

Altération des matériaux basaltiques et genèse des argiles en climat tempéré humide et milieu organique

J. MOINEREAU*

* Laboratoire de Géologie et Science du Sol de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier

RÉSUMÉ

L'altération des matériaux basaltiques dans un environnement organique et humide en climat tempéré, s'effectue essentiellement sous l'influence des acides organiques hydrosolubles qui dissolvent les plagioclases et le verre, l'olivine, les pyroxènes et la titano-magnétite, en complexant préférentiellement l'aluminium, le fer, le titane et secondairement le magnésium et le calcium. Les bases alcalines, une partie du calcium et de la silice sont évacuées du gel organo-minéral résultant de la coagulation et de la polymérisation des acides organiques et des chaînes de silicium et d'aluminium Al^{IV} et Al^{VI} . Une désaturation et une désilicification différentielle du gel créent des microsites hyposiliceux localisés dans une trame amorphe hypersiliceuse. L'halloysite glomérulaire naît autour des globules vitreux désaturés et hyposiliceux alors que les voiles de beidellite s'organisent dans la trame hypersiliceuse, saturée par le fer et le magnésium. Cette beidellite alumineuse, ferrifère et magnésienne est ensuite protégée par le complexe organo-minéral amorphe, hautement polymérisé, constituant l'humine, qui enrobe les feuillets et occupe les espaces interfoliaires de l'intergrade organo-minéral gonflant, présent dans les andosols. Par conséquent, l'humus joue, au cours de l'argilo-genèse, successivement le rôle d'un agent agressif, sélectif, protecteur et conservateur, en fonction de son degré de saturation et de polymérisation.

Dans les sols peu organiques tels que les sols bruns sur basalte, le processus d'altération prédominant n'est plus l'acido-complexolyse mais une hydrolyse neutre ou acide qui favorise la désaturation

et la désilicification des gels et par conséquent la genèse de l'halloysite.

ABSTRACT

Basaltic rock alteration in organic humid environment and temperate climate, occur as the water soluble organic acids dissolve the plagioclasic feldspars, glass, olivine, pyroxène, titanomagnetite and give aluminium, iron and titanium complex then magnesium and calcium complex. Sodium, potassium, a part of calcium and silicium are leached from organo-mineral gel which is issued from coagulated and copolymerized organic acid and Al^{IV} - Al^{VI} - Si^{IV} chains. Differential desaturation and desilicification give hyposilicic spots, located in the amorphous hypersilicic framework. Spheroidal halloysite growth around these vitreous desaturated and hyposilicic spots, whereas beidellite layers appear in the rich silicium, iron and magnesium framework. This beidellite clay is protected by highly polymerized humin which coat layers and fill interlayers spaces of the swelling organo-mineral intergrade clay in the andosols. Consequently, the humus play successively the role of chelating, selective, protective and conservative agent related to its polymerized and saturated degree.

In the few organic soils, like brown soils, the main process of alteration is not acid complexolysis but neutral or acid hydrolysis that favour desaturation and desilicification of the gels and consequently favour genesis of halloysite.

1. INTRODUCTION

De très nombreuses études sur l'altération des roches basaltiques ont montré que les argiles de la famille de la kaolinite et de la montmorillonite étaient indubitablement les *principaux minéraux argileux néo-formés*, que ce soit par action hydrothermale naturelle en milieu terrestre (Correns, 1961 ; Moine-*reau et al.*, 1972) et en milieu marin (Bonatti, 1967), que ce soit par altération expérimentale en conditions hydrolytiques (Pedro, 1964 ; Trichet, 1969) ou que ce soit dans les conditions normales de l'altération supergène (Hauser et Reynolds, 1939, Sherman *et al.*, 1962, Pecrot *et al.*, 1962 ; Eswaran et De Coninck, 1971).

Les smectites néoformées dans ces conditions diverses sont le plus souvent des beidellites aluminieuses, magnésiennes et surtout *ferrifères* (Paquet, 1970 ; Yaalon, 1970). Les argiles kaoliniques sont généralement des halloysites tubulaires ou glomérulaires, des halloysites déshydratées et des kaolinites en plaquettes plus ou moins hexagonales. Ces argiles néogéniques sont associées à des phyllites micacées héritées et transformées (Wada et Aomine, 1973 ; Moine-*reau*, 1975).

La genèse des argiles du sol commence dans la frange d'altération des matériaux basaltiques, dans un milieu humide et riche en cations, propice à la néoformation de smectite (Millot, 1964). Dans un milieu appauvri en cations et bien drainé, la smectite disparaît progressivement au profit de l'halloysite, de la kaolinite et de la gibbsite en milieu tropical (Sieffermann *et al.*, 1968 ; Gense, 1976). L'origine de la montmorillonite fut recherchée successivement dans l'altération de l'olivine (Craig, 1963), des plagioclases (Craig et Loughnan, 1964), des verres hydratés et des allophanes (Masui et Shoji, 1967), des pyroxènes (Loughnan, 1969). Quant à l'origine de l'halloysite, elle est beaucoup plus classiquement expliquée par l'altération des plagioclases (Bates, 1962) et la réorganisation des allophanes (Aomine et Wada, 1962 ; Fieldes, 1966).

La formation de la kaolinite et de la montmorillonite à partir de gels silico-alumineux a été démontrée en laboratoire par les minéralogistes (Gastuche *et al.*, 1961 ; De Kimpe, 1976) dans un milieu fermé dont les paramètres principaux (pH, concentration des cations et de la silice) sont connus et contrôlés. Mais le processus de formation dans les conditions normales de la pédogenèse reste encore imprécis, surtout en présence de *solutions riches en composés*

organiques, ce qui est le cas de *tous les profils d'altération en climat tempéré*. Or, un certain nombre d'observations effectuées sur des sols dérivés de matériaux basaltiques dans le Velay et le Vivarais (Moine-*reau*, 1974 et 1975), nous ont paru être quelque peu en contradiction avec les conditions de formation habituellement admises pour la montmorillonite et la kaolinite :

- La beidellite se forme et se conserve, en compagnie de l'halloysite, dans les andosols très *humifères, humides mais drainés, acides et désaturés en cations*.
- L'halloysite et ses formes déshydratées se développent dans les sols *peu humifères, neutres, relativement saturés*, bien drainés mais aussi hydromorphes, où subsiste un peu de beidellite.

Ces contradictions apparentes nous ont conduit à regarder de plus près, les modalités de l'altération des matériaux basaltiques en climat tempéré humide ($5^\circ < T < 13^\circ$, $900 \text{ mm} < P < 1500 \text{ mm}$).

2. LES DONNÉES DU TERRAIN ET DE LA MICROSCOPIE OPTIQUE

Les matériaux basaltiques présentent des faciès d'altération différents selon les profils observés :

— Dans un *milieu très humide, organique ou peu organique*, la roche basaltique se décompose *dans la masse*, produisant une argile plastique gris bleuté s'oxydant très rapidement à l'air libre, en plages rouille. Les scories, dans les mêmes conditions, donnent aussi une argile bleutée à taches et traînées rougeâtres.

— Dans un *milieu humide sans excès et peu organique*, la décomposition du basalte engendre un cortex argileux brun, très plastique, enveloppant les grains de roche farineuse, grisâtre, dont la structure est conservée. Les tufs et les scories s'altèrent comme les roches dures à partir des fissures et des pores qui se couvrent progressivement de revêtements argileux bruns.

— Dans un *milieu humide et très organique* apparaît dans les fissures et autour des grains de la roche grisâtre, un cortex jaune ocré, non plastique, gras et fluant à l'état humide, poudreux à sec, qui réagit vivement à la phénolphtaléine en présence de NaF. Cette forme d'altération spécifique existe aussi bien

pour les roches compactes que pour les roches vacuolaires. Les tufs, par contre, donnent une altération terreuse, brunâtre ou jaunâtre se développant dans la masse de la roche-mère, sans liaison bien visible avec les fissures ou les pores.

Le drainage ou le confinement n'ont pas une importance majeure dans ces profils d'altération en milieu ouvert et non saturé. Tous les profils sont *normalement drainés*, car ils occupent une position haute par rapport au réseau hydrographique. Les quelques sols hydromorphes observés dans les mouillères sont parfaitement drainants d'un point de vue géochimique, car les solutions ou pseudosolutions sont évacuées par les sources (Moinereau *et al.*, 1974). Le confinement n'est possible que dans les dépressions fermées en milieu saturé, qui n'existent pas sur les basaltes de la région étudiée.

L'examen des faciès d'altération en microscopie optique, révèle par contre un comportement différentiel des basaltes, des tufs et des scories, en fonction de la *richesse organique* du milieu, ce qui correspond finalement aux deux grands types de sols sur basalte :

- les Andosols dont la teneur en carbone est supérieure à 2 % dans l'horizon BC
- les Sols Bruns dont la teneur en carbone est inférieure à 1 % dans le même horizon

2.1. Mécanisme de l'altération des basaltes

L'altération est facilitée par la structure granulaire du basalte à « taches de soleil » dont les fissures sont déjà remplies d'oxydes de fer, de verre et de zéolites (photo 1, pl. I).

La mésostase plagioclasique perd rapidement sa biréfringence par suite de la pulvérisation des micro-lithes dont la taille moyenne est réduite de 100 à moins de 5 μ . La roche présente un aspect farineux, grisâtre, sans variations de son volume (photo 2, pl. I).

Les phénocristaux et microcristaux d'olivine déjà altérés (Iddingsite) fondent progressivement et se couvrent d'oxydes ou d'hydroxydes de fer brun rouge. Les phénocristaux et microcristaux de clinopyroxène se fragmentent et se dissolvent sans donner, en apparence, de produits secondaires.

La titanomagnétite s'oxyde rapidement en halos brun rouge enveloppant des granules résiduels d'une taille inférieure à 10 μ .

Un *gel non ou peu biréfringent* diffuse dans les cavités et à la périphérie des grains de la roche altérée où il s'organise progressivement en argile (photo 3, pl. I).

En *présence d'une matière organique abondante*, apparaît un cortex constitué d'un plasma organo-minéral en contact avec le gel biréfringent ; le complexe organo-minéral se détache de la roche sous forme de flocons plus ou moins arrondis qui confèrent aux Andosols leur microstructure caractéristique (photo 4, pl. I). Dans ce plasma organique, on retrouve des cristaux de pyroxène, d'olivine rougeâtre et de titanomagnétite, mais *pas de plagioclase ni aucun dépôt argileux*.

Lorsqu'il y a *peu de matière organique*, les gels s'organisent en *dépôts argileux* blancs, biréfringents, devenant brunâtres au fur et à mesure de la fixation du fer et de l'humus sur l'argile ; des dépôts stratifiés se forment dans les cavités et autour des lithoreliques (photo 5, pl. I). Un plasma à structure masépique se développe au fur et à mesure de l'argillification et du tassement du sol, parfois jusqu'à l'apparition de cutanes secondaires de tension (photo 6, pl. I). Dans les sols très humides, le fer peut migrer dans le plasma argilo-humique, formant des nodules autour des pertuis racinaires.

L'ordre d'altérabilité décroissante des minéraux primaires de dimension équivalente est le même dans les sols organiques et peu organiques ; plagioclase, olivine et clinopyroxène, titanomagnétite. La titanomagnétite est très instable en milieu organique ; entre la roche et le plasma organique, on observe la disparition de 55 % des grains d'une taille supérieure à 10 μ .

2.2. Mécanisme de l'altération des scories

En raison de leur structure vacuolaire et de leur richesse en verre basaltique (sidéromélane), les scories s'altèrent plus rapidement que les basaltes :

— *en milieu organique*, on observe une fragmentation des parois vitreuses qui séparent les alvéoles fermées. Celles-ci sont fréquemment tapissées de verre jaune-brun plus hydraté que le sidéromélane de la paroi. Des *flocons organo-minéraux* se forment au contact immédiat de ces parois fragmentées et comblent progressivement les alvéoles ouvertes de la périphérie de la roche (photo 7, pl. II). Comme dans le basalte, il se forme un cortex d'altération de couleur ocrée ;

— *en milieu peu organique*, l'argillisation s'effectue à partir du verre brun isotrope. Le phénomène débute par une hydratation et une expansion d'un gel jaunâtre, faiblement biréfringent, qui diffuse hors des parois, dans les vacuoles. La biréfringence du gel croît au fur et à mesure que s'organisent des dépôts argileux blancs puis bruns dans les cavités (photo 8, pl. II). L'ensemble de la roche est peu à peu transformé en argile.

2.3. Mécanisme de l'altération des tufs

L'altération n'est plus limitée au cortex, mais se propage dans toute la masse de la roche en raison de la structure poreuse du verre (photo 9, pl. II) et surtout en raison de son hydratation qui lui confère une couleur jaune-brun et une certaine biréfringence (verre palagonitique). Notons que ce verre contient déjà des smectites (nontronite) et des zéolites, d'origine hydrothermale.

Les argiles blanches et brunes se forment directement dans le verre poreux. Des dépôts stratifiés, épais, tapissent les cavités, surtout en sol peu organique (photo 10, pl. II). Cependant, en sol organique, on observe aussi des dépôts argileux qui n'apparaissent pas sur basalte ou sur scorie. L'humus pénètre dans la roche et se fixe sur le verre hydraté ainsi que sur les argiles nées de l'organisation de ce verre, sans exudation d'un gel comme dans le basalte. L'altération terreuse brune ou jaune est très difficile à dissocier du verre hydraté. La structure floconneuse n'est pas aussi nette que sur basalte ou scorie, car le plasma est beaucoup plus argileux (photo 11, pl. II).

En résumé, la microscopie optique montre le passage progressif d'un gel inorganisé, provenant du verre et/ou des minéraux primaires, à un complexe chimique organo-minéral essentiellement amorphe dans le cas des Andosols et à un complexe d'association entre l'argile, le fer et l'humus dans le cas des sols bruns. L'argillisation est nettement mieux exprimée dans les tufs vitreux, poreux et hydratés que dans les basaltes cristallins, peu poreux, non hydratés. Les scories occupent une position intermédiaire en raison de la faible hydratation du verre et de leur porosité fermée.

3. LES DONNÉES DE LA GÉOCHIMIE ET DE LA MINÉRALOGIE

Plusieurs roches et leur cortex d'altération ont été prélevés dans sept profils représentatifs d'ando-

sols et de Sols Bruns, en fonction de leur richesse en matière organique. Les échantillons A, F et G proviennent de sols bruns, le dernier étant situé dans une source (sol brun hydromorphe). Les autres proviennent d'Andosols. Les roches, sauf l'échantillon B, ont un âge antérieur au Quaternaire.

Les données concernant l'analyse chimique et les déterminations minéralogiques, groupées dans les tableaux I à III, permettent de dégager les points suivants :

a) *La matière organique pénètre au sein des roches altérées* ; la teneur est comprise entre 0,2 et 0,8 % (dosage ANNE). Dans les cortex, qui font partie déjà du complexe organo-minéral, le taux s'élève de 0,6 à 20 % (tabl. I).

b) L'altération se manifeste par un accroissement considérable de l'hydratation des matériaux : 600 % pour un basalte, 275 % pour une scorie, 130 % pour un tuf. Ces hydratations secondaires sont inversement proportionnelles à la teneur en eau des roches fraîches : 1 à 3 % pour un basalte, 6 à 10 % pour une scorie, 15 à 20 % pour un tuf. Ce qui signifie que le développement des altérations au sein d'un basalte entraîne des « besoins en eau » bien supérieurs à ce que nécessite l'altération d'un tuf.

c) L'altération des minéraux primaires libère des produits amorphes au sein de la roche-mère. La silice est fortement et régulièrement libérée : 25 à 68 % de la silice totale. L'alumine l'est beaucoup moins et plus irrégulièrement : 3 à 50 % de l'alumine totale. Le fer amorphe varie de 8 à 80 % du fer total en fonction de l'humidité du sol. Ces quelques chiffres confirment l'existence de gels dans les matériaux en voie d'altération.

d) *L'aluminium étant incontestablement l'élément le plus stable* en valeur relative, un raisonnement isoalumine entre cortex et roche, montre la désilicification des matériaux (pertes en SiO₂ comprises entre 13 et 48 %), l'évacuation rapide des bases alcalines et alcalino-terreuses (pertes de 49 à 94 % pour MgO, 45 à 92 % pour CaO, 44 à 90 % pour Na₂O, 33 à 82 % pour K₂O) et des variations contradictoires pour le fer ferrique (+26 à 30 % en sol organique, -30 % en sol hydromorphe).

e) En appliquant le raisonnement isovolumétrique (tabl. II), à trois échantillons de roche basaltique, de composition voisine, ayant conservé leur structure dans des conditions d'altération différentes, on remarque que par rapport au témoin de roche non altérée :

— la roche fondue en milieu très humide et drainant (sol hydromorphe) a perdu 44 % de silice, 74

TABLEAU I

Analyses chimiques des roches et de leur altération

Echantillons	Carbone %	Hydratation %	% Oxydes extractibles (1)			% Oxydes totaux (2)										
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ + FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
Scorie en sol peu organique						(29,22)	—	(9,71)	(0,28)	(5,39)	(4,54)	(0,51)	(0,19)	(1,10)	(0,50)	(0,05)
A Cortex	0,32	9,93	12,3	5,0	8,3	39,55	19,84	13,15	0,39	7,30	6,15	0,70	0,26	1,49	0,68	0,08
Roche	0,21	4,63	—	2,6	0,9	43,20	14,67	10,53	0,86	10,59	9,79	1,95	0,96	1,55	0,83	0,08
Scorie en sol organique						(35,53)	—	(8,79)	(0,22)	(6,83)	(5,64)	(1,32)	(0,63)	(1,09)	(0,65)	(0,15)
B Cortex	10,60	10,18	8,8	2,8	3,8	37,89	15,11	9,38	0,24	7,29	6,02	1,41	0,68	1,17	0,70	0,17
Roche	0,42	3,70	10,6	7,3	8,0	42,64	14,17	12,25	0,23	7,21	10,99	2,96	1,59	1,50	1,00	0,18
Tuf en sol organique						37,97	—	(13,45)	(0,26)	(0,89)	(0,96)	(0,08)	(0,08)	(1,85)	(0,17)	(0,03)
C Altération	0,95	23,05	17,0	5,9	6,0	38,48	18,90	13,64	0,27	0,91	0,98	0,09	0,09	1,88	0,18	0,04
Roche	0	17,80	—	—	—	44,12	18,65	11,55	1,33	1,86	1,39	0,30	0,45	2,85	—	—
Basalte en sol organique						(30,33)	—	(11,14)	(1,22)	(1,53)	(1,50)	(0,59)	(0,40)	(1,68)	(0,59)	(0,35)
D Cortex	2,76	16,16	12,5	8,3	2,7	35,92	22,53	13,19	1,45	1,82	1,78	0,70	0,48	2,00	0,71	0,42
Roche altérée	0,21	7,33	9,5	0,8	2,9	42,77	19,03	8,80	2,31	5,71	8,16	2,07	0,60	1,40	0,84	0,12
Basalte en sol organique						(34,72)	—	(22,50)	(0,20)	(1,90)	(2,07)	(0,56)	(0,28)	(1,72)	(0,79)	(0,80)
E Cortex	1,80	14,59	19,5	0,6	8,0	33,83	18,85	21,92	0,20	1,86	2,02	0,55	0,28	1,68	0,77	0,78
Roche altérée	0,10	10,70	10,6	2,6	7,9	40,26	19,35	17,23	1,21	2,92	4,08	1,00	0,79	0,66	0,80	0,40
Basalte en sol peu organique						(35,18)	—	(13,60)	(0,61)	(1,52)	(3,28)	(0,73)	(0,73)	(0,61)	(0,32)	(0,32)
F Cortex	0,95	13,66	26,3	4,6	9,0	38,54	22,38	14,90	0,67	1,67	3,60	0,80	0,80	0,67	0,36	0,36
Roche altérée	0,31	6,05	14,4	2,2	6,8	41,73	20,43	15,46	0,33	4,27	5,95	2,63	1,33	0,17	0,79	0,23
Basalte en sol hydromorphe						(22,83)	—	(3,59)	(0,26)	(0,42)	(0,77)	(0,33)	(0,36)	(0,67)	(0,36)	(0,01)
G Roche fondue	0	13,10	9,9	1,6	5,4	42,08	27,40	6,62	0,48	0,78	1,43	0,61	0,68	1,25	0,68	0,03
Roche fraîche	0	2,10	—	—	—	44,05	14,87	5,16	7,15	7,05	9,97	3,50	1,51	2,33	0,43	0,14

(1) 2 extraits oxalate dithionite + 1 extrait soude.

(2) % absolu et (% corrigé par rapport à l'invariant alumine).

à 93 % des bases, 68 % de titane, 96 % de fer ferreux, 25 % de fer ferrique et s'est enrichie de 8 % d'alumine ;

— la roche très altérée, en milieu organique (Andosol) a perdu 28 % de silice, 33 à 55 % des bases, 94 % de titane, 96 % de fer ferreux et gagné 127 % de fer ferrique et 4 % d'alumine ;

— la roche peu altérée dans un milieu pauvre en matière organique (sol brun) a perdu seulement

19 % de silice, 32 à 67 % des bases, 50 % de titane, 73 % de fer ferreux et s'est enrichie de 41 % de fer ferrique et de 6 % d'alumine.

Le bilan met en évidence, d'une part l'importance du renouvellement des solutions dans un milieu hydromorphe ouvert qui accélère la désilicification et l'entraînement des bases hors de la roche, et d'autre part l'action des solutions organiques qui amplifient le processus de désilicification au sein de la

TABLEAU II

Bilan isovolumétrique entre basalte frais et basaltes altérés (g/100 cm³)

	Poids spécifq. g/cm ³	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
1. Roche fondue en milieu hydromorphe	1,7	71,53	46,58	11,25	0,81	1,32	2,43	1,03	1,15	2,12
2. Roche très altérée en milieu organique	2,2	91,80	44,94	34,01	0,72	9,39	13,09	5,78	2,92	0,37
3. Roche altérée en milieu peu organique	2,4	102,64	45,67	21,12	5,54	13,70	19,58	4,96	1,44	3,36
4. Roche fraîche	2,9	127,74	43,12	14,96	20,73	20,44	28,91	10,15	4,37	6,75
Bilan entre 1 et 4 en %		-44,0	+ 8,0	-24,8	-96,1	-93,1	-91,6	-89,8	-73,6	-68,6
Bilan entre 2 et 4 en %		-28,0	+4,2	+127	-96,5	-54,0	-54,7	-43,0	-33,1	-94,5
Bilan entre 3 et 4 en %		-19,0	+5,9	+41,1	-73,2	-32,9	-32,2	-51,1	-67,0	-50,2

roche-mère. Notons aussi l'instabilité manifeste du titane en présence de matière organique et la *migration du fer en milieu hydromorphe*.

f) Les rapports moléculaires SiO₂/Al₂O₃ et SiO₂/Bases (tabl. III) tendraient à situer le milieu d'altération à la limite des domaines géochimiques

TABLEAU III

Paramètres géochimiques et cristallographiques

		SiO ₂ / Al ₂ O ₃ moles	SiO ₂ / Bases moles	Argiles néoformées
A	Cortex Roche altérée	3,38 5,00	2,19 1,50	Halloysite-Smectite Smectite
B	Cortex Roche fraîche	4,26 5,10	1,98 1,61	Halloysite
C	Cortex Roche altérée	2,03 4,01	15,20 9,17	Beidellite-Halloysite Smectite
D	Cortex Roche altérée	2,70 3,80	6,41 2,18	Beidellite-Halloysite Beidellite-Halloysite
E	Cortex Roche altérée	3,04 3,53	5,97 3,95	Beidellite Beidellite
F	Cortex Roche altérée	2,92 3,47	5,04 2,59	Halloysite-Smectite Halloysite-Smectite
G	Roche fondue Roche fraîche	2,60 5,03	11,47 1,72	Halloysite-Smectite —

de la bisiallisation (argile 2/1) et de la monosiallisation (argiles 1/1) selon les concepts développés par Pedro (1966). C'est bien ce que confirment les déterminations cristallographiques effectuées sur les poudres et les suspensions inférieures à 2 μ, des roches altérées et de leur cortex. *La beidellite (ou une smectite indifférenciée) coexiste presque toujours avec l'halloysite*. Dans certains diagrammes, l'importance relative des deux argiles a pu être estimée, dans d'autres diagrammes, seule l'une des deux phyllites a été déterminée avec certitude, la présence de l'autre étant probable.

En résumé, les données de la géochimie et de la minéralogie, qui recourent d'ailleurs des conclusions de Pedro (1968) et de Hétier (1975) sur les altérations de matériaux volcaniques dans des milieux analogues, confirment et précisent les données de la microscopie optique :

- pénétration de la matière organique dans la roche-mère,
- hydratation et dissolution des minéraux primaires et du verre,
- libération et exportation de la silice et des bases hors de la roche, libération et accumulation relative de l'aluminium, exportation ou accumulation du fer et du titane,
- diffusion d'un gel silico-alumineux et ferrifère dans la roche et à la périphérie,
- apparition de beidellite et d'halloysite au sein du gel.

TABLEAU IV

Source des éléments majeurs en fonction de la composition minéralogique d'un basalte moyen du Velay-Vivaraïs (pourcentages absolus relatifs, en poids d'oxydes)

	Proportion dans le basalte	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ +FeO	CaO	MgO	TiO ₂
Plagioclases	22	14,0/33	8,4/56	—	2,0/19	—	—
Verre + zéolites	4	2,5/ 6	0,8/ 5	0,3/ 2	0,4/ 4	0,4/ 4	0,1/ 4
Clinopyroxènes	42	20 /47	4,6/31	2,1/16	8,0/76	4,6/51	0,4/16
Olivine	12	5,5/14	0,1/ 1	2,4/18	0,1/ 1	4 /45	—
Titanomagnétite	20	—	1,1/ 7	8,7/64	—	—	2 /80
Basalte moyen	100	42,0	15,0	13,5	10,5	9,0	2,5

4. LES DONNÉES DE LA MICROSCOPIE ET DE LA MICROANALYSE ÉLECTRONIQUES

Dans le but de préciser les mécanismes mis en évidence d'après les données du terrain, de la micro-morphologie et des analyses, nous avons poursuivi les investigations au niveau des cortex d'altération, car c'est bien là que se forme le complexe organo-minéral du sol.

4.1. Microanalyse qualitative

Un basalte altéré et son cortex ont été prélevés à la base d'un profil d'Andosol humifère (11 % de matière organique). Après inclusion dans une résine polymère, l'échantillon a été scié en deux parties. Chacune des faces en vis-à-vis a subi un polissage léger pour obtenir une surface plane et régulière. L'une des faces a servi pour la fabrication d'une lame mince, l'autre a été métallisée à l'or pour analyse au microscope à balayage.

Sur la lame mince situant la zone explorée, on distingue le contact entre le basalte altéré dont on peut observer les plagioclases et la magnétite, le gel en cours d'organisation et le plasma organo-minéral du sol (photo 12, pl. II). Sur la surface analysée au MEB qui couvre le contact roche-gel, on distingue dans la roche, des plagioclases non altérés en relief et des zones grises en dépression où les plagioclases ont fondu (pl. III).

D'après les images de la densité électronique des

principaux éléments, on constate que le gel contient du silicium, du fer, du magnésium, de l'aluminium et dans une moindre proportion du carbone ainsi que des traces de titane et de calcium (planches III et IV). Le calcium et le magnésium ont un comportement opposé : le premier est encore présent dans les plagioclases non ou peu altérés, mais il a pratiquement disparu du reste de la roche et du gel ; le second par contre, s'est accumulé dans le gel. On distingue parfaitement l'emplacement des plagioclases encore peu altérés, grâce à la superposition de l'aluminium et du silicium. On observe aussi l'emplacement de la titanomagnétite, repérable par la densité du titane. Enfin, on peut vérifier que le carbone s'est accumulé dans les zones où les plagioclases ont été détruits, ce qui confirme l'action de la matière organique sur la dissolution des minéraux primaires de la roche.

Ces images sont éloquentes : le gel qui diffuse à la périphérie de la roche est un produit silico-alumineux, ferrifère, magnésien et carboné. Il s'agit donc d'un produit amorphe ou semi-organisé dont la composition est plus complexe que celle d'une allophane purement silico-alumineuse. Et c'est dans ce gel, déjà biréfringent, que vont s'organiser l'hallowite et la beidellite comme le montrent les micrographies électroniques.

4.2. Micrographie électronique

Une première série d'observations sur la fraction colloïdale d'un basalte très altéré, extrait d'un Ando-

sol humifère, démontre la naissance des gels et des argiles à la périphérie des plagioclases (photo 13, pl. V). Sous le microscope à balayage, la surface des plagioclases, corrodés et poreux, est parfois couverte de lattes ou d'aiguilles creuses dont la croissance évoque celle des whiskers (photo 14, pl. V). Des phénomènes analogues ont été observés par Eswaran *et al.* (1973) sur des laves basaltiques en climat équatorial. Pour ces auteurs, il s'agit de filaments d'imogolite. Dans le cas présent, nous pensons qu'il s'agit *plutôt d'halloysite* mais sans preuve, car il est difficile de se prononcer sur un minéral déshydraté sous le vide du microscope. Par transmission, on observe l'hydratation et l'exfoliation de la surface des feldspaths et l'apparition d'un gel à structure en réseau (photo 15, pl. V). Dans le gel se différencient des glomérules, des paquets de membranes plus ou moins enroulées, des ébauches de tubes, *quelques rares plaquettes hexagonales*, ainsi que des voiles ponctués de taches sphériques, qui évoquent le faciès microscopique d'une montmorillonite après absorption de composés organiques (Moinereau, 1977). Cependant, les taches ont ici un diamètre bien supérieur à celui des pelotes de matière organique absorbées par la montmorillonite (0,1 à 0,2 μ contre 400 à 30 Å). Il s'agit plutôt de globules ou de condensats vitreux (photo 16, pl. V).

Dans le verre basaltique extrait d'un Andosol sur tuf, riche en beidellite, on observe une structure réticulée, ponctuée de granulats de très petite taille (100 Å). Le verre très poreux est interrompu par de nombreuses vésicules d'une taille comprise entre 0,04 et 0,5 μ . Dans les parties altérées, on note une expansion de la structure réticulée, la disparition des granulats et l'organisation de files parallèles à côté des condensats globuleux de 0,2 μ environ, analogues aux précédents (photo 17, pl. V). A très fort grossissement, on peut distinguer des feuillets dont l'écartement avoisine 15 Å ; *c'est la beidellite* (photo 18, pl. V). L'halloysite est localisée dans les glomérules ; une microdiffraction sur l'écorce exfoliée d'un de ces glomérules, a donné une série de halos et de points d'équidistance 3.24 - 2.33 - 1.98 - 1.66 - 1.46 Å, qui sont apparentés à ceux d'une argile 1/1.

Dans une scorie basaltique, le verre volcanique présente assez souvent un faciès en sphérules, dont les diamètres varient entre 0,5 et 5 μ . Pour les auteurs japonais, ce seraient des *disques d'opale secondaire*, résultant de la désilicification des verres (Shoji et Masui, 1967). Dans notre cas, la microanalyse indique non seulement la présence de silice, mais aussi de fer et d'aluminium. *Ce n'est donc pas de l'opale*

mais du verre volcanique. De fait, ces sphérules extrêmement poreuses s'altèrent comme le verre, présentant à leur périphérie des ébauches de glomérules et de tubes (photo 19, pl. V).

Enfin, l'examen d'une suspension très fine (0,5 μ) d'un sol dont on a extrait la matière organique par la soude 0,5 N, montre que les glomérules d'halloysite et le gel contenant les feuillets de beidellite sont imprégnés par une forme d'humus hautement polymérisée que l'on nomme l'humine. Les glomérules en particulier, semblent se structurer autour de globules fortement contrastés résultant d'une condensation du gel sous l'influence de la matière organique (photo 20, pl. V).

En résumé, la micrographie et la microanalyse électronique, apportent les premières clefs du mécanisme intime de la formation des argiles :

- les solutions organiques diffusent dans la roche et provoquent la destruction des plagioclases, de l'olivine, des pyroxènes et de la titanomagnétite ;
- les minéraux primaires donnent un gel complexe siliceux, alumineux, ferrifère, magnésien, imprégné par la matière organique ;
- la beidellite et l'halloysite naissent au sein de ce gel ; la première apparaît sous la forme de feuillets parallèles et de voiles diffus au sein de la masse amorphe, la seconde s'organise autour de condensats globuleux bien localisés ;
- la matière organique est intimement liée aux deux types d'argiles, *puisque elle participe à leur genèse*.

5. CERTITUDES ET HYPOTHÈSES

Une étude préalable de la fraction argileuse des Andosols et des Sols Bruns (Moinereau, 1975) avait montré la présence de l'halloysite-métahalloysite sous ses faciès classiques : glomérules, tubes et plaquettes. La forme glomérulaire apparaissait en particulier dans les matériaux vitreux, où préexistent des particules sphériques résultant d'une différenciation précoce du verre basaltique (Trichet et Sella, 1968). Il était tout naturel d'établir une relation génétique entre ces formes sphériques et d'expliquer ensuite le passage aux plaquettes et aux tubes par une exfoliation des glomérules dont la structure concentrique est bien connue (Wada et Harward, 1974 ; Dixon et McKee, 1974). Cependant, nous avons observé aussi des faciès glomérulaires sur des sols dérivés de basaltes holocristallins, très pauvres en verre volcanique. Mais il était très difficile d'expliquer l'origine de ces

glomérules, car une contamination par des cendres vitreuses est toujours possible et elle est absolument indétectable dans les sols actuels.

Nous avons conclu à l'héritage de la kaolinite dans les sols « pollués » par des roches granitiques, comme c'est le cas pour l'illite et la vermiculite. Les rares diffractogrammes montrant des spectres de kaolinite provenaient effectivement de sols andiques sur coulées récentes situées en fond de vallée, contaminées par les alluvions et les colluvions du socle antérieur.

Les diagrammes d'Andosols humifères, obtenus après des traitements au citrate de sodium, destinés à séparer les argiles de leur gangue organo-minérale amorphe, mettaient en évidence la prédominance de la beidellite aussi bien sur basalte que sur tuf. Nous avons montré par la suite que cette beidellite évoluait vers une forme d'intergrade gonflant à comportement de pseudochlorite après absorption de complexes organo-alumineux entre les feuillets (Moinereau, 1977). Mais il n'a pas été possible de reconnaître et de localiser cette argile sur les micrographies de la fraction colloïdale des sols, comme il est aisé de le faire pour l'halloysite.

Avec les données complémentaires sur l'altération des basaltes, des scories et des tufs, au contact de milieux organiques, un certain nombre de faits et d'idées nouvelles ont été acquis sur le genèse des minéraux argileux et du complexe organo-minéral en climat tempéré humide.

5.1. Les certitudes

La *beidellite* et l'*halloysite* naissent ensemble dans les matériaux basaltiques altérés, au sein d'un gel silico-alumineux, ferrifère, magnésien et carboné, dont les éléments proviennent de la dissolution des minéraux primaires sous l'action des solutions organiques qui diffusent dans la roche.

Chacun des principaux minéraux de la roche participe à la formation du gel selon son degré d'altérabilité dans le milieu organique. Le tableau IV permet de situer la source des éléments majeurs dans le cas d'une roche basaltique représentative des coulées supérieures du Massif Central. On voit que le silicium et l'aluminium viennent pour 80 % des plagioclases et des pyroxènes. La source principale du fer se trouve dans la magnétite puis, à parts égales, dans l'olivine et le clinopyroxène. Le calcium est issu du pyroxène, le magnésium de l'olivine et du pyroxène, le titane de la titanomagnétite. Compte

tenu des comportements observés au microscope, on peut affirmer que le gel silico-alumineux se forme en premier lieu à partir des plagioclases et/ou du verre dans le cas des pyroclastites.

La solubilisation rapide des plagioclases calciques, en présence d'acides organiques complexants, tels que l'acide salicylique et l'acide citrique, a été étudiée par Huang et Kiang (1972). Ces deux auteurs ont constaté une extraction préférentielle de l'aluminium et du calcium par rapport à la silice ; ce fait pouvant être facilement expliqué par la formation de complexes comme le citrate d'aluminium ou/et de calcium. Les acides organiques hydrosolubles dégradent aussi les autres minéraux dont la dissolution enrichit le gel en silice, aluminium, fer, magnésium, éventuellement calcium et titane. Ce dernier est très facilement extrait de la titanomagnétite car il forme des complexes organiques comme l'a montré Dumon (1972), en attaquant expérimentalement de l'ilménite par de l'acide oxalique et de l'acide citrique. Cette expérience vient à l'appui de nos observations sur la biodégradabilité de la titanomagnétite dans les Andosols.

Le silicium, le calcium, le magnésium sont libérés par la dissolution de l'olivine et du pyroxène. Si le calcium est, en grande partie, évacué du sol à l'état de bicarbonate, le magnésium est retenu par le gel et semble jouer un rôle essentiel dans la genèse de la *beidellite*. On voit donc l'importance de l'olivine et du pyroxène qui règlent le flux de magnésium dans le milieu. Ils participent également à l'approvisionnement en fer aux côtés de la magnétite. Ce fer, dont une petite fraction est intégrée dans les couches octaédriques de la beidellite et dont la plus grande part précipite sous forme d'hydroxydes amorphes ou cryptocristallins liés à l'humus et aux argiles.

Une partie de la beidellite ferromagnésienne peut avoir une origine hydrothermale tout comme l'halloysite. C'est le cas de l'iddingsite provenant de l'altération précoce de l'olivine. Mais, dans un basalte, cela ne représente qu'une toute petite fraction des argiles 2/1. Par contre, dans les pyroclastites vitreuses et hydratées, telles que les hyaloclastites, une plus grande part des argiles 2/1 est héritée de la volcanogénèse.

L'halloysite et la kaolinite se forment dans le gel, à la périphérie des plagioclases. L'halloysite apparaît dans les glomérules dont l'exfoliation concentrique s'accroît au fur et à mesure de leur vieillissement et de leur déshydratation. Les plaquettes et les tubes ne sont que des formes secondaires de ces écailles

concentriques. La kaolinite néogénique est rare et semble se différencier à l'état de plaquettes de très petite taille et de forme parfaitement hexagonale.

5.2. Les hypothèses probables

Si les conditions du milieu d'altération peuvent être favorables à la néoformation simultanée des argiles 1/1 et des argiles 2/1, comme le supposaient Sieffermann (1969) et Hétier (1975), il semble bien que le mécanisme intime de la néogénèse soit différent dans chaque cas.

Les glomérules d'halloysite s'organisent autour des condensats sphériques du gel. Cette faculté des gels à se rassembler en globules, avait déjà été observée par Pedro (1964) dans les suspensions opalescentes provenant de l'altération à l'eau pure d'un granite et d'un trachy-Andésite et d'ailleurs, les « billes » observées par Trichet (1969) dans les verres basaltiques ne sont finalement que des condensations précoces et sélectives de silice et d'alumine.

Pour Hétier (1975), le faciès glomérulaire pourrait apparaître sous l'influence des acides fulviques. On sait que les acides organiques se rassemblent effectivement en pelotes et précipitent lorsque leurs fonctions COO^- sont saturées par l'aluminium ou le fer. Un mécanisme de coprécipitation est possible car la matière organique imprègne de toute évidence les glomérules. D'ailleurs, la fixation de composés organiques entre les couches concentriques de l'halloysite glomérulaire est un fait connu depuis longtemps (voir mise au point dans Theng, 1974).

On peut donc concevoir une interstratification concentrique de couches organo-minérales et de feuillettes d'halloysite s'organisant progressivement autour d'un nucléus dont l'origine peut être soit une bille silico-alumineuse, soit un flocculat humo-alumino-silicique. Mais comment se forment les couches concentriques ?

Est-ce l'acide organique qui mobilise l'aluminium et lui confère une structure propre au greffage de la silice en solution comme le suggèrent Dennfeld *et al.* (1970) à propos de la synthèse hydrothermale de la kaolinite à basse température, ou sont-ce tout simplement les feuillettes 1/1 hydratés, néoformés par l'organisation des polymères de silicium et d'aluminium qui absorbent ensuite un complexe amorphe organo-minéral ? Il n'est pas certain, en effet, que des synthèses en solution puissent se produire dans un gel constitué avant tout de chaînes de silicium et

d'aluminium Al^{IV} et Al^{VI} . Il ne faut pas perdre de vue non plus que la genèse de l'halloysite glomérulaire est possible *en l'absence de solutions organiques*.

Les acides humiques hautement polymérisés, constituant l'humine, ne sont pas uniquement absorbés par les glomérules d'halloysite ; ils imprègnent en fait *tout le gel complexe* dans lequel s'organisent les feuillettes de la beidellite. Il n'est donc pas exclu que des interstratifications organo-minérales apparaissent dans les tous premiers stades de la formation de la smectite. Cependant, c'est dans le plasma organique du sol, hors de la roche, que s'accumule l'intergrade organo-minéral gonflant. Là se pose une question sur le maintien de la beidellite dans les Andosols humifères, non seulement dans un milieu tempéré raisonnablement pluvieux (1 500 mm) mais aussi en climat tropical, comme l'avait montré Sieffermann (1969) sur le Mont Cameroun où les précipitations peuvent atteindre et dépasser 7 000 mm. Il est surprenant que la smectite ne soit pas dégradée dans ce milieu acide, désaturé, complexant et hyperdrainant. On observe plus souvent la stabilité de la montmorillonite dans les sols saturés en milieu confiné, que dans les sols acides en milieu drainé. La seule hypothèse vraisemblable est que l'*humine extra-foliaire et intra-foliaire, constituant une gangue organo-minérale, protège les feuillettes de la beidellite contre une acido-complexolyse ultérieure*.

Ceci expliquerait que la beidellite soit minoritaire dans les sols bruns où prédomine au contraire l'halloysite. Dans les milieux peu organiques, l'altération du basalte s'effectue essentiellement par un processus d'hydrolyse neutre ou acide. Le gel cède peu à peu la silice et les bases, entraînées à l'état de solutions et de pseudosolutions particulières. Cette désilicification est d'autant plus efficace que le milieu aqueux se renouvelle rapidement. C'est ce qui se passe dans les roches poreuses au cours des orages (Moinereau *et al.*, 1974). L'appauvrissement du gel en silice et en magnésium, l'absence d'acides humiques protecteurs, suffiraient à privilégier la genèse de l'halloysite aux dépens de la beidellite.

Une dernière hypothèse permet d'envisager une sélection des ions dans le gel, avec ou sans la participation des acides organiques. L'halloysite apparaît dans des microsites désaturés et hyposiliceux ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 2$). La beidellite se forme dans le fond amorphe, alumineux, ferrifère, magnésien et hypersiliceux ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 3$). Les acides humiques ont un rôle sélectif vis-à-vis de l'aluminium, du fer et du magnésium. Le gel organo-minéral qui

enrobe les minéraux primaires, en voie de dissolution, peut jouer le rôle d'une membrane sélective favorisant la croissance de whiskers silico-alumineux.

6. CONCLUSION

Les mécanismes de l'argilogenèse sur basalte en climat tempéré dans un milieu organique, mettent en évidence le rôle efficace mais ambigu de l'humus. Les acides organiques agressifs, véhiculés en solution depuis la surface du sol, pénètrent au sein des éléments de la roche-mère où ils provoquent une dégradation des minéraux primaires en complexant préférentiellement les cations métalliques (Al^{3+} , Fe^{3+} , Ti^{4+}) et alcalino-terreux (Mg^{2+} , Ca^{2+}). Puis leurs fonctions acides étant saturées, ils précipitent, polymérisent et se fixent dans le gel résiduel. Mais la complexation est sélective ; le magnésium, le fer, le

titane et l'aluminium sont retenus, la silice, les alcalins et le calcium dans une moindre mesure, sont évacués. Cette sélection est différentielle, elle crée, de ce fait, des microsites au sein du gel. Dans les sites hyposiliceux et désaturés naissent les glomérules concentriques de l'halloysite ; dans les sites hypersiliceux et saturés apparaissent les feuillets et les voiles de la beidellite. Après neutralisation, les complexes organo-minéraux amorphes, hautement polymérisés, ne sont plus agressifs ; ils se fixent sur les feuillets fragiles de la beidellite qu'ils protègent contre une acido-complexolyse ultérieure dans les Andosols acides et désaturés.

En fonction du degré de polymérisation, l'humus peut donc jouer successivement un rôle agressif, sélectif, puis protecteur et conservateur, au cours de l'argilogenèse sur basalte en milieu organique.

Manuscrit reçu au Service des Publications le 6 juin 1977.

BIBLIOGRAPHIE

- AOMINE (S.), WADA (K.), 1962. — Differential weathering of volcanic ash and pumice resulting in formation of hydrated halloysite. *Amer. Min.*, 47 : 1024-1048.
- BATES (T.F.), 1962. — Halloysite and gibbsite formation in Hawaii. *Proc. Nat. Conf. Clays and Clays Minerals*, 9 : 307-314.
- BONATTI (E.), 1967. — Mechanisms of Deep sea volcanism in the south Pacific. *Research in Geochemistry. Vol. 2*, 453-491.
- CORRENS (C.W.), 1961. — Observations sur la formation et la transformation de minéraux argileux lors de la décomposition des basaltes. *Coll. Genèse et Synthèse des Argiles. C.N.R.S.*, 105 : 109-121.
- CRAIG (D.C.), 1963. — Geochemical and mineralogical aspects of weathering of some basaltic rocks from New South Wales. *M. Sc. Thèse, Univ. New South Wales*.
- CRAIG (D.C.), LOUGHNAN (F.C.), 1964. — Chemical and mineralogical transformation accompanying the weathering of basic volcanic rocks from New South Wales. *Aust. J. Soil Res.*, 2 : 218-234.
- DENNFELD (F.), SIEFFERT (B.), WEY (R.), 1970. — Etude de l'influence des complexants de l'aluminium et du broyage des hydroxydes d'aluminium sur la formation hydrothermale de la kaolinite. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, XXII, 2 : 179-190.
- DUMON (J.C.), 1976. — Action d'acides organiques divers sur des minéraux titanés (ilmenite et rutile). Comparaison de leur pouvoir d'extraction du titane avec celui d'acides minéraux. *Bull. Soc. Géol. France*, 7, XVIII : 75-79.
- DIXON (J.B.), MCKEE (T.R.), 1974. — Internal and external morphology of tubular and spheroidal halloysite particles. *Clays and Clay Minerals*, 22 : 127-137.
- ESWARAN (H.), DE CONINCK (F.), 1971. — Clay mineral formations and transformations in basaltic soils in tropical environments. *Pédologie*, XXI, 2 : 181-210.
- ESWARAN (H.), STOOPS (G.), DE PAEPE (P.), 1973. — A contribution to the study of Soil formation on Isla Santa Cruz, Galapagos. *Pédologie*, XXIII, 2 : 100-122.
- GASTUCHE (M.C.), FRIPIAT (J.J.), DE KIMPE (C.), 1961. — La genèse des minéraux argileux de la famille du kaolin. *Coll. Genèse et Synthèse des Argiles, CNRS*, 105 : 57-81.
- GENSE (C.), 1976. — L'altération des roches volcaniques basiques sur la côte orientale de Madagascar et à la Réunion, Thèse Doc. d'Etat, Inst. Géologie, Strasbourg, 165 p.
- HAUSER (E.A.), REYNOLDS (H.H.), 1939. — Altération of glasses to montmorillonite. *Am. Min.* 24 : 590-597.
- HETIER (J.M.), 1975. — Formation et évolution des Andosols en climat tempéré. Thèse Doct. d'Etat, Nancy I, 185 p.
- HUANG (W.H.), KIANG (W.C.), 1972. — Laboratory dissolution of plagioclase feldspars in water and organic acids at room temperature. *Am. Miner.* 57 : 1849-1859.
- DE KIMPE (C.R.), 1976. — Formation of phyllosilicates and zéolites from pure silica-alumina gels. *Clays and Clay Minerals*, 24 : 200-207.
- LOUGHNAN (J.C.), 1969. — Chemical weathering of the silicate minerals. *Am. Elsevier Publ. Comp. Inc. New York*, 146 p.

- MASUI (J.), SHOJI (S.), 1967. — Some problems on clay minerals of volcanic ash-soil, *Pedologist*, 11, 1 : 33-45.
- MILLOT (G.), 1964. — Géologie des Argiles - Ed. Masson.
- MOINEREAU (J.), GRILLOT (J.C.), NAUD (G.), 1972. — Origine et géochimie des niveaux rouges du plateau basaltique des Coirons en Ardèche. *Rev. Géog. Phys. et Géol. Dyn.* XIV, 1 : 35-94.
- MOINEREAU (J.), 1974. — Andosols, sols podzolisés, sols andiques et sols bruns, séquence sur matériaux basaltiques dans le Velay oriental et le Vivarais (Massif Central, France). Première partie : *Sc. du Sol*, 3, 179-191. Deuxième partie : *Sc. du Sol*, 4 : 253-267.
- MOINEREAU (J.), BIBENT (B.), TRICHET (J.), 1974. — Présence de produits amorphes et de minéraux argileux de la famille de l'halloysite en suspension dans les eaux de drainage d'un tuf basaltique, CRAS, 278 D : 2389-2392.
- MOINEREAU (J.), 1975. — Andosols, sols podzolisés, sols andiques et sols bruns : nature et évolution de la fraction argileuse. *Sc. du Sol*, 4 : 295-313.
- MOINEREAU (J.), 1977. — Absorption de composés humiques par une montmorillonite H^+ , Al^{3+} . Présence de smectites à couches interfoliaires organo-minérales dans les Andosols. *Clay Minerals*, 12 : 75-82.
- PAQUET (H.), 1970. — Evolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées. Thèse Doct. d'Etat Univ. Strasbourg. *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorraine*, n° 30, 212 p.
- PECROT (A.), DELVIGNE (J.), GASTUCHE (M.C.), VIELVOYE (L.), FRIPIAT (J.J.), 1962. — L'altération des roches et la formation des sols au Kivu. Publ. de l'INFCAC, Série Scientifique, n° 97, 90 p.
- PEDRO (G.), 1966. — Essai sur la caractérisation des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles, CRAS, 262 : 1828-1831.
- PEDRO (G.), 1968. — Notes sur le type d'altération superficielle caractérisant les projections volcaniques récentes du Puy de la Vache (Massif Central). *Bull. AFES*, 3 : 17-20.
- SHERMAN (G.D.), IKAWA (H.), UEHARA (G.), OKASAKI (E.), 1962. — Types of occurrence of nontronite and nontronite like minerals in soils. *Pacific Science*, 16 : 57-62.
- SHOJI (S.), MASUI (J.), 1967. — Amorphous clay minerals of recent volcanic ash soils in Hokkaido. *Soil Sc. Pl. Nut.*, 15, (4), 161-168 et (5), 191-201.
- SIEFFERMANN (G.), JEHL (G.), MILLOT (G.), 1968. — Allophanes et minéraux argileux des altérations des basaltes du Mont Cameroun, *Bull. Gr. Fr. Argiles*, XX, 2 : 109-129.
- SIEFFERMANN (G.), 1969. — Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Thèse Doct. d'Etat Univ. Strasbourg, 290 p.
- THENG (B.K.G.), 1974. — The chemistry of Clay organic reaction. Adam. Hilger. England, 343 p.
- TRICHET (J.), SELLA (C.), 1968. — Etude de la structure des verres volcaniques. Relation avec leur mode de formation et d'altération. CRAS, D, 267 - 1084-1086.
- TRICHET (J.), 1969. — Contribution à l'étude de l'altération expérimentale des verres volcaniques. Thèse Doct. d'Etat Sc. Nat., Paris, 232 p.
- WADA (K.), AOMINE (S.), 1973. — Soil development on volcanic materials during the Quaternary. *Soil. Sc.*, 116, 3 : 170-177.
- WADA (K.), HARWARD (M.E.), 1974. — Amorphous clay constituents of soils. *Advances in Agronomy*, 26 : 211-260.
- YAALON (D.H.), 1970. — On high iron montmorillonite ; discussion of the significance of magnesium and iron montmorillonite formation from basic igneous rocks, *Soil Science*, 110, 1 : 74-76.



PLANCHE I. — 1. Fissures remplies d'oxydes de fer et de verre volcanique dans un basalte à structure granulaire - L.P. $\times 4$;
 2. Enveloppe de basalte altéré, grisâtre (B) au contact du basalte sain, birefringent (R) - LP $\times 32$; 3. Exudation
 d'un gel en partie birefringent (G) entre la roche altérée (R) et le plasma organo-minéral du sol (P) - LP $\times 250$;
 4. Cortex organo-minéral (C) formé au contact du gel (G) qui se détache de la roche altérée (R) sous forme de floccons
 arrondis (F) - LN $\times 32$; 5. Dépôts argileux stratifiés, blancs (A) puis devenant brunâtres après fixation de la matière
 organique (B) - LP $\times 250$; 6. Cutanes de tension (C) dans un plasma argileux, à structure masépique (P) - LP $\times 60$;

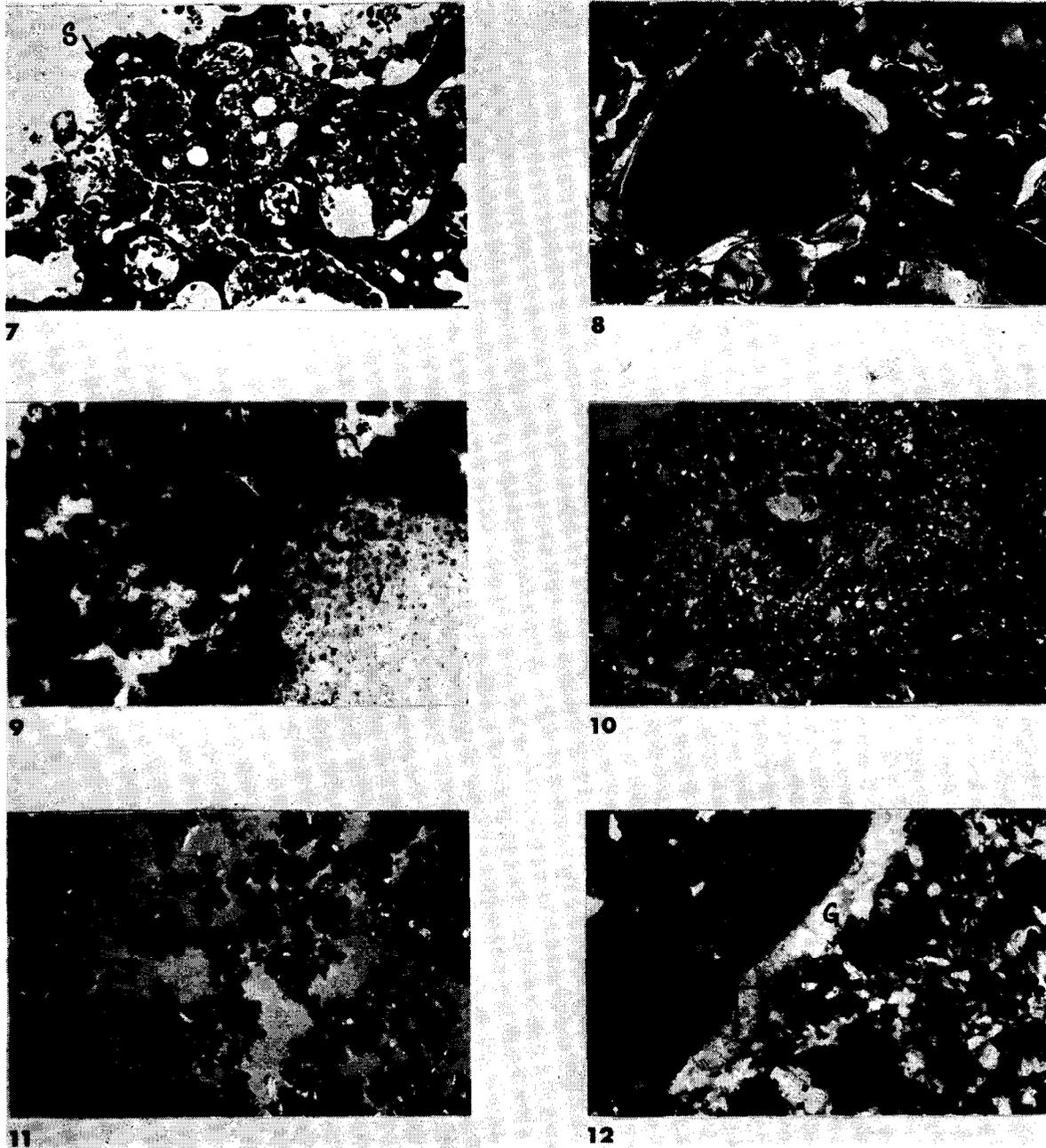


PLANCHE II. — 7. Fragmentation de la paroi des scories (S) et remplissage des vacuoles par le complexe organo-minéral (C) - LN×32 ; 8. Hydratation du verre volcanique (V) qui exude à la périphérie un gel jaunâtre ou blanc (G) qui s'organise en argile et fixe la matière organique (C) - LP×80 ; 9. Verre vésiculaire hydraté (V) en voie d'argillification (A) au contact du plasma organo-minéral - LP×250 ; 10. Plasma argileux (P) et dépôts argileux stratifiés (A) dans les cavités d'un sol brun sur tuf - LP×32 ; 11. Plasma argilo-humique d'un Andosol sur tuf - LP×80 ; 12. Contact roche altérée (R), gel (G) et plasma organo-minéral (P) exploré en micro-analyse qualitative - LP×300 ;

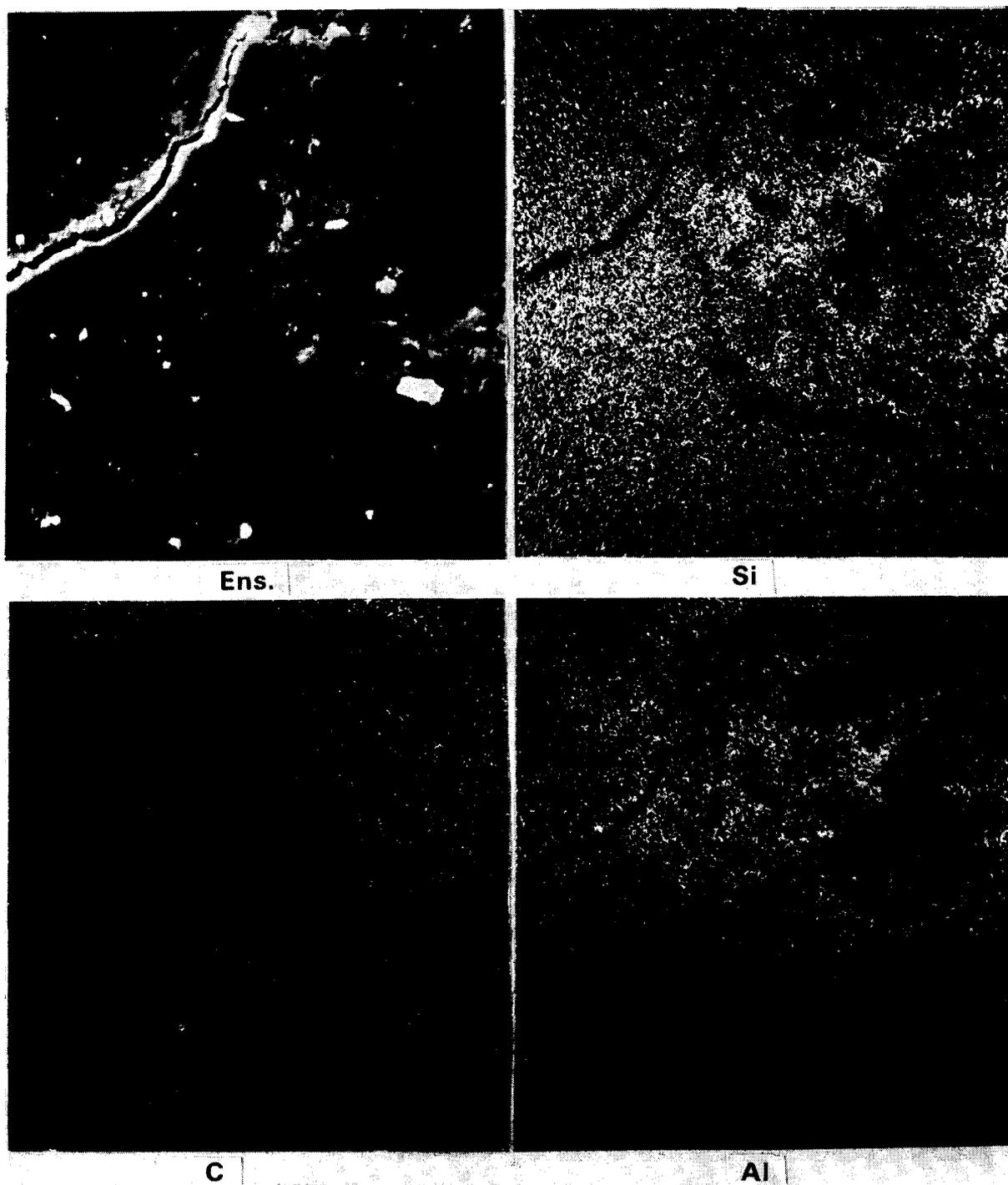


PLANCHE III. — Micrographies du contact roche-gel montrant les plagioclases sains (F) et altérés (Fa), le gel en voie d'argillification (G) et la répartition du Silicium, de l'Aluminium et du Carbone - MEB×600.

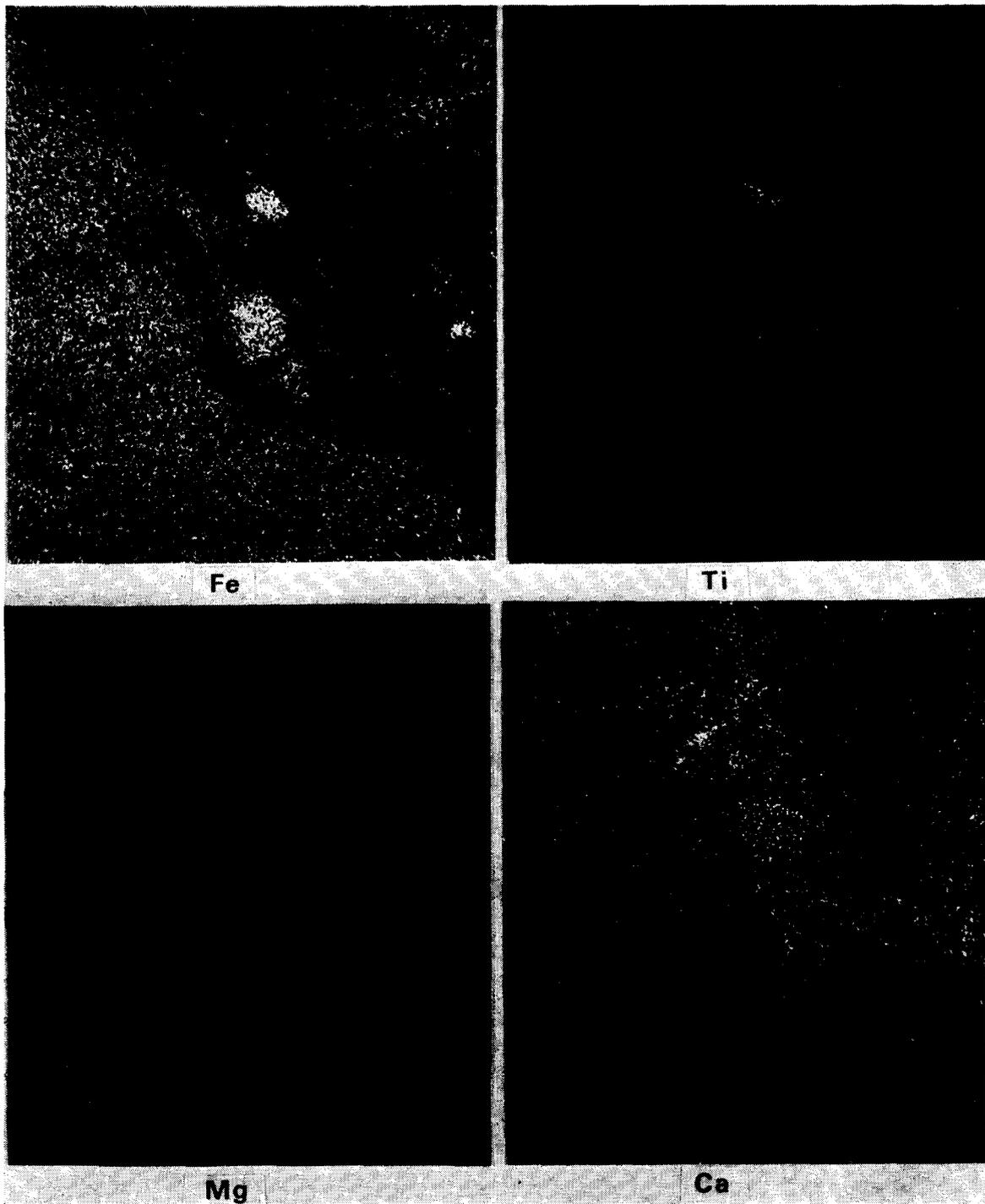


PLANCHE IV. — Micrographies de la répartition du Fer, du Titane, du Magnésium et du Calcium entre la roche altérée et le gel externe. MEB $\times 600$.

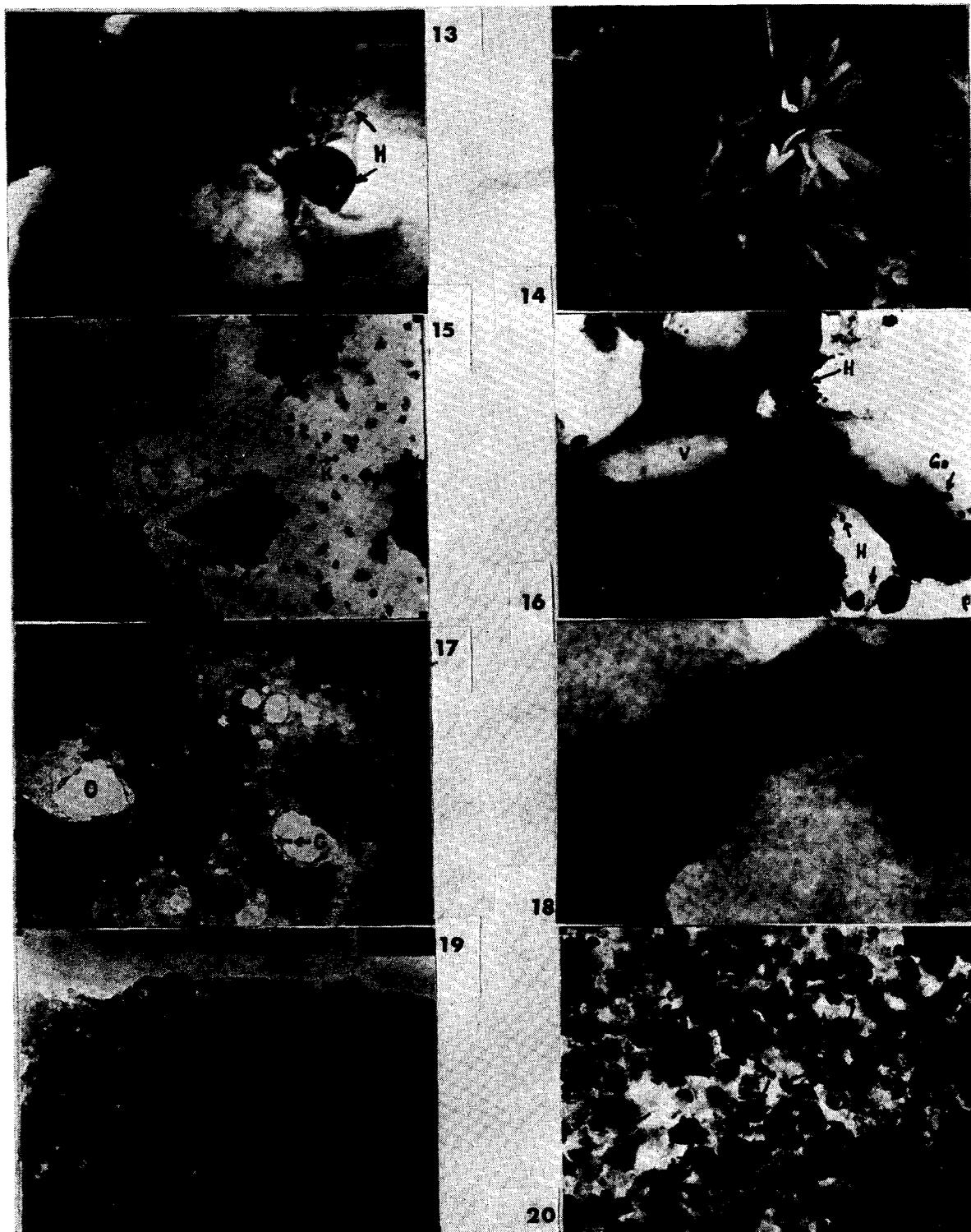


PLANCHE V. — 13 : Exudation d'un gel (G) à la périphérie des plagioclases altérés (P) et néogénèse des glomérules d'halloysite et des tubes par exfoliation (H). MET $\times 60\ 000$; 14 : Croissance de rubans et d'aiguilles sur un plagioclase corrodé. MEB $\times 5\ 000$; 15 : Gel à structure en réseau (G) entre les plagioclases (P) ; genèse de kaolinite (K) et d'halloysite glomérulaire (H). MET $\times 15\ 000$; 16 : Voiles amorphes (V) ponctués de condensats globuleux (Go) d'un diamètre équivalent à celui des glomérules d'halloysite (H). MET $\times 9\ 000$; 17 : Verre volcanique poreux (O) à structure réticulée (V) en cours d'expansion (R) puis de disparition dans les zones argillifées (A) ; organisation de globules (G) et de feuilletts (F). MET $\times 20\ 000$; 18 : Genèse des feuilletts de la beidellite (B) dans un gel à structure réticulée (R). MET $\times 200\ 000$; 19 : Altération de la périphérie d'une sphérule de verre volcanique (V) extrêmement poreuse (O) ; ébauches de globules (G) et de tubes d'halloysite (H). MET $\times 90\ 000$; 20 : Imprégnation de la fraction colloïdale par l'humine ; organisation des glomérules autour de nuclei organiques très condensés. MET $\times 20\ 000$.