

Etude de deux sols formés sur roches volcaniques dans la Selva (Catalogne, Espagne)

Jaime BECH BORRAS (1,6), Annie BOULEAU (4), José CARDUS (2,3),
Miguel LASALA (3), Maurice LAMOUREUX (4), Paul QUANTIN (4), Pierre SEGALÉN (5)

(1) Laboratorio de los suelos, Escuela Universitaria de Ingeniería Agrícola, Urgell 187, Barcelona, 36, Espagne. (2) Departamento de Edafología, Nucleo Universitario de Pedralbes, Universidad de Barcelona, 28, Espagne. (3) Instituto de Biología de Barcelona, U.E.I. Edafología, C.S.I.C. Jorge Girona Salgado S/N, Barcelona, 24, Espagne. (4) Pédologues ORSTOM, Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM, 70-74 route d'Aulnay 93140 Bondy, France. (5) Pédologue ORSTOM, 25, rue de la Mairie, St Martin des Champs, 29210 Morlaix, France. (6) Catedra de Edafología — Facultad de Biología — Universidad de Barcelona, avenue Diagonal 645 Barcelona 28 — Espagne.

RÉSUMÉ

Deux sols dérivés de roches volcaniques ont été étudiés en Catalogne (Espagne), à Aiguaviva près de San Dalmay et à Maçanet, dans la dépression de la Selva, au sud de Gerona. Le premier dérive de lapilli basaltiques d'âge Quaternaire récent, mélangés à des débris du socle granitique. C'est un sol Brun. Le second dérive de deux matériaux pyroclastiques superposés l'un probablement du Quaternaire inférieur, l'autre plus récent. C'est un sol marron.

MOTS-CLÉS : Catalogne — Roches volcaniques — Sol brun — Sol marron.

ABSTRACT

STUDY OF TWO SOILS DERIVED FROM VOLCANIC ROCKS IN THE SELVA (CATALONIA, SPAIN)

Two volcanic material derived soils have been studied in Catalonia (Spain) at Aiguaviva near San Dalmay and Maçanet belonging both to the Selva depression, south of Gerona. The first one derives from pyroclastic materials mixed with pieces of the underlying granite ; its age is upper Quaternary. It is a brown Soil. The second derives from two superimposed pyroclastic materials ; the former of which could be of the lower Pleistocene and the later is more recent. It is a cinnamonic soil.

KEY WORDS : Catalonia — Volcanic rocks — Brown soils — Cinnamonic soils.

RESUMEN

ESTUDIO DE DOS SUELOS DERIVADOS DE ROCAS VOLCÁNICAS EN LA SELVA (CATALUNA, ESPAÑA).

Han sido estudiados dos suelos derivados de rocas volcánicas en Catalunya (España), en Aiguaviva cerca de San Dalmay y en Maçanet. Ambos lugares pertenecen a la zona deprimida de la Selva, al sur de Gerona. El primero deriva de una mezcla de materiales piroclásticos y de fragmentos del granito subyacente. Es de edad es Cuaternario ; es un suelo pardo. El segundo se ha formado a partir de dos materiales piroclásticos superpuestos ; el primero podría ser del Pleistoceno inferior e el otro más reciente. Es un suelo marrón.

PALABRAS CLAVES : Cataluna — Rocas volcánicas — Suelo pardo e suelo marrón.

1. INTRODUCTION

Les roches volcaniques basiques, basaltes ou basanites, n'occupent en Catalogne qu'une superficie réduite et disper-

sée. On observe un certain nombre d'affleurements dont le plus important se situe aux environs d'Olot, à la partie amont du bassin du Rio Fluvia, au Nord-Ouest de Gerona (Fig. 1).

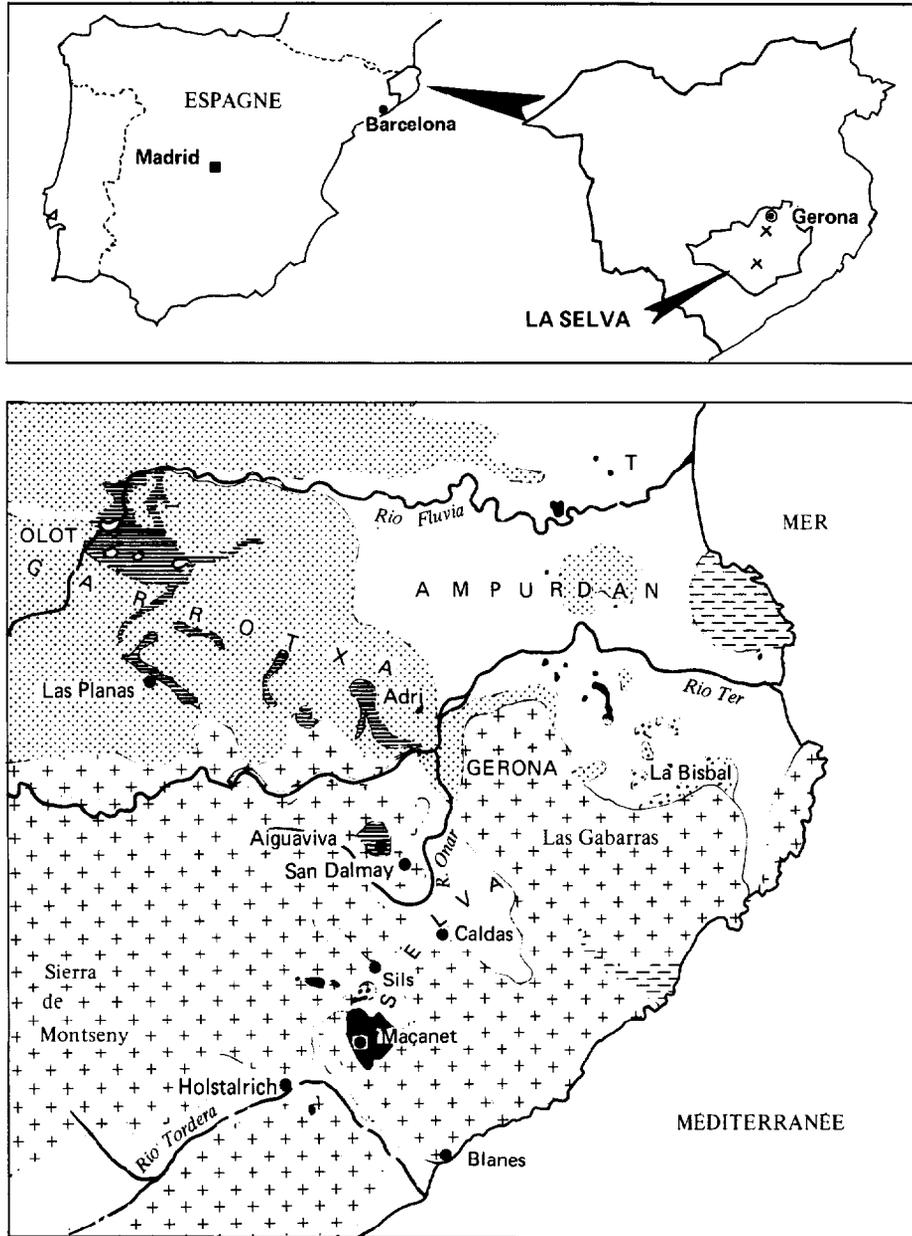


Fig. 1. — Emplacement des profils étudiés. Esquisse géologique

Les sols de ce secteur ont fait l'objet d'une étude détaillée qui a conclu à la présence d'andosols favorisée par des matériaux basaltiques récents et un climat humide (BECH *et al.*, 1976, 1 et 2). A ce volcanisme quaternaire correspondent, plus au sud, d'autres affleurements très localisés, dont celui de Aiguaviva près de San Dalmay, à quelques kilomètres au Sud-Ouest de Gerona.

Mais, outre ce volcanisme quaternaire, il existe, dans la partie Nord-Est de la Catalogne des affleurements de basalte tertiaire, nombreux, mais d'étendue assez réduite, dans la plaine de l'Ampurdan, d'une part, et dans la région de Maçanet, d'autre part. Des observations ont été effectuées autour de cette localité (Fig. 1).

Ce sont les résultats obtenus par les examens de terrain et les diverses analyses micromorphologiques, physiques, chimiques et minéralogiques sur les profils de Aiguaviva et Maçanet, qui sont présentés ci-après.

2. ENVIRONNEMENT ACTUEL DES SOLS

L'ensemble de la Catalogne a été présenté précédemment par l'un d'entre nous (BECH, 1982). Des zones particulières ont été examinées en détail et présentées antérieurement (BECH *et al.* 1982, 1983). Voici quelques données particulières des secteurs où sont localisés les deux profils étudiés dans la région de la Selva.

2.1. Topographie

La Selva est une région déprimée d'allure générale circulaire, occupée sur sa périphérie, surtout par des granites, et dans un degré moindre par des schistes et quartzites du Silurien, en son centre, par des matériaux continentaux (arkoses, argiles, sables, galets, etc.) du Pliocène ainsi que par des matériaux alluviaux quaternaires de granulométrie variée. Cette zone s'ouvre vers le Nord, drainée surtout par le Rio Onar qui rejoint le Rio Ter à Gerona. Un jeu de fractures a affecté l'ensemble de la dépression, modifiant l'écoulement de quelques rivières dont celle du Rio Tordera. Les formations volcaniques affleurent sur les bordures de la dépression.

2.2. Les Roches

Le cratère d'explosion de San Dalmay couvre par ses projections environ 6 km². Il témoigne d'une activité presque uniquement explosive. On note une stratification très nette des projections avec des graviers et des cailloux granitiques mêlés à des bombes et des scories.

La roche-mère est donc un mélange de basalte et de granite. L'âge de l'édifice est quaternaire.

Autour du village de Maçanet, les basaltes couvrent une surface d'environ 10 km². Ils se présentent sous forme de coulées, de scories et de tufs. Ils se situent à des altitudes variant de 100 m (plaines) à 150-200 m (collines aux formes arrondies, tranchant sur les reliefs granitiques). A ces basaltes sont associées des formations volcano-sédimentaires. Quelques filons isolés entre Maçanet et Hostalrich permettent de pen-

ser qu'il y avait dans cette région un important centre d'émission. Les différentes manifestations volcaniques des environs de Maçanet ont été situées par DONVILLE (1973) entre le Pontien et le début du Quaternaire, à un âge proche de 5 millions d'années. Le basalte le plus proche de Maçanet, à Vil-laseca, a été analysé par VASSART (1968). Les résultats sont présentés au Tableau I. On y note la présence d'un peu de néphéline et de calcite. Cette dernière indique un début d'altération hydrothermale ou météorique. L'abondance de l'olivine et la présence de néphéline apparentent cette lave à une basanite, quoique la composition chimique (Tabl. I) conduit à la formule d'une phonolite sombre à néphéline.

TABLEAU I

Lave de Maçanet : composition centésimale et norme. VASSART, 1968

Oxyde	%		Norme
SiO ₂	45,01	Or	8,73
Al ₂ O ₃	15,84	Ab	23,68
Fe ₂ O ₃	2,48	An	22,93
FeO	7,88	Ne	3,41
MnO	0,13	CaSiO ₃	5,13
MgO	7,49	MgSiO ₃	3,20
CaO	10,21	FeSiO ₃	1,61
Na ₂ O	3,65	Mg ₂ SiO ₄	10,77
K ₂ O	1,47	Fe ₂ SiO ₄	6,02
TiO ₂	1,94	M+	3,67
P ₂ O ₅	0,40	Il	3,71
H ₂ O ⁺	1,63	Ap	1,01
H ₂ O ⁻	0,34	Calcite	4,56
CO ₂	2,02		
	100,40		100,40

2.3. Les caractéristiques climatiques ont été données précédemment ; ce sont celles de la Selva (BECH *et al.* 1982). Le profil de Maçanet est très proche de Sils dont les données climatiques sont les suivantes :

— Température moyenne annuelle : 16°7 C, avec 24°6 C en été et 9°1 C en hiver.

— Précipitations moyennes annuelles : 747 mm, avec deux maxima, l'un de septembre à novembre avec 285 mm, l'autre de mars à mai avec 182 mm ; le « creux » de juin à août est peu accusé avec 115 mm.

Le volcan de San Dalmay est très proche de l'aéroport de Gerona dont les caractéristiques sont les suivantes :

— Température moyenne annuelle : 15° C, avec 22°6 C en été et 7°8 C en hiver.

— Précipitations moyennes annuelles : 740 mm, avec deux maxima de 177 mm en septembre et octobre et de 154 mm en mars et avril ; le creux estival est réduit au seul mois de juillet avec 43 mm. Le climat est méditerranéen atténué ou subméditerranéen (BECH, 1982).

2.4. La végétation naturelle sur les sols dérivés de roches basiques et sur les pentes devait être une forêt à prédominance de *Quercus robur* et *Quercus ilex* et en outre sur les sommets *Quercus coccifera*, *Cistus sp.* et en sous-bois *Trifolium sp.* et *Brachypodium ramosum*. La végétation actuelle, provenant d'une dégradation de la précédente est une mosaïque de *Cistus sp.*, *Sarothamnus catalaunica*, avec quelques *Quercus coccifera*, et au sol toujours *Trifolium sp.* et *Brachypodium ramosum* (BOLOS, 1979).

2.5. Peu d'informations sont disponibles sur la durée de la pédogénèse, autres que celles indiquées précédemment pour la mise en place des roches : à Aiguaviva au cours du Quaternaire, à Maçanet depuis le Pliocène. Il est possible que la pédogénèse n'ait pas été toujours identique ni continue. Mais on en ignore les variations.

3. MÉTHODES D'ÉTUDE

Un certain nombre de profils ont été examinés à la faveur d'excavations ouvertes pour des carrières, et tout particulièrement près de Maçanet et Aiguaviva. Elles permettent une vue plus complète des profils et des horizons. Les profils échantillonnés ont été considérés comme les plus représentatifs. Des prélèvements spéciaux ont été effectués pour l'étude de la micromorphologie.

Les méthodes de détermination analytique effectuées ont été précisées dans des publications précédentes (BECH *et al.*, 1982).

4. LA MORPHOLOGIE DES SOLS

4. Profil 1-81 d'Aiguaviva (Fig. 1).

- Localisation : Carrière près du kilomètre 8 de la route de Riudelloto de la Selva à Bonmati près de San Dalmay.
 Coordonnées : 40°55'40" lat. N et 2°44'55" long. E.
 Altitude : 190 m.
 Topographie : Pente très légère, exposée au Sud, dans une plaine légèrement ondulée.
 Végétation : Lisière de forêt à *Pinus pinea*, *Quercus robur*, *Quercus ilex*, *Cistus monspeliensis*, *Spartium junceum*, *Ulex sp.*, *Erica sp.*, *Lavandula sp.*, *Rosmarinus officinalis*, *Capsella bursa pastoris*, *Dactylis glomerata*, *Rubia peregrina*, *Convolvulus lineata*.
 Roche-mère : Lapilli hétérométriques stratifiés de basalte à olivine et de micro-granite.
 Drainage : moyen à rapide.
 Erosion : très faible à nulle.

CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES

0 — 10 cm : Horizon A₁ — 10 YR 3/3, frais, brun foncé ; matière organique non directement décelable ; pas d'effervescence à l'acide ; abondants cailloux et graviers de basalte et de granite, et aussi de porphyre, micaschistes, et quartzites ; texture sableuse à sablo-limoneuse ; structure fragmentaire peu nette, grumeleuse fine à très fine, moyennement développée ;

poreux à très poreux ; pas de revêtements argileux visibles ; consistance rigide, non plastique, non collant ; quelques grosses racines, nombreuses racines moyennes et fines ; activité biologique moyenne ; transition distincte ; limite ondulée.

10 — 18 cm : Horizon (B) — 10 YR 4/4, frais, brun-jaunâtre foncé ; matière organique non directement décelable ; pas d'effervescence à l'acide ; quelques blocs ; cailloux et graviers de basalte, granite et micaschistes abondants et plus ou moins arrondis ; texture sableuse ; structure fragmentaire polyédrique, moyenne, peu nette, avec sous-structure polyédrique subanguleuse fine ; pas de revêtements visibles ; poreux ; consistance fragile ; quelques racines grosses, moyennes et fines ; activité biologique moyenne ; transition nette ; limite régulière.

18 — 85 cm : C₁ — 5 YR 3/4, humide, brun-rougeâtre foncé ; quelques taches ; non organique ; pas d'effervescence à l'acide ; blocs peu abondants ; cailloux abondants ; graviers peu abondants (basaltes, micaschiste, granite, pegmatite et porphyre, faiblement altérés), de forme irrégulière, avec quelques-uns arrondis ; texture sableuse ; structure polyédrique subanguleuse grossière à particulaire, peu nette ; quelques revêtements argileux minces ; très poreux avec pores moyens et larges, intergranulaires ; peu fragile ; quelques racines, grosses et moyennes ; activité biologique nulle ; transition nette ; limite ondulée.

> 85 cm : C₂ — 7,5 YR 4/4, humide, brun foncé ; couche de matériaux projetés, bien stratifiés ; non organiques ; pas d'effervescence à l'acide ; très peu de blocs, mais cailloux et graviers abondants (basalte et granite) et de forme anguleuse ; texture sableuse ; structure à tendance particulaire ; très poreux, à pores intergranulaires ; pas de revêtements ; activité biologique nulle...

4.2. Profil MA-BA-1 de Maçanet de la Selva

- Localisation : Petite carrière près du km 4,2 de la route de Maçanet à Hostalrich (Fig. 1).
 Coordonnées : 41°46'0" Lat. N. et 2°42'55" Long E.
 Altitude : 160 m.
 Topographie : Relief faiblement ondulé ; versant exposé au Sud-Est ; pente 2 à 8 %.
 Végétation : Bois à *Quercus ilex*, *Q. coccifera*, *Pinus pinea*, *Sarothamnus scoparius*, *Cistus monspeliensis*, *Crataegus monogyna*, *Galium reptans*, *G. lucidum*, *Brachypodium sylvaticum*, *Ononis spinosa*, *Arrhenatherium elathius*, *Scabiosa colombaria*.
 Roche-mère : coulée et projections pyroclastiques rouges et altérées.
 Drainage : moyen à rapide.
 Erosion : non visible.

CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES

0 — 20 cm : A₁₁ — 7,5 YR 3/2, frais, brun foncé ; matière organique directement décelable ; pas d'effervescence à l'acide ; cailloux de basalte de forme irrégulière, faiblement altérés ; texture argilo-limoneuse ; structure fragmentaire, polyédrique grossière, bien développée ; sous-structure polyédrique fine à moyenne ; peu poreux à poreux, à pores interstitiels ; pas de revêtements ; consistance semi-rigide ; peu plastique ; fragile ; nombreuses racines grosses, moyennes et fines ; chevelu racinaire ; activité biologique forte ; turricules de lombrics, mycelium ; transition nette à distincte ; limite régulière ; test au fluorure de sodium négatif.

- 20 — 40 cm : A₁₂ — 7,5 YR 3/2, frais, brun foncé ; matière organique non directement décelable ; pas d'effervescence ; quelques concrétions et pisolites de sesquioxides ; quelques cailloux de basalte, faiblement altérés ; texture argileuse ; structure fragmentaire, polyédrique moyenne à grossière, bien développée ; sous-structure fine à très fine ; peu poreux à poreux ; quelques fentes ; pas de revêtements ; consistance rigide ; non fragile ; racines surtout grosses et moyennes, quelques racines fines ; activité biologique moyenne à forte avec quelques galeries et turricules de lombrics ; transition distincte ; limite régulière ; test au fluorure de sodium négatif.
- 40 — 80 cm : (B) — 2,5 YR 2/4, humide, brun rougeâtre foncé avec des taches noires (environ 7 %) et des taches blanchâtres ; pseudo-mycélium de carbonate de calcium ; matière organique non décelable ; effervescence à l'acide, localisée au pseudomycélium intrapédal et au revêtement calcaire de quelques agrégats ; quelques lapilli ferruginisés ; quelques cailloux de lave faiblement altérée de forme irrégulière ou arrondie ; texture argileuse ; structure fragmentaire polyédrique grossière, très bien développée, surstructure cubique à prismatique ; porosité forte due aux nombreux vides entre les agrégats ; fentes de retrait ; agrégats très peu poreux ; pas de revêtements ; consistance rigide ; peu fragile, plastique ; quelques racines grosses, moyennes et fines ; activité biologique moyenne à faible, quelques turricules de coprolites de vers ; transition graduelle ; limite régulière.
- > 80 cm : C — 2,5 YR 3/2, humide, rouge sombre, et 2,5 YR 3/4 humide, brun rougeâtre ; la première couleur s'applique aux matériaux pyroclastiques rubéfiés, la seconde aux laves altérées ; non organique ; effervescence à l'acide, pseudo-mycélium et filonnets rubanés ; taches de sesquioxides de fer ; texture limoneuse avec passages argileux ; structure massive ; très peu poreux à non poreux ; pas de revêtements ; consistance semi-rigide à rigide, peu fragile ; quelques racines moyennes, s'introduisant dans des fentes ; activité biologique très faible à nulle ; la roche-mère apparaît en profondeur grisâtre avec des passées rougeâtres.

4.3. Observations sur la morphologie

Les caractéristiques les plus nettes de ces deux profils sont les suivantes :

— *Aiguaviva* : La différenciation morphologique est très limitée ; la couleur brune est dominante ; la texture est grossière et caractérisée par la présence d'éléments basaltiques et d'autres roches (granite, micaschistes etc...) en provenance du socle sous-jacent ; le sol ne fait pas d'effervescence à l'acide et ne réagit pas au test au fluorure de sodium ; il n'y a pas de manifestation apparente de migration de l'argile.

— *Maçanet* : la différenciation morphologique est au contraire très forte. L'horizon humifère est épais, très foncé et saturé ; l'horizon (B) rouge foncé, argileux et riche en pseudomycéliums calcaires, est très net ; la texture est fine et la structure est très bien développée. L'horizon C est bien tranché. Il n'y a pas de signe apparent d'illuviation d'argile.

5. MICROMORPHOLOGIE

5.1. Profil d'Aiguaviva

Quatre prélèvements ont été effectués sur ce profil : entre 2 et 10 cm en A, entre 10 et 20 cm en (B), entre 30 et 50 cm en C₁ et à 85 cm en C₂.

L'étude montre qu'il y a sur tout le profil un certain nombre d'éléments permanents :

— Le squelette qui occupe plus des 2/3 des surfaces observées est constitué par des graviers provenant de deux roches différentes :

— Les uns à grains clairs, émoussés à arrondis, constitués de quartz, feldspaths, (orthose, microcline et albite) et micas (2 types), de type microgranite surtout, parfois microsénite. On observe aussi des minéraux brisés et isolés, qui en proviennent.

— Les autres de couleur brun-noirâtre noduleux sont des lapilli bulleux de basalte. On y distingue des cristaux de taille variable surtout de quartz, de feldspath, mais aussi de pyroxène et d'olivine, ainsi que des verres altérés de couleur rouge sombre. Les graviers granitiques sont plus abondants (50 à 60 % du squelette) que les lapilli volcaniques.

— Les vides sont vésiculaires et souvent bordés d'un liseré blanc biréfringent, soit hémisphériques, soit circulaires, ou irréguliers.

— Le plasma présente deux domaines assez différents (Fig. 2 et 3).

— Un domaine brun clair, peu ou pas orienté (asépiques), avec parfois de nombreux petits traits biréfringents (insépiques), poreux, contenant des cristaux variés et des « papules » (débris d'argilanes). On observe un passage progressif du plasma aux lapilli.

— Un domaine constitué de figures de biréfringence très nettes ; argilanes de formes irrégulières et mineures autour des lapilli ; argilanes ou ferriargilanes lités le long de certains vides.

Les graviers granitiques du squelette sont nettement moins altérés et moins entourés de cutanes que les lapilli volcaniques. Un certain nombre d'irrégularités viennent cependant pondérer le schéma analytique présenté ci-dessus :

— A la base de l'horizon C, il y a peu de plasma différencié et pas d'argilanes.

— A la partie supérieure de l'horizon C (30-55 cm) le plasma est plus abondant que le squelette, avec de nombreux traits de biréfringence et présence de papules ; quelques ferroargilanes minces.

— En B (10-20 cm) le plasma est moins biréfringent, de couleur brun-rougeâtre et il est constitué d'un mélange argilo-organique contenant de nombreux petits grains sablo-limoneux ; présence de ferro-argilanes bien individualisés et fréquents ; plasma bio-turbé.

— En A (2-10 cm) le squelette ainsi que les pores sont plus abondants et la matière organique marque davantage le plasma. Celui-ci est plus bioturbé et ne présente plus de ferro-argilanes.

B. Profil de Maçanet. L'échantillonnage a concerné l'altérite : MA₁₀ de 190 à 200 cm, MA₉ de 122 à 132 cm, MA₈ de 85 à 95 cm, ainsi que le solum : MA₇ horizon (B), de 62 à 72 cm ; MA₆ passage de (B) à A, de 35 à 45 cm ; MA₅ horizon A, de 10 à 20 cm.

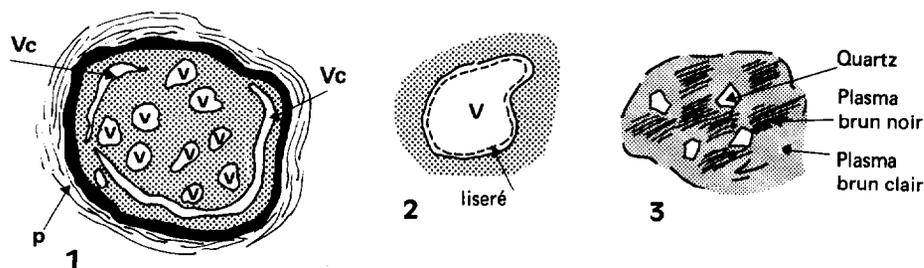


Fig. 2. — Lapilli basaltique (Profil Aiguaviva). 1 : Vue générale de lapilli avec revêtements argiliques (P).
2 : Vacuole (V) ronde dont la cavité est entourée d'un fin liseré biréfringent.
3 : Masses formées de domaines brun clair et de domaines brun foncé, incluant des quartz et des divines à iddingsites.

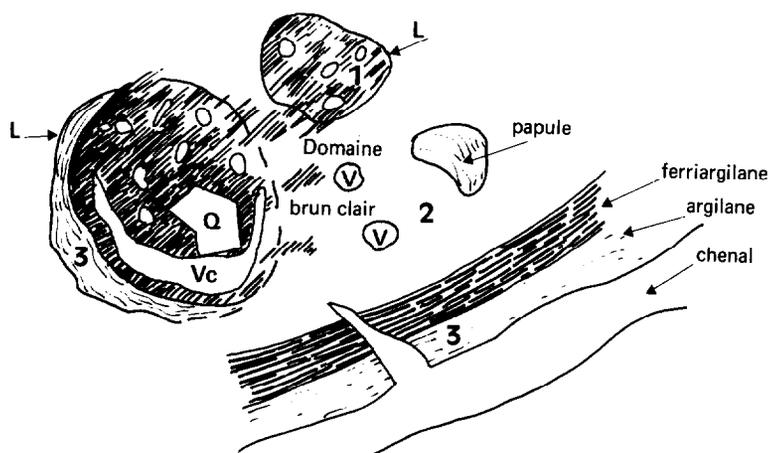


Fig. 3. — Passages des lapilli (L.) aux domaines plasmiques

5.1.1. *L'altérite* (fig. 4 et 5) présente un certain nombre de caractéristiques particulières dont les plus marquantes sont les suivantes :

— *Le plasma* des lapilli volcaniques est brun à brun-rouge foncé ; on y distingue une structure microlitique pophyrique, avec microlites de feldspaths très altérés orientés en forme de lattes, ainsi qu'un pyroxène altéré en iddingsite. Le verre est totalement transformé et les phénocristaux eux-mêmes ne sont plus identifiables (les traces de feldspaths sont optiquement vides en L.P.).

— *Les pores* représentent une grande surface de ces lames. Ce sont : tantôt des micropores originels des lapilli (0,01 mm à 0,1 mm) vésiculaires, irréguliers, dans un réseau plasmique brun-rouge foncé ; tantôt des macropores (0,1 à 1 mm) sphériques, dans un réseau plasmique brun foncé. Il n'y a pas de calcite à la base de l'altérite. Mais vers le haut, les pores peuvent être remplis plus ou moins complètement (fig. 4), par une calcite très fine. Celle-ci se dépose d'abord au fond du pore et peut englober de petits fragments de lapilli. Vers la partie supérieure de l'altérite, l'invasion de la calcite se généralise et forme des traînées subhorizontales, brun clair et poreuses (fig. 5). Cette calcite est microlitique, grise à blan-

châtre, avec quelques cristaux aciculaires (lublinité) et certains plus gros, allongés perpendiculairement aux parois de pores.

Parallèlement (entre 120 et 130 cm) apparaissent des argilanes de beidellite ferrifère très biréfringents, soit lités le long des parois de grands vides vacuolaires, soit sous forme de papules incluant des petits fragments de verre volcanique.

Les dépôts de calcite et d'argile peuvent être indépendants ou mélangés, la calcite recouvrant le plus souvent les argilanes (donc postérieure). En outre, des dépôts d'hématite ou de ferro-argilanes rouges, remplissent certains des tubes qui ne sont pas comblés totalement par la calcite (donc, cutanes de troisième génération).

5.1.2. *Le solum*

Dès le sommet de l'altérite (entre 85 et 90 cm) des domaines brun-rougeâtre foncé organisés (pédoplasmés) commencent à apparaître. Ils sont plus abondants dans les horizons supérieurs (fig. 6). Des lapilli volcaniques très peu altérés ou moins altérés que dans l'altérite sont fréquents, ainsi que des phénocristaux isolés et brisés de quartz et de feldspaths alcalins (anorthose, albite, sanidine), plus rarement de biotite

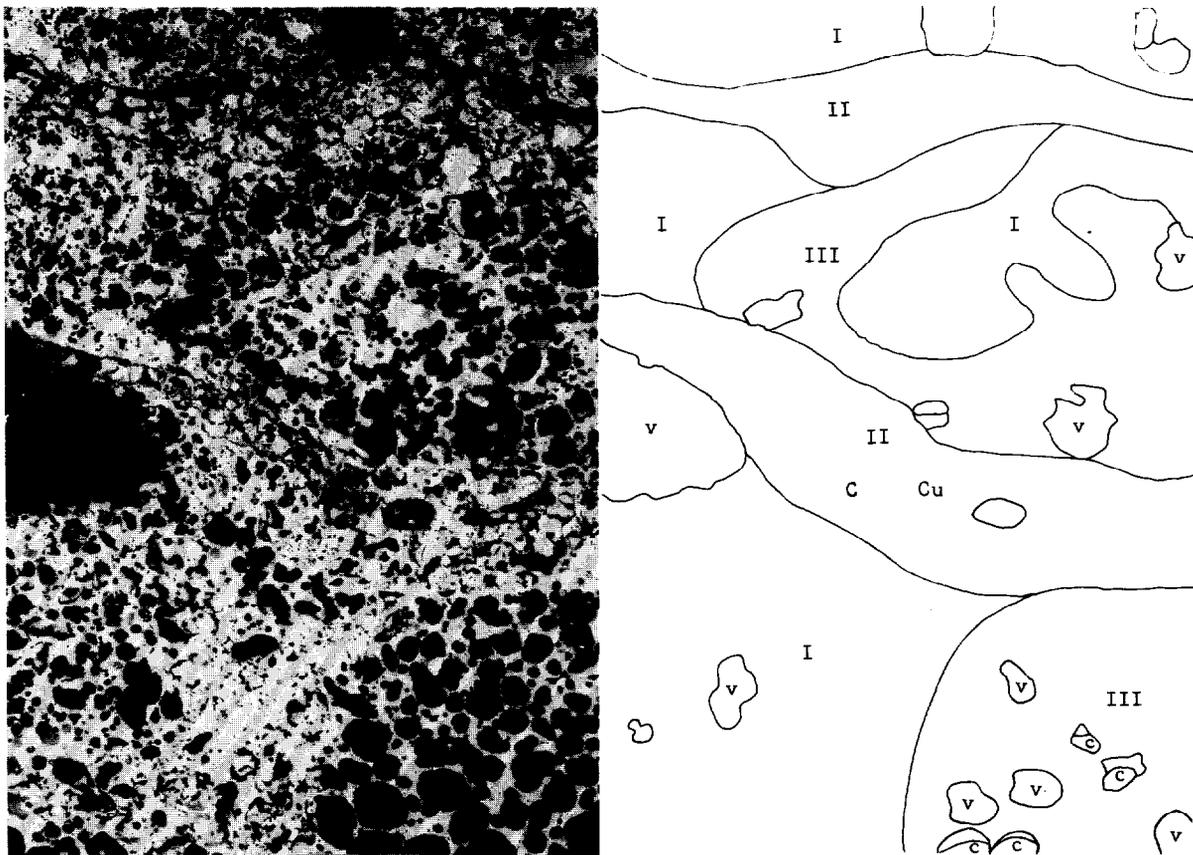


Fig. 4. — Photogramme de l'altérite Maçanet 9 A (122-127). Grands domaines morphologiques — I : Domaine brun-rougeâtre très poreux, plus ou moins enrichis en Calcite et argilanes. II : Domaine subhorizontal brun-clair envahi de calcite (C) et d'argilanes (Cu). III : Domaine aux larges pores vésiculaires arrondis (lapilli scoriacé) dont certains sont à moitié remplis par de la calcite (C). V — quelques grands vides. C — calcite visible en gris clair dans les pores

altérée. on observe même des pyroxènes incomplètement altérés. Les lapilli contiennent des feldspaths, plutôt du pôle alcalin (albite-oligoclase, anorthose), des pyroxènes de type augite et hypersthène, altérés en épidote, et même des microlites de quartz. La composition de ces lapilli est voisine de trachyandésites ou de latites. En outre leur origine est plus récente que celle des matériaux de l'altérite.

L'organisation plasmique, caractéristique du solum, est dominée par la structuration en peds nuciformes à prismatiques de quelques dixièmes de millimètres à plusieurs millimètres. Les argilanes et ferro-argilanes rouges sont ici peu abondants ; des vides tubulaires d'origine biologique apparaissent ; des gros cristaux de quartz ou de feldspaths alcalins sont visibles dans le plasma. Dans l'horizon (B), les larges fissures verticales (5 mm de large, entre 60 et 65 cm) sont remplies de calcite secondaire. Mais dans le sol supérieur, les calcitanes disparaissent. Entre 35 et 45 centimètres (passage du A au B), la masse plasmique est plus bio-turbée, mélangée à des lapilli microlitiques abondants et à des quartz, feldspaths et micas isolés et brisés, plus ou moins gros. Les agrégats

sont arrondis, avec quelques ferro-argilanes rouges contenant des sables fins et des limons. Les vides sous forme de chenaux deviennent nombreux. Le plasma est éclairci le long des fentes. D'importants remaniements et une intense vie biologique caractérisent le sol de surface (10-20 cm) : beaucoup de racines, un plasma brun foncé plus organique, plus finement sablo-limoneux et toujours très poreux, avec des amas de calcite rares et isolés et des éléments sableux variés.

OBSERVATIONS SUR LA MICROMORPHOLOGIE

Les deux profils observés sont bien différents, par la nature des matériaux originels, leur degré d'altération minérale, la différenciation et l'organisation de leurs constituants minéraux.

— Le sol d'Aiguaviva provient d'un mélange de graviers et sables de microgranite et de lapilli scoriacés de basalte ou de labradorite. Ceux-ci sont plus altérés que les produits granitiques. Les verres basaltiques et les minéraux ferromagnésiens (biotite, pyroxène, olivine) sont fortement altérés ; les plagioclases ne le sont que partiellement ; les feldspaths alcalins ne sont que corrodés et peu transformés. La

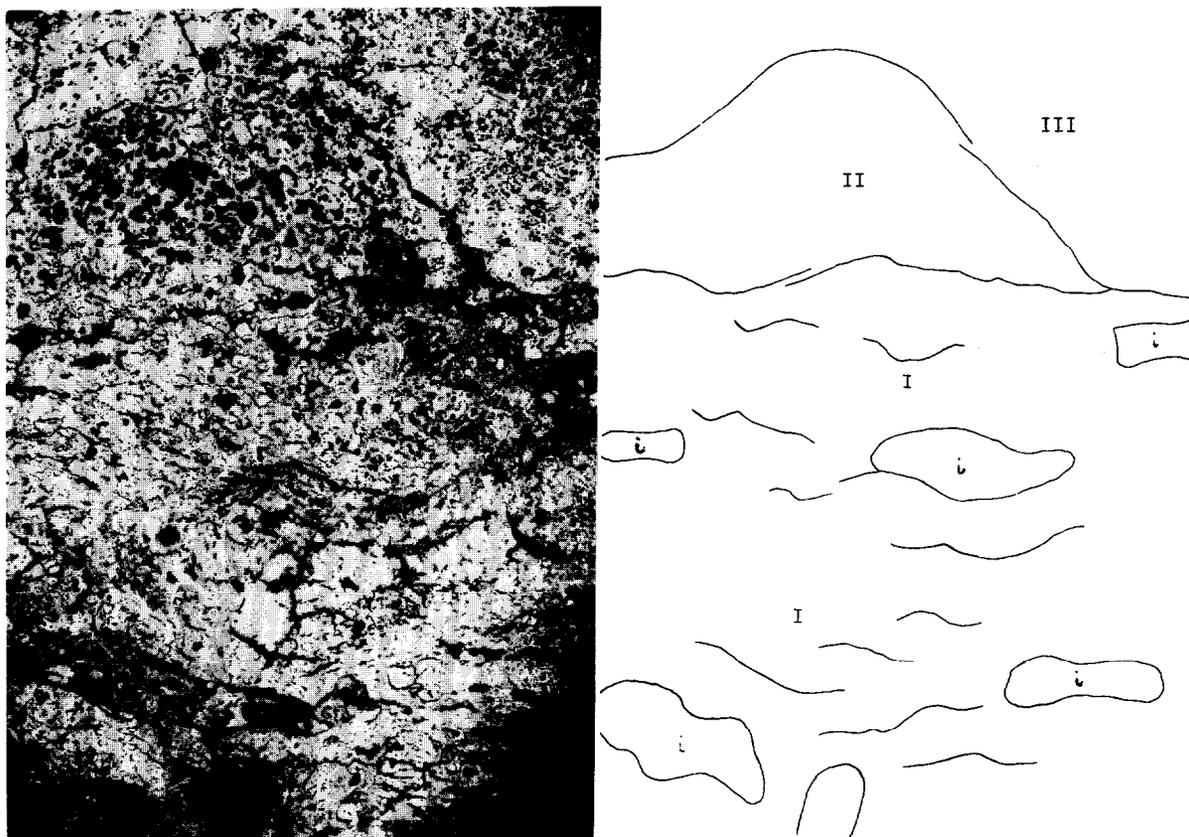


Fig. 5. — Photogramme de la partie supérieure de l'altérite (Maçanet 8 B : 90-95 cm) Grands domaines micromorphologiques
 — I : Domaine marqué par l'envahissement de calcite en strates subhorizontales. Quelques îlots (I) restent peu imprégnés par la calcite.
 II : Domaine très poreux rappelant le D.I. sous-jacent (9 B). III : Domaine brun-rougeâtre très finement poreux dont certains îlots (i) subsistent en I

proportion de graviers granitiques et de cristaux isolés de quartz, microcline et micas, augmente dans le haut du solum. Le plasma provient surtout de l'altération in situ, essentiellement des verres, des minéraux ferro-magnésiens et des plagioclases. Des ferro-argilanes, en cutanes minces et dispersés autour de certains vides, dans les horizons (B) et C₁, peuvent témoigner d'une faible migration d'argile et d'oxydes de fer à courte distance. Les marques de bio-turbation et pédoplasation sont nombreuses dans le solum.

— Le sol de Maçanet a une origine complexe. C'est un bisequum. L'altérite est constituée de lapilli scoriacés et bulleux de trachyandésite ou de trachybasalte. Ceux-ci sont presque totalement altérés, seule la trace des minéraux restant reconnaissable. Le solum au contraire contient beaucoup de lapilli de trachyandésite encore peu altérés dont les feldspaths et même les minéraux ferromagnésiens sont identifiables ; en outre il présente des sables de quartz et d'un feldspath sodipotassique de type anorthose. L'horizon (B) incorpore des produits des deux matériaux. Le solum est donc formé d'un

matériau pyroclastique beaucoup plus récent et aussi plus alcalin et siliceux que celui de l'altérite. Le plasma est abondant dans l'altérite et à la base du solum, en (B)—C. Il comporte une partie d'altération in situ, argilo-ferrugineuse, mais aussi des cutanes argileux (de beidellite) et ferrugineux (d'hématite) stratifiés, nombreux et épais, probablement d'illuviation dans les vides et fissures, surtout dans le haut de l'altérite, en C₁, et dans le bas du solum, en (B)-C. Ceux-ci se raréfient en remontant dans l'horizon (B). En outre des calcitanes abondants remplissent tous les vides dans le haut de l'altérite et la base du solum, où ils épigénisent probablement une partie du plasma ; ces calcitanes se restreignent aux fentes verticales dans le haut de l'horizon (B) et disparaissent, au sommet du sol. Il semble que les calcitanes se soient développés après les ferro-argilanes. Puis des ferranes d'hématite semblent être apparus récemment au centre des vides résiduels surtout du solum et au sommet de l'altérite. Enfin le solum montre de nombreuses marques de bio et pédoturbation, surtout dans sa partie supérieure.

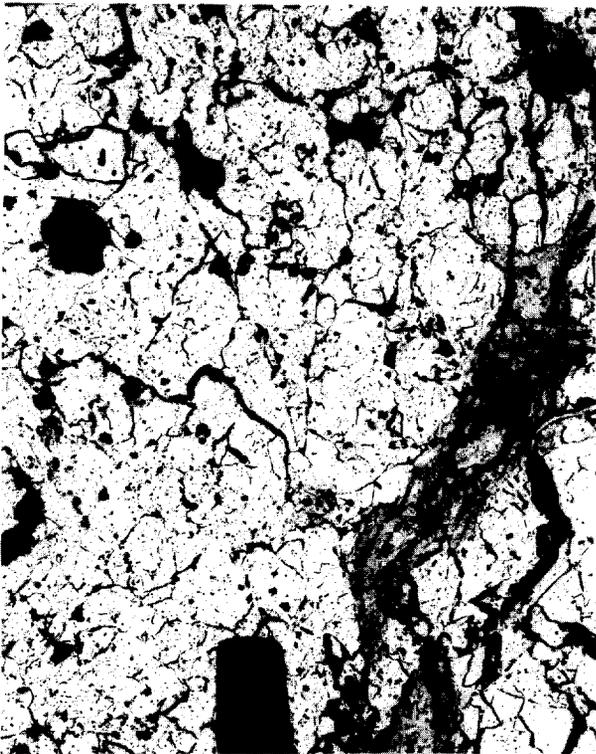


Fig. 6. — Photogramme d'une lame de solum (Maçanet — 7 A (B) : 62-67 cm. La calcite remplit une fente verticale, le reste du plasma est peu carbonaté. La structure nuciforme a tendance à s'organiser en surstructure prismatique

6. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

Ces caractéristiques ont été rassemblées dans les tableaux II et III, sur lesquelles on peut faire les observations suivantes :

6.1. Texture des sols

Dans les deux profils, on peut noter une quantité élevée de graviers et cailloux (fraction supérieure à 2 mm). Elle est particulièrement importante dans le sol d'Aiguaviva, où l'abondance des matériaux projetés de toute nature (basalte ou granite) est facilement visible sur le terrain. A Maçanet, par contre, seule la partie supérieure du sol est riche en matériaux grossiers (41 à 18 %), tandis qu'au-dessous de 40 cm, ils sont pratiquement inexistantes. Ceci indique, pour la partie supérieure du profil, une mise en place postérieure à celle de la partie inférieure, où l'altération est plus poussée.

A Aiguaviva, la granulométrie est franchement sableuse avec 60 à 80 % de sables, tandis que le limon et l'argile sont à peu près équivalents dans chaque horizon (10 à 20 %). La fraction inférieure à 2 μ est plus abondante en profondeur qu'en surface.

A Maçanet, les teneurs en sables sont de l'ordre de 30 % dans les horizons de surface et atteignent 50 % en profondeur. La fraction la plus abondante est ici le limon qui, en surface, dépasse 60 %, tandis que l'argile est nettement plus faible avec 5 à 10 %. Dans ce profil on n'observe pas de gradient argileux particulier.

6.2. Le pH à l'eau du sol d'Aiguaviva est légèrement acide en surface et augmente avec la profondeur jusqu'à 7,5 vers 1 m. A Maçanet, il est presque neutre en surface et il atteint 8,4 en profondeur, là où la calcite est la plus abondante. Le pH au chlorure de potassium normal est dans les deux cas beaucoup plus faible, avec un Δ pH de — 1,0 à — 1,7, dénotant de fortes charges négatives dues aux teneurs élevées en smectites.

6.3 Les cations échangeables : Les teneurs en calcium sont moyennes (5 à 9 mé/100 g) à Aiguaviva, et fortes (21 à 54 mé/100 g) à Maçanet. Les teneurs en magnésium sont dans les deux cas comprises entre 5 et 10 mé/100 g. Dans le profil d'Aiguaviva, les teneurs en magnésium sont parfois légèrement supérieures à celles en calcium ; ceci peut être attribué à l'altération des minéraux ferromagnésiens (olivine en particulier) qui y abondent. Les teneurs en potassium et sodium échangeables sont de 0,2 à 0,5 mé/100 g, sauf dans les horizons de profondeur où les chiffres atteignent 0,7 à 1,45 mé/100 g respectivement.

6.4. La capacité d'échange de cations varie de 18 à 23 mé/100 g à Aiguaviva, de 34 à 24 mé/100 g à Maçanet. Le degré de saturation dans le sol d'Aiguaviva est de 61 % dans l'horizon A₁ et de 80 à 90 % dans les autres horizons. A Maçanet, le degré de saturation est proche de 90 % en surface, tandis qu'en profondeur, à cause de l'excès de carbonate de calcium, la valeur de S est largement supérieure à la capacité d'échange.

6.5. La teneur en matière organique est de 2,4 à 2,9 % dans les horizons A des sols d'Aiguaviva et de Maçanet, respectivement. Le rapport C/N est assez variable, entre 11 et 15.

6.6. La conductivité (mesurée par conductimétrie sur l'extrait de pâte saturée) est comprise entre 0,5 et 1,0 mmhos ; elle montre une très faible salinité.

En résumé, ces deux sols ont un certain nombre de caractéristiques communes, à savoir : une teneur en graviers élevée, une teneur en sables moyenne à élevée, des teneurs en matière organique peu élevées, un pH proche de la neutralité ou légèrement alcalin, des minéraux argileux présentant des charges permanentes négatives élevées et une forte CEC, un degré de saturation élevé ou même la saturation totale en bases échangeables.

7. CARACTÉRISTIQUES MINÉRALOGIQUES

Une étude des minéraux primaires et secondaires a été effectuée par diffraction des rayons X. Celle-ci a été faite sur pou-

TABLEAU II

Caractéristiques physiques, physico-chimiques et chimiques du sol d'Aiguaviva

A

Profondeur cm	Horizon	Grav. & cailloux	S.G. %	S.F. %	L %	A %	pH/H ₂ O	pH/KCl	Δ pH	Mat.Or. %	C %	N %	C/N
0 - 10	A ₁	17,9	35,0	36,0	13,2	15,8	6,2	4,9	- 1,3	2,4	1,4	0,10	13,8
10 - 18	(B)	19,5	38,2	25,8	20,6	15,4	6,7	5,2	- 1,5	1,2	0,7	0,06	11,45
18 - 85	C ₁	40,7	68,9	10,7	10,2	10,3	7,3	5,7	- 1,6	0,3	0,2	0,015	11,8
85 - 100	C ₂	66,4	55,4	16,6	15,3	12,7	7,5	6,4	- 1,1	0,3	0,15	0,01	12,8

B

Profondeur cm	Horizon	Le complexe absorbant en				mé/ 100 g		% v
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	T	
0 - 10	A ₁	5,2	5,1	0,4	0,2	10,9	17,8	61
10 - 18	(B)	8,2	9,6	0,4	0,3	18,5	20,5	90
18 - 85	C ₁	8,8	9,1	0,4	0,5	18,9	23,4	81
85 - 100	C ₂	8,0	6,8	0,65	0,55	16,0	18,5	92

TABLEAU III

Caractéristiques physiques, physico-chimiques et chimiques du sol de Maçanet

A

Profondeur cm	Horizon	Cailloux et Grav.	S.G. %	S.F. %	L. %	A. %	pH/H ₂ O	pH/KCl	Δ pH	Mat.Org %	C %	N %	C/N
0 - 20	A ₁₁	41,0	6,3	21,25	62,15	10,35	6,8	5,6	- 1,2	2,9	1,7	0,14	11,7
20 - 40	A ₁₂	18,0	12,1	21,7	58,25	7,95	6,9	5,2	- 1,7	1,2	0,7	0,05	14,9
65 - 80	B	0,3	7,95	19,7	67,15	5,15	8,4	7,05	- 1,35	0,2	0,1	0,01	12,7
100 - 130	C ₁	1,8	24,95	17,0	50,5	7,55	8,4	7,1	- 1,3	0,2	0,1	0,008	14,9
150 - 170	C ₂	0,6	27,7	26,0	36,0	10,3	8,3	7,25	- 1,05	0,1	0,08	0,01	8,2

B

Horizon	Le complexe absorbant en				mé/100 g		% v
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	T	
A ₁₁	22,5	8,2	0,3	0,4	31,4	34,3	91,5
A ₁₂	21,8	8,05	0,3	0,4	30,6	34,4	88,9
(B)	48,7	5,85	0,2	0,4	55,1	26,15	-
C ₁	54,1	7,7	0,1	0,6	62,6	24,7	-
C ₂	32,6	10,2	0,7	1,45	44,3	23,6	-

dre de sol total, puis sur la fraction inférieure à 2 μ orientée, et complétée par des observations au microscope optique. Les résultats sont présentés aux tableaux D et E.

7.1. Sols d'Aiguaviva (Tabl. IV)

(a) MINÉRAUX PRIMAIRES

Les horizons C sont constitués en prédominance de minéraux provenant de basalte : olivine, labrador, augite et magnétite. Ils comportent aussi des minéraux provenant de roches granitiques : quartz, feldspaths potassiques (orthose, microcline) et micas (muscovite, séricite) notamment. Olivine argile et plagioclases diminuent progressivement vers le haut de l'altérite, jusque dans le solum. L'olivine disparaît presque dans l'horizon humifère et l'augite n'y est plus qu'en très petite quantité. Tandis que persistent feldspaths et micas, et surtout que la proportion de quartz augmente fortement. Le changement dans la composition minéralogique entre l'altérite et le solum suggère une variation dans l'origine des matériaux, l'un plus basaltique, l'autre plus granitique. Cela peut signifier aussi une altération croissante de la base vers le haut du profil.

(b) MINÉRAUX SECONDAIRES

Les produits minéraux secondaires sont essentiellement des phyllosilicates. Leur quantité augmente vers le sommet du sol. On n'observe que des traces d'oxydes de fer : hématite

dans l'altérite, goéthite dans l'horizon (B). Les argiles sont constituées d'un mélange d'une argile 2 : 1 mal définie (smectite, interstratifiés 10-14 M, 10-14 C), d'illite « ouverte » (mica altéré) et d'une métahalloysite mal cristallisée. A la base de l'altérite, l'argile 2 : 1 prédomine très largement ; elle est accompagnée d'un peu de chlorite, d'illite et de métahalloysite. Au sommet de l'altérite, l'argile 2 : 1 est plus nettement une smectite et la chlorite devient moins perceptible. Dans le solum la proportion de métahalloysite augmente fortement sans dépasser cependant 35 % des phyllosilicates ; mais l'argile 2 : 1 demeure mal définie et la quantité d'illite s'accroît même dans l'horizon humifère, à la surface du sol ; ceci suggère aussi un enrichissement relatif en produits dérivés de micas et donc un matériau originel plus granitique vers la surface du sol. On n'observe pas de calcite ni d'autres sels solubles dans tout le profil.

(c) FORMES DU FER

Bien que la quantité globale du fer soit élevée, de 8 à 9 % en Fe₂O₃, dans tout le profil, la proportion de fer « libre » est plutôt faible ; de 25 % du fer total à la base de l'altérite, elle augmente progressivement à 38 % dans le solum. En outre les oxydes libres de fer sont mal cristallisés, et à près de 80 % à l'état « amorphe ».

7.2. Sol de Maçanet (Tabl. V)

(a) MINÉRAUX PRIMAIRES

TABLEAU IV
Les constituants minéraux du sol d'Aiguaviva : D₁ caractères chimiques — D₂ minéralogie

Prof. cm	Conduct. Electr. m S	CaCO ₃ %	F e 2 O 3					Etat de Fe, % de Fe total		
			Total %	Libre %	Amorphe	L/T	A/L	silicates primaires et argiles	Oxydes cristal- lisés	amorphes
0-10	0,90	0	8,0	2,95	2,6	36,8	89,6	63,1	4,4	32,5
10-18	0,49	0	9,0	3,45	2,5	38,3	72,5	56,1	9,6	25,25
18-85	0,85	0	9,9	2,8	2,2	28,3	78,6	71,7	6,1	22,2
85	0,83	0	8,8	2,2	1,4	25,0	63,6	75,0	9,1	15,9

Minéraux primaires							Minéraux secondaires					
Prof.	Q	F	Mi	Py	Ol	Ma	He	mH	Io	Ch	I-Sm Sm	Go, He
0-10	+++	+	++	tr	ε	tr	ε	++	++	ε	++	
10-18	+++	+	+	tr	tr	tr	ε	++	+		++	ε
18-85	++	+	+	+	+	tr	ε	+	+	tr	++	ε
85	++	++	++	+	++	+	ε	+	+	+	++	ε

L/T = Fe libre/Fe total

A/L = Fe amorphe/Fe libre

F : feldspaths (potassiques et plagioclases)
 Mi : mica
 Q : quartz
 Ma : magnétite
 He : hématite
 I-Sm : interstratifié
 Go : goéthite
 Py : Pyroxène
 Ol : olivine
 mH : métahalloysite mal cristallisée
 Io : illite « ouverte »
 Sm : smectite (mal cristallisée)
 Ch : chlorite
 + + + + : très abondant ; + + + : abondant ; + + : moyen ; + : un peu ; tr : très peu ; ε : traces.

Dans les horizons C, les minéraux primaires sont composés de feldspaths et d'hématite. Il semble qu'un feldspath alcalin de type sanidine et anorthose prédomine sur les plagioclases. Ceci indique un matériau volcanique alcalin qui a été rubéfié lors de son émission.

Dans le solum, la composition change brusquement. L'anorthose disparaît au profit des plagioclases et probable-

ment de l'orthose ; du quartz apparaît en petite quantité, ainsi qu'un peu de magnétite, de pyroxènes et de mica ; l'hématite diminue fortement. Le sol de l'horizon (B) fait transition, marquant un mélange avec le matériau sous-jacent. La présence de quartz et de mica suggère une transformation du matériau originel en un produit plus siliceux. La pétrographie indique qu'il s'agit de lapilli peu altérés de trachyandésite.

TABLEAU V

Les constituants minéraux du sol de Maçanet : E₁ caractères chimiques — E₂ minéralogie

A													
Prof. cm	Conduct. Electr. m S	CaCO ₃	Fe ₂ O ₃						Etat de Fe, % de Fe total silicates primaires et argiles				
			Total %	Libre %	Amorphe	L/T x 100	A/L x 100	Oxydes cristallisés	amorphes				
0-10	0,84	tr	10,65	3,2	0,5	30,0	15,6	70	25,3	4,7			
20-40	0,98	tr	9,9	2,9	0,7	29,3	20,7	70,7	22,2	7,1			
65-80	0,67	13,65	10,5	2,1	0,5	20,0	23,8	79,9	15,2	4,8			
100-130	0,64	11,9	10,5	2,0	0,1	19,0	5,0	80,9	18,1	0,95			
150-170	1,03	2,2	12,65	2,8		22,1		77,9	22,1				

B													
Prof. cm	Minéraux Primaires							Minéraux Secondaires					
	Q	San	Pl	Mi	Ma	Py	Hé	H	m.H	Io	Sm	Go,He	Ca
0-10	++	tr	++	tr	+	+	+		++	+	+++	tr	ε
20-40	++	tr*	++	tr	+	+	+		++	+	+++	+	ε
65-80	+	++	++	tr	tr	tr	++		++	tr	+++	tr	+++
100-130		+++	tr		tr	ε	++	++	+	ε	+++	tr	++
150-170		+++	tr		tr	ε	+++	++	+	ε	+++	ε	tr

L/T = Fe libre/Fe total	A/L = Fe amorphe/Fe libre	+++ : abondant
Q : quartz	San : sanidine et anorthose	++ : moyen
Mi : mica	Pl : plagioclase	+ : un peu
Ma : magnétite	Py : pyroxène	tr : très peu
Hé : hématite	H : halloysite	v : traces
mH : métahalloysite	Io : illite	
Sm : smectite	Go : goethite	
Ca : calcite		

(b) MINÉRAUX SECONDAIRES

La proportion des minéraux secondaires est importante dans tout le profil, et les minéraux argileux sont bien cristallisés, ce qui indique une altération bien plus avancée que dans le cas du sol d'Aiguaviva. Cependant, la présence d'oxydes de fer secondaires et bien cristallisés dans la fraction < 2μ demeure discrète. En outre, il y a de la calcite en abondance dans les horizons (B) et C₁.

Les argiles sont constituées en prédominance d'une smectite assez bien cristallisée, probablement ferrifère (beidellite-Fe), dans l'ensemble du profil. Cependant la présence d'une argile 1 : 1 halloysitique est importante (~ 30 à 40 % des argiles). Celle-ci est hydratée (à 10 Å) dans l'altérite, puis déshydratée (à 7.4 Å) dans le solum, vers le haut du profil.

De l'illite ouverte apparaît nettement dans les horizons humifères ; elle n'est plus qu'en trace dans l'horizon B et disparaît dans l'altérite. Cela souligne bien l'apport de produits plus trachytiques dans le haut du sol.

De la goethite a été déterminée en petite quantité dans l'horizon B seulement. L'hématite n'apparaît pas nettement dans la fraction < 2 μ, ce qui montre son origine probablement primaire, puisque localisée dans les sables.

La calcite se développe brusquement dans l'horizon (B) et pénètre le haut de l'altérite (C₁). Sa présence est nulle ou infime dans le haut du solum et à la base de l'altérite.

(c) FORMES DU FER

La quantité globale du fer est élevée, de 10 à 12 % dans

l'ensemble du sol. La valeur la plus élevée, 12,7 %, se situe à la base de l'altérite, là où l'hématite est la plus abondante. Dans l'altérite le fer est réparti entre les minéraux primaires silicatés, l'hématite également primaire, et la beidellite ferri-fère. Les oxydes de fer « libre », probablement à l'état d'hématite, ne représentent que 20 % du fer total ; il n'y a pas d'oxy-hydroxyde secondaire, même à l'état « amorphe ». Dans le solum, la proportion de fer « libre » augmente légèrement, de 20 à 30 %, bien que l'hématite diminue ; il s'agit d'une forme mal cristallisée de goethite, car la proportion de fer « amorphe » ne représente que 15 à 20 % du fer libre. La faible proportion du fer « amorphe » indique une évolution nettement plus avancée de l'altération dans ce sol que dans celui d'Aiguaviva.

8. INTERPRÉTATION

8.1. Facteurs de formation des sols

Les deux sols étudiés sont bien différents malgré leur proximité (fig.1) et, bien que leurs facteurs de formation paraissent très semblables : matériau originel à prédominance volcanique, climat sub-méditerranéen (à saison sèche atténuée), végétation naturelle originelle de type chênaie (*Quercus* divers actuellement dégradée de la même manière (mélange de *Quercus*, *Pinus*, *Cistus*, etc...), bon drainage du sol. Cependant une différence existe dans la nature et l'âge des matériaux originels, différence qui a modifié les conditions géochimiques et la durée de la pédogénèse. En outre, il n'est pas sûr que les conditions climatiques aient été invariables et identiques, du moins pour le sol dont les matériaux sont les plus anciens.

8.1.1. NATURE DES MATÉRIAUX ORIGINELS

(a) Aiguaviva

Le matériau volcanique basaltique, probablement émis par une coulée pyroclastique fissurale, est fortement mêlé de blocs et cailloux granitiques qui ont pu être arrachés au cortex encaissant et représentent près de 50 à 60 % du matériau. C'est pourquoi l'examen microscopique et minéralogique montre en même temps, quartz, feldspaths, orthoclases et plagioclases, micas, augite et olivine. Cependant, l'accroissement en quartz et en micas dans le haut du profil peut témoigner d'une pollution superficielle par des produits érodés des matériaux granitiques environnants, ou seulement signifier une altération préférentielle des minéraux les plus altérables (augite et olivine).

(b) Maçanet

La lave observée à quelque distance de Maçanet par VAS-SART (1968) a la composition d'une basanite à néphéline et calcite. Le fait que cette roche contienne un peu de calcite pourrait indiquer une pré-altération hydrothermale. Mais dans le cas du profil observé le matériau est tout différent et complexe.

L'altérite est formée à partir de lapilli d'une lave scoria-

cée, sombre et alcaline, dont la composition pouvait être celle d'un trachybasalte ou d'une trachyandésite. Ces lapilli ont été probablement oxydés à l'origine, si l'on considère que l'hématite est primaire, car les spinelles oxydés ont conservé leur place initiale. En outre ces lapilli sont probablement anciens, car ils sont fortement altérés et seule l'anorthose reste identifiable (par diffraction de rayons X). Le matériau du solum est formé pour l'essentiel de lapilli beaucoup plus récents, car pour la plupart peu altérés ; plagioclases et minéraux ferro-magnésiens restant bien identifiables. En outre ces lapilli sont plus siliceux et leur composition est plus trachytique ; ils contiennent en outre un peu de quartz et de micas. La pollution du sol superficiel par des produits granitiques environnants n'est pas évidente, sinon très faible. Le solum a donc été fortement rajeuni par des produits pyroclastiques récents et de nature plus siliceuse et plus alcaline encore que le matériau sous-jacent.

8.1.2. DURÉE DE LA PÉDOGÉNÈSE

La durée de la pédogénèse est mal connue dans les deux cas. D'après certaines données de la littérature géologique, nous pensons que l'âge des matériaux volcaniques était bien différent : près de 5 MA à Maçanet (DONVILLE, 1973), Pléistocène à Aiguaviva (BECH, 1982). En réalité à Maçanet les strates inférieures de produits pyroclastiques sont probablement d'une venue bien antérieure aux éruptions d'Aiguaviva, car les lapilli semblent plus altérés ; mais leur âge serait plutôt Pléistocène que Pliocène. Cependant, à la partie supérieure du sol de Maçanet, les produits volcaniques sont beaucoup plus récents, peut-être d'âge Pléistocène supérieur, car la plupart des lapilli sont encore peu altérés, moins même apparemment que ceux du sol d'Aiguaviva. Dans ce dernier, ce sont les produits granitiques moins altérés, parce que plus lentement altérables que des lapilli basaltiques, et présents en abondance (50 à 60 % du volume), qui font que le sol est demeuré riche en minéraux primaires altérables (feldspaths et micas).

Il n'est donc pas certain, voire improbable, que l'âge des matériaux volcaniques puisse expliquer, à lui seul, les différences observées entre les sols d'Aiguaviva et de Maçanet. La nature diverse des matériaux originels explique mieux les différences dans la composition des produits d'altération. Cependant, à Maçanet les variations d'âge et de nature des produits pyroclastiques entre la base et le sommet du profil permettent de mieux saisir la différenciation de la pédogénèse dans le sol et dans l'altérite.

8.1.3. CLIMAT ET FLUCTUATIONS

Le climat actuel de type méditerranéen « atténué » (BECH, 1982), c'est-à-dire plus humide que la normale pendant la saison sèche estivale, pourrait rendre compte de l'argilo-génèse encore active, mais pas de la formation de calcite. Car, seul le sol de Maçanet, dont l'âge de l'altérite est plus ancien, présente cette formation ainsi qu'une rubéfaction plus accentuée. Il est probable que le climat a varié au

cours du Quaternaire, comme cela a été observé dans d'autres régions méditerranéennes. Ceci est suggéré par la succession de cutanes qui est apparue dans les pores de l'altérite du sol de Maçanet, à savoir : argilo-ferranes, calcitanes, ferranes ou argilo-ferranes. A des conditions initiales chaudes et humides, auraient vraisemblablement succédé des conditions plus arides, puis à nouveau plus humides.

8.2. Processus de formation des sols.

8.2.1. SOLS D'AIGUAVIVA

Il s'agit d'un sol brun à profil peu différencié. Il est semblable aux sols formés sur des matériaux granitiques dans la Sierra de Prades et le Maresme (BECH *et al.* 1983). En effet, il dérive pour une part importante de graviers de microgranite, mêlés à des lapilli basaltiques. L'altération incomplète des minéraux primaires et la faible différenciation du sol s'expliquent à la fois par l'âge récent de sa formation et par l'altération lente du microgranite.

Ce sol se caractérise par une argilification croissante vers le sommet, soulignée par l'accroissement relatif des minéraux les plus stables (quartz, micas). Le pH est neutre et le taux de saturation en bases (Ca^{2+} et Mg^{2+}) est élevé dans la majeure partie du sol, sauf l'horizon humifère qui est légèrement acide et désaturé. La richesse en ions Ca^{2+} et Mg^{2+} s'explique par l'altération active des plagioclases et de minéraux ferromagnésiens provenant des lapilli basaltiques. Quelques ferro-argilanes à la base du solum témoignent cependant d'un début de migration des argiles, à courte distance, qui n'est pas visible sur le terrain.

La formation d'argiles et d'un peu d'oxydes de fer (hématite), ainsi que l'absence de calcitanes, montrent que le processus d'altération par hydrolyse est actif et que la saison sèche n'est pas assez marquée pour provoquer une accumulation de calcaire. Donc il y a une adéquation satisfaisante entre le processus de la pédogenèse et le climat actuel.

Les minéraux argileux sont en majeure partie mal définis, de type illite « ouverte », chlorite et interstratifiés 10-14 M ou C ; ils dérivent de micas, ou de feldspaths altérés en phyllites micacées, ou de ferro-magnésiens chloritisés. La présence de smectite de néogenèse n'est pas nette. La métahalloysite elle-même, provenant de l'altération des plagioclases, est mal cristallisée. Les oxy-hydroxydes de fer secondaires sont surtout à l'état crypto-cristallin, ce qui produit la couleur brune ; il n'y a que très peu d'hématite. Tous ces caractères minéralogiques s'expliquent par une convergence de trois facteurs : une pédogenèse récente, l'importance des microgranites dont l'altération est lente et fournit des argiles de transformation (de phyllites micacées ou de chlorites), et aussi un processus ménagé d'altération qui évoque des conditions de climat tempéré et modérément humide. Toutefois, la quasi-absence d'alophaane, à la différence des andosols d'Olot qui dérivent de basaltes holocènes (BECH *et al.*, 1976), signifie sans doute un âge plus ancien des lapilli basaltiques d'Aiguaviva (Pléistocène supérieur ?) et aussi un climat moins humide qu'à Olot.

8.2.2. SOL DE MAÇANET

Globalement, le profil présente des caractères d'altérite rouge fersiallitique à la base, de mollisol au sommet et d'accumulation calcaire friable à l'interface entre solum et altérite. C'est un sol bien différencié. Cependant, les lapilli volcaniques du matériau originel sont moins altérés près de la surface. C'est donc un sol rajeuni, marqué d'une part par une altération active, et d'autre part par les effets de la rubéfaction et de l'accumulation calcaire. Le pH est neutre dans le haut du solum et légèrement alcalin dans l'altérite ; le sol est totalement saturé en bases échangeables, surtout en calcium. L'humus de type mull est abondant dans le haut du solum, jusqu'à 40 cm, puis diminue brusquement et devient peu abondant dans l'horizon (B). La fraction argileuse est constituée principalement de beidellite et d'hématite, et le fer « libre » est à plus de 80 % à l'état bien cristallisé, comme c'est le cas dans les sols fersiallitiques.

Le sol de Maçanet est en réalité un sol complexe. C'est un bisequum. Il s'est développé successivement à partir de deux matériaux pyroclastiques d'âge différent. C'est aussi un sol polycyclique. Les conditions de la pédogenèse et donc ses produits se sont modifiés au cours du temps sous l'effet de fluctuations climatiques. Enfin c'est un sol complexe, car la formation du sol récent a interféré sur l'évolution du sol ancien, l'horizon (B) incorporant des produits des deux matériaux et l'altérite étant enrichie par de nouveaux produits d'altération.

A la base du sol, l'altération est très avancée en un plasma rouge-foncé, argileux et ferrifère, composé de beidellite, halloysite et hématite. Ces minéraux sont bien cristallisés et les argiles sont probablement des produits de néosynthèse. Il ne reste que les minéraux primaires les moins altérables, essentiellement des feldspaths alcalins de type anorthose. L'hématite elle-même est en grande partie héritée ; mais une partie a sans doute été redistribuée ou néoformée.

Dans le solum, le degré d'altération est plus modéré ; il demeure une part importante de plagioclases et de minéraux ferro-magnésiens (biotite, pyroxène). Le plasma est aussi argileux et ferrifère ; mais sa couleur est plus brune, car il y a un peu de goëthite et moins d'hématite. Les minéraux argileux pour la plupart sont bien cristallisés : la beidellite prédomine ; l'halloysite est déshydratée en métahalloysite, sous l'effet de la dessiccation estivale. Mais il apparaît aussi un peu d'argile de transformation de type illite « ouverte » et d'oxy-hydroxyde de fer mal cristallisé de type goëthite. Ce caractère minéralogique du solum de Maçanet le rapproche un peu du sol d'Aiguaviva. Cependant, le fait que les minéraux argileux soient pour la plupart bien cristallisés et de néosynthèse s'explique par l'absence de microgranites ; l'altération des lapilli volcaniques ne fournit probablement pas de produits de transformation (hormis les rares biotites observées dans le haut du sol).

Le deuxième caractère original du sol de Maçanet est la différenciation des cutanes, argilanes, argilo-ferranes, calcitanes, ferranes, et aussi leur succession. Cette différenciation

se développe surtout à la base du solum. Elle prend naissance dans l'horizon (B), au lieu même où s'interpénètrent les deux matériaux originels et les deux pédogenèses successives. La différenciation de cutanes est alors limitée aux vides des fentes verticales. Puis, elle s'accroît dans l'horizon (B) — C, au sommet de l'altérite, où elle remplit presque tous les pores. Enfin, elle disparaît à la base de l'altérite. Ceci suggère que la formation des cutanes, même de la première génération de produits argilo-ferrugineux, s'est développée à la suite du rajeunissement par un nouvel apport de lapilli volcaniques. En effet, il semble que ce sont les produits d'une nouvelle altération qui sont venus précipiter sur les parois des vides dans la précédente altérite ; car les argiles de type beidellite, recouvertes de ferranes rouges d'hématite, sont en feuillets bien cristallisés et orientés parallèlement aux parois.

Il est probable que le processus d'altération et d'illuviation, qui correspond à la première génération de cutanes argilo-ferrugineux, s'est développé dans des conditions analogues à celles qui prévalent pour la genèse de sols fersiallitiques. Puis des calcitanes se sont formés, qui ont revêtu les cutanes précédents, remplissant presque tous les vides au sommet de l'altérite et envahissant même par remplacement une partie des argilanes. Cette deuxième génération de cutanes est sans doute apparue lors d'une période à climat présentant une saison sèche plus accentuée. Finalement une troisième génération de cutanes, argilo-ferrugineux ou simplement d'hématite, se développe depuis le sommet du solum, surtout dans les fentes verticales ; elle s'insère ensuite au centre des chenaux laissés vacants par les calcitanes. Cette dernière formation, peu importante, semble contemporaine de la pédogenèse actuelle. Elle est similaire aux cutanes observés dans le sol d'Aiguaviva.

8.3. Classification

La caractérisation et l'interprétation des propriétés des deux sols conduisent aux propositions suivantes de classifications dans les systèmes du C.P.C.S. (1967), de la Soil Taxonomy (U.S.D.A., 1975) et de la F.A.O. (1974).

8.3.1. SOL D'AIGUAVIVA. Le profil de type A (B) C, est faiblement différencié. Le sol peut être considéré comme jeune. Mais, bien que dérivant en partie de lapilli basaltiques d'âge récent, il n'a pas les caractères d'un andosol ; car les produits d'altération sont formés de minéraux argileux et non d'allophane. La couleur brune du sol, la faible profondeur de l'horizon A et de l'horizon (B), les marques très discrètes d'illuviation argileuse, le taux élevé de saturation en bases échangeables, l'abondance de minéraux primaires altérables et la formation d'argiles interstratifiées (de transformation), la prédominance d'hydroxydes de fer à l'état « amorphe », permettent de classer ainsi le sol d'Aiguaviva :

— C.P.C.S. : Classe, Sols Brunifiés ; sous-classe, des climats tempérés humides ; Groupe, Sols Bruns ; Sous-groupe, modal, eutrophe ; Famille, matériau originel mixte de lapilli basaltiques d'âge récent et de microgranite ou granite.

— Soil Taxonomy : Typic Xerochrepts.
— FAO/UNESCO : Cambisol eutrique.

8.3.2. SOL DE MAÇANET. Ce sol est complexe. La notation des horizons A_{11} , A_{12} , (B), C_1 , C_2 , qui avait été utilisée pour décrire la morphologie du profil pourrait être valablement remplacée par : A_{11} , A_{12} , B_{tca} II B_{tca} II (B)-C. En effet, le (B) est illuvié en produits argilo-ferrugineux et en calcaire ; de plus, il incorpore des produits de l'altérite antérieure. Le C_1 est plus profondément altéré et il présente de nombreux ferro-argilanes et calcitanes. Enfin le C_2 est lui aussi plus altéré et argilifié que l'horizon (B).

En première approximation, si l'on néglige l'origine complexe du matériau volcanique et l'importance de l'illuviation argilo-ferrugineuse, peu évidente sur le terrain, on pourrait considérer que le sol de Maçanet comporte seulement un horizon A mollique, des horizons B_{ca} et C_{ca} et une altérite rubéfiée. Ce qui amène à le classer ainsi :

— C.P.C.S. : Classe, Sols Isohumiques ; Sous-classe, à complexe saturé, évoluant sous un pédo-climat frais pendant les saisons pluvieuses (régime méditerranéen) ; Groupe, Sols Marrons ; Sous-groupe, rubéfiés ; Famille, dérivant de lapilli volcaniques. Ce sol s'apparente aux sols marrons décrits par RUELLAN (1971) et DUCHAUFOR (1979), ainsi qu'aux sols cinnamoniens des auteurs soviétiques.

— Soil Taxonomy : Calcic Haploxerolls.

— FAO/UNESCO : Kastanozem haplique ; en fait proche de calcique, car il y a 14 % de $CaCO_3$ en B_{ca} et 12 % en C_{ca} .

En deuxième approximation, on pourrait envisager le caractère complexe et polycyclique du sol, marqué par : le rajeunissement du solum par des lapilli volcaniques, la brusque diminution de la teneur en matière organique entre A_1 et B_{ca} , la couleur rouge et la composition fersiallitique de l'altérite, l'enrichissement secondaire de l'horizon B et de l'altérite en produits argilo-ferrugineux puis carbonatés. Ce qui conduirait à le classer dans le système C.P.C.S. comme : Classe, Sols à Sesquioxydes de fer ; Sous-classe, Sols Fersiallitiques ; Groupe, à réserve calcique et peu lessivés ; Sous-groupe recalifiés. DUCHAUFOR (1977) considère que les sols marrons sont un intergrade « isohumique fersiallitique ».

8.4. Propriétés agronomiques

8.4.1. LE SOL D'AIGUAVIVA a des propriétés physiques et chimiques favorables à la croissance des plantes cultivées : une bonne structure, permettant une bonne aération du sol et la pénétration des racines, un pH proche de la neutralité, une abondance d'éléments facilement assimilables ou en réserve dans des minéraux altérables. Cependant la très grande perméabilité du sol et l'abondance des cailloux à faible profondeur restreignent la fertilité potentielle du sol, par suite d'un risque de rétention insuffisante de l'eau en saison sèche et de limites physiques à certaines aptitudes culturales. Ce sol convient mieux à la culture de plantes annuelles à cycle court, se développant pendant la saison humide.

8.4.2. LE SOL DE MAÇANET présente aussi des caractères physiques et chimiques qui permettent une bonne fertilité. L'abondance de produits limono-argileux à la base du solum et dans l'altérite assurent une bonne rétention de l'eau. Ce sol convient donc aussi bien à des plantes annuelles qu'à des plantes pérennes à enracinement profond. Mais le pH alcalin et l'abondance du calcaire à la base du solum, restreignent probablement les aptitudes culturales à des plantes calcicoles.

CONCLUSION

Les sols d'Aiguaviva et de Maçanet sont bien différents, quoique leurs conditions écologiques, et notamment leur origine volcanique, paraissent semblables à première vue.

Leurs caractères conduisent à les classer ainsi :

— Le sol d'Aiguaviva est un sol Brun modal et eutrophe, qui dérive d'un matériau mixte de lapilli basaltiques et de microgranites.

— Le sol de Maçanet est un sol Marron rubéfié, à pseudomycélium calcaire, dérivant de lapilli volcaniques.

Les caractères minéralogiques et micromorphologiques permettent d'expliquer la genèse et la différenciation des deux sols :

— Le sol Brun d'Aiguaviva est en fait un sol encore faiblement différencié, qui dérive d'un matériau mixte de lapilli basaltiques d'âge récent et de microgranites (arrachés lors de l'éruption aux parois de la cheminée ?) en quantité au moins égale. L'abondance de minéraux primaires facilement altérables (augite, olivine, plagioclases), une argilification croissante vers le haut du profil, la prédominance d'argiles mal cristallisées ou interstratifiées, la localisation du fer surtout dans les silicates, ou le fer « libre » demeurant à l'état cryptocristallin, la présence très restreinte de cutanes d'illuviation

argilo-ferrugineuse, sont autant d'indications d'un sol jeune, en début d'altération (Inceptisol).

— Le sol Marron de Maçanet est en réalité un sol complexe et polycyclique. Il est constitué à partir de deux matériaux volcaniques pyroclastiques d'âge nettement plus anciens. Ces matériaux ne sont pas mêlés à des microgranites ; mais leur composition, plutôt trachytique, justifie la présence de feldspaths alcalins (anorthose, albite) et d'un peu de quartz. En outre, l'origine purement volcanique explique la formation prédominante d'argiles bien cristallisées de néosynthèse, de type beidellite et halloysite.

L'argilification est plus importante dans la partie inférieure du sol, plus ancienne et décrite comme altérite. En réalité, l'altération profonde des lapilli et la composition minéralogique des produits d'altération, essentiellement constituée de beidellite ferrique, d'halloysite et d'hématite, apparentent cette partie du profil à un sol fersiallitique. La partie supérieure et humifère du solum est beaucoup moins altérée ; elle présente des caractères d'épipédon mollique. Mais l'horizon B est brun-rouge foncé à rouge foncé, peu humifère et il incorpore des produits des deux matériaux originels, l'un peu altéré, l'autre davantage. En outre, la différenciation importante de cutanes à la base du solum et au sommet de l'ancienne altérite, ainsi que la succession de leur formation, d'abord argilo-ferrugineux rouges, puis calcaires, montrent une genèse polycyclique : un climat plus sec ayant succédé à un autre plus humide. Enfin, une très légère reprise de l'illuviation argilo-ferrugineuse au sommet du sol, comparable à celle observée à Aiguaviva, confirme l'hypothèse d'une fluctuation climatique, à laquelle le sol d'Aiguaviva aurait pu échapper.

Ce sont donc la superposition de deux matériaux volcaniques d'âge différent et une double évolution climatique qui permettraient d'expliquer la différenciation du sol de Maçanet, non un seul processus actuel. D'où son caractère intergrade « isohumique-fersiallitique ».

BIBLIOGRAPHIE

- BECH-BORRAS (J.), 1982. — Introduction à l'étude de quelques sols de Catalogne. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* vol. XIX, n° 3 : 221-232.
- BECH-BORRAS (J.), QUANTIN (P.), SEGALÉN (P.), 1976. — Etude des Andosols d'Olot (Gerone, Espagne). Première partie. Ecologie, morphologie, caractéristiques physiques et chimiques. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* vol. XIX, n° 1 : 73-87. Deuxième partie. Caractéristiques minéralogiques. Conclusions. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* vol. XIV, n° 2 : 95-112.
- BECH-BORRAS (J.), FEDOROFF (N.), QUANTIN (P.), SEGALÉN (P.), 1982. — Etude des sols fersiallitiques lessivés formés sur des arènes granitiques de la Selva (Catalogne, Espagne). *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* vol. XIX, n° 3 : 233-256.
- BECH-BORRAS (J.), CARDUS (J.), LASALA (M.), LAMOUREUX (M.), QUANTIN (P.), SEGALÉN (P.), 1983. — Etude des sols bruns formés sur arènes granitiques de la bordure septentrionale de la Sierra de Prades (Tarragone, Espagne). *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* vol. XX, n° 1 : 63-71.
- BOLOS (O. de), 1979. — Els sols i la vegetació dels Països Catalana. In « Geografia física dels Països Catalans ». Ketres : 107-158.
- Comité de Pédologie et de Cartographie des Sols (C.P.C.S.), 1967 — Classification des sols. Mimeo ENSA Grignon, 87 p.
- DONVILLE (B.), 1973. — Ages potassium-argon des roches granitiques de la dépression de la Selva (Nord Est de l'Espagne). *C.R. Acad. Sci.* (Paris), 277 p.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1977. — Pédologie. 1. Pédogenèse et classification. Masson, 477 p.
- FAO/UNESCO, 1974. — Carte Mondiale des sols. Vol. 1. Légende, UNESCO, Paris, 62 p.
- RUELLAN (A.), 1971. — Les sols à profils calcaire différencié des plaines de la basse Moulouya. Thèse Doc. d'Etat Strasbourg. *Mem. ORSTOM* n° 54, 302 p.
- USDA — Soil Survey Staff, 1975. — Soil Taxonomy. A basic system of Soil Classification for making and interpreting soil surveys. Agric. Handbook n° 436, 754 p., Washington D.C.
- VASSART (N.), 1968. — In TOURTON J., 1968. — Le volcanisme de la province de Gerone, Espagne. Thèse de 3^e cycle. Paris.