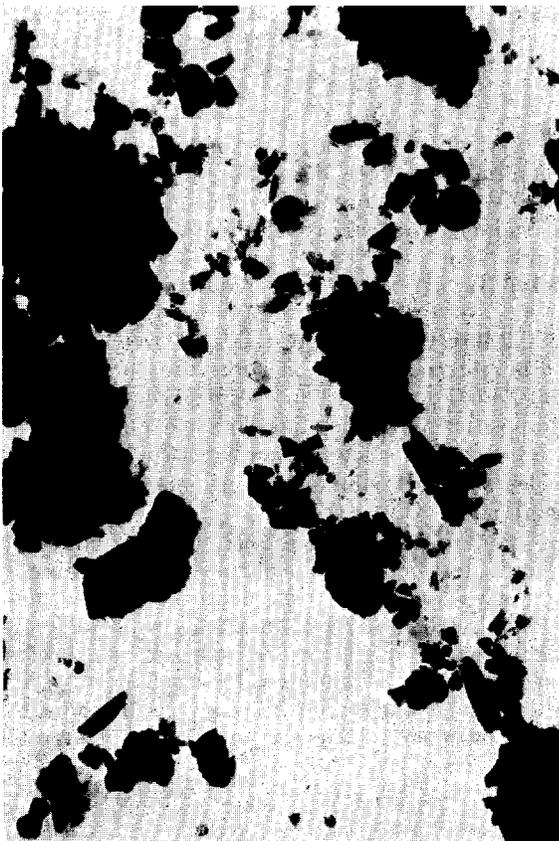


TABLEAU III
Analyses des phases $< 2 \mu$ du 2^e profil du Col d'Aulac

Echantillon	221	241	261
Profondeur (cm)	30-60	160-180	270-290
N° Analyse	A.2721	A.2722	A.2723
SiO ²	35,30	27,30	37,00
Al ² O ³	30,50	35,60	25,10
Fe ² O ³	12,30	10,00	14,30
FeO	tr.	tr.	tr.
TiO ²	3,30	2,50	1,30
P ² O ⁵	n.d.	n.d.	n.d.
MnO	0,04	0,05	0,11
CaO	0,02	tr.	0,07
MgO	0,50	0,40	1,30
K ² O	0,40	0,40	0,40
Na ² O	0,10	0,10	0,10
H ² O ⁺	14,50	19,72	13,74
H ² O ⁻	2,47	2,97	4,64
TOTAL	99,43	99,04	99,96
SiO ² /Al ² O ³ moléculaire	1,97	1,30	2,90
Surface totale m ² /g	142,1	117,8	191,2
Fe ² O ³ libre %	7,06	1,90	8,30

AN. S. CANTAGREL et F. COUTURIE, Labo. de Géologie Clermont, mai 1981.

à l'altération de produits pyroclastiques où le drainage est plus accusé ; quant à la partie supérieure, elle peut être un remaniement plus ou moins marqué de l'ensemble du paléosol.

Si nous comparons maintenant la composition des fractions $< 2 \mu$ des sols du Col d'Aulac avec celles des sols fersiallitiques du bassin d'Aurillac, nous notons que la métahalloysite est toujours prépondérante dans les deux situations, mais que la gibbsite est absente et la smectite mieux représentée autour d'Aurillac. L'intensité du pic à 14 Å est en effet plus nette ; les surfaces totales atteignent

230 m²/g à Belbex et 390 m²/g à Saint-Étienne-de-Carlat ; les rapports moléculaires SiO²/Al²O³ sont compris entre 2,57 et 4,5. Ici la nature fersiallitique de la pédogenèse est bien marquée.

Au Col d'Aulac, la morphologie des sols rouges est plus complexe, témoignant ainsi de la diversité des paléosols sur laves basiques dans le Massif Central. La dominance plus marquée du minéral 1/1 annonce une évolution plus accusée qu'autour d'Aurillac. Des sols relativement voisins sur les plans morphologique et minéralogique, ont été décrits aux îles Canaries et apparentés aux types fersial-

PHOTO 1. — G x 20.000. Échantillon n° 151 (30-40) cm. Niveau thermométamorphisé de la 1^{re} coupe du Col d'Aulac (Cantal).

Divers types de métahalloysite en tubes et glomérules et débris de micas altérés

PHOTO 2. — G x 20.000. Échantillon n° 241 (160-180) cm. 2^e coupe du Col d'Aulac. Importance de la gibbsite dans la préparation ; traces d'halloysite en tubes

PHOTO 3. — G x 20.000. Échantillon n° 181 (220-250) cm. Col d'Aulac 1^{re} coupe ; métahalloysite en petits tubes ; présence de gibbsite et de micas altérés

PHOTO 4. — G x 25.000. Échantillon n° 221 (30-60) cm. 2^e coupe du Col d'Aulac. Métahalloysite dominante en tubes et petits glomérules ; présence d'allopmane

litiques ou ferrallitiques pénévoués et rajeunis (TEJEDOR SALGUERO *et al.*, 1978). Peut être les paléolsols d'Aulac font-ils la transition entre les types fersiallitiques et ferrallitiques. On aurait ainsi une séquence topoclimatique caractérisée par des sols fersiallitiques aux altitudes plus basses du bassin d'Aurillac (630 à 700 mètres) et des types plus évolués dans les zones plus hautes (au-delà de 1.100 mètres).

5.3. Phases 2-20 μ

La composition des fractions 2-20 μ étudiée à l'aide des rayons X (fig. 8) rappelle celle des éléments $< 2 \mu$ dans les mêmes niveaux des profils. Au sommet, le minéral 1/1 est dominant (34 % d'après la perte d'eau entre 400 et 600 °C de la courbe thermopondérale); la smectite est en faible quantité, tout comme la gibbsite; plagioclases et quartz accompagnent ces minéraux.

Dans la zone 160-180 cm, on note une teneur en métahalloysite du même ordre de grandeur que celle du niveau sommital et le développement très important de la gibbsite (25 %); la smectite est absente; les plagioclases sont bien caractérisés.

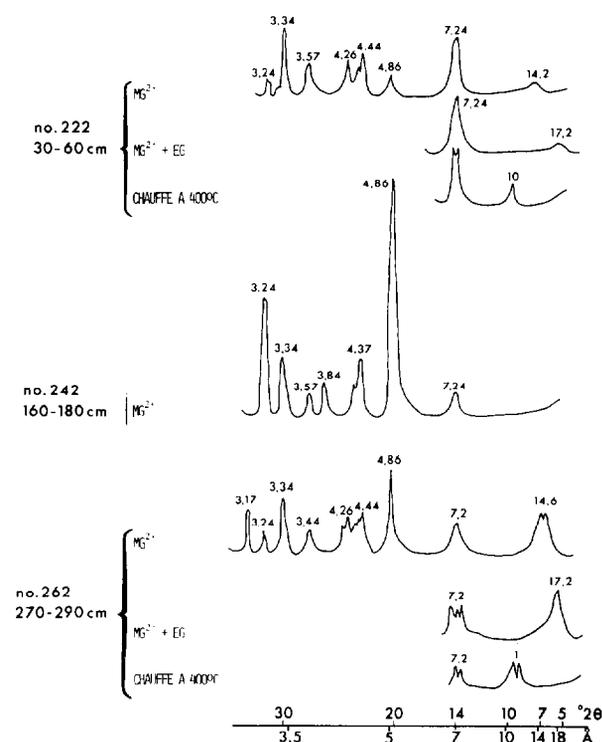


FIG. 8. — Diagrammes RX des fractions 2-20 μm du sol fersiallitique n° 2 du Col d'Aulac

En zone profonde, la smectite est la mieux caractérisée et le minéral 1/1 est aussi important que dans le reste du profil. Le pic de la gibbsite à 4,86 Å a une intensité intermédiaire entre celui de la surface et celui de la zone 160-180 cm, tandis que plagioclases et quartz sont aussi bien représentés.

Ainsi, la présence des minéraux primaires différencie fondamentalement les fractions 2-20 μ des phases $< 2 \mu$ où ils sont absents et indique que l'évolution géochimique n'est pas encore achevée.

6. ÉVOLUTION CHIMIQUE GLOBALE DEPUIS LA ROCHE-MÈRE JUSQU'AU SOMMET DES PROFILS AU COURS DE LA PALÉOPÉDOGÉNÈSE

6.1. Analyses chimiques totales (annexes I et II)

Cette évolution a été suivie grâce aux analyses chimiques effectuées sur le matériau global d'un niveau donné, toutes fractions confondues, suivant la technique déjà décrite dans un paragraphe précédent. Cinq sols différents ont été choisis pour cette étude, deux au Col d'Aulac et trois au Suc du Rond; les analyses ont été réalisées depuis la roche-mère jusqu'au sommet des profils, en divers horizons plus ou moins rapprochés. Les résultats obtenus pour trois d'entre eux figurent, à titre d'exemples, dans les annexes I et II.

En composant la composition des matériaux deshydratés à 105 °C des divers profils à celle de la roche-mère basaltique, la variation relative des divers éléments au cours de la paléopédogenèse se traduit comme suit :

1. Transformation quasi totale de Fe^{2+} en Fe^{3+} ; la fraction de Fe^{2+} restant au sommet des profils est nulle (Suc du Rond) ou faible : 5 % environ au Col d'Aulac.

2. Désilicification variable suivant les sites, même très rapprochés; la perte de SiO_2 la plus faible est enregistrée au Suc du Rond VIII (8,5 %) et la plus élevée au Col d'Aulac n° 1 (44 %).

3. Concentration relative importante des éléments Al, Fe et Ti dans les sols.

4. Évacuation quasi totale des cations Na et Ca dont les pertes moyennes s'établissent respectivement à 94 % et 95 % pour 6 profils dont un du bassin d'Aurillac avec des écarts-types très faibles. Les pertes de Mg sont aussi très fortes : 88 % à l'exception du sol n° 2 du Col d'Aulac où des apports de cendres non altérées viennent s'ajouter au profil. Elles sont alors de 30 %.

5. Vulnérabilité accusée de K, mais un peu plus faible cependant que celle des autres cations : 65 %.

L'élimination considérable des alcalins et alcalino-terreux marque ainsi une différence importante avec la pédogenèse des régions tempérées.

Si l'on classe les constituants chimiques essentiels par ordre de mobilité croissante, on a la séquence suivante :

Al, Fe, Ti < Si < K < Mg < Ca, Na
 très stables < mobilité variable < mobile < très mobiles

Cette séquence n'est pas différente de celle obtenue sur roche basique en pays tempéré, mais elle fait apparaître d'une manière beaucoup plus tranchée deux familles distinctes : l'une composée d'éléments très stables et l'autre d'éléments extrêmement mobiles, dont l'élimination est presque complète.

En conséquence, on peut en conclure que la plus grande partie des minéraux primaires a été altérée et que la composition globale du matériau dont le rapport moléculaire SiO_2/Al_2O_3 est voisin de 2, confirme la néogénèse dominante des argiles 1/1.

6. Hydratation très accusée, en liaison avec la néogénèse des minéraux argileux et associés.

6.2. Représentation graphique de l'évolution chimique par le diagramme de PARKER (fig. 9)

L'évolution chimique au cours de la pédogenèse peut être suivie par le diagramme de PARKER (1970) où la composition globale d'un niveau donné d'un

sol est représentée par un indice prenant seulement en compte les cations qui lient ces mêmes cations avec l'oxygène. Il se définit comme suit :

$$I = \left[\frac{Ca}{0.7} + \frac{Mg}{0.9} + \frac{K}{0.25} + \frac{Na}{0.35} \right] \times 100$$

La figure 9 représente les variations de cet indice depuis la roche-mère jusqu'au sommet de 3 paléosols qui sont comparés à deux andosols récents développés sur des basaltes de composition semblable. Le graphique traduit une évolution chimique intense, à telle enseigne que la valeur de l'indice devient très faible dans les trois profils ; elle est plus accusée que celle des andosols (DEJOU *et al.*, 1982).

6.3. Diagramme de CHESWORTH (fig. 10)

Cette autre représentation graphique de l'évolution géochimique globale montre un déplacement très important du point représentatif de la composition de la roche-mère jusqu'à celle de la zone sommitale des trois paléosols. Le plus accusé est celui enregistré pour le profil n° 1 du Col d'Aulac dont les points sont groupés à la frontière du « stade ultime » où seuls subsistent Si, Al et Fe par suite de l'élimination presque complète des autres cations. Viennent ensuite le profil n° 2 du Col d'Aulac et le profil III du Suc du Rond à la limite du stade intermédiaire. Les andosols demeurent dans le domaine initial

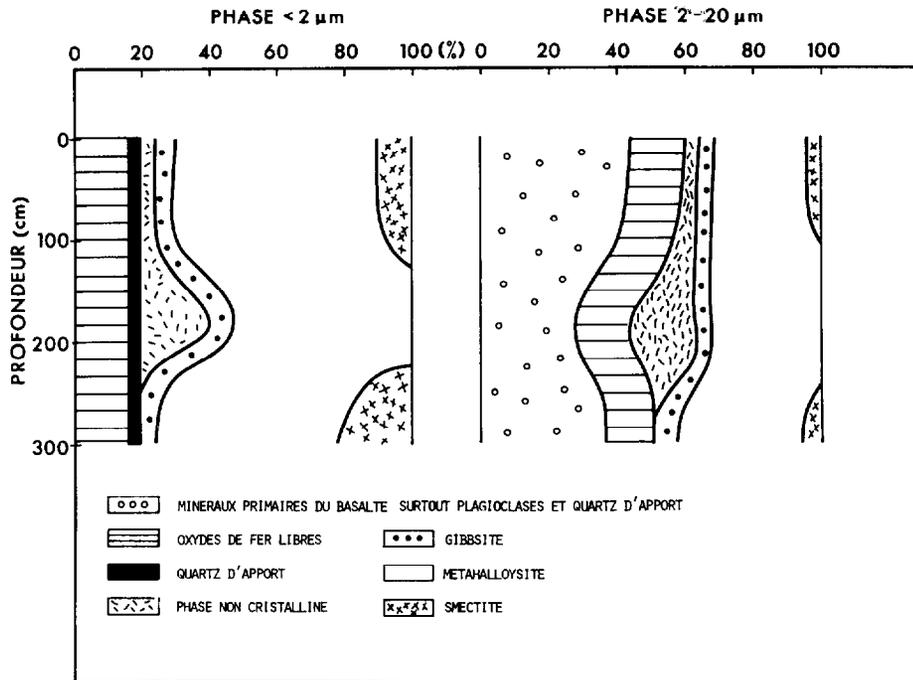


FIG. 9. — Distribution des minéraux argileux et associés dans les phases < 2 μm et 2-20 μm du sol fersiallitique n° 2 du Col d'Aulac

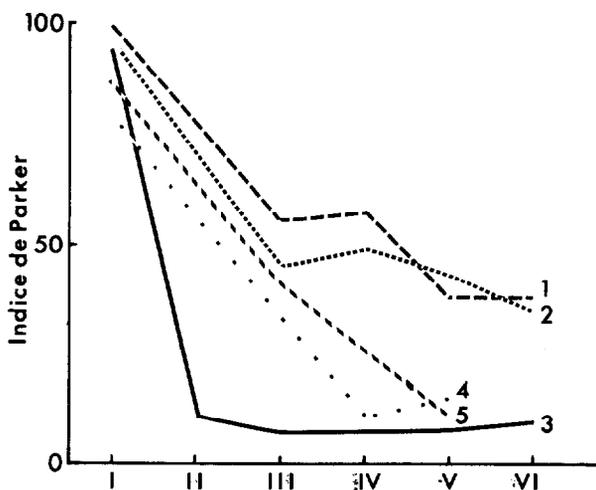


FIG. 10. — Diagramme de PARKER pour divers profils du Cantal. 1 et 2 — Andosols actuels de la Barrière; 3 — Sol fersiallitique n° 1 du Col d'Aulac; 4 — Sol fersiallitique n° 2 du Col d'Aulac; 5 — Sol fersiallitique n° 3 du Suc du Rond. En abscisse, sont représentés les différents niveaux des profils depuis la roche-mère basaltique (I) jusqu'au sommet du sol (VI)

où tous les minéraux argileux 2/1 et 1/1 peuvent coexister. Ce diagramme confirme l'importance de l'altération en produits néoformés presque totalement composés de Si, Al et Fe.

7. AGE DES SOLS ÉTUDIÉS (tabl. IV)

L'âge des sols peut être estimé de façon approximative par la datation des roches-mères qui leur ont donné naissance. Les structures en trapp, comme celle du Col d'Aulac, où les coulées successives fossilisent les sols et figent en quelque sorte leur évolution apparaissent, pour une telle estimation, plus favorables que les coulées à l'air libre où les sols peuvent être tronqués par l'érosion et où des pédogenèses distinctes et d'âge très différent de celui de la roche-mère peuvent se succéder.

Le tableau IV contient quelques datations de basaltes ayant donné naissance ou non à des paléosols rouges. Toutes les coulées qui ont engendré un sol de ce type ont un âge supérieur à 6,5 millions d'années. D'autre part, les manifestations volca-

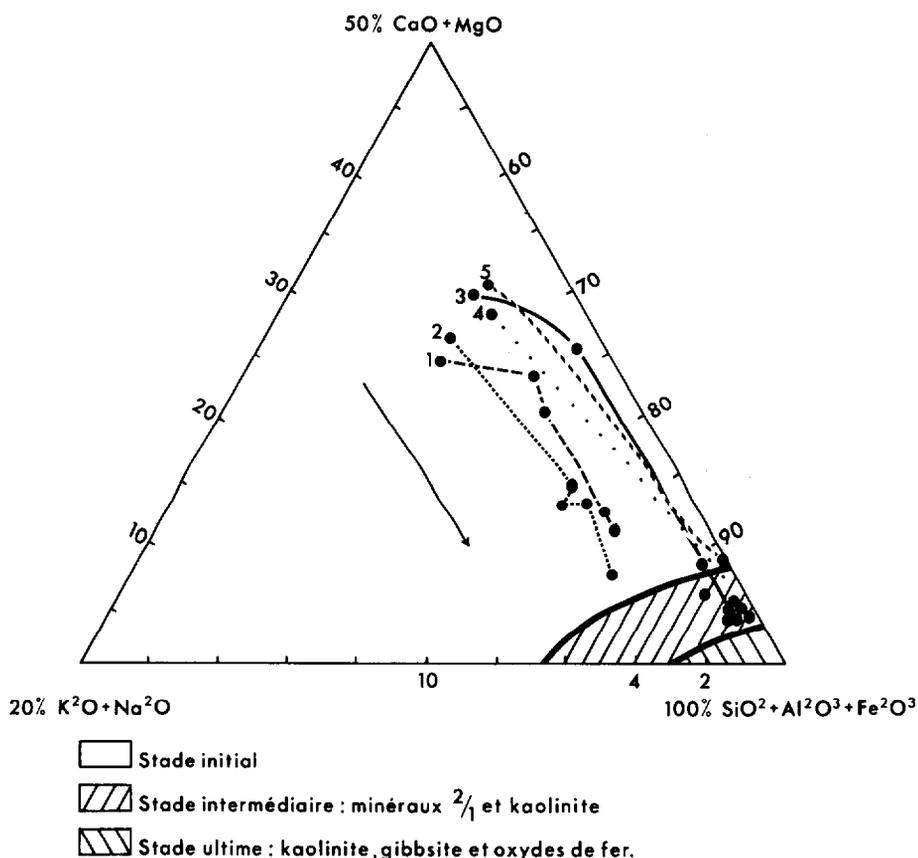


FIG. 11. — Diagrammes de CHESWORTH pour les mêmes sols du Cantal. 1 et 2 — Andosols; 3 à 5 — Sols fersiallitiques. La flèche indique le sens de l'évolution géochimique

TABLEAU IV

Datations en millions d'années par la méthode K/Ar de coulées basaltiques du Massif Central sur lesquelles se sont développés ou non des paléosols rouges

Basaltes avec paléosols			Basaltes sans paléosols		
Localisation	Âge	Référence	Localisation	Âge	Référence
CANTAL					
Col d'Aulac - Le Faigoux coulée C2 coulée C6	7,2 ± 0,4	Cantagrel (1982)	Puy Courny coulée supérieure	6,48 ± 0,1	Bellon et al (1972)
	6,8 ± 0,5				
Puy Courny Aurillac coulée inférieure	7,3 ± 0,4	Bellon et al (1972)	Badailhac	4,51 ± 0,1	Bellon et al (1972)
Belbex (Aurillac)	7,3	Prolongement de la coulée du Puy Courny. Gibert (1972)	Table de Carlat	5,15 ± 0,45	id.
St Etienne de Carlat	7,37 ± 0,4	Bellon et al (1972)	Roufilange	3,83 ± 0,3	id.
			Roudadou	5,5	Gibert (1972)
PUY DE DÔME					
Puy de Mur	13 ± 1,2	Bellon et al (1971)	Charade	3,0	Bout et al (1966)
			Montagne de la Serre	3,4	
			Pardines	4,2	
			Roca Neyra	3,1	
Rochefort-Montagne coulée inférieure	15 ± 4	Cantagrel (1982)	Rochefort-Montagne coulée supérieure	0,9 ± 0,15	Cantagrel et al (1982)
HAUTE-LOIRE					
			Devès-St. Arcons	2,7 ± 0,2	Cantagrel et al (1971)
			coulée 1 à 4	à 0,59 ± 0,6	

Remarque : On peut noter que l'intervalle de temps entre les coulées C₆ et C₂ du Col d'Aulac est de 0,4 M.A., pendant lequel se sont formés 3 paléosols.

niques étant apparues au Miocène inférieur dans le Puy-de-Dôme (MICHEL, 1953) et vers 21 M.A. dans le Cantal (BELLON *et al.*, 1972), nous aurions ainsi pour ces régions à la fois une limite supérieure et une limite inférieure de temps entre lesquelles se situeraient ces pédogenèses. Il serait cependant souhaitable que cette proposition soit étayée à l'avenir par de plus nombreuses datations.

8. CONCLUSION

Au terme de cette étude, il apparaît que les paléosols rouges développés sur basaltes dans le Massif Central français sont différents d'une station à l'autre. Si autour d'Aurillac, ils peuvent être rangés parmi les sols fersiallitiques, compte tenu

de leur couleur et de la présence de minéraux 1/1 et 2/1 dans les profils, ceux observés au centre du strato-volcan du Cantal, à Aulac et au Suc du rond, sont bien différents et posent un problème de classification. Nous avons affaire ici à des sols plus ou moins complexes par l'origine des matériaux inter-basaltiques et où la filiation génétique roche-mère-sol n'est pas toujours aussi nette que dans le bassin d'Aurillac ; les profils se distinguent en effet par leur morphologie, leur couleur variable, leur épaisseur, leur granulométrie, la présence plus ou moins importante de matériaux pyroclastiques. Cependant on relève plusieurs caractéristiques physico-chimiques communes qui établissent entre eux un lien de parenté : taux de saturation du complexe d'échange supérieur à 70 %, Ca échangeable représentant plus de 40 % de la CEC, abondance du fer libre.

Par ailleurs, l'analyse chimique globale fait ressortir une évacuation très intense des cations les plus mobiles : Ca, Mg, K et Na et la concentration résiduelle en Si, Al et Fe, indiquant une altération presque totale des minéraux primaires. Il en résulte la formation prédominante d'argiles 1/1 accompagnée d'oxydes de fer. Dans la partie inférieure du profil, on observe aussi des argiles 2/1 de type smectite en quantité variable ; elle peut provenir d'une altération plus ménagée du basalte dans la zone la moins perméable ; par contre, dans la partie médiane, la présence de gibbsite est constante et parfois importante ; les argiles 2/1 disparaissent alors. Enfin le diagramme de CHESWORTH (1977) confirme que l'évolution géochimique est particulièrement intense dans ces paléosols, à telle enseigne que les points représentatifs de la composition chimique de la zone sommitale des profils sont situés tout à proximité du domaine ferrallitique où subsistent seulement la kaolinite, la gibbsite et les oxydes de fer.

D'un autre côté, des sols plus ou moins apparentés à ceux du Cantal et développés également sur basaltes ont été décrits notamment aux Antilles (COLMET-DAAGE *et al.*, 1965), aux Iles Canaries (QUANTIN *et al.*, 1977) ; TEJEDOR SALGUERO *et al.*, 1978), aux Nouvelles Hébrides (QUANTIN, 1978) ; ils ont été apparentés aux sols ferrallitiques ou se situent à la limite des sols fersiallitiques et ferrallitiques. Il semblerait que les paléosols du Cantal, du moins pour les plus altérés d'entre eux, soient plus proches de ces intergrades, compte tenu de la présence résiduelle de minéraux 2/1 et de minéraux primaires altérables ; ils pourraient figurer aussi parmi le groupe pénévolué et rajeuni, très faiblement désaturé.

La différenciation régionale des caractères géochimiques des paléosols d'Aurillac apparentés aux sols fersiallitiques, et de ceux du centre du Cantal, plus évolués suggérerait une séquence topoclimatique rappelant celle donnée à l'heure actuelle, dans le Massif Central, dans la même situation géographique avec la présence de sols andiques développés autour d'Aurillac (1.200 mm) de pluviosité annuelle et d'andosols au centre du strato-volcan (plus de 2.000 mm de pluie par an). Ce type de séquence fersiallitique-ferrallitique s'observe aussi aux Canaries (QUANTIN, 1978).

Par ailleurs, cette paléopédogenèse avec développement de sesquioxides de fer apparaît comme un processus généralisé dans le Massif Central volcanique à la suite de descriptions de sols relativement comparables dans sa zone sud, aux Coirons (GRANGEON, 1959 ; MOINEREAU, 1966 ; CAMUS et KIEFFER, 1980). Quelques mesures d'âge sur basaltes la situent au Miocène entre 21 et 6,5 millions d'années et l'intervalle de temps apprécié au Col d'Aulac pour la genèse d'un paléosol entre deux coulées serait de l'ordre de 100.000 ans environ.

L'étude de ces sols apporte aussi de précieuses indications sur les conditions paléoclimatiques qui ont régné à cette époque, marquées par un climat plus chaud que l'actuel et à saisons contrastées. En outre, la similitude de ces sols avec ceux du même type ou relativement proche de ce type développés sur des roches-mères de composition voisine en Écosse (GODARD *et al.*, 1961), en Irlande (REFFAY *et al.*, 1970) et aux Canaries (TEJEDOR SALGUERO *et al.*, 1978 ; RODRIGUEZ-RODRIGUEZ *et al.*, 1979 et 1980 ; POMEL, 1983), témoigne de l'extension de caractéristiques climatiques favorables à une pédogenèse à sesquioxides de fer depuis l'Europe du Nord jusqu'au large de l'Afrique.

Enfin cette pédogenèse s'est développée surtout sur basaltes riches en fer ; elle a affecté également d'autres substrats, tels que les gneiss. Mais une teneur en fer plus réduite dans ces roches n'a pas permis de la mettre en évidence de façon aussi nette.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à ceux et à celles qui nous ont aidé dans ce travail en réalisant plusieurs déterminations analytiques : M^{mes} CANTAGREL et COUTURIE du Laboratoire de Géologie de Clermont pour les analyses totales ; M^{me} CASSEAU de l'Institut de Recherche « Ressources et Minéraux associés » d'Orléans qui a dosé les phases amorphes ; M^{me} CHAUMONT, INRA Châteauroux, pour le fer libre ; M. GUYOT et M^{me} JACQUIN, INRA Dijon, qui ont mesuré les surfaces des argiles ; MM. ROBERT et HERVIO, INRA Versailles, qui ont préparé les diagrammes RX, ATD et ATP. Qu'ils trouvent tous ici l'expression de notre gratitude.

*Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.
le 1^{er} février 1984*

BIBLIOGRAPHIE

- BAKKER (J.-P.), 1966. — Weathering of granites in different climates, particularly in Europe. Colloque Inter. Liège. L'évolution des versants, v. 1 : 51-68.
- BELLON (A.), BRITO (U.), BROUSSE (R.) et GOUTHIER (J.), 1971. — Ages Miocène inférieur pour les pépérites et moyen pour quelques laves de Limagne. *C. r. Ac. Sci.*, t. 273, série D : 1258-1260.
- BELLON (H.), BROUSSE (R.), LAMBERT (A.), CORNEN (G.), LE GARREL (Marie-José), MAURY (R.), PESME (Marie-Françoise), BLAIS (S.), LARROQUE (P.) et BAUDEIGNE (Laurence), 1972. — Longue activité volcanique du massif du Cantal, de 21 à 3,8 millions d'années. *C. r. Ac. Sci.*, t. 274, série D : 2409-2412.
- BOUT (P.), FRECHEN (J.) et LIPPOLT, 1966. — Datations stratigraphiques et radiochronologiques de quelques coulées basaltiques de Limagne. *Rev. Auvergne*, n° 80 : 208-231.
- BROUSSE (R.), 1961. — Analyses chimiques des roches volcaniques tertiaires et quaternaires de la France. *Bull. Serv. Carte Géol. France*, n° 263, t. LVIII, 136 p.
- GAMUS (G.) et KIEFFER (G.), 1980. — Les couches rouges (red partings) du massif volcanique des Coirons, Ardèche, France. *Géol. Méditerranéenne*, t. VII, n° 2 : 193-197.
- CANTAGREL (J.-M.) et PREVOT (M.), 1971. — Paléomagnétisme et âge potassium-argon des basaltes du Devès aux environs de Saint-Arcons d'Allier (Massif Central, France). *C. r. Ac. Sci.*, t. 273, série B : 261-264.
- CHESWORTH (W.), 1977. — Weathering stages of the common igneous rocks, index minerals and mineral assemblages at the surface of the earth. *Journ. Soil Sci.*, v. 28, n° 3 : 490-497.
- CHESWORTH (W.), DEJOU (J.) et LARROQUE (P.), 1981. — The weathering of basalt and relative mobilities of the major elements at Belbex, France. *Geochimica et Cosmoch. Acta*, v. 45 : 1235-1243.
- CHESWORTH (W.), DEJOU (J.), de KIMPE (C.), LARROQUE (P.), MACIAS VASQUEZ (F.), GARCIA-PAZ (Carlota) et GARCIA-RODEJA (E.), 1983. — Étude comparative des processus de fersiallisation et d'andosolisation développés sur basaltes du Massif Central français. *C. r. Ac. Sci.*, t. 296, série II : 1651-1654.
- CHESWORTH (W.), DEJOU (J.), de KIMPE (C.), MACIAS VASQUEZ (F.), CANTAGREL (J.-M.), LARROQUE (P.), GARCIA-PAZ (Carlota), GARCIA-RODEJA (E.), 1983. — Importance de la fersiallisation sur les basaltes miocènes du Massif Central. Principales caractéristiques de cette pédogénèse. *C. r. Colloque CNRS. Paris (sous presse)*.
- CLÉMENT (P.), DEJOU (J.) et de KIMPE (C.), 1982. — Importance du site dans la genèse des minéraux secondaires issus des altérations superficielles. Exemples des granites et des gabbros du Mont Mégantic, Québec, Canada. *Catena*, v. 9, n° 3/4 : 181-198.
- COLMET-DAAGE (F.) et LAGACHE (P.), 1965. — Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. III, n° 2 : 91-122.
- DEJOU (J.) et CHESWORTH (W.), 1979. — Nouvelles observations concernant l'évolution géochimique superficielle des basaltes miocènes du bassin d'Aurillac (Cantal). Nature fersiallitique de cette évolution et conséquences paléoclimatiques. *C. r. Ac. Sci.*, t. 288, série D, n° 3 : 295-298.
- DEJOU (J.), CHESWORTH (W.) et LARROQUE (P.), 1982. — Données nouvelles sur l'évolution superficielle fersiallitique subie par les basaltes pontiens du bassin d'Aurillac (Cantal, France). Cas du profil de Saint-Étienne-de-Carlat et considérations paléoclimatiques. *Pédologie*, Gand, t. XXXII, n° 1 : 67-83.
- DE LA ROCHE (H.), LETERRIER (J.), GRANDCLAUDE (P.) et MARCHAL (M.), 1980. — A classification of volcanic and plutonic rocks using R_1R_2 diagramme and major elements analyses. Its relationships with current nomenclature. *Chemical Geol.*, v. 29 : 183-210.
- EHRHART (H.), 1940. — Sur l'évolution des basaltes miocènes du Cantal et sur la nature des sols qui en dérivent. *C. r. Ac. Sci.*, t. 210 : 537-539.
- FONSECA (J.-B.), 1974. — Application des techniques d'analyse des sols à l'étude de « pseudo-paléosols » fossilisés par le basalte dans le bassin de Paulhaguet-Langeac (Haute-Loire). DEA option Pédologie. Univ. Montpellier, 41 p.
- GIBERT (J.-P.), 1972. — Géologie de la basse vallée de l'Authre (Cantal) et des plateaux environnants. Thèse 3^e cycle. Univ. Paris Sud Orsay, 238 p.
- GIBERT (J.-B.), 1973. — Mise en évidence d'une altération de type fersiallitique au Miocène terminal du sud du Cantal. *C. r. Ac. Sci.*, t. 277, série D : 545-547.
- GODARD (A.), PAQUET (Hélène) et MILLOT (G.), 1961. — Contribution à l'étude de quelques paléosols du Nord de l'Écosse. *Bull. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine-Strasbourg*, t. 14, fasc. 4 : 101-109.
- GRANGEON (P.), 1959. — Sur une couche d'altération climatique miocène de la région du Coiron (Ardèche). *C. r. Ac. Sci.*, t. 248 : 1370-1372.
- HENMI (T.) et WADA (K.), 1976. — Morphology and composition of allophane. *Amer. Mineralogist*, v. 61 : 379-390.
- KUNO (H.), 1965. — Fractionation trends of basalt magmas in lava flows. *Jour. Petrol.*, v. 6 : 302.
- 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. + 34 p. annexes.

- MAC DONALD (G. A.) et KATSURA (T.), 1969. — Chemical composition of Hawaiian lavas. *Jour. Petr.*, v. 5 : 82-133.
- MEUNIER (A.), 1977. — Les mécanismes de l'altération des granites et le rôle des microsystemes. Étude des arènes du massif granitique de Parthenay (Deux-Sèvres). Thèse Doct. Univ. Poitiers, 248 p.
- MICHEL (R.), 1953. — Contribution à l'étude pétrographique des pépérites et du volcanisme tertiaire de la Grande Limagne. *Mém. Soc. Hist. Nat.*, Auvergne n° 5, 140 p.
- MOINEREAU (J.), 1966. — Étude des sols et des paléosols du Bas-Vivaraais. Thèse 3^e cycle. Fac. Sci. Univ. Paris, 164 p.
- PARKER (A.), 1970. — An index of weathering for silicate rocks. *Geol. Magaz.* : 501-504.
- POMEL (R. S.), 1983. — Les Iles Canaries : Fuerteventura, Lanzarote, Ténérife. Livret-guide de l'excursion du Comité Nat. Geogr. Commission de Géomorph. des reliefs volcaniques, 358 p.
- QUANTIN (P.), TEJEDOR-SALGUERO (Maria-Luisa) et FERNANDEZ-CALDAS (E.), 1977. — Climatosequence de la région méridionale de l'île de Ténérife (Iles Canaries) ; 1^{re} partie : écologie, morphologie, caractéristiques physico-chimiques. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XV, n° 4 : 391-407.
- QUANTIN (P.), 1978. — Archipel des Nouvelles Hébrides. Atlas des sols et de quelques données du milieu naturel. Carte de pédologie, géologie, formes du relief et végétation, 18 pl. couleur. Notice explicative en 7 fascicules, 260 p. *O.R.S.T.O.M.*, Paris.
- REFFAY (Annie) et RICO-DE-BOUARD (M.), 1970. — Contribution à l'étude des paléosols interbasaltiques à la Chaussée des Géants, Comté d'Antrim, Irlande du Nord. *Rev. Géogr. Alp.*, t. LVIII, fasc. 2 : 301-338.
- REFFAY (Annie), 1972. — Les montagnes de l'Irlande septentrionale. Contribution à la géographie physique de la montagne atlantique. Thèse Doct. Univ. Grenoble. Imprimerie Allier, Grenoble, 614 p.
- RODRIGUEZ-RODRIGUEZ (A.), TEJEDOR-SALGUERO (Maria-Luisa) et FERNANDEZ (E.), 1979. — Suelos fersialíticos sobre cenizas volcanicas. Características morfológicas y físico-químicas. *An. Edaf. y Agrobiología*, Madrid, t. XXXVIII, n° 9-10 : 1608-1624.
- RODRIGUEZ-RODRIGUEZ (A.), QUANTIN (P.), TEJEDOR-SALGUERO (Maria-Luisa) et FERNANDEZ CALDAS (E.), 1979. — Suelos fersialíticos sobre lapillis basálticos. *An. Edaf. y Agrobiología*, Madrid, t. XXXVIII, n° 9-10 : 1945-1950.
- SÉGALEN (P.), 1967. — Les sols de la vallée du Noun. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. V, n° 3 : 287-349+ 1 carte h.-t.
- TEJEDOR-SALGUERO (Maria-Luisa), QUANTIN (P.) et FERNANDEZ CALDAS (E.), 1978. — Climatosequence de la région méridionale de l'île de Ténérife (Canaries). 2^e partie, Caractéristiques minéralogiques : interprétation et classification. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XVI, n° 1 : 83-106.
- TERCINIER (G.) et QUANTIN (P.), 1968. — Influence de l'altération de cendres et ponces volcaniques d'âge récent sur la nature, les propriétés et la fertilité des sols aux Nouvelles Hébrides. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, v. VI, n° 2 : 203-224.
- YOSHINAGA (N.), 1966. — Chemical composition and some thermal data of eighteen allophanes from andosols and weathered pumices. *Soil Sci. and Plant Nutrit.*, v. 12 : 47-54.

ANNEXE I

ÉVOLUTION GÉOCHIMIQUE GLOBALE DEPUIS LA ROCHE-MÈRE AU SOMMET DES PALÉOSOLS

1. Col d'Aulac. Sol sur la 4^e Coulée de Basalte

Echantillon	Basalte frais	Zone d'altération profonde N° 18	Niveau jaunâtre très altéré		Zone peu métamorphisée		Niveau rouge thermométa- morphisé		
	N° 22		N° 17	N° 16	N° 15	N° 14	N° 13	N° 12	N° 11
Profondeur(cm)	450-500	220-250	80-100	50-80	30-40	20-30	10-20	5-10	0-5
SiO ²	42.46	25.42	17.58	23.10	24.83	24.10	28.00	25.97	22.10
Al ² O ³	12.93	19.43	18.13	17.90	18.90	18.00	21.52	18.65	24.96
Fe ² O ³	5.24	17.76	17.20	14.13	16.80	15.18	18.67	16.83	22.70
FeO	6.95	0.63	1.08	1.10	0.33	0.26	-	0.20	1.10
TiO ²	2.71	4.25	4.30	3.53	3.94	3.76	4.31	4.00	5.60
P ² O ⁵	0.66	0.34	0.36	0.24	0.23	0.24	0.30	0.24	0.45
MnO	0.16	0.27	0.30	0.23	0.27	0.28	0.29	0.26	0.36
CaO	10.20	0.70	0.52	0.48	0.52	0.56	0.62	0.52	0.65
MgO	10.25	2.26	0.71	0.50	0.46	0.59	0.55	0.62	0.65
K ² O	1.16	0.42	0.12	0.21	0.23	0.21	0.24	0.30	0.19
Na ² O	2.12	0.11	tr.	0.12	-	0.11	0.29	0.20	0.12
H ² O ⁺	3.95	21.24	32.69	32.09	25.90	27.82	19.38	26.20	14.10
H ² O ⁻	1.30	7.20	7.00	7.00	7.60	8.30	6.00	6.00	7.00
TOTAL	100.09	100.03	99.99	100.63	100.01	99.41	100.17	99.99	99.98
SiO ² /Al ² O ³ mol.	5.6	2.2	1.65	2.2	2.3	2.3	2.2	2.3	1.50

An. W. CHESWORTH, Guelph (Ontario), avril 1980. Il faut remarquer que le basalte dit « frais » est en réalité un peu altéré compte-tenu de sa teneur en eau relativement élevée.

2. Col d'Aulac. Sol sur la 6^e Coulée de basalte basanitoïde

Echantillon	Basalte frais profil N° 61	Niveau rouge profil N° 62	Niveau ocre N° 64	Niveau rouge supérieur N° 66	Niveau métamorphisé N° 67
Profondeur(cm)	350-400	290-320	170-190	10-30	0-10
SiO ²	43.30	37.90	38.80	34.20	33.20
Al ² O ³	14.50	24.60	29.50	18.20	16.65
Fe ² O ³	8.34	14.30	7.98	14.71	13.14
FeO	3.84	0.80	0.65	0.80	1.59
TiO ²	2.70	3.50	1.30	3.20	3.30
P ² O ⁵	0.77	0.43	0.20	0.30	0.50
MnO	0.19	0.11	0.13	0.21	0.22
CaO	10.00	0.37	0.50	1.80	2.40
MgO	11.60	1.15	0.70	5.15	7.25
K ² O	1.30	0.60	1.80	0.25	0.30
Na ² O	3.00	0.15	1.40	0.15	0.30
H ² O ⁺	1.11	10.62	11.93	8.48	7.60
H ² O ⁻	0.60	5.82	4.37	13.60	13.10
TOTAL	101.25	100.35	99.26	101.05	99.55
SiO ² /Al ² O ³ (mol.)	5.07	2.6	2.2	3.2	3.4

An. S. CANTAGREL et F. COUTURIE, Labo. Géol. Clermont, déc. 1980.

Remarque: Profil complexe, avec des variations accusées de Al²O³ et Fe²O³, CaO et MgO, dues vraisemblablement à l'apport de Cendres volcaniques. Les valeurs plus élevées du rapport moléculaire SiO²/Al²O³ dans la partie sommitale du profil traduisent la présence d'une quantité plus importante de minéraux primaires plus ou moins altérés.

ANNEXE II

3. Suc du Rond. Sol n° 3 sur la 3^e Coulée de basalte

Echantillon	Basalte frais SR. 30	Sol	
		SR. 31	SR 32
Profondeur (cm)	100-120 cm	40-60 cm	20-40 cm
SiO ₂	44.60	28.20	32.90
Al ₂ O ₃	14.40	22.20	22.60
Fe ₂ O ₃	9.95	21.20	19.50
FeO	3.60	tr.	tr.
TiO ₂	2.80	5.00	4.60
P ₂ O ₅	0.62	0.40	0.17
MnO	0.18	0.28	0.32
CaO	8.45	0.85	0.85
MgO	11.00	1.80	1.60
K ₂ O	1.20	0.20	0.70
Na ₂ O	1.90	0.10	0.20
H ⁺	2.00	9.58	8.48
H ⁻	1.70	10.34	8.26
TOTAL	101.46	100.95	100.18
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (mol.)	3.27	2.16	2.47

An. S. CANTAGREL, S. COUTURIE, Labo. Géologie Clermont, janvier 1982.