

Étude des sols fersiallitiques lessivés formés sur des arènes granitiques de la Selva (Catalogne, Espagne)

Jaime BECH BORRAS (1), Nicolas FEDOROFF (2), Paul QUANTIN (3) et Pierre SEGALÉN (3)

(1) *Université de Barcelona (Espagne), Nucleo Universitario de Pedrables, Barcelona, Espagne*

(2) *I.N.A. Paris-Grignon, 78850 Thiverval-Grignon, France*

(3) *Services Scientifiques Centraux de l'O.R.S.T.O.M., 70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy, France*

RÉSUMÉ

Trois profils de sols, formés sur arènes granitiques, ont été étudiés dans la région de la Selva, à environ 75 km au nord-ouest de Barcelone, dans une région à topographie ondulée, sous un climat de type méditerranéen. Les trois profils sont de couleur dominante rouge, contiennent de fortes teneurs en minéraux primaires et des minéraux argileux riches en smectites, illites, kaoliniles et métahalloysite. Les caractères de ces sols indiquent qu'ils sont fersiallitiques, mais ils contiennent encore beaucoup de feldspaths et micas incomplètement altérés. En outre, ils sont marqués par des processus secondaires de lessivage, dégradation, hydromorphie et parfois de carbonatation. Il s'y ajoute des signes de remaniement.

MOTS-CLÉS : Catalogne — Granite — Fersiallitique — Lessivage — Dégradation — Hydromorphie — Carbonatation — Remaniement.

SUMMARY

STUDY OF CLAY-ELUVIATED FERSIALITIC SOILS, DEVELOPED ON SOME SANDY PRODUCTS FROM WEATHERED GRANITE, IN THE SELVA (CATALONIA, SPAIN)

Three profiles, derived from granitic material, have been studied in the Selva region, 75 km north east of Barcelona (Spain). Topography is undulated; climate is of mediterranean type. The three profiles are dominantly red, but contain high amounts of primary minerals such as feldspars and micas, and a mixture of secondary clay minerals, such as smectites, illites, kaoliniles and metahalloysites. The characteristics of these soils indicate they are fersiallitic; but they still contain much uncompletely weathered feldspars and micas. Moreover, they are concerned by secondary soil forming processes: eluviation, degradation, hydromorphy and calcium carbonate accumulation. Many signs of reworking are evident.

KEY WORDS : Catalonia — Granite — Fersiallitic — Eluviation — Degradation — Hydromorphy — Calcium carbonate accumulation — Reworking.

RESUMEN

ESTUDIO DE SUELOS FERSIALITICOS LIXIVIADOS, DESARROLLADOS SOBRE UNAS ALTERACIONES ARENÁCEAS PROVENIENDO DE GRANITO, EN LA SELVA (CATALUNA, ESPAÑA).

Se han estudiado tres perfiles de suelos derivados de granito de la comarca de la Selva, a unos 75 km al noreste de Barcelona, España. La fisiografía de la comarca es ondulada y su clima mediterráneo. Los tres perfiles son de

color rojo predominante, contienen altas concentraciones de minerales primarios y la fracción arcillosa es rica en esmectitas, ilitas, caolinitas y metahalloysitas. Las características de estos suelos hacen pensar que se trata de suelos fersialíticos. Pero, contienen todavía altas cantidades de feldespatos y micas no completamente alterados. Además, han sido marcados por procesos secundarios de « lessivage », degradación, hidromorfia y calcificación. Los tres suelos muestran igualmente indicios de remoción.

PALABRAS LLAVES : Cataluna — Granito — Fersialítico — « Lessivage » — Degradación — Hidromorfia — Calcificación — Remoción.

INTRODUCTION

La région de la Selva est située par 2°45' longitude est et 41°10' latitude nord à environ 75 km au nord-est de Barcelone, sur la route qui va de cette ville à Gerone. C'est une région légèrement déprimée, située entre les cordillères littorale et pré-littorale et remplie de sédiments néogènes et quaternaires, et bordée, au nord-ouest comme au sud-est, par des affleurements de granite ou d'arkose. Trois profils ont été examinés dans cette région et font l'objet de la présente étude.

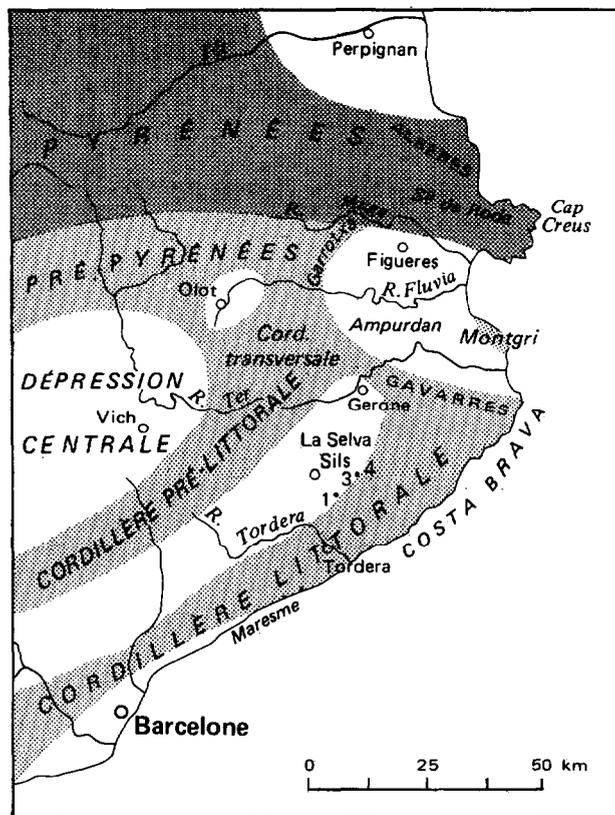


FIG. 1. — Situation des profils étudiés

Ces trois profils sont situés (fig. 1) entre le Rio Tordera qui coule vers le sud et le Rio Onyar qui coule vers le nord en direction de Gerone, avant de se jeter dans le Rio Ter. Les profils SA 1 et SA 4 ont été étudiés dans le lotissement dit « Terra Brava », au nord de Tordera. Le profil SA 1 a été examiné près de Sils (à Caldas de Malavella), à quelques kilomètres plus au nord.

Les sols ont été examinés et échantillonnés par l'ensemble des auteurs. Un certain nombre d'analyses ont été effectuées tant au Département des sols de l'INAPG à Grignon qu'aux Services Scientifiques Centraux de l'O.R.S.T.O.M. à Bondy. Les auteurs sont très reconnaissants à M^{mes} LUCET et PLEVEN de l'INAPG et à M^{me} BOULEAU et M. D. RAMBAUD des S.S.C. pour leur contribution aux analyses.

1. L'ENVIRONNEMENT ACTUEL DES SOLS

Les **roches-mères** des sols sont des granites leucocrates à quartz, orthose, plagioclases et biotites. Le tableau I donne la composition de quelques granites représentatifs de la région. Les analyses indiquent une grande pauvreté en fer (moins de 1,5 % de Fe₂O₃) une certaine pauvreté en calcium (moins de 1,2 % en CaO); par contre, ils sont riches en alcalins (plus de 8 %) et surtout en potassium (plus de 5 % en K₂O) ainsi qu'en silice (plus de 73 % en SiO₂). Ces granites sont parcourus par de multiples fractures et différents blocs ont joué, indépendamment les uns des autres, pendant le Pliocène et le Quaternaire. Quelques manifestations volcaniques et thermales accompagnent ces fractures, qui permettent la pénétration de l'eau et facilitent l'altération.

La **topographie** de ces affleurements de granite correspond à un modelé de collines à sommet arrondi et pentes convexes assez fortes. Les talwegs sont séparés par une dénivellation de 10 à 20 mètres. Le drainage général est bien assuré. A l'intérieur des profils, par contre, on observe des marques d'hydromorphie.

TABLEAU I. — Analyse de quelques granites de la Selva et des environs de Gérone (les oxydes sont exprimés en %, les éléments en p.p.m.)

	(1)	(2)	(3)
SiO ₂	73.81	74.85	74.70
Al ₂ O ₃	14.23	12.29	14.38
Fe ₂ O ₃	1.51	0.24	0.63
FeO	-	0.50	0.33
TiO ₂	0.18	ind.	ind.
MnO	0.40	ind.	0.02
MgO	0.30	3.20	0.05
CaO	1.21	0.16	0.17
Na ₂ O	3.48	3.03	2.69
K ₂ O	5.00	5.33	6.23
P ₂ O ₅	-	ind.	0.00
Li	46.00		
Rb	168.00		
Sr	93.30		
Ba	624.00		
Cu	11.30		
Pb	47.50		
Zn	54.77		
F	403.21		

(1) Leucogranites à grain moyen de Morou-Areny (Massif de Montseny). Composition moyenne. VILADEVALL, 1977.

(2) et (3) Granites de Punta Aigua Blava. Fornells (Gérone). FUSTER et al 1954.

Le climat actuel de la région étudiée peut être caractérisé par les données de quelques stations comme celles de Gerone (Aéroport), Sils et Tordera (tabl. II et fig. 2). L'examen de ces données permet les observations suivantes :

— les températures moyennes mensuelles croissent régulièrement en janvier (7°1 à 9°4 C) pour atteindre un maximum en juillet (23°5 à 25°9 C) et décroître ensuite;

— les précipitations totales annuelles sont voisines de 700 mm. Pour chaque station, on note deux

maxima situés, le premier entre mars et mai, le second en octobre. Ces deux maxima encadrent une diminution estivale qui n'est pas très nette à Gerone, proche des Pyrénées, mais plus sensible à Sils et

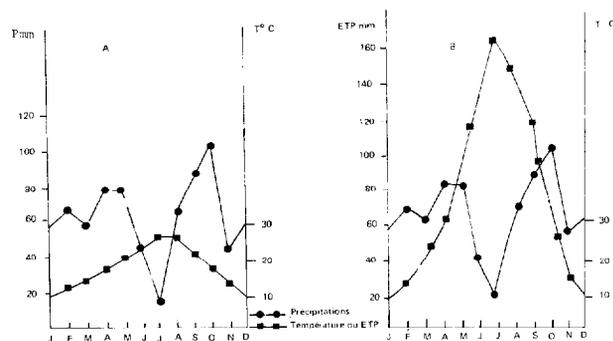


FIG. 2. — A : Diagramme ombrothermique de sils ; B : Diagramme P+ETP de Sils

Tordera. Les figures 2 A et 2 B permettent de comparer les répartitions des précipitations et de la température. La figure 2 A représente le diagramme ombrothermique de Sils. Elle ne met en évidence qu'une période sèche assez brève, de deux mois. Par contre, sur la figure 2 B, où la température a été remplacée par l'ETP, on voit que la période déficitaire en eau est de cinq mois.

Le climat de la Selva présente donc un régime méditerranéen avec des précipitations maximales en automne et au printemps, avec une période déficitaire de plusieurs mois en été.

La végétation actuelle est variable. Près de Sils, il s'agit d'une forêt où les chênes-lièges (*Quercus suber*) sont partiellement remplacés par des pins d'Alep (*Pinus alepensis*) et *Pinus pinea*. Dans la Terra Brava, cette forêt mixte est remplacée localement par une lande où l'on reconnaît les espèces suivantes : *Arbutus unedo*, *Ulex parviflorus*, *Erica*

TABLEAU II. — Données climatiques (précipitations moyennes mensuelles et températures moyennes mensuelles) de localités de la Selva

	J	F	M	A	M	Jn	Jt	A	S	O	N	D	A	Δ
GERONE Temp.M.	7.1	8.4	11.1	13.4	16.8	20.7	23.5	23.3	20.9	16.0	11.3	8.3	15.0	14.6
Préc.	36	43	86	68	64	55	44	57	86	91	54	57	740	
SILS Temp.	8.9	10.8	12.9	15.5	19.8	22.6	25.9	25.2	23.4	18.4	12.8	9.01	17.1	14.5
Préc.	57	67	56	80	78	37	15	61	86	100	42	61	755	
TORDERA Temp.	9,2	9.8	10.8	13.2	17.4	21.3	24.2	23.7	21.8	17.2	12.0	10.0	15.9	13.5
Préc.	48	55	69	68	62	52	22	53	80	109	67	83	778	

Δ = Différence entre la moyenne des trois mois les plus chauds et la moyenne des trois mois les plus froids.

cinerea, *Calluna sp.*, *Erica scoparia*, *Cistus monspeliensis*, *Cistus salvifolius*, *Carex sp.* et quelques *Quercus suber*.

L'histoire géologique et pédologique de la Selva apparaît fort complexe. Elle a été certainement fortement modifiée par les changements climatiques liés aux événements du Quaternaire. Au cours de l'époque historique, des défrichements et mises en culture ont eu lieu à différentes époques, et n'ont pas manqué d'avoir des répercussions sur les sols.

Par conséquent, dans la zone étudiée les sols dérivent de granites leucocrates; ils supportent une végétation arborée à base de chêne-liège et de pin d'Alep, localement remplacée par une lande; le climat est de régime méditerranéen avec de fortes précipitations en automne et au printemps, et avec un déficit estival.

2. LES MÉTHODES D'ÉTUDE

Parmi les divers profils examinés dans la Selva sur matériau acide, trois ont été retenus comme représentatifs de la région. Deux d'entre eux dérivent d'arène de granite, le troisième d'arkose. La morphologie a été examinée et décrite sur le terrain. Les échantillons prélevés ont fait l'objet des déterminations suivantes :

L'analyse mécanique a été effectuée après dispersion à l'héxamétaphosphate de sodium; les fractions ont été estimées après sédimentation et prélèvements à l'aide d'une pipette de Robinson.

La matière organique a été dosée après attaque au réactif sulfo-chromique et dosage en retour au sel de Mohr par la technique de WALKLEY-BLACK. L'azote total a été déterminé après minéralisation de l'échantillon suivant KJELDAHL. Le pH a été mesuré par potentiométrie à l'électrode de verre, avec un rapport sol/eau et sol/solution de chlorure de potassium normale de 1/2,5. Les bases échangeables ont été extraites par une solution d'acétate d'ammonium normale à pH = 7,0. La capacité d'échange de cations a été déterminée après lessivage à l'acétate d'ammonium et dosage des ions ammonium fixés.

L'oxyde de fer total a été dosé après attaque du sol à l'acide chlorhydrique bouillant. L'oxyde de fer libre a été déterminé après extraction au dithionite de sodium. Les résultats obtenus permettent de calculer les rapports Fe_2O_3 libre/ Fe_2O_3 total ainsi que les rapports Fe_2O_3 /argile. L'oxyde de fer amorphe a été déterminé par une extraction cinétique à l'acide chlorhydrique suivant SEGALÉN, 1968.

L'analyse minéralogique du sol a été effectuée par diffraction des rayons X, d'abord sur la poudre de sol (< 2 mm), pour avoir une idée globale de l'ensemble des minéraux; puis, sur la fraction inférieure à 2 μ (éventuellement prétraitée par des ions potassium ou magnésium) puis glycérolée ou chauffée à 105 et 500 °C afin de préciser la nature des minéraux argileux. Quelques échantillons de la fraction inférieure à 2 μ représentatifs des horizons A, Bt et C d'un profil ont été examinés au microscope électronique à transmission. L'ensemble des résultats ont été estimés de manière semi-quantitative.

Les données complémentaires sur les minéraux primaires et leur altération, le transfert de produits solides à l'intérieur des profils ont été obtenus par une étude micromorphologique. Les lames minces 135 x 55 mm ont été imprégnées au polyester dilué dans l'acétone; elles ont été taillées et polies suivant la méthode GUILLORE (1980). Elles ont été décrites suivant BREWER (1964) et FEDOROFF (1979) pour les minéraux altérés.

Les résultats de toute nature obtenus grâce à ces déterminations permettent de tirer un certain nombre de conclusions sur la genèse et la classification.

3. LA MORPHOLOGIE DES SOLS

3.1. Description des profils

PROFIL SA 1. Caldas de Malavella.

Pente de quelques degrés, immédiatement sous un interfluve. Arkose, roche saine non vue jusqu'à 1,50 m, arène.

Forêt de chênes-lièges totalement dégradée, peuplement de Pins d'Alep.

Croupes très aplaties, entaillées par des vallées peu profondes.

— un micropodzol à :

.. moder mince (1 cm).

.. A₂ discontinu, ne dépassant pas 2 cm.

.. Bh, épais de 3 à 5 cm, 2,5 Y 7/0 sec, gris clair; à graviers peu abondants de quartz subanguleux; texture sablo-limoneuse; structure particulière à tendance massive; poreux; très fragile; chevelu de racines fines; activité biologique faible; transition nette et régulière.

3 — 17 (20) cm, A₂ 7,5 YR 7/2 sec, gris rosé à très nombreuses taches, 10 YR 8/2, blanches, 10 mm, à limites peu nettes, peu contrastées; apparemment non organique; à graviers peu abondants de quartz subanguleux; texture sablo-limoneuse; structure particulière à tendance massive; poreux; très fragile; racines fines et moyennes; activité biologique faible; transition nette et assez régulière.

17 — 55 cm, B₂t_g, 10 R 3/6 sec, rouge foncé à taches rares au sommet, devenant de plus en plus nombreuses avec la profondeur, nombreuses à la base de l'horizon, 10 YR 6/6 brun-jaune, à limites peu nettes; texture argilo-sableuse; structure très nette, généralisée,

prismatique à sous-structure polyédrique grossière, agrégats sans pores visibles, très cohérents, non fragiles ; porosité entre les agrégats assez élevée, revêtements humo-argileux épais sur les faces des prismes, 2,5 YR 3/4, brun-rouge foncé ; le sommet des prismes est légèrement « arrondi » ; le matériel sablolimoneux pénètre sur quelques centimètres à la faveur de cet altération, mais très brièvement, il est relayé par des revêtements humo-argileux ; racines grosses, horizontales au sommet de l'horizon ; transition graduelle et régulière.

- 55 — vu jusqu'à 100 cm, B₂g, 7,5 YR 5/8, frais, brun-foncé, à taches 5 YR 5/6, rouge-jaune, à teintes peu nettes, à distribution aléatoire ; à graviers peu abondants de quartz ; texture sablo-argileuse ; structure massive à tendance prismatique grossière disparaissant en profondeur ; peu poreux ; la friabilité augmente avec la profondeur : de non friable au sommet, ou passe à friable à la base ; pas de racines.

Au-dessous, le profil a été observé à l'interfluve (à une dizaine de mètres du profil décrit ci-dessus).

- K₁ — Le sol prend de plus en plus un aspect arkosique, 10 YR 6/6 frais, jaune-brun, à texture sablo-argileuse, à structure massive, mais des fissures verticales persistent, on peut le considérer comme un C ; des revêtements argileux épais 2,5 YR 4/8, rouges, sont présents. Progressivement dans les fissures verticales apparaissent des éléments carbonatés friables, cette organisation peut atteindre 50 cm formant un K₂. Les revêtements argileux 2,5 YR 4/8, rouge deviennent plus nombreux. Puis après une transition brutale, on observe :
- K₂ — une croûte carbonatée lamellaire au sommet, peu fragile, avec des lits d'argile rouge-brun ; son épaisseur est d'environ 5 cm qui passe graduellement à,
- K₃ — une croûte carbonatée massive, fragile ; son épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres, qui à son tour se prolonge par des éléments carbonatés friables dans les fissures de l'arkose.

PROFIL SA 4 de la Selva/Urbanisation de « Terra Brava ».

Pente d'environ 15 %, en contrebas d'une ligne de crêtes. Même type de paysage et d'érosion qu'au profil SA 3. Arène granitique complexe. Même association végétale qu'au profil SA 3, mais plus dégradée, pins plus nombreux (*Pinus halepensis* et *Pinus pinea*).

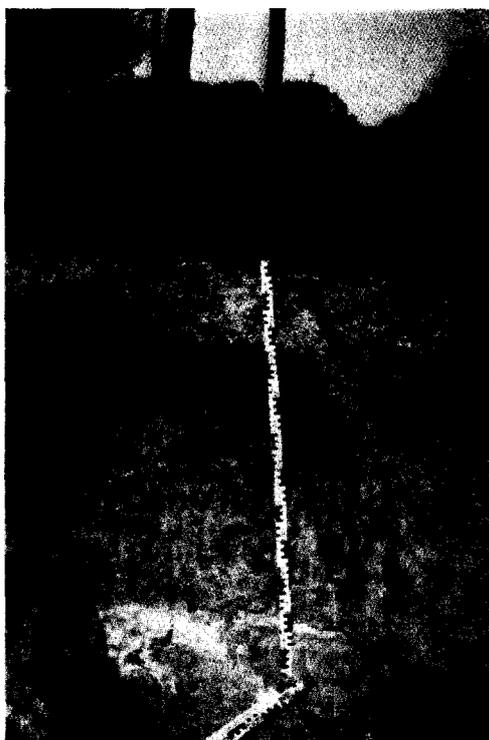
- 0 — 5 cm. A₁ ; 10 YR 5/4, sec, brun-jaune ; à matière organique non directement décelable ; texture limoneuse ; structure nette, généralisée, grumeleuse moyenne ; volume des vides important entre agrégats, très poreux ; très fragile ; nombreuses racines fines et moyennes ; activité biologique moyenne ; transition nette et régulière.
- 5 — 35 cm. A₂₂ ; 10 YR 6/4, sec, brun clair ; apparemment non organique ; texture sablo-limoneuse ; structure polyédrique subanguleuse, nette, généralisée, moyenne à grossière ; volume assez important entre agrégats ; poreux ; très fragile ; racines fines, moyennes et grosses ; activité biologique moyenne ; transition graduelle et régulière.

- 35 — 65 cm. A₂₃g ; 10 YR 7/4, sec, rosé à taches, 7,5 YR 5/6, rouge-jaune, à limites peu nettes, peu contrastées, à distribution aléatoire, apparemment non organique ; texture limono-sableuse ; structure massive ; aspect spongieux, poreux, fragile ; quelques racines moyennes et grosses ; activité biologique faible ; transition graduelle et régulière.
- 65 — 75 cm. BA ; 10 YR 7/4, sec, rosé à taches, 2,5 YR 4/8, rouges à auréole 10 YR 5/8, brun-jaune à distribution aléatoire, 0,5 cm-1 cm, à limites peu nettes, contrastées, plus cohérentes ; apparemment non organique ; texture limoneuse pour le fond, argilo-limoneuse pour les taches ; structure massive à tendance polyédrique fine ; peu poreux ; fragile pour l'ensemble, peu fragile pour les taches ; quelques racines fines, moyennes et grosses ; activité biologique très faible, transition graduelle et régulière.
- 75 — 95 cm. B₂t ; frais, sans couleur dominante ; le centre des agrégats est jusqu'à 10 R 4/8, rouge ; leur périphérie 10 YR 5/8, brun-jaune, à limites nettes, contrastées, est aussi cohérente ; le long des espaces entre agrégats, on observe une bande 10 YR 7/4, brun-très pâle, à limites nettes, contrastées, moins cohérente ; texture argilo-limoneuse pour les agrégats, limoneuse au niveau des espaces entre agrégats, structure polyédrique moyenne, peu nette, généralisée ; agrégats sans pores visibles ; porosité essentiellement inter-agrégats ; pas de revêtements ; agrégats peu friables, limons inter-agrégats très friables ; racines fines et moyennes dans les limons entre les agrégats ; transition graduelle.
- 95 — 135 cm. B₂g ; tacheté ; frais, 10 R 4/8, rouge au centre des unités structurales, 10 YR 6/8, jaune-brun à la périphérie, à limites nettes, contrastées, et 5 YR 6/1, gris entre les unités structurales à limites nettes, contrastées aussi cohérentes ; texture limono-argileuse ; structure massive à tendance polyédrique ; très peu poreux ; pas de revêtements ; peu friable ; quelques racines au centre du réseau gris, fines et moyennes ; transition distincte ; à noter que la texture du réseau gris est argileuse.

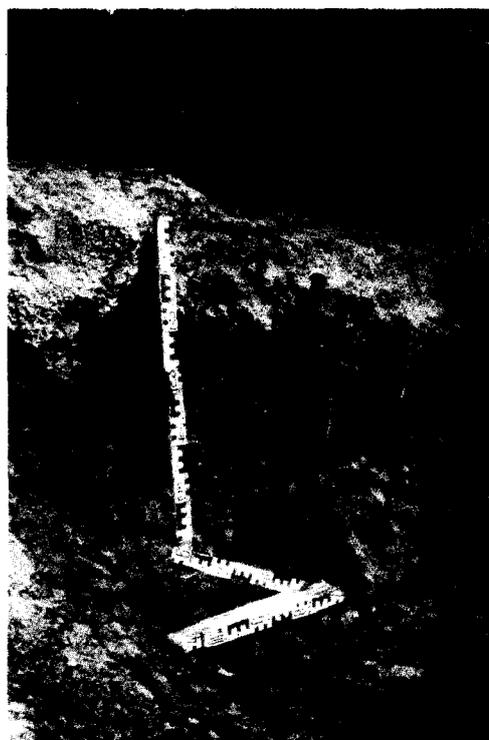
- 135 — 155 cm. II Cx (horizon fragile) ; frais, 2,5 Y 5/6, brun-olive clair à taches, 5 Y 6/1, gris clair à limites nettes, contrastées ; à graviers et quelques cailloux de feldspaths et de quartz ; texture sablo-limoneuse ; structure massive ; très peu poreux ; revêtements argileux, 7,5 YR 5/8 brun foncé, peu friable ; transition distincte.
- 155 — 200 cm. III Cg ; frais ; bariolé 5 Y 6/1, gris et 7,5 YR 5/6, brun foncé, à limites nettes, contrastées ; texture argilo-sableuse ; feldspaths dans la fraction sableuse ; structure massive ; très peu poreux ; non friable, légèrement cimenté ; transition graduelle.
- 200 — vu jusqu'à 300 cm. IV Cg ; frais ; 5 YR 4/6, rouge-jaune à taches, 2,5 Y 5/2 gris-brun, à limites peu nettes, contrastées ; éléments ferro-manganésifères en pellicules ; texture argilo-sableuse ; structure massive, très peu poreuse non friable.

PROFIL SA 3 de la Selva/Urbanisation de « Terra Brava ».

Pente d'environ 15 % ; en contrebas à quelques centaines



1



2



3



4

PLANCHE I

Photos 1 et 2. — Profils analogues à SA 1. — Caldas de Malavella. A la base de 1 : horizon carbonaté Cca.
Photo 3. — Profil SA 3 — La Selva.
Photo 4. — Profil SA 4 — La Selva.

de mètres d'une crête, sur une croupe entre 2 vallées secondaires. Toute la zone est soumise à une érosion puissante, nombreux ravinnements visibles, en particulier aux endroits où il a été procédé à des terrassements.

Granite de la Selva. Le granite à texture conservée apparaît au-dessous de 1 m.

Forêt de chênes-lièges (recouvrement de 20 %) moyennement dégradé, tendance à la lande (*Erica sp.*, *Ulex parviflorus*), présence de quelques pins d'Alep (essence introduite).

0 — 5 cm. A₁; 10 YR 5/4, sec, brun-jaune; à matière; organique non directement décelable; texture limoneuse; structure nette, généralisée, grumeleuse moyenne; volume des vides important entre agrégats; très poreux; très fragile; nombreuses racines fines et moyennes; activité biologique moyenne; transition nette et régulière.

5 — 14 cm. A₂; 10 YR 7/5 sec, jaune à brun très pâle. apparemment non organique; texture limoneuse; structure peu nette, généralisée, polyédrique fine à tendance massive; volume assez important entre agrégats, poreux; très fragile; racines moyennes, fines et grosses; activité biologique moyenne à faible; transition distincte et régulière.

14 — 25 cm. BA; 5 YR 6/8 sec, jaune-rouge, à très nombreuses taches 10 YR 7/6 jaunes, à distribution aléatoire, irrégulières, à limites peu nettes, contrastées, moins cohérentes; texture limono-argileuse et taches limoneuses à sables quartzo-feldspathiques; structure à tendance massive se résolvant en une structure polyédrique subanguleuse moyenne; peu poreux; pas de revêtements; peu fragile pour la texture limono-argileuse, très fragile pour les taches limoneuses; nombreuses racines moyennes et grosses; activité biologique faible; transition graduelle régulière.

25 — 65 cm. B_{2t}; 2,5 YR 4/6, frais, rouge, à taches 10 YR 7/6 jaunes, liées aux faces des unités structurales, en bandes orthogonales à limites nettes, contrastées, moins cohérentes; enduits pelliculaires ferro-manganesifères sur les faces des éléments structuraux; très peu de graviers; texture limono-argileuse, limoneuse dans les taches; structure nette, polyédrique grossière; volume des vides assez important entre agrégats, poreux; revêtements probables, argileux, rouges et minces sur les éléments structuraux, mais difficiles à distinguer de faces de glissement; peu fragile; racines grosses et moyennes en décroissance avec la profondeur; activité biologique très faible; transition graduelle.

65 — 85 cm. B₃; 2,5 YR 5/8, frais, rouge, à taches 10 YR 7/6 jaunes, liées aux fissures orthogonales, à limites nettes, contrastées, moins cohérentes; quelques enduits ferro-manganesifères; texture sablo-limoneuse à sableuse dans les taches; structure massive à tendance prismatique grossière; poreux surtout dans le réseau de fissures orthogonales; revêtements argileux rouges et minces probables; fragiles; transition distincte.

85 — 135 cm. C_{2g}; 5 Y 8/4, frais, jaune pâle, à taches, 10 YR 6/8, jaune-brun, liées à l'intérieur des éléments structuraux, à limites peu nettes contrastées et à taches 10 YR 7/6 jaunes, liées aux fissures, surtout verticales, à limites nettes, très contrastées, moins cohérentes;

texture sablo-argileuse et sableuse dans les taches jaunes; structure prismatique grossière, très peu poreuse, sauf entre les prismes et surtout les fissures à remblaiement sableux; peu fragile; transition distincte; horizon discontinu sous forme de lentilles argileuses, quelquefois au contact du B₃, mais souvent incluses dans le C_{2g}.

135 — 150 cm. C_{2g}; la texture du granite est conservée, à réseau dense de diaclases orthogonales, 5 Y 8/4, frais, jaune pâle; les minéraux sont revêtus d'argiles ferrugineuses, 7,5 YR 6/8, jaune-rouge; les feldspaths sont blanchis, poudreux, les biotites sont encore reconnaissables; transition diffuse.

250. C₃; le réseau des diaclases, 5 Y 8/4, jaune pâle disparaît progressivement, ainsi que les revêtements argileux 7,5 YR 6/8, jaune-rouge; le blanchiment des feldspaths diminue lui aussi progressivement tandis que la roche devient de plus en plus cohérente.

3.2. Commentaires sur la morphologie

L'examen de ces trois profils permet un certain nombre d'observations particulières :

SA 1. Au sommet du profil SA 1, s'est développé un micropodzol caractérisé par un A 2 discontinu de 2 cm et un Bh de 3 à 5 cm. Au dessous du A₂ du sol sous-jacent, on note une différenciation marquée par une individualisation nette d'oxydes de fer (couleurs rouge foncé à brun-rouge foncé) et une accumulation d'argile identifiable par une augmentation de la teneur en argile et par des revêtements humo-argileux. Le contact entre A₂ et B est très brutal.

À la base du profil, on note un encroûtement carbonaté massif, mais fragile, pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur.

Dans ce profil, on peut donc identifier ferruginisation et accumulation d'argile. En outre, le sommet est marqué par une micropodzolisation, tandis que la base est le siège d'une accumulation de carbonate de calcium.

SA 3. Ce profil montre les caractéristiques suivantes :

— le développement d'une couleur brun-rouge associée à des taches et marbrures;

— une augmentation nette de la teneur en argile associée à des revêtements argileux sur les éléments structuraux;

— des taches et revêtements limoneux dans le B_{2t};

— le passage graduel à une arène granitique brune où la structure du granite est conservée.

Dans ce profil, on note donc : ferruginisation, accumulation d'argile, hydromorphie.

SA 4. Ce profil montre un certain nombre des caractéristiques précédentes : ferruginisation, accumulation d'argile, hydromorphie. Mais, à la partie inférieure du profil, on observe :

Photo 1. — Altération de la biotite dans l'arène en place (profil SA 3, horizon C_{2g}). Les feuillets sont partiellement ferruginisés et tendent à s'ouvrir. Lumière naturelle.

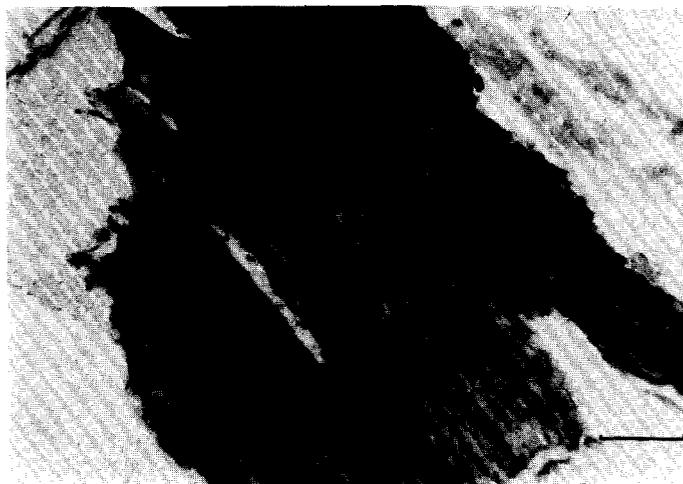


Photo 2. — Maximum d'altération de la biotite observable sur un minéral entier (profil SA 3, horizon B₄). Le minéral est fortement ferruginisé. Les feuillets sont séparés et surtout apparaissent corrodés. Entre les paquets de feuillets, on observe des argilanes, foncés, poussiéreux (partie gauche de la photo) et des argilanes, clairs (partie droite de la photo). Lumière naturelle.

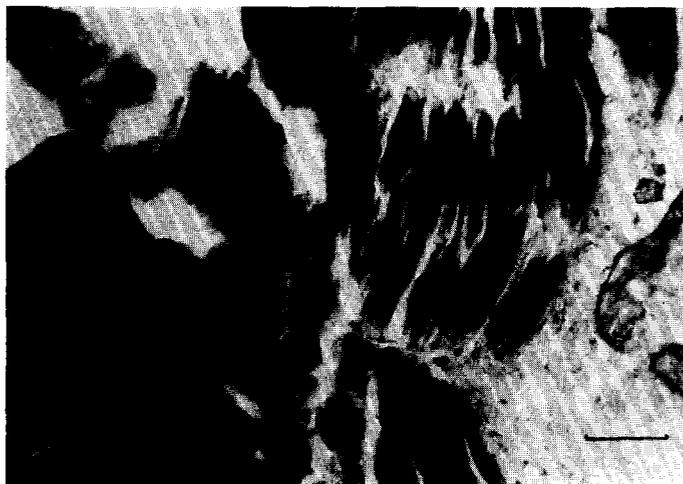


Photo 3. — Altération des plagioclases dans l'arène en place (profil SA 3, horizon C_{2q}). Le plagioclase du haut est pratiquement intact tandis que celui du bas est totalement altéré, en partie en séricite et en partie en voile microcristallin. Lumière polarisée. Le trait correspond à 100µm.

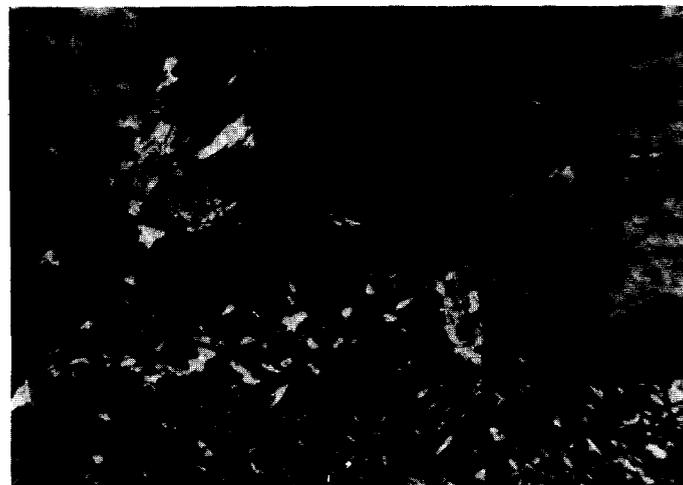


PLANCHE II. — *Altération des minéraux primaires*

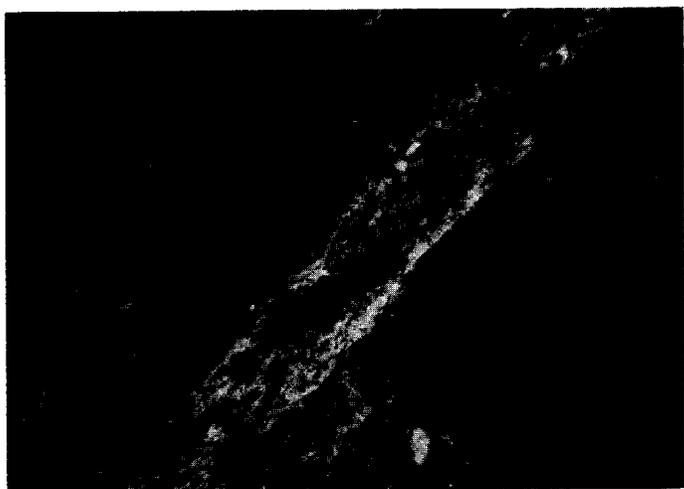


Photo 1. -- Horizon A_2 du profil SA 1. Noter l'orthose et le quartz nettement cariés surtout le premier. Le fond matriciel est constitué uniquement de sables et de limons. Au centre, en foncé, on observe un fragment de l'horizon B_{2t} . Lumière naturelle.



Photo 2. — Base de l'horizon B_{2t} du profil SA 1. En haut, plage ferrugineuse, légèrement fragmentée. A l'extérieur un fond matriciel grisâtre à intercalations argileuses claires. Lumière naturelle.

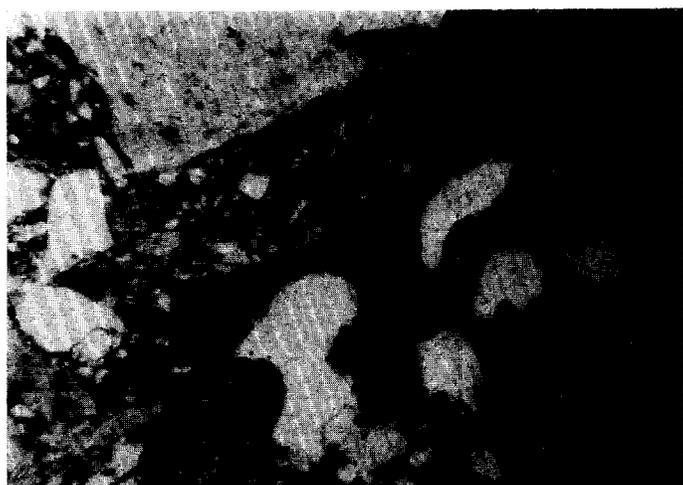


Photo 3. — Zone de circulation phréatique à la base du profil SA 3. Comblement d'une fissure par des argiles fortement biréfringente. lumière polarisée.

PLANCHE III

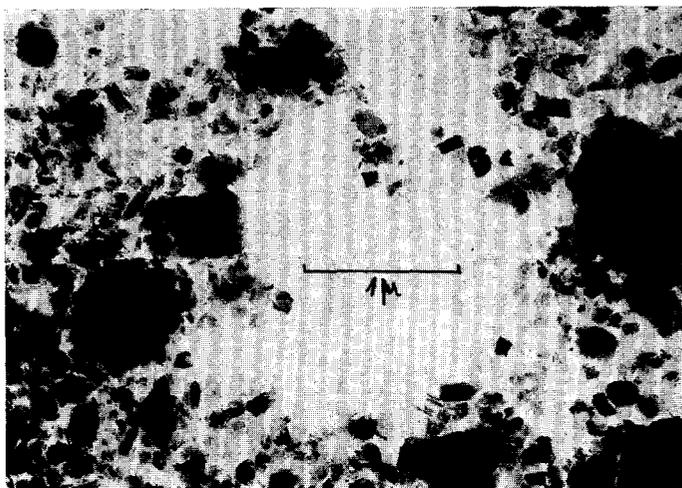


Photo 1. — Grossissement 10.000 Horizon A. Micro-kaolinites et microtubes de métalloysites, rares formes pseudo-hexagonales ; quelques micas altérés ; quelques argiles 2:1 de transformation (dérivant de mica).

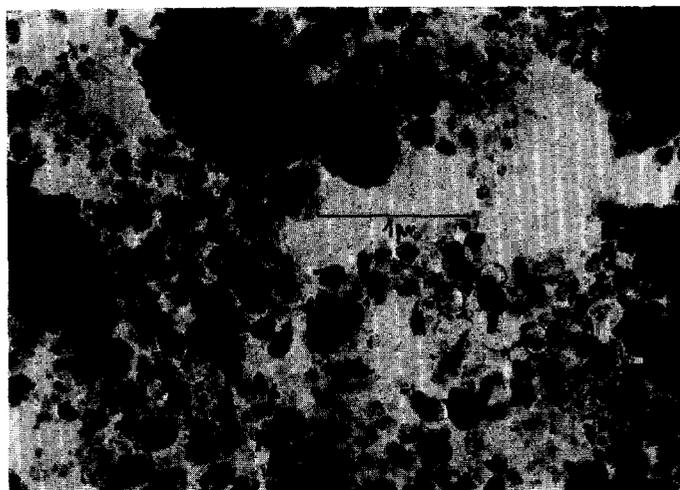


Photo 2. — Grossissement 10.000 Horizon Bt ; analogue à 2 mais quelques tubes et glomérules nets.

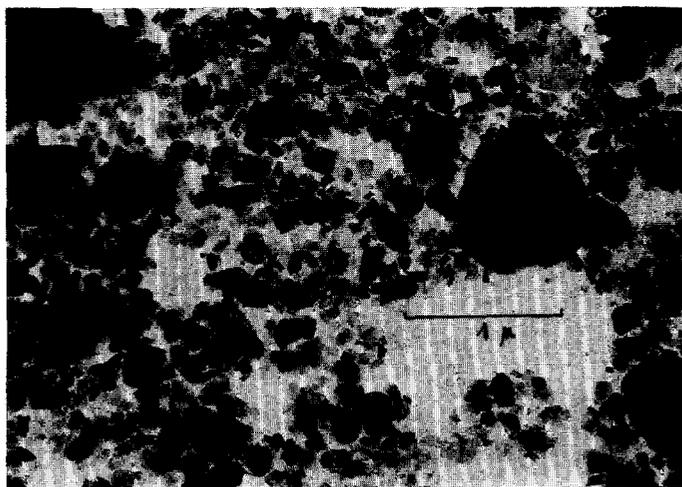


Photo 3. — Grossissement 10.000 Horizon C ; analogue à 1 et 2 mais tubes plus abondants et micas moins altérés.

PLANCHE IV

— plusieurs discontinuités dans le matériau original, ce qui indique des mouvements de masse sur le versant;

— le développement d'un horizon fragique au sommet d'une de ces discontinuités.

Si le profil SA 3 apparaît le siège d'un développement pédologique continu, il n'en est pas de même dans les profils SA 1 et SA 4, qui montrent des signes de remaniement et de complexité.

4. LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

Ces caractéristiques ont été rassemblées dans les

tableaux III, IV, V qui appellent les commentaires suivants :

— *Granulométrie.* Dans tous les profils, on note un accroissement notable des teneurs en argile entre 50 et 100 centimètres. On passe de 10 % environ à 25-50 %. Au dessous de 100 cm, les teneurs sont irrégulières. L'augmentation est généralement assez graduelle; au contraire, dans le profil SA 1, elle est très brutale confirmant le caractère planique observé sur le terrain.

Les teneurs en limon paraissent varier assez peu.

Les fractions « sables très fins » et « sables fins » sont assez semblables d'un horizon à l'autre; tandis

TABLEAU III. — Analyse mécanique (les résultats sont exprimés en %). Profil SA 1 — Caldas de Malavella. Profil SA 3 — La Selva Terra Brava. Profil SA 4 — La Selva Terra Brava

Profil SA1 - CALDAS DE MALAVELLA

Profondeur	Horizon	Humidité	Argile < 2 μ	Limon 2-20	S T F 20-50	S F 50-200	S G 200-2000	CO ₃ Ca
0-3	A ₀	1,4	8	10	15	20	43	
3-15	A ₂	0,5	6	10	18	23	43	
15-20	A ₂ -B	3,35	45	11	11	9	24	
40	B ₂	5,95	48	10	10	8	24	
80	B ₃	3,0	36	12	9	9	34	
	K ₁	2,25	17	12	6	24	41	8,1
	K ₂	3,35	25	18	8	16	33	27,5
	K ₃	3,0	21	11	7	19	42	21,2

Profil SA3 - LA SELVA TERRA BRAVA

Surface		1,2	11	18	18	12	35	
0-10	A ₁	1,0	11	19	20	14	33	
25-34	B ₂ t	1,0	19	21	19	12	29	
52-62	B ₃	1,0	31	17	14	10	28	
77-87	B ₃	1,0	20	17	13	12	38	
100-110	C ₁ g	1,0	28	13	9	11	39	
112-122	C ₂ g	1,0	29	9	5	10	47	
128-138	C ₃ g	1,0	34	11	7	16	32	
200-210		1,0	8	4	3	10	75	
Argile grise			34	19	17	8	22	

Profil SA4 - LA SELVA TERRA BRAVA

0-3	A ₀		12	17	20	13	31	
3-12	A ₁₁		10	16	20	13	39	
12-38	A ₁₂		17	17	18	11	36	
38-64	A ₂ g		16	23	23	10	28	
64-82	B ₁ g		26	24	22	9	19	
90-95	B ₂ t		30	18	14	8	30	
100-110	B ₃ g		39	19	15	8	19	
135-155	IICx		28	15	12	8	37	
180	IIICg		20	25	11	9	45	
250	IVCg		28	17	17	10	28	

que les fractions « sables grossiers » diminuent très nettement de A vers B pour augmenter ensuite. Dans les trois profils les variations de la granulométrie, hormis le limon, montrent :

- dans le haut du profil, un lessivage de l'argile surtout, et moindrement du limon;
- dans la partie médiane, une illuviation d'argile;
- de l'arène vers l'horizon B, un accroissement de l'altération et de l'argilification.

— *Matière organique.* L'horizon de surface contient entre 3 et 5 % de carbone, soit 5 à 8 % de matière organique. L'azote est, en surface, compris entre 1 et 2 %. Le rapport C/N est généralement

élevé dans les 30 premiers centimètres, avec des valeurs supérieures à 30. Bien qu'on ne puisse parler d'accumulation de matière organique en différents points de la profondeur des profils, on constate diverses irrégularités de sa distribution, en particulier dans SA 1 et SA 3. Ces irrégularités sont accompagnées d'une augmentation du rapport C/N.

Il existe en surface, pour les trois profils, une matière organique mal décomposée à C/N compris entre 20 et 40; ce qui est conforme aux observations de terrain où l'on note un blanchiment très net des horizons A₂ et même un micropodzol au sommet du profil SA 1.

TABLEAU IV. — Complexe absorbant (de Ca à T. mè/100 g V en %). Profil SA 1 — Caldas de Malavella. Profil SA 3 — la Selva Terra Brava. Profil SA 4 — la Selva Terra Brava

PROFIL SA1 - CALDAS DE MALAVELLA

Profondeur	Horizon	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	S	T	Vg
0-3	A ₁	6,75	1,3	0,30	0,1	0,02	8,45	13,0	65
3-15	A ₂	3,0	0,5	0,10	0,15	0,02	3,75	4,7	80
15-20	A ₂ -B	10,15	3,25	0,20	0,25	0,04	13,85	18,4	75
40	B ₂	13,50	3,80	0,20	0,65	0	18,15	23,9	76
80	B ₃	13,20	3,05	0,25	1,05	0	17,55	21,7	81
	K ₁	11,95	2,65	0,15	0,55	-	15,30	15,3	Sat.
	K ₂	18,1	3,5	0,15	0,55	0	22,30	22,3	Sat.
	K ₃	-	-	-	-	0	-	-	Sat.

PROFIL SA3 - LA SELVA TERRA BRAVA

Surface		10,9	1,25	0,35	0,15	0	12,65	15,15	83
0-10	A ₁	7,25	0,90	0,2	0,10	tr	8,45	10,75	77
25-34	B ₂ t	4,55	1,25	0,45	0,1	0,05	6,30	9,20	68
52-62	B ₃	7,0	3,2	0,55	0,15	0	10,90	15,15	72
77-87	B ₃	8,95	2,5	0,25	0,15	0,05	11,85	15,30	78
100-110	C ₁ g	5,85	3,0	0,20	0,15	0,38	9,20	17,0	54
112-122	C ₂ g	7,10	3,95	0,15	0,35	0,52	11,55	22,45	51
128-138	C ₃ g	10,05	5,30	0,15	0,35	0,66	16,05	30,5	53
200-210		8,2	1,45	0,05	0,30	0,04	10,05	10,75	93
Argile grise		9,6	3,90	0,15	2,35	0,12	16,05	21,65	74

PROFIL SA4 - LA SELVA TERRA BRAVA

0-3	A ₀	11,0	2,1	0,3	0,15	0,02	13,55	18,35	74
3-12	A ₁ l	4,45	0,9	0,15	0,10	0,04	5,6	9,1	61
12-38	A ₁ 2	4,6	1,5	0,2	0,15	0,03	6,45	9,75	68
38-64	A ₂ g	2,95	1,2	0,15	0,15	0,08	4,45	8,0	55
64-82	B ₁ g	4,3	2,2	0,15	0,15	0,15	6,80	12,4	55
90-95	B ₂ t	4,8	2,7	0,15	0,55	0,34	8,2	16,3	50
100-110	B ₃ g	4,35	2,9	0,15	0,55	0,42	7,9	18,7	42
135-155	IIICx	3,6	2,05	0,10	0,50	0,37	6,25	13,35	47
180	IIICg	4,4	1,9	0,10	0,65	0,20	7,05	12,05	58
250	IVCg	10,25	3,75	0,15	3,45	tr	17,6	19,5	90
		14,65	2,75	0,15	3,40	-	20,95	21,95	95

TABLEAU V. — Matière organique, pH et oxydes de fer. Profil SA 1 — Caldas de Malavella. Profil SA 3 — la Selva Terra Brava. Profil SA 4 — la Selva Terra Brava

PROFIL SA1 - CALDAS DE MALAVELLA

Profondeur	Horizon	C %	MO %	N %	C/N	pH-H ₂ O	pH-KCl	ΔpH	Fe ₂ O ₃		L/T	Fe ₂ O ₃ L Argile
									Libre %	Total %		
0-3	A ₀	33,45	57,6	1,1	29,8	5,0	4,5	-0,5	3,85		68	4,8
3-15	A ₂	6,45	11,1	0,2	32,0	5,55	5,0	-0,55	tr	2,4	-	-
15-20	A ₂ -B	6,6	11,4	0,3	20,0	5,45	4,2	-1,25	22,25	48,5	46	4,9
40	B ₂	4,3	7,4	0,60	7,3	5,6	4,5	-1,1	17,0	53,15	32	3,5
80	B ₃	2,8	4,8	0,52	5,4	6,55	5,15	-1,4	16,5	37,95	44	4,6
	K ₁	2,2	3,8	0,40	5,6	8,35	7,1	-1,25	10,95	34,4	32	6,4
	K ₂	4,0	6,9	0,32	12,4	8,0	7,0	-1,0	15,10	45,6	33	6,0
	K ₃	2,5	4,3	0,27	9,2	8,0	7,0	-1,0	10,3	38,8	27	4,7

PROFIL SA3 - LA SELVA TERRA BRAVA

Surface		33,75	58,15	1,4	23,7	6,5	5,85	-0,65	6,85	13,8	50	6,2
0-10	A ₁	17,7	30,5	1,0	17,5	6,2	5,35	-0,85	7,7	15,35	50	7,0
25-34	B _{2t}	6,85	11,8	0,6	11,6	5,6	4,3	-1,3	11,45	25,2	45	6,0
52-62	B ₃	5,70	9,8	0,6	9,7	5,6	4,45	-1,15	17,6	32,3	59,5	5,7
77-87	B ₃	3,0	5,2	0,3	9,4	5,5	4,15	-1,35	11,15	22,85	49	5,6
100-110	C _{1g}	3,0	5,2	0,4	7,7	5,0	3,65	-1,35	15,3	33,9	45	5,5
112-122	C _{2g}	3,0	5,2	0,4	7,7	5,0	3,4	-1,6	11,15	41,75	27	3,8
128-138	C _{3g}	3,25	5,6	0,3	10,0	4,9	3,35	-1,55	7,3	25,2	29	2,1
200-210		1,7	2,9	0,3	5,4	5,6	3,6	-2,0	5,0	23,65	21	6,2
Argile grise		1,55	2,6	0,3	4,8	5,5	3,55	-1,95	18,45	45,70	40	5,4

PROFIL SA4 - LA SELVA TERRA BRAVA

0-3	A ₀	45,7	77,9	1,9	23,8	5,95	5,25	-0,7	14,15	16,55	85,5	11,8
3-12	A ₁₁	15,85	27,3	0,55	28,7	5,2	4,45	-0,75	6,15	15,0	41,0	6,1
12-38	A ₁₂	5,6	9,5	0,15	39,3	5,4	4,30	-1,1	10,3	21,3	48	6,05
38-64	A _{2g}	4,55	7,8	0,52	8,7	5,3	4,0	-1,3	9,15	21,3	46	5,7
64-82	B _{1g}	4,05	7,0	0,4	10,3	5,1	3,9	-1,2	15,3	34,65	44	5,9
90-95	B _{2t}	3,40	5,9	0,66	5,1	5,1	3,4	-1,7	16,9	36,25	47	5,6
100-110	B _{3g}	3,7	6,4	0,52	7,1	5,0	3,55	-1,45	20,0	43,35	46	5,1
135-155	IICx	3,25	5,6	0,39	8,3	5,1	3,45	-1,65	14,5	32,3	45	5,2
180	IICg	2,65	4,6	0,39	6,8	5,2	3,35	-1,85	13,45	25,2	53,7	6,7
250	IICg	2,5	4,3	0,39	6,4	7,05	5,15	-1,9	9,15	17,35	52,7	3,2
						7,85	7,2	-0,65	14,05	51,2	27,4	5,8

— Le pH à l'eau est toujours acide à la partie supérieure des profils (et compris entre 5,0 et 6,5). Mais, à la base du profil SA 1 qui contient du carbonate de calcium, on voit le pH s'élever jusqu'à 8,0.

— Le pH au KCl est nettement plus faible; tandis que le ΔpH est toujours fortement négatif. Ce ΔpH est de l'ordre d'une demi-unité en surface mais de 1 ou 2 unités en profondeur, ce qui correspond à des argiles à forte capacité d'échange de cations, ainsi qu'il apparaît au tableau IV.

L'aluminium échangeable ne dépasse jamais 0,5 mé; il est vrai que le pH ne descend jamais au-dessous de 5,0.

— Le complexe absorbant présente quelques particularités. La capacité d'échange cationique est comprise entre 13 et 18 mé/100 g en surface; elle décroît vers 4-10 mé/100 g entre 10 et 30 cm pour remonter à 15-30 mé/100 g dans l'horizon d'accumulation. La capacité d'échange cationique, rapportée à 100 g d'argile, est comprise entre 40 et 80 mé/100 g. Cette valeur élevée indique l'abondance de minéraux à forte capacité d'échange dont les argiles 2/1 de type smectite, vermiculite et des argiles 1/1 de type halloysite, mais avec prédominance des minéraux argileux 2/1.

Les bases échangeables sont dominées par le calcium,

relativement abondant dans les horizons humifères (6 à 11 mé/100 g). En profondeur, les teneurs de l'horizon B sont de 8 à 13 mé. Le magnésium présente une répartition assez analogue, mais avec des teneurs nettement inférieures : 1 à 5 mé/100 g. Le potassium présente des teneurs de 0,3 à 0,5 mé/100 g; elles décroissent d'abord pour augmenter ensuite dans l'horizon B. Cet accroissement va sans doute de pair avec celui des argiles/micacées. Le sodium échangeable est faible en surface, mais augmente très fortement en profondeur (2 à 3 mé/100 g dans l'altérite). Cette teneur élevée peut être attribuée à l'altération des plagioclases; on peut envisager également du sodium lixivié à partir de la surface (la mer n'est pas loin et le climat présente une certaine aridité saisonnière). Ceci est souvent observé dans certains sols du Sud de la France. Les teneurs en aluminium échangeable sont toujours inférieures à 0,5 mé/100 g. Les proportions de l'aluminium sur le complexe, calculées à l'aide du rapport $\frac{Al}{Al + S} \times 100$, de Kamprath sont toujours inférieures à 5, ce qui exclut toute éventualité de toxicité aluminique.

Le degré de saturation est presque toujours supérieur à 50 %. Dans SA 3 et SA 4, il décroît nettement de la surface vers l'horizon B (de 70-80 % à 45-50 %), tandis que dans SA 1, il reste à peu près constant. Le degré de saturation élevé des horizons humifères peut être attribué à une remontée biologique, ou bien à la proximité de la mer, ou bien encore à une calcification ancienne des sols de la région, dont témoignent d'ailleurs de nombreux sols situés entre la zone étudiée et la mer.

5. LES CARACTÉRISTIQUES MINÉRALOGIQUES

Les minéraux primaires comportent du quartz, des orthoclases, des plagioclases (où domine l'oligoclase), des biotites; parmi les minéraux argileux, on a observé des smectites, des vermiculites (alumineuses), des interstratifiés IM ou IM-IV souvent difficiles à identifier avec précision, des illites (mica), des illites ouvertes. Les minéraux kaoliniques sont également présents sous forme de méthalloisite, ou de kaolinite désordonnée. La goethite n'a été identifiée que dans un petit nombre d'échantillons en raison de teneurs assez faibles. La calcite est présente à la base du profil SA 1.

5.1. Les minéraux primaires et leur altération (tabl. VI, VII et VIII)

5.1.1. COMPOSITION

Les minéraux primaires ont été examinés dans les trois profils, qui contiennent tous en abondance du quartz, mais aussi des feldspaths, des orthoclases et des plagioclases (très probablement de l'oligoclase); des biotites sont également identifiables dans les trois profils. A propos de la répartition des minéraux dans les différents profils on peut faire les observations suivantes :

Profil SA 1. Le quartz représente près de 40 % du sol dans l'horizon A₂; la quantité diminue progressivement vers la base du profil. La quantité de feldspaths varie moins; elle diminue légèrement en B et augmente légèrement en K₁.

TABLEAU VI. — Altération des minéraux primaires. Profil SA 1 — Caldas de Malavella

	QUARTZ			ORTHOCLASES			PLAGIOCLASES			BIOTITES			
	A	F	C	A	F	C	A	F	Alt.	A	F	Alt.	
A ₂ 3-17cm	50%	4	1	30%	4	3	ε	4	0-1	ε	5	2	
Sommet 15-30cm B ₂	10%	4	ε	20%	3	3	"	"	0-1	"	" (a)	4	
Base de 45-55 B ₂	"	3	"	20%	"	2	99%	"	4	"	"	"	
B ₃ 60-70cm	5-10%	2	"	15-20%	2	1	5%	"	3-4	"	"	"	
K ₃	n.c.	10%	0	"	25%	0	1	40%	1-2	3	10%	2	2-3
	e.en c.	15%	"	"	15%	"	"	5%	(b) "	3	99%	"	"
K ₂	p.n.c.	10%	0	"	20%	"	1	99%	1-2	"	"	"	"
	e.e.c.	1%	4	"	ε	2-3	"	ε	(c) 4	"	1%	4	(d) 1-2
K ₁	n.c.	15%	0	"	25%	0	"	35%	1	"	10%	2	"
	e.e.c.	1%	0	"	1%	1	"	ε	1	1	ε	(e) 2-4	1

A=abondance, F=fragmentation, C=corrosion, Alt.=altération, n.c.=non calcaire, e.en c.=enrichi en calcaire, p.n.c.=plages non calcaires, (a) quelques micas blancs très fragmentés, (b) très imprégné par carbonates, (c) très imprégné par carbonates, (d) kaolinite entre les feuillets, (e) fragmentation variable, (ε) très faible.

TABLEAU VII. — Altération des minéraux primaires. Profil SA 3 — Terra Brava

	QUARTZ			ORTHOCLASES			PLAGIOCLASES			BIOTITES		
	A	F	C	A	F	C	A	F	Alt.	A	F	Alt.
A ₂ 5-10cm	15-20%	3 (a)	1-2	10-15%	4	2-3 (b)	ε	5	2-3	0 (c)	-	-
BA 25-34	"	"	1	"	"	"	"	"	3-4	0 (c)	-	-
B _{2t} 52-62	15%	"	ε	15%	"	2-3 (d)	"	"	"(e)	ε	5	3-4
B ₃ 77-87	"	"	"	20%	3	2 (f)	99%	"	3-4	"	"	"
C _{1g} 100-110	20%	2	"	"	2	1	"	"	3	"	"	"
C _{1g} 112-122	25%	1	"	30%	1	"	20%	2	2-3	99%	3	3
C _{2q} 128-138 transition	30%	"	"	30%	"	ε	99%	3	"	ε	5	"
C _{2q} 200-210	35%	1	"	"	"	"	25%	2	2	5%	1	2
(g)	"	(h)	"	"	"	"	"	1	1-2	"	"	1
(i)	"	ε	"	"	0	"	"	ε	1	"	0	"

A=abondance, F=fragmentation, C=corrosion, Alt.=altération ; (a) fragments anguleux, (b) variable, (c) quelques micas blancs très fragmentés, (d) imprégnation des fissures par les oxydes de fer, (e) avec imprégnation ferrugineuse, (f) aspect fibreux net, (g) zone diaclasée à illuviations grossière, (h) fissuration et fragmentation suivant une direction, (i) arène à architecture conservée, (ε) très faible.

TABLEAU VIII. — Minéraux primaires. Profil SA 4 — Terra Brava

	QUARTZ			ORTHOCLASES			PLAGIOCLASES			BIOTITES		
	A	F	C	A	F	C	A	F	Alt.	A	F	Alt.
A ₂₂ 35-45cm	15-20%	4	1	10-15%	4	2	1-2%	5	2-4		5	2-4
A _{23B} 55-65	15%	"	1	10%	3	2 (a)	"	4-5	" (a)	"	"	"
B ₂ 85-95	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
B _{3g} 100-110	"	3	"	"	"	"	ε	3	4	0	-	-
IICx 135-145	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
IIICg 175-185 (b)	"	2	0	7-10%	2	1-2	7-10%	2	1-3	3-4%	2	1-3
Matrice	dominant	5	-	impossible à distinguer du quartz			1-2%	5	3 (c)	1-2%	5	1-3 (c)
IVCg 220-230 (b)	15-20%	ε	0	7-10%	1	1-2	7-10%	1	1-3	2-3%	2	1-3
Matrice	dominant	5	-	impossible à distinguer du quartz			1-2%	5	3 (c)	1-2%	5	"
IVCg 290-300 (b)	20%	ε	0	15%	1	2-3	15%	1	1-3	2%	2	3
Matrice	dominant	4	-	impossible à distinguer du quartz			1-2%	5	3 (c)	1-2%	5	1-3 (c)

A=abondance, F=fragmentation, C=corrosion, Alt.=altération, (a) ferrugineux, (b) squelette grossier, (c) variable ε=très faible

Dans le *profil SA 3*, les minéraux primaires diminuent progressivement, de 80 % au sommet jusqu'à 60-70 % à la base du profil. Le quartz et l'orthoclase diminuent faiblement, tandis que le plagioclase augmente légèrement dans l'horizon C. Il est intéressant de noter une discontinuité brusque entre les horizons C_{1g} et C_{2g}, marquée par une forte diminution du quartz. Dans la veinule argileuse, l'orthose disparaît totalement au profil du plagioclase et corrélativement de la séricite.

Dans le *profil SA 4*, on observe une diminution brusque du quartz au passage de A à B₁; puis il varie peu ensuite. La teneur en orthose décroît fortement de A₂ à B_{1t} puis varie peu. Le plagioclase augmente sensiblement vers la profondeur et devient prédominant, surtout dans l'horizon C_{1xg} situé à la base du profil; au-dessous de cet horizon on note une nouvelle discontinuité minéralogique.

5.1.2. L'ALTÉRATION DES MINÉRAUX a été appréciée par microscopie optique (micro-morphologie). Les observations ont été rassemblées dans les tableaux VI, VII, VIII. On peut faire les commentaires suivants :

— Altération du quartz

Dans l'arène non remaniée, le quartz, comme les autres minéraux, est traversé par des fissures droites. La corrosion est nulle dans l'arène, très faible dans les horizons C, encore peu marquée dans les horizons B. Elle ne se développe vraiment que dans l'horizon A de SA 1. Elle se présente alors sous forme de cavités irrégulières taraudant l'ensemble du minéral; localement, ces cavités sont colmatées par des produits ferrugineux. Deux stades de corrosion ont été distingués : 1) quelques cavités, 2) de nombreuses cavités.

— Altération des orthoclases

Les orthoclases sont déjà légèrement altérées, tout à fait à la base de l'arène du profil SA 3. Elles sont parsemées, en lumière polarisée, de taches diffuses et brunâtres qui correspondent à des pertes de biréfringence. Puis, ces minéraux présentent les caractéristiques suivantes :

— une couleur brunâtre continue, mais peu marquée accompagnée d'une légère biréfringence (gris clair);

— une corrosion progressive par l'apparition d'un réseau légèrement entrecroisé de fissures, d'abord très fines, mais devenant de plus en plus denses et larges;

— un remplissage progressif des fissures par des produits ferrugineux brun foncé. On n'observe jamais de produits de néogenèse à l'intérieur du feldspath, mais seulement dans les fissures.

Les trois premiers stades de l'altération ont été

reconnus. Le *stade (1)* correspond au début de la corrosion; le *stade (2)* à une fissuration importante; le *stade (3)* correspond à une fissuration importante, mais où les fissures sont remplies de produits ferrugineux. On constate, dans un même horizon, la coexistence de divers stades d'altération des orthoclases (comme pour les plagioclases et les micas). Le *stade (3)* s'observe en abondance dans les horizons B et A.

— Altération de plagioclases

Cette altération est déjà très poussée, car même tout à fait à la base de l'arène du profil SA 3, il n'existe pas de plagioclase sain ou quasi-sain. Trois stades d'altération ont été reconnus.

Le *stade (1)*, le plus faible, se reconnaît à de petites cavités se prolongeant par des fissures sinueuses peu nombreuses et quelques fissures droites (revêtues d'argile) communes à l'ensemble de l'arène. Les séricites sont abondantes.

Les *stades (2 et 3)* sont caractérisés par un développement plus important des cavités et des fissures sinueuses; le minéral se transforme et devient entièrement nébuleux (voile microcristallin).

Le *stade (4)* correspond à une disparition presque complète du minéral primitif, dont on ne peut voir que quelques restes; l'aspect moiré, dû aux séricites, tend à s'atténuer, et l'on observe une perte de biréfringence, tandis qu'apparaissent des remplissages argileux à biréfringence grise et tachetée. Ce stade est généralement associé au précédent.

— Altération de biotites

La biotite typique, comme celle observée à la base de SA 3, présente d'assez nombreuses inclusions.

L'altération débute par le *stade (1)* où l'on note : une tendance à l'exfoliation, une perte partielle du pléochroïsme, une ferruginisation faible à moyenne surtout localisée à la bordure des feuillets; l'apparition d'intercalations d'argile entre certains feuillets exfoliés, polarisant dans les gris, avec rarement un voile microcristallin. On pense que cette argile est de type kaolinitique. Ce stade a été observé dans les trois profils.

L'altération se poursuit au *stade (2)* par : une accentuation de l'exfoliation, de la ferruginisation qui envahit l'ensemble du minéral, en masquant fortement le pléochroïsme et la biréfringence dans un même minéral (du centre vers les bords), enfin une absence d'augmentation des intercalations entre les feuillets. Ce stade succède au précédent mais souvent coexiste avec lui.

Le *stade* suivant (*3*) permet de constater une accentuation de l'exfoliation, un sectionnement des feuillets et un début de rétraction, puis une augmentation de la ferruginisation, tandis que les teintes de

polarisation restent sensiblement les mêmes que dans le stade précédent. Ce stade coexiste avec le précédent dans les trois horizons principaux des trois profils. Dans aucun d'entre eux on n'a constaté d'altération plus avancée que la biotite.

On peut résumer tout ceci en disant que dans les trois exemples, le profil d'altération est tronqué. En effet, l'architecture du granite ou de l'arkose est détruite à un moment où l'altération des minéraux primaires est encore peu développée. Mais dans le cas des plagioclases, les minéraux finissent par disparaître vers le haut du profil. Ce n'est pas le cas des orthoclases, que l'on retrouve à ce niveau, avec des fissures remplies de produits ferrugineux. Les biotites disparaissent presque totalement au sommet des profils avec un sectionnement des feuilletés et une ferruginisation importante. Cette altération est donc plus forte que celle que SEDDOH (1973) avait qualifiée de « ménagée ». Le quartz est le minéral le moins altérable, bien que corrodé dans le haut du profil, où il tend cependant à s'accumuler; aussi sa teneur augmente à mesure que l'on s'élève dans le profil.

L'altération des minéraux primaires dans ces profils est comparable à celle que l'on observe dans l'Europe atlantique (BISDOM, 1967; SEDDOH, 1973 et MEUNIER, 1977). La forte ferruginisation de la biotite constitue le seul caractère original. Il est à noter que le stade extrême (5, de notre échelle) n'est jamais atteint,

sauf pour les plagioclases, et ceci dans les A₂ sur un nombre très réduit de minéraux.

5.2. Les minéraux de la pédogenèse et leurs modifications dans les profils (tabl. IX, X, XI, XII)

Un certain nombre de minéraux secondaires apparaissent dans les trois profils au cours de la pédogenèse. On s'est efforcé de déterminer leur *origine* à partir des minéraux primaires et de suivre leur *évolution*.

Les minéraux secondaires participent à la formation du *plasma*, une partie migre au cours de l'*éluviation*. Les sesquioxydes participent à la *rubéfaction* et aux modifications apportées par l'*hydro-morphie*. Enfin, dans un des profils, on observe une accumulation de calcite.

5.2.1. RÉPARTITION, GENÈSE ET ÉVOLUTION DES CONSTITUANTS SECONDAIRES

(a) Répartition

1° *Les minéraux argileux*. On constate dans les trois profils un mélange de minéraux argileux 2/1 (smectites, illites et divers interstratifiés) et 1/1 (métahalloysite et kaolinite désordonnée). De faibles teneurs en sesquioxydes de fer ont été identifiées par analyse chimique et par diffraction des rayons X.

TABLEAU IX. — Minéralogie du profil SA 1

Hori.	Fract.	M.P.		Kaolinites			Illites		Minéraux secondaires		Smect. M	O-hyd.fer Go	Carb.ca. Ca
		Q	F	Kd	Kh	mH	I	Io	Interst. I-X	Verm. V			
A ₂	<2mm	4	2,5	1			1		0,5		1	tr	-
	<2μ	-	-	3		tr	3		1,5		2	0,5	-
A' 2	<2mm	3	2	1		0,5		1,5	0,5		0,5	0,5	-
	<2μ	-	-	2		1,5		4	1		0,5	1	-
B' 2	<2mm	3	2		1,5			1,5		tr	0,5	1	tr
	<2μ	-	-		3			4		0,5	<0,5	2	-
B ₃	<2mm	3	1,5		1,5			1,5		tr	tr	2,5	tr
	<2μ	-	-		3			3		0,5	tr	3,5	-
K ₁	<2mm	2	2,5	tr		1		0,5		-	-	3,5	-
	<2μ	-	-	0,5		2		1,5		0,5	tr	5,5	-
K ₂	<2mm	1,5	1	tr		1		0,5		-	-	3,5	-
K ₃	<2mm	2,5	2	tr		1,5		0,5		-	-	3,5	tr

Hori. = Horizon, Fract. = Fraction, M.P. = Minéraux primaires, Interstr. = Interstratifié, Verm. = Vermiculite, Smect. = Smectite, O-hyd.fer = Oxy-hydroxydes de fer, Carb.Ca. = Carbonate de calcium, Q = Quartz, F = orthose et plagioclase, Kd = kaolinite désordonnée prédominante, Kh : kaolinite et métahalloysite, mH = métahalloysite prédominante, I = mica, Io = illite "ouverte", I-X = I-M et I-V non précisés, V, Al-X = vermiculite et intergrade pseudo-chlorite, M = beidellite ferrique et montmorillonite, Go = goéthite et hémate en traces, Ca : calcite.

TABLEAU X. — Minéralogie du profil SA 3

Hori.	Fract.	Minéraux primaires Feldspaths			Minéraux secondaires											
		Q	O	Pl	Kaolinities			Illites		Interstr.		Verm.		Smect.	O-hydro fer Go	
					Kd	Kh	mH	I	Io	I-X	I-M	V	Al-X	M		
A ₁₁	<2mm	5	2,5	0,5	0,5		tr	tr	0,5	0,5	0,5		0,5	tr	-	
A ₁₂																
A _{3/Bt}	<2μ	1,5	tr	-	1,5 à 2		0,5 à 1	0,5	2	0,5	1		2	tr	-	
B _{2t}	<2mm	4	1,5	1												
B ₃			à 1	à 1,5		0,5		tr	0,5	0,5	1		<0,5	0,5 à 1 (Al)	-	
B _{3/C}																
C _{1g}	<2mm	4 → 2	1,5	2 → 3	tr		0,5 → tr	tr	0,5	-	tr		tr	2	-	
C _{2g}														1,5		
	<2μ	tr	-	-	0,5		1	tr	1	-	0,5 à 1		tr	7	-	
C'	<2mm	4	tr	2	0,5		tr	1,5		tr	1		tr	1	-	
(argi- lane)	<2μ	tr	-	-	1		0,5	4	1	tr	2,5		tr	1	-	

Hori.= Horizon, Fract.= Fraction, Interstr.= Interstratifié, Verm.= Vermiculite, Smect.=Smectite, Q = quartz, O = orthose, Pl = plagioclase (oligoclase), Kd = kaolinite désordonnée, Kh = kaolinite et métahalloysite, Mh = métahalloysite, I = mica, Io = illite "ouverte", I-X =

TABLEAU XI. — Minéralogie du profil SA 4

Hori.	Fract.	M.P.			Minéraux secondaires											
		Q	O	Pl	Kaolinities			Illites		Interstr.		Verm.		Smect.	O-hyd.fer Go	
					Kd	Kh	mH	I	Io	I-X	I-M	V	Al-X	M		
A ₁	<2mm	5	2,5	0,5	0,5		tr	0,5	tr	0,5	0,5	tr	tr	tr	-	
A ₂	<2μ	1,5	-	-	2		tr	1	1	0,5	2	tr	0,5	1,5 (Al)	-	
A _{2g}	<2mm	4	1,5	1	0,5 à 1			0,5	tr	0,5	0,5	tr	tr	1 à 1,5		
B _{1tg}	<2μ	1	-	-		2		0,5	1,5	0,5	2	tr	0,5	1,5 (Al)	-	
		1	-	-	1		1	1	1	tr	2	tt	tr	3	-	
B _{2t}	<2mm	4	1	1,5	tr		0,5	tr	0,5	tr	0,5	tr	tr	2 (Al)	-	
B' _{2tg}		à 4,5		à 2	à 0,5		à tr						à 0,5	à 1		
C _{1xg}	<2μ	tr	-	-	0,5		1 à 1,5	0,5	4	0,5	1		0,5	1,5 (Al)	-	
II	<2mm	3,5	1,5	1,5	tr		0,5	tr	1	0,5	0,5	tr	tr	1 (Al)	-	
III Cg								à 0,5	à 0,5						-	
IV	<2μ	0,5 à tr	-	-	0,5		0,5 à 1	2	3,5	0,5	0,5	tr	0,5	1 (Al)	-	

Hori.= Horizon, Fract.= Fraction, M.P.= Minéraux primaires, Interstr.= Interstratifié, Verm.= Vermiculite, Smect.= Smectite, O-hyd.fer= Oxy-hydroxydes de fer, Q = Quartz, O = Orthose, Pl = Plagioclase (oligoclase ?), Kd = Kaolinite désordonnée, Kh = Kaolinite et métahalloysite, Mh = Métahalloysite, I = Mica, Io = Illite "ouverte", I-X = I-M et I-V non précisés, V, Al-X = vermiculite et pseudochlorite-Al, M = Beidellite ferrique et montmorillonite, M (Al) = Montmorillonite à Al interfoliaire, Go = Goethite.

Les tableaux IX, X, et XI résument l'évolution des constituants dans les profils ; pour chaque horizon une estimation semi-quantitative (de 0 à 10) a été effectuée. On peut faire les remarques suivantes pour chaque profil :

— Profil SA 1. Dans les horizons B₃ et K, les smectites prédominent. Dans l'horizon B, elles diminuent très nettement tandis que l'on voit apparaître un interstratifié I-M, qui paraît dériver d'un minéral micacé, à aluminium interfoliaire.

Dans l'horizon A₂ apparaît d'abord de l'illite ouverte, puis de l'illite, qui devient importante. Les minéraux argileux 1/1 sont représentés dans l'horizon K uniquement par de la métahalloysite. A mesure que l'on s'élève dans le profil, celle-ci est remplacée par de la kaolinite désordonnée qui devient prédominante dans l'horizon A₂.

— Profil SA 3. On observe dans l'horizon C une prédominance de smectites, et un peu d'illite et de métahalloysite. Dans les horizons B, on

TABLEAU XII. — Les différentes formes du fer dans les profils SA 3 et SA 4

	OXYDES DE FER %					en % du Total		
	Total	Libre	F.S.	B.C.	L.S.	F.S.	B.C.	L.S.
SA3 1	1,4	0,7	0,6	0,1	0,7	43	7	50
1bis	1,5	0,8	0,6	0,2	0,7	40	13	47
2	2,5	1,1	0,4	0,7	1,4	16	28	56
3	3,2	1,8	0,6	1,2	1,4	19	39	43
4	2,3	1,1	0,4	0,7	1,2	17	30	52
5	3,4	1,5	0,7	0,8	1,9	20	23	56
6	4,2	1,1	tr	1,1	3,1	0	26	74
7	2,5	0,7	0,1	0,6	1,8	4	24	72
8	2,4	0,5	0,4	0,1	1,9	17	4	79
9	4,5	1,8	tr	1,8	2,7	0	40	60
SA4 1	1,6	1,4	0,9	0,5	0,2	56	31	13
2	1,5	0,6	0,6	-	0,9	40	0	60
3	2,1	1,0	0,4	0,6	1,1	19	29	52
4	2,1	0,9	0,4	0,5	1,2	19	24	57
5	3,4	1,5	0,4	1,1	1,9	12	32	56
6	3,6	1,7	0,9	0,8	1,9	25	22	53
7	4,3	2,0	1,2	0,8	2,1	28	18	49
8	3,2	1,5	1,0	0,5	1,7	31	16	53
9	2,5	1,3	0,3	1,0	1,2	12	40	48
10	1,7	0,9	0,6	0,3	0,8	35	18	47
11	5,1	1,4	0,3	1,1	3,7	6	22	72

F.S. : Oxydes Facilement Solubles

B.C. : Oxydes Bien cristallisés

L.S. : Fer Lié aux Silicates

observe une dégradation des smectites par le passage de l'aluminium à l'état interfoliaire. Dans les horizons A, les smectites disparaissent au profit des illites ouvertes et d'interstratifiés. La métahalloysite diminue progressivement au profit de kaolinite désordonnée. Les minéraux argileux, qui représentent environ 10 à 15 % dans l'horizon C, atteignent graduellement 20 à 30 % dans l'horizon A.

— *Profil Sa 4.* La répartition des minéraux argileux n'apparaît pas aussi régulière dans ce profil que dans les précédents. A la base, les smectites ne sont pas très caractéristiques. Dans l'horizon B, on note une montmorillonite alumineuse qui passe, dans l'horizon A, à des interstratifiés. L'illite est abondante dans les horizons B et C surtout sous forme ouverte. Dans l'horizon A, les illites diminuent graduellement. Les kaolinites sont minoritaires dans tout le profil (15 à 20 %). Mais la métahalloysite, qui est la forme dominante à la base du profil, est progressivement remplacée par de la kaolinite désordonnée vers la surface, dans les horizons A₂ et A₁.

2° Les Formes du fer

— Les oxydes de fer *totaux* ont été déterminés sur tous les échantillons. Les teneurs ne dépassent que rarement 5 % ce qui est conforme à la nature des roches-mères, granites très leucocrates.

— Les oxydes de fer *libres* sont presque toujours inférieurs à 2 % et compris pour la plupart entre 0,5 et 1,7 %. Ils représentent de l'ordre de 20 à 50 % des oxydes de fer totaux.

— Les oxydes de fer *facilement solubles* (déterminés sur les profils SA 3 et SA 4) représentent de 30 % jusqu'à la totalité des oxydes libres.

Ces formes du fer sont en faible quantité, mais suffisantes pour colorer les sols en rouge. Les formes facilement solubles contribuent pour une très large part à cette coloration des sols.

L'examen des fractions <2 μ par diffraction des rayons X et par microscopie de transmission, n'a pas permis l'identification précise des constituants ferrugineux. Des traces de goëthite ont été identifiées dans SA 1, mais aucun minéral ferrique cristallisé n'a pu être dans les autres profils. On pense, avec LAMOUREUX *et al.* (1977), QUANTIN *et al.* (1979), qu'il s'agit de formes d'hématite très fine.

3° La *calcite* n'a été identifiée que dans la partie inférieure de SA 1 (2 à 8 %).

(b) Genèse

La corrélation entre les observations micro-morphologiques et les analyses minéralogiques et chimiques est délicate car, aux minéraux altérés, s'ajoutent des revêtements argileux et surtout un plasma colluvial de provenance incertaine. On peut toutefois penser que :

— Les argiles kaolinitiques dérivent probablement de l'altération des feldspaths : la métahalloysite, qui apparaît la première, dès l'arène, provient sans doute des plagioclases; tandis que la kaolinite désordonnée, qui apparaît progressivement vers le haut du profil, peut dériver de l'altération plus lente des orthoclases ou de la métahalloysite elle-même.

— Les minéraux interstratifiés proviennent de la

transformation des illites (issues des biotites) et des séricites, qui elles-mêmes peuvent provenir des plagioclases.

— Les smectites peuvent se néoformer dans le plasma, ou provenir de la transformation d'un minéral micacé. La relation entre l'abondance des smectites et l'hydromorphie en SA 3, ou les horizons carbonatés en SA 1, plaide en faveur de la néoformation. Cependant, la transformation de minéraux micacés est également possible.

- a. Illite → Vermiculite → Smectite
- b. Illite → Smectite

Dans le premier cas (a), les smectites dérivent des biotites (ROBERT *et al.*, 1972-5); dans le second cas (b), de plagioclases séricitisés (TERCINIER et QUANTIN, 1968). Une part d'indétermination existe entre les argiles 2/1 interstratifiées et les smectites dégradées à aluminium interfoliaires.

(c) Évolution

En conséquence, il y a une évolution nette des minéraux argileux de la base vers le haut des profils :

— à la base, smectites et métahalloysite, minéraux argileux les plus « actifs » et les plus fragiles;

— au sommet, kaolinite désordonnée, illite; I-M et minéraux à aluminium interfoliaire, minéraux argileux les plus stables et les moins actifs.

Ceci peut s'expliquer par plusieurs processus, concurrents ou successifs :

- genèse plus lente de la kaolinite;
- dégradation de la métahalloysite et des smectites aluminisées;
- éluviation préférentielle des argiles les plus fines;

— ou encore colluvionnement, qui aurait enrichi la surface en minéraux moins altérables (quartz, orthose, muscovite et kaolinite).

Enfin, la faible quantité des oxydes de fer libres est consécutive à la pauvreté des roches-mères en fer. Cette faible quantité, facilement absorbée par les argiles (surtout celles à forte surface, comme les smectites et même la métahalloysite) ne permet pas aux oxydes d'apparaître sous une forme cristalline bien exprimée.

5.2.2. LA RUBÉFACTION

Au sommet de l'horizon B₂ du profil SA 1, la couleur rouge, bien visible sur le terrain, et la plus intense (10 R 3/6), est donnée par le fond matriciel uniformément coloré en brun rouge et par les ferriargilanes rouges. A la base de cet horizon, la couleur rouge visible sur le terrain s'exprime sous forme de

taches; l'observation micromorphologique montre qu'elle résulte d'imprégnations ferrugineuses rouges du fond matriciel sous forme de taches, et d'argilanes rouges, présentes uniquement à l'intérieur de ces taches.

Dans les horizons B et SA 3, le fond matriciel est brun et ce sont essentiellement les argilanes rouges qui contribuent à la rubéfaction.

Dans le profil SA 4, la couleur rouge résulte d'imprégnations ferrugineuses rouges, en taches, et d'argilanes de même couleur, présents uniquement à l'intérieur de ces taches.

L'observation micromorphologique montre que la ferruginisation de la biotite ne concourt pas directement à la rubéfaction. On est donc amené à penser aux origines possibles suivantes de la couleur rouge des sols qui proviendrait :

— des argilanes rouges, qui se sont rubéfiés au moment de leur formation, parce que selon BRESSON (1974) cette couleur s'acquiert dans les horizons d'éluviation;

— du fond matriciel rouge, qui a dû se rubéfier en place, puisque la rubéfaction du fond matriciel est fréquemment associée à celle des argilanes;

— des imprégnations ferrugineuses rouges, à caractère hydromorphe, mais qui sont postérieures aux formes précédentes.

La rubéfaction de ces profils n'apparaît plus fonctionnelle. En effet, ainsi qu'on l'a constaté pour les argilanes, le fond matriciel rouge est toujours au centre des agrégats et les imprégnations ferrugineuses rouges sont en voie de déferrification; ceci est particulièrement net à la base de l'horizon B₂ de SA 1.

5.2.3. LA PLASMATION

Dans le granite à architecture conservée (profil SA 3), de même que dans l'arkose, les minéraux primaires ne sont que faiblement altérés. Dès que l'architecture du granite et de l'arkose disparaît, le nombre des plagioclases et des biotites diminue brutalement, et ces minéraux ne sont plus visibles qu'à l'état de traces; ainsi dans les horizons B, la biotite n'existe pratiquement plus et les plagioclases se réduisent à quelques pourcents. Dans les profils étudiés, il n'a pas été possible de suivre l'altération finale, ni la fragmentation de ces minéraux, et donc leur transformation en plasma. Les orthoclases, et dans une moindre mesure le quartz, se corrodent, et surtout se fragmentent, alimentant le squelette sableux et limoneux, mais non le plasma (cf. minéralogie de la fraction argileuse).

Les argiles illuviales pénètrent dans les niveaux à architecture conservée, mais en quantités très limitées et l'architecture disparaît avant que ces argiles aient eu un rôle de plasmation significatif.

Les effets de retrait-gonflement des argiles, peu marqués dans les profils SA 3 et SA 4, sont évidents dans l'horizon B du profil SA 1 (fissuration à tendance déviée, assemblage plasmique squel-polymasé-pique, revêtements déformés et intégrés au fond matriciel); néanmoins on n'observe pas, même dans l'horizon B de ce dernier profil, un broyage des minéraux primaires et leur intégration progressive au plasma, comme on peut le voir dans les vertisols (RODRIGUEZ-HERNANDEZ *et al.*, 1979).

Les effets de la bioturbation ne sont guère observables en lames minces dans ces sols; néanmoins son rôle dans la plasmation ne peut être tenu pour négligeable.

Par conséquent, on est amené à penser que le plasma de ces sols est d'origine colluviale; c'est évident d'après la morphologie pour le profil SA 4; la micromorphologie le montre également pour le profil SA 3 (le sommet du granite en place correspond à une limite d'érosion) et c'est aussi probablement le cas pour une partie ou la totalité du plasma du profil SA 1.

Les observations de suspensions, au microscope électronique, confirment que nous sommes en présence de minéraux à divers stades d'altération et dont certains, les micas, ont été fragmentés.

5.2.4. LES TRANSFERTS SOUS FORME PARTICULAIRE : LE PROFIL D'ÉLUVIATION-ILLUVIATION

Le profil d'éluviation-illuviation est bien développé dans les sols étudiés. Nous y avons observé deux générations majeures de traits texturaux, l'une essentiellement en forme de revêtement et de colmatage de vides, l'autre principalement intégrée au fond matriciel; la première comprend des siltanes, des silt-argilanes, des argilanes grossiers et des argilanes, jaune à brun-jaune et la seconde uniquement des ferri-argilanes rouges et brun-rouge.

(a) Premier profil d'éluviation-illuviation

Il se caractérise par la présence :

— dans les horizons A₂, d'accumulations de limons fins plus ou moins lavés des argiles et enrichis en petits débris organiques (siltanes et silt-argilanes); ils se localisent dans les rétrécissements de la porosité d'entassement ou dans de petites cavités quand elles existent; le triage des siltanes dépend du développement de l'horizon d'éluviation : ceux-ci sont bien triés dans le profil SA 1 et moyennement dans les profils SA 3 et SA 4;

— à la base des horizons A₂, d'agrégats de l'horizon B_{2t} dispersés au sein du fond matriciel éluvial, très nets dans le profil SA 1, diffus dans le profil SA 3 et ferruginisés dans le profil SA 4, et de siltanes s'enrichissant de plus en plus en argiles;

— dans les horizons B_{2t}, d'argilanes grossières (micro-inclusions nombreuses et mal triées) sans litage (profil SA 3) ou à litage irrégulier (profil SA 1), brun-gris (profil SA 3) ou brun-jaune (profil SA 1) en position de revêtement dans les vides gros et moyens; du haut vers le bas de l'horizon, la proportion des micro-inclusions décroît régulièrement, mais lentement;

— dans les horizons B_{3t}, d'argilanes comparables à celles des horizons B_{2t}, mais moins grossières et mieux litées; dans les zones blanchies du profil SA 4, elles passent à des argilanes hydromorphes (gris blanc, à microlitage irrégulier et sinueux) colmatant de grosses cavités et des fissures;

— dans les horizons C, les différentes générations de traits texturaux sont difficiles et souvent impossibles à séparer les unes des autres; avec la profondeur la couleur tend à s'éclaircir, par exemple dans l'arène en place du profil SA 3, tous les argilanes sont blanc-jaune.

Interprétation du premier profil d'éluviation-illuviation

Ce profil est actuellement fonctionnel. L'absence d'intégration (sinon très faible) des traits texturaux au fond matriciel et leur localisation, même dans les horizons superficiels en position de revêtement (ou de colmatage) l'attestent.

Ce profil est de type dégradé textural. Le fond matriciel argilique se détruit au sommet des horizons A₂; les siltanes et les argilanes grossières indiquent une mise en suspension des fractions argileuses et limoneuses fines et la présence d'agrégats reliques à la base de l'horizon A₂. Le contact brutal entre les horizons A et B montrent que la dégradation est linéaire dans le profil SA 1, plus diffuse dans les deux autres profils. Il est à tendance hydromorphe marquée dans le profil SA 4, où des argilanes hydromorphes sont présents dans l'horizon B_{3t}.

Ce profil se juxtapose à un profil d'illuviation rouge.

(b) Profil d'illuviation rouge

Il se caractérise par des argilanes brun-rouge à brun-jaune, micro-lités, bien orientés, intégrés totalement (ou presque) au fond matriciel dans les horizons B_{2t}. Ils s'observent encore clairement dans les horizons B₃, mais disparaissent rapidement dans les horizons C.

Le caractère intégré de ces argilanes colorés conduit à formuler l'hypothèse que ce profil n'est plus fonctionnel.

5.2.5. L'HYDROMORPHIE

Elle s'exprime dans ces trois profils par un pseudo-gley brun-ocre se superposant à un pseudo-gley rouge

et une illuviation hydromorphe. Elle est surtout marquée dans le profil SA 4. Mais, même dans ce profil, le pseudo-gley est rarement très contrasté.

Les nodules ferrugineux sont très rares dans ces sols. Les seuls qu'on puisse observer résultent d'imprégnations ferrugineuses brun foncé.

Le pseudo-gley résulte de taches d'imprégnation ferrugineuse brun foncé à ocre en contraste avec des plages jaunes, exceptionnellement gris clair. Les taches du pseudo-gley rouge tendent à se séparer (avec apparence de déferrification) et à se trouver englobées au centre de taches ocres.

Les argilanes hydromorphes caractéristiques n'existent que dans le profil SA 4, où elles n'apparaissent qu'à partir de l'horizon B₃. On les observe dans les fissures des plages décolorées.

5.2.6. LE PROFIL CARBONATÉ

Seul le profil SA 1 présente des horizons carbonatés en position horizontale ou subhorizontale. Ils sont continus, d'épaisseur sensiblement constante et apparaissent à peu près à la même profondeur. Ils sont absents des profils SA 3 et SA 4.

En observation micromorphologique, ces horizons carbonatés apparaissent comme relativement simples. Les différences entre les horizons K₁, K₂ et K₃ correspondent uniquement à une densité de la carbonatation. Dans les horizons K₁ et K₃, la carbonatation est liée uniquement à des microfissures verticales tandis que dans le K₂ elle envahit l'ensemble de l'horizon. Hiérarchiquement, on observe :

— une imprégnation de l'arkose qui donne des nodules dans l'horizon K₂;

— des revêtements de calcite recouvrant les zones imprégnées;

— un colmatage partiel des vides par de fines aiguilles.

La carbonatation ne semble plus se produire actuellement; en effet, la quasi-totalité des traits carbonatés est recouverte par des argilanes jaunes.

6. LES INTERPRÉTATIONS

Trois profils de sols, dérivés d'arènes granitiques ou arkosiques, dans la région de la Selva en Catalogne, Espagne, ont été examinés sur le terrain et les échantillons prélevés soumis à des analyses physiques, chimiques, minéralogiques et micromorphologiques. De l'ensemble des observations et résultats obtenus, un certain nombre de conclusions peuvent être tirées.

(a) Le *Remaniement* concerne les trois profils. Une observation importante, visible dès l'examen morphologique, mais confirmée par l'ensemble des résultats analytiques obtenus, est que la totalité des sols n'est pas dérivée directement de la roche-mère granitique ou arkosique. Il existe des preuves évidentes de colluvionnement des arènes dans lesquelles se sont développés les sols, ou bien des sols eux-mêmes.

(b) L'*Allération* est *incomplète*. En effet, elle n'a pas réussi à détruire tous les minéraux altérables, surtout les orthoclases qui sont encore bien présents dans les horizons supérieurs des trois profils (cf. tabl. VI à XI). Elle a, toutefois, fait disparaître les biotites et la majeure partie des plagioclases.

Les *minéraux argileux* sont très variés. On observe des smectites, vermiculites, illites, de la métahalloysite et de la kaolinite désordonnée. Les *smectites* sont les plus abondantes à la base des profils et disparaissent peu à peu au profit de l'*illite*, avec des intermédiaires interstratifiés et des intergrades à aluminium interfoliaire, à mesure que l'on s'élève dans les profils entre les horizons B et C. Tous ces minéraux présentent une décroissance nette lorsque l'on passe de B en A.

La *métahalloysite* est le minéral argileux 1/1 dominant à la base des divers profils. A mesure qu'on se rapproche du sommet, elle disparaît graduellement pour être remplacée par de la *kaolinite désordonnée*, qui, au contraire des minéraux argileux 2/1, se maintient dans l'horizon A.

La *goethite* est le seul minéral ferrugineux identifiable et seulement dans le haut du profil SA 1. Il existe dans les trois profils de petites quantités d'oxydes mal cristallisés et facilement solubles dans les acides (proto-hématite) qui suffisent à donner aux sols leur couleur rouge.

La *calcite* n'est présente que dans le seul profil SA 1.

(c) La *Fersiallisation* (1), considérée comme la formation simultanée de minéraux argileux 2/1 et d'oxydes ou hydroxydes de fer libres, apparaît comme le processus majeur de ces sols. Ces minéraux argileux, abondants à tous les niveaux, sont responsables de la capacité d'échange cationique élevée; malgré une teneur faible en oxydes de fer, la couleur la plus évidente est le rouge (10 R, 2,5 YR, 5 YR) qui concerne à la fois le plasma et les argilanes. Cette fersiallisation est incomplète, puisque des minéraux altérables (orthoclases surtout et plagioclases) sont encore abondants dans les profils. On pourrait lui appliquer le qualificatif de « pénévolué » proposé par AUBERT et SEGALEN (1965) pour les sols ferrallitiques.

(1) Cette définition générale des sols fersiallitiques apparaît plus appropriée que celle du CPCS (1967).

Cela permettrait de séparer ces sols d'autres sols fersiallitiques des régions méditerranéennes et tropicales, où les minéraux primaires ont été altérés plus complètement. Cette fersiallisation remonte à une époque difficile à préciser car on constate que d'autres processus lui sont postérieurs et sont venus modifier les caractéristiques morphologiques.

(d) Le *Lessivage* est identifiable à la fois par l'observation des profils et des lames minces. Il prédomine dans les profils SA 3 et SA 4, où l'on observe une répartition régulière de l'argile dans l'horizon Bt. Il est contemporain de la fersiallisation et s'est poursuivi en s'intensifiant. Actuellement il se produit une véritable destruction du sommet du Bt, où apparaissent des revêtements limoneux et limono-argileux.

(e) La *Dégradation* des minéraux argileux et de leur micro-organisation est active et actuelle; elle est en relation avec la dégradation texturale et même, comme dans le profil SA 1, avec la micro-podzolisation. Elle se traduit par une véritable destruction du sommet des horizons Bt, se marquant par un contact planique entre A₂ et B. La disparition de certains minéraux argileux, comme les smectites et la métahalloysite dans les horizons A, peut être également attribuée à cette dégradation.

(f) L'*Hydromorphie* est présente, mais surtout en profondeur. Elle ne se traduit pas par des caractéristiques visuelles très accusées, mais elle peut mieux s'apprécier par l'étude des lames minces. Elle semble la conséquence du processus de lessivage et de la compaction, liée au retrait et au gonflement des argiles, puisqu'elle succède à la mise en place des ferri-argilanes rouges.

(g) L'*Accumulation de carbonate de calcium* n'intéresse que la base du seul profil SA 1, précisément celui où la dégradation de la partie supérieure est la plus accusée. Elle est antérieure aux dernières illuviations.

(h) *Chronologie*

Les différents processus qui ont pu être observés ou déduits par toutes les méthodes utilisées, peuvent être interprétés chronologiquement de la manière suivante :

Tout commence par une arénisation des granites et des arkoses. Elle a été suivie par un mouvement de la masse arénisée sur de faibles distances, sur les versants. Puis, le matériau originel a été fixé par la végétation, tandis que, sous un climat sans doute voisin du climat actuel, mais plus chaud et plus humide, se sont développés des sols fersiallitiques. Le temps disponible n'a pas été suffisant pour détruire totalement les minéraux altérables, mais a permis la formation de minéraux argileux 2/1 et 1/1,

ainsi que de petites quantités d'oxydes et d'hydroxydes qui ont suffi à les colorer.

Une modification du climat est alors intervenue dans le sens de la diminution des précipitations, favorable à l'accumulation de carbonate de calcium à la base d'un des profils. L'ensemble de la région de la Selva semble avoir échappé à ce changement, mais non Caldas de Malavella (profil SA 1), où le profil sur arkose est empreint de carbonate de calcium à sa base. Cet épisode plus sec apparaît général vers la côte toute proche, où, à quelques kilomètres de là, un grand nombre de sols sont carbonatés.

À cette phase sèche, en succèdent d'autres plus humides qui permettent le lessivage, postérieur à la carbonatation puisque les calcitanes ont été revêtus par des argiles, puis la dégradation et l'hydromorphie qui modifient les caractéristiques imprimées aux sols antérieurement. Des changements récents de végétation, de modes d'utilisation des sols sont sans doute à l'origine de la dégradation du sommet des profils.

CONCLUSIONS

L'examen attentif de trois profils dérivés de granite ou d'arkose dans la région de la Selva au nord-est de Barcelone, a permis d'en connaître les caractéristiques actuelles, de déterminer la succession des processus pédologiques au cours du temps et de les mettre en parallèle avec des modifications subies par cette région sur le plan des variations climatiques et de la mise en valeur.

Les sols dérivent d'arènes granitiques ou arkosiques plus ou moins remaniées ou colluvionnées sur les versants. Ce sont des sols fersiallitiques où l'altération a été incomplète, car il subsiste encore de l'orthose et des plagioclases. L'argilogenèse a permis la formation de divers types de minéraux argileux 2/1 associés à de la kaolinite et de la métahalloysite. La couleur rouge est due à une petite quantité d'oxydes de fer.

La morphologie est affectée par le lessivage, par la dégradation des fractions fines et, localement, une micropodzolisation superficielle. On observe également l'hydromorphie en profondeur et localement une accumulation de carbonate de calcium.

La chronologie des processus serait la suivante : arénisation, remaniement et colluvionnement, fersiallisation avec genèse de minéraux argileux 2/1 et 1/1 et d'oxydes de fer, accumulation calcaire localisée à Caldas de la Malavella, lessivage, hydromorphie, dégradation et micropodzolisation superficielle.

Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.
le 28 juillet 1982.

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.), SEGALÉN (P.), 1965. — Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.* IV, 4 : 97-112.
- BISDOM (E. B. A.), 1967. — Micromorphology of a weathered granite near the ria de Arosa (N. W. Spain). *Leid. Geol. Med.* 37 : 33-67.
- BRESSON (L. M.), 1976. — La rubéfaction récente des sols en climat tempéré humide. Thèse 3^e cycle, Univ. P. et M. Curie, Paris, 197 p.
- BREWER (R.), 1964. — Fabric and mineral analysis of soils. John Wiley and Sons, 470 p.
- FEDOROFF (N.), 1979. — L'organisation du sol à l'échelle microscopique in « *Pédologie* », t. 2 « Constituants et propriétés du sol ». M. Bonneau et B. Souchier Ed., Masson : 251-265.
- FUSTER (J. M.) *et al.*, 1954. — « Análisis químicos de rocas españolas publicados hasta 1952 ». Monografías del Inst. Lucas Mallada de Inv. Geol. núm. 14, C.S.I.C. Madrid.
- GUILLORE (P.), 1980. — Méthode de fabrication mécanique et en série des lames minces. Doc. ronéotypé du Département des sols de l'I.N.A. P-G, 22 p.
- KAMPRATH (E. I.), 1970. — Exchangeable Al as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 24 : 252-254.
- LAMOUREUX (M.), SEGALÉN (P.), 1969. — Étude comparée des produits ferrugineux dans les sols rouges et bruns méditerranéens du Liban. *Sci. du Sol*, 1 : 63-75.
- LAMOUREUX (M.), LOYER (J. Y.), BOULEAU (A.), JANOT (C.), 1977. — Formes du fer des sols rouges et bruns versiallitiques. Application de la spectrométrie Mössbauer. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.* vol. XV, n° 2 : 199-210.
- MEUNIER (A.), 1977. — Les mécanismes de l'altération des granites et le rôle des micro-systèmes. Études des arènes du massif granitique de Parthenay (Deux-Sèvres). Thèse Univ. Poitiers, 248 p.
- QUANTIN (P.), LAMOUREUX (M.), 1974. — Adaptation de la méthode cinétique de Ségalen à la détermination des constituants minéraux de sols variés. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.* vol. XII, n° 1 : 13-46.
- ROBERT (M.), BARSHAD (I.), 1972. — Sur les propriétés et la détermination des minéraux expansibles (vermiculites-smectites). *C.R. Acad. Sci. (Paris)* 275 : 1463-1465.
- RODRIGUEZ-HERNANDEZ (C. M.), FERNANDEZ-CALDAS (E.), FEDOROFF (N.), QUANTIN (P.), 1973. — Les vertisols des Iles Canaries occidentales. Étude physico-chimique, minéralogique et micromorphologique. *Pédologie*, XXIX minéralogique et micromorphologique. *Pédologie*, XXIX : 71-107.
- SEDDOH (F. K.), 1973. — Altération des roches cristallines du Morvan : granites, granophyres, rhyolites. Étude minéralogique, géochimique et micromorphologique. Thèse Univ. Dijon, *Mém. Géol. Univ. Dijon*. Doin éd., 337 p.
- SEGALÉN (P.), 1968. — Note sur la détermination des produits amorphes des sols à hydroxydes. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. VI, n° 1 : 105-126.
- SOLE SABATIS (L.), 1948. — « Observaciones sobre el Plioceno de la comarca de La Selva ». *Estudios Geol. C.S.I.C.* 8 : 287-307.
- SOLE SABARIS (L.), 1958. — « Geografía de Catalunya ». T.I.E. Aedos. Barcelona.
- STOOPS (G.), ALTEMULLER (M. J.), BISDOM (E. B. A.), DELVIGNE (J.), DOBROVOLSKY, FITZPATRICK (E. A.), PANEQUE (G.), SLEEMAN (J.), 1979. — Guidelines for description of mineral alterations in soil micromorphology. *Pédologie*, XXIX : 121-135.
- TERCINIER (G.), QUANTIN (P.), 1968. — Influence de l'altération de cendres et ponces volcaniques sur la nature, les propriétés et la fertilité des sols aux Nouvelles Hébrides. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. VI, n° 2 : 203-224.
- VICENTE H. (M. A.), ROBERT (M.), 1975. — Transformation profonde des micas sous l'action de l'acide galacturonique. Problème des smectites des podzols. *C.R. Acad. Sc. (Paris)*, 278 : 523-526.
- VILADEVALL (M.), 1978. — « Estudio petrologico y estructural de las rocas metamórficas y graníticas del sector N-oriental del macizo del Montseny ». Res. de la Tesis. Secretariado Public. Univ. de Barcelona.