

# Étude de deux sols andiques dérivés de roches volcaniques d'Italie du Sud (Monts Roccamonfina et Vulture), à caractère cryptopodzolique

## 2. Formes de la matière organique et du phosphore; interprétation générale

Luciano LULLI (1), Donatella BIDINI (1), Bernard DABIN (2) et Paul QUANTIN (2)

(1) *Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo, Piazz. d'Azeglio, 30-50121 Firenze (Italie)*

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

### INTRODUCTION

Cette étude concerne deux sols andiques, localisés respectivement à Roccamonfina et au Mont Vulture, en Italie du Sud. La première partie, dans le précédent article, a traité de l'environnement et des principaux caractères de la morphologie et des constituants minéraux de ces deux sols.

Les deux sols dérivent de matériaux pyroclastiques alcalins, d'âge récent. Ils se sont formés en un climat proche de tempéré-humide, en raison de leur altitude (700 à 1 300 m).

Le sol de Roccamonfina est complexe ; il présente les caractères d'un sol andique et désaturé dans sa partie supérieure, puis brun-acide à fragipan dans sa partie inférieure. Dans le haut du profil, il contient un peu d'allophane et beaucoup d'alumine « amorphe » — non liée à l'allophane. On observe un fort développement d'halloysite en profondeur, et simultanément la disparition de l'allophane et de l'alumine « amorphe ».

Le sol du Vulture paraît homogène et présente les caractères typiques d'un andosol très humifère, dérivant de cendres volcaniques ; il est peu acide et modérément désaturé. Il contient beaucoup d'allophane et d'alumine « amorphe » — non liée à un silicate, dans le haut du profil ; puis il s'enrichit en imogolite en profondeur, en même temps que l'alumine — non liée à un silicate disparaît. De l'halloysite apparaît à la base du profil, dans l'altération d'un matériau scoriacé d'origine différente de celui du sol. Le caractère spodique des horizons B<sub>21</sub> et B<sub>22</sub>, marqué par le rapport élevé de :

$$\frac{\text{Fe} + \text{Al Pyrophosphate}}{\text{Fe} + \text{Al Dithionite}}$$

(LULLI et BIDINI, 1978 et 1980) n'est pas évident dans la morphologie du profil.

La deuxième partie de l'étude va analyser en détail les formes de la matière organique et du phosphore. Ensuite, une interprétation générale permettra d'aborder les problèmes de la pédogenèse et de la classification de ces deux sols, ainsi que les possibilités de leur utilisation.

### 1. FORMES DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

#### 1.1. Méthodologie

L'analyse du carbone organique total (par la méthode du bichromate-sulfurique ou par combustion et coulométrie) permet de calculer le taux de matière organique totale. L'azote total, minéralisé par l'acide sulfurique, a été dosé selon la méthode Kjeldahl.

Le fractionnement des matières humiques a été effectué dans les sols de Roccamonfina et Vulture selon la méthode DABIN (1971), par plusieurs extractions successives : prétraitement acide par H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (2M), épuisement par le pyrophosphate de sodium (0,1 M), épuisement par la soude (0,1 N) à froid. Le carbone de chaque extrait est dosé par les mêmes techniques que le carbone total.

L'acide phosphorique dont la densité est de 1,1-1,2 permet de séparer par flottation et centrifugation les matières végétales légères non liées à la matière minérale. (Le sol a été préalablement broyé et tamisé à 0,5 mm). Le filtrat phosphorique contient une fraction soluble d'acides fulviques, qui sont des acides fulviques libres, formant des complexes avec

des oxydes métalliques. Les acides humiques extraits par le pyrophosphate de soude, ainsi que les acides fulviques qui leur sont liés, sont des composés fortement oxydés, possédant de nombreuses fonctions carboxyliques, donnant également des complexes métalliques ; leur degré de polymérisation est variable ; on le détermine par électrophorèse.

Après l'épuisement par le pyrophosphate, la soude diluée à 0,1 N extrait des formes généralement moins oxydées et plus condensées des acides humiques, qui font la liaison avec l'humine (héritée ou d'insolubilisation) dont ils proviennent au cours de l'humification. Les acides fulviques séparés de cette fraction sont des substances provenant de la dissolution de produits organiques peu transformés, ce sont des substances « préhumiques » ou « précurseurs », riches en composés aliphatiques et peu polymérisées.

L'électrophorèse est également appliquée aux acides humiques de l'extrait soude pour déterminer leur degré de polymérisation. Le résidu solide de tous ces extraits contient encore de 50 à 70 % de la matière organique du sol, on l'appelle « Humine globale ». L'humine est un mélange de substances proches de la matière végétale, mais fortement « collées » à la matière minérale et aussi de produits transformés, plus ou moins fortement polymérisés, riches en chaînes aliphatiques, mais pauvres en fonctions carboxyliques. Cette humine est fortement liée à la matière minérale ; on peut l'extraire par la soude ou par densité après des prétraitements acides énergiques à chaud.

On obtient dans le cas le plus simple 7 fractions :

- les matières organiques légères MOL ;
- les acides fulviques libres AFL ;

- les acides fulviques pyrophosphate AFP ;
- les acides humiques pyrophosphate AHP ;
- les acides fulviques soude AFS ;
- les acides humiques soude AHS ;
- l'humine globale est déterminée par le carbone total du culot.

Le dosage de carbone et d'azote des fractions peut être effectué par un appareil d'analyse élémentaire CHN, ou bien par oxydation sulfochromique pour le carbone, et l'attaque Kjeldahl pour l'azote.

Les résultats sont globalement comparables à ceux de la méthode DUCHAUFOR et JACQUIN (1963). L'électrophorèse sur bande de papier permet de distinguer des acides humiques très peu mobiles, dits acides humiques gris, des produits intermédiaires et des acides humiques, plus mobiles, appelés acides humiques bruns.

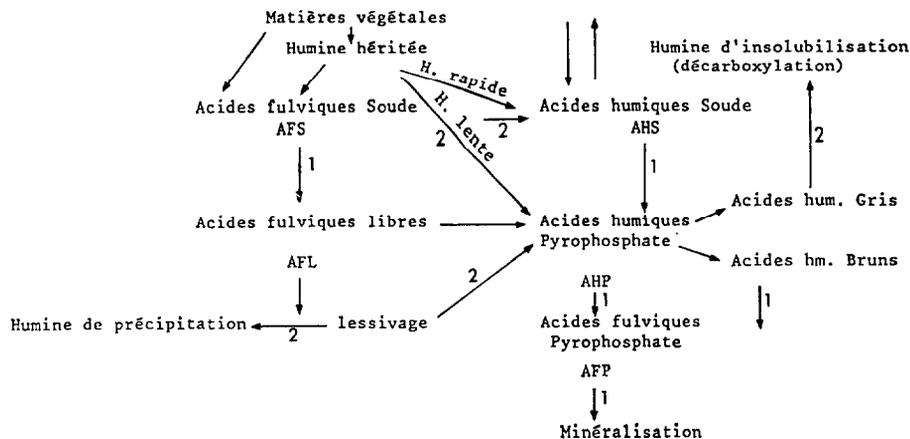
Les lectures sont faites au densitomètre optique, en lumière blanche et aux longueurs d'onde 625 nm et 512 nm ; le rapport des densités optiques

moyennes  $\left(\frac{625}{512}\right)$  des différentes fractions, renseigne

sur leur degré de polymérisation ; il est généralement inférieur à 0,5 pour les acides humiques bruns (AHB) et entre 0,5 et 0,9 pour les acides humiques gris (AHG), les valeurs proches de 1 indiquent des condensations élevées.

La répartition quantitative et qualitative des fractions de l'humus en fonction de la profondeur des profils, renseigne sur l'évolution de l'humus dans les différents types de sol.

On peut schématiser l'évolution de l'humus dans le sol par le graphique suivant :



NB. { 1 = oxydation  
2 = condensation

1.2. Résultats

1.2.1. MATIÈRE ORGANIQUE TOTALE (tabl. I)

(a) Profil Roccamonfina

La matière organique est très abondante dans la partie supérieure du profil (A<sub>11</sub>, A<sub>12</sub>), où elle décroît progressivement de 22 à 4 % de A<sub>11</sub> à B<sub>1</sub>. Le rapport C/N élevé, de 24 à 17, marque un Mull-acide, oligotrophe. Dans la partie inférieure (B<sub>2</sub>, Cx) le taux de matière organique chute brusquement (2 à 1 %), tandis que le rapport C/N diminue fortement (13 à 11), montrant une minéralisation plus poussée, en dépit d'un pH 5,5. Ces caractères sont habituels dans les sols bruns-acides.

(b) Profil Vulture

La matière organique est très abondante dans tout le profil (de 27 à 10 %), jusqu'à l'horizon C, où elle chute brusquement à 1 %. Une basse valeur du rapport C/N (~ 11 à 9), dès l'horizon A<sub>11</sub>, marque une bonne minéralisation et un Mull eutrophe. Mais, l'horizon B<sub>21</sub> se distingue par un brusque accroissement du taux de matière organique (de 12 à 15 %) et du rapport C/N (de 9 à 20), qui marque une discontinuité entre les horizons A<sub>3</sub> et B<sub>22</sub>. Cette anomalie peut indiquer, soit un horizon spodique humifère, [B<sub>23</sub>], soit un horizon A<sub>1</sub> enterré (parce que C/N est double en B<sub>21</sub> relativement au A<sub>11</sub> superficiel).

TABLEAU I  
Matière organique totale, en % du sol < 2 mm

Profil Echantillons	Profondeur cm	M.O. %	C %	N %	C/N
<b>Roccamonfina</b>					
6R A11	0-26	21,50	12,5	0,51	24
6R A12	26-56	9,36	5,44	0,29	19
6R B1	56-88	4,15	2,42	0,14	17
6R B2	88-132	2,20	1,28	0,10	13
6R Cx	132-160	1,20	0,69	0,06	11
<b>Vulture</b>					
3V A11	0-19	27,10	15,60	1,35	11
3V A12	19-33	22,23	12,90	1,26	10
3V A3	33-50	11,82	6,81	0,79	9
3V B21	50-80	15,13	8,80	0,43	20
3V B22	80-140	10,15	5,90	0,55	11
3V C	140-160	1,46	0,85	0,12	7

1.2.2. FRACTIONNEMENT CHIMIQUE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE (tabl. II et III)

(a) Profil de Roccamonfina (fig. 1)

Il y a une diminution rapide de l'ensemble des fractions de A<sub>11</sub> à A<sub>12</sub>, puis un ralentissement en B<sub>1</sub>, marqué par une remontée des acides fulviques-pyrophosphate.

En valeur absolue la diminution du taux d'humine suit celle du carbone total; elle est très rapide entre A<sub>11</sub> et A<sub>12</sub>, puis se ralentit en profondeur.

Les différentes fractions des acides fulviques et acides humiques diminuent en A<sub>11</sub> et A<sub>12</sub> parallèlement à l'humine :

. Dans l'horizon A<sub>11</sub>, la dominance de l'humine-héritée, des acides fulviques libres et des acides humiques-soude, indique une matière organique jeune, en cours d'humification active.

. A partir de l'horizon A<sub>12</sub>, il est plus intéressant de considérer les valeurs relatives (fig. 1b). Les acides humiques-pyrophosphate, qui sont des formes de maturation, augmentent au détriment des autres formes (ac. humiques-soude, ac. fulviques-soude, ac. fulviques libres), qui diminuent. En A<sub>12</sub>, il y a donc maturation de l'humus, avec une stabilisation, qui semble liée avec un accroissement de l'alumine amorphe complexée.

. Dans l'horizon B<sub>1</sub>, il y a inversion du processus :

TABLEAU II  
Différentes fractions chimiques des matières humiques en C‰ du sol

Profil Echantillons	C Total ‰	CAF H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ‰	CAF Pyro ‰	CAF NaOH ‰	CAH Pyro ‰	CAH NaOH ‰	CAH Total ‰	CML ‰	C Humine ‰
Roccamonfina									
6R A11	125,0	10,34	5,38	2,83	6,32	6,58	12,90	1,77	91,98
6R A12	54,4	3,98	1,37	0,62	4,48	2,63	7,11	0,44	40,88
6R B1	24,2	3,12	2,13	0,16	1,69	2,35	4,04	0,92	13,83
							A.F.H.T.		
6R B2	12,8	2,64					0,64	0,06	9,46
6R Cx	6,9	1,28					0,23	0,04	5,35
Vulture									
3V A11	156,0	9,08	10,12	17,87	18,15	1,53	28,27	0,96	98,29
3V A12	129,0	13,53	9,66	3,58	9,13	5,54	18,79	0,25	87,56
3V A3	68,1	10,55	5,59	3,05	7,34	2,02	12,93	0,53	39,05
3V B21	88,0	21,60	6,85	4,98	11,19	2,30	18,04	0,12	40,96
3V B22	59,0	8,85	3,77	0,24	6,89	3,45	10,75	0,05	35,65
							A.F.H.T.		
3V C	5,1	2,68					0,45	0,06	1,91

CAF = ac. fulviques CAH = ac. humiques CML = matières légères Pyro = Na-pyrophosphate NaOH = soude H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> = ac. phosphorique

TABLEAU III  
Fractions chimiques des matières humiques en % de C total

Profil Echantillons	C Total ‰	AF libres PO <sub>4</sub> H <sub>3</sub>	Acides Fulviques		Acides Humiques		M.O.L. Mat. légères	Humine %	Taux d'extr. %
			AF Pyro	AF Soude	AH Pyro	AH Soude			
Roccamonfina									
6R A11	125	8,27	4,304	2,26	5,036	5,26	1,41	73,42	26,53
6R A12	54,4	7,31	2,51	1,13	8,23	4,83	0,80	75,14	24,86
6R B1	24,2	12,8	8,8	0,66	6,98	9,71	3,8	57,14	42,86
6R B2	12,8	20,6	-	-	5		0,47	73,9	26,1
6R Cx	6,9	18,5			3,33		0,57	77,5	22,5
Vulture									
3V A11	156	5,82	6,48	11,45	11,6	0,98	0,61	63,0	37,0
3V A12	129	10,48	7,48	2,77	7,07	4,29	0,19	67,8	32,2
3V A3	68,1	15,49	8,20	4,47	10,77	2,96	0,77	57,34	42,66
3V B21	88	24,5	7,78	5,65	12,7	2,6	0,13	46,5	53,5
3V B22	59,0	15	6,38	0,406	11,67	5,84	0,08	60,42	39,58
3V C	5,1	52,5			8,82		1,17	37,45	62,55

CAF = ac. fulviques CAM = ac. humiques CML = matières légères Pyro = Na-pyrophosphate H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> = ac. phosphorique

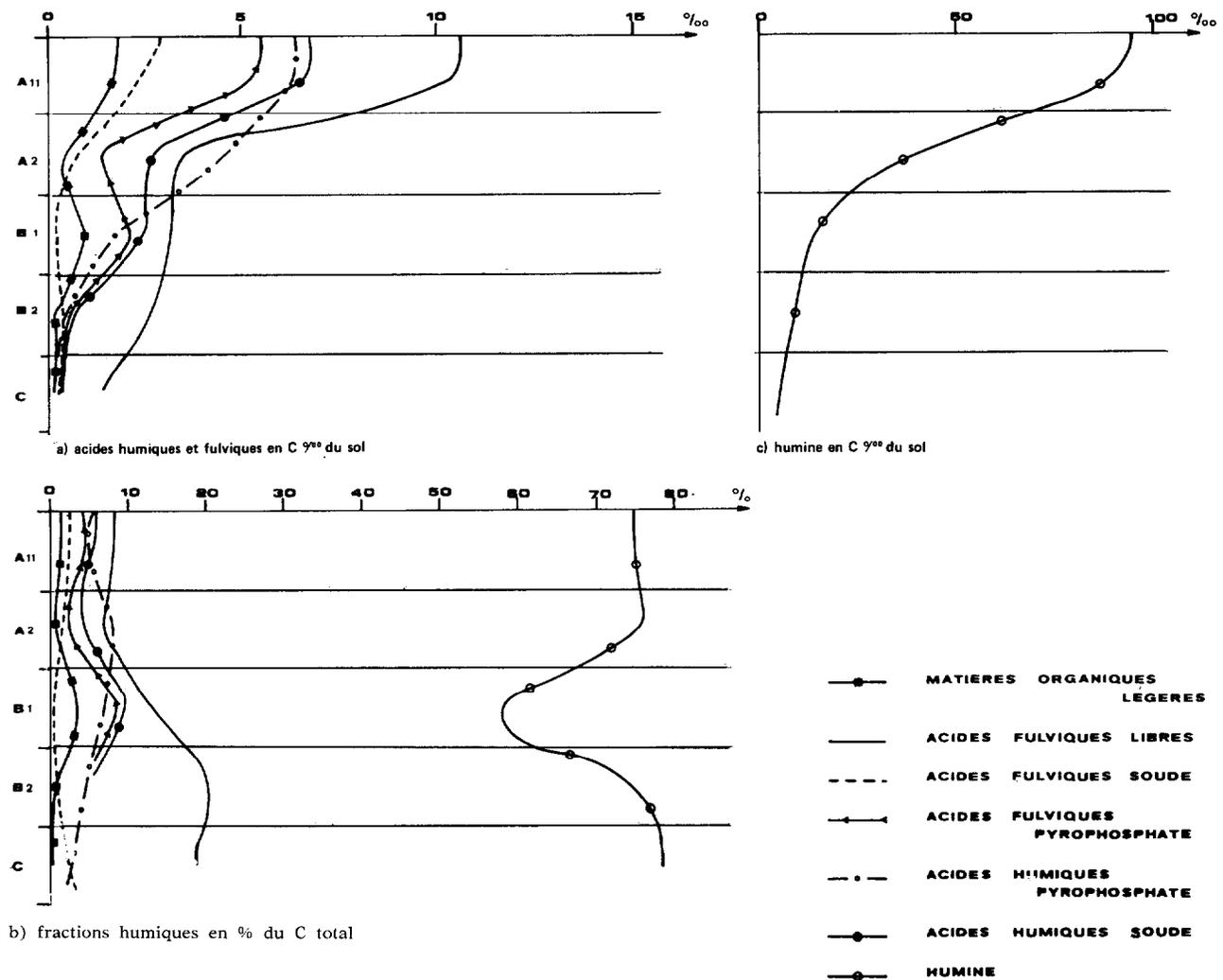


FIG. 1. — Répartition des fractions organiques du sol de Roccamonfina

l'humine se décompose et forme des acides humiques-soude. Les acides humiques-pyrophosphate se décomposent pour donner les acides fulviques qui leur sont liés (AFP). Les acides fulviques-soude disparaissent. Mais, les acides fulviques libres (AFL) augmentent en valeur relative en B<sub>1</sub>, et encore davantage en B<sub>2</sub>. En B<sub>1</sub>, il y a donc un phénomène important de dépolymérisation et de déstabilisation, corrélé avec une diminution de l'alumine complexée.

Dans l'horizon B<sub>2</sub>, il y a illuviation d'acides fulviques libres, qui augmentent relativement aux autres fractions, sauf l'humine de précipitation qui augmente aussi à nouveau. Mais les autres acides humiques et fulviques ont presque disparu, de même que l'alumine complexée, et en réalité le taux d'acides fulviques libres continue à décroître.

L'humine qui, jusqu'en B<sub>1</sub>, était formée en partie d'humine héritée (proche de la matière végétale), se décompose et devient en profondeur de l'humine de précipitation, par la transformation des acides fulviques qui y ont migré. Presque toutes les autres formes de l'humine se décomposent et disparaissent en B<sub>2</sub> et C<sub>x</sub>.

(b) Profil du Vulture (fig. 2)

Les fractions montrent une distribution irrégulière dans le profil, notamment en B<sub>21</sub>, comme l'indiquait déjà la matière organique totale, et une chute brusque dans l'horizon C.

Fractions les moins mobiles (ac. humiques-pyrophosphate, acides humiques et fulviques-soude), en valeur absolue : on observe une répartition

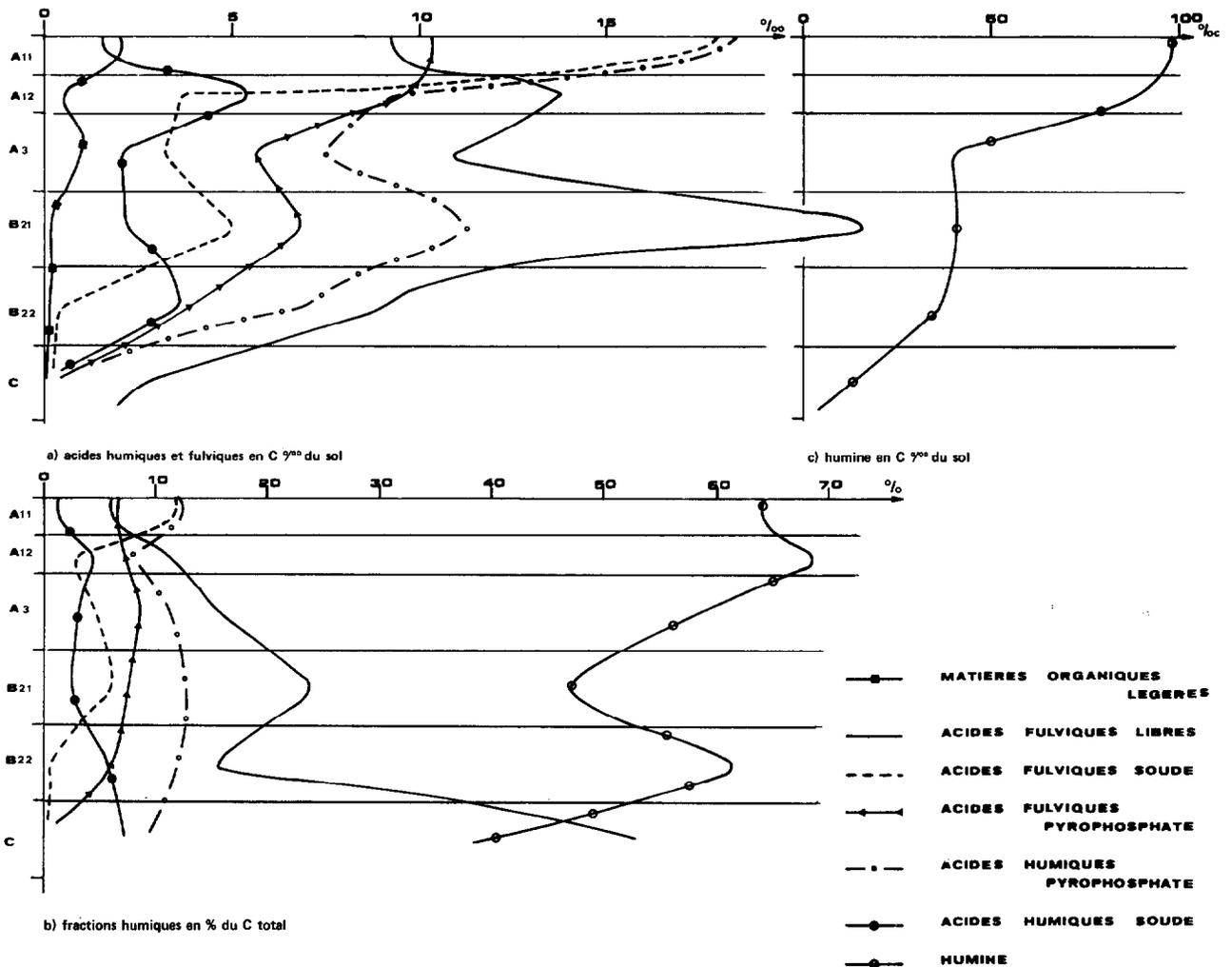


FIG. 2. — Répartition des fractions organiques du sol de Vulture

cyclique des fractions, marquée par une diminution de AFS et AHP en A<sub>11</sub> en A<sub>12</sub> et A<sub>3</sub>, une remontée brusque en B<sub>21</sub>, suivie d'une diminution en B<sub>22</sub>. La fraction AHS montre des variations symétriques entre A<sub>11</sub> et A<sub>12</sub> et B<sub>21</sub>-B<sub>22</sub>. Tout se présente comme si l'on avait superposition de deux sols, avec une évolution comparable des fractions peu mobiles de la matière organique de B<sub>21</sub> à B<sub>22</sub> et de A<sub>11</sub> à A<sub>12</sub>-A<sub>3</sub>.

Fractions les plus mobiles (ac. fulviques libres), en valeur absolue : la distribution périodique est déphasée. Il y a un accroissement de A<sub>11</sub> en A<sub>12</sub> puis diminution en A<sub>3</sub>, et une très brusque augmentation en B<sub>21</sub> suivie d'une baisse rapide en B<sub>22</sub> et en C. Ces deux maximum, en A<sub>12</sub> et surtout en B<sub>21</sub>, manifestent une migration des acides fulviques libres en profondeur vers deux horizons d'illuviation, l'horizon B<sub>21</sub> étant le plus marqué.

La courbe de distribution en valeur relative (fig. 2b) souligne le processus d'illuviation des acides fulviques, dont la proportion augmente presque régulièrement de A<sub>11</sub> à B<sub>21</sub>, puis diminue en B<sub>22</sub> (au profit de l'humine). Mais elle augmente à nouveau dans l'horizon C, où les autres fractions ont presque disparu.

L'illuviation d'acides fulviques libres en B<sub>21</sub>, signe évident de podzolisation, confirme le premier diagnostic de LULLI et BIDINI (1980) d'après la valeur

du rapport  $\frac{Fe+Al \text{ Pyr.}}{Fe+Al \text{ Dit.}}$ , ici de 0,7 en B<sub>21</sub> et B<sub>22</sub>

(> 0,5 pour un B spodique, Soil Taxonomy, 1975).

Mais les taux d'humine et d'acides humiques et fulviques-soude sont anormalement élevés pour un B spodique. Ces taux trop élevés suggèrent à

nouveau un humus résiduel de sol enterré, auquel se serait ajoutée ensuite l'illuviation des acides fulviques libres venant du sol superficiel.

On remarque, en outre, que le taux de Fe+Al pyrophosphate, comme ceux de Fe+Al dithionite et Fe+Al « amorphes », augmentent sensiblement de B<sub>21</sub> à B<sub>22</sub>, à l'inverse du taux d'acides fulviques libres, mais dans le même sens que le taux relatif d'acides humiques-soude et d'humine (fractions moins mobiles). Il y a donc une certaine indépendance entre le taux de Fe+Al complexés et celui des acides fulviques libres.

L'analyse des produits minéraux « amorphes » a mis en évidence (caractères chimiques, fig. 2, 1<sup>re</sup> partie) de l'alumine très soluble — non allophanique et probablement complexée. Or cette forme complexée abonde dans les horizons humifères, croissant de A<sub>11</sub> en A<sub>12</sub>, puis diminue brutalement dans l'horizon B<sub>21</sub>. Cette forme d'alumine semble plus liée aux fractions humine et acides humiques-soude, qu'elle stabilise (comme c'est le cas dans les andosols), qu'aux acides fulviques libres. Il y aurait donc compétition de deux processus, le premier d'andolisation, prédominant, le second de podzolisation, plutôt discret.

De même la répartition du fer « amorphe » (extraits HCl 2 N et extraits dithionite — voir Caractères

chimiques, tabl. VIII et fig. 2, 1<sup>re</sup> partie) n'est pas en B<sub>21</sub> consécutive de l'illuviation d'acides fulviques libres, comme c'est habituellement le cas dans les podzols (humu-ferrugineux).

1.2.3. ÉTUDE PAR ÉLECTROPHORÈSE (tabl. IV)

Cette analyse a été faite sur chacune des fractions d'extrait-pyrophosphate et d'extrait-soude. Elle a fourni les propositions relatives d'acides humiques gris (AHG), peu mobiles, d'acides intermédiaires (AHI) et d'acides humiques bruns (AHB), mobiles. Elle donne aussi par le rapport de densité optique (625/512 nm) une idée de degré de condensation des molécules organiques de ces fractions.

(a) Profil Roccamonfina

On observe un accroissement des acides humiques gris (AHG), aussi bien dans l'extrait pyrophosphate que l'extrait soude, de l'horizon A<sub>11</sub> à l'horizon B<sub>1</sub>, avec un rapport de densité optique constamment élevé d'environ 0,67. Il y a donc une humification croissante dans la partie supérieure du sol jusqu'en B<sub>1</sub>, avec formation d'acides humiques condensés et stables. Ceci peut être mis en relation avec l'abondance d'une forme complexée d'alumine, qui joue un rôle catalyseur et stabilisateur, comme

TABLEAU IV  
Électrophorèse des acides humiques

Profil Echantillons	AHG %	AHI %	AHB %	$\lambda \frac{625}{512}$ AHG	$\lambda \frac{625}{512}$ AHG	AHG %	AHI %	AHB %
Roccamonfina		Extrait Pyrophosphates			Extrait NAOH			
6R A11	60	12	28	0,68	0,61	62	13	25
6R A12	59	13	28	0,69	0,67	71	9	20
6R B1	70	14	16	0,67	0,68	76	9	15
6R B2	-	-	-	-	-	-	-	-
6R Cx	-	-	-	-	-	-	-	-
Vulture								
3V A11	57	11	32	0,62	0,65	79	8	13
3V A12	60	12	18	0,65	0,73	70	10	10
3v A3	56	11	33	0,55	0,70	77	8	15
3V B21	60	12	28	0,57	0,71	75	24	1
3V B22	60	15	25	0,64	0,72	74	22	4
3V C	-	-	-	-	-	-	-	-

AH = acides humiques, B = bruns, G = gris, I = intermédiaires

$\lambda \frac{625}{512}$  = rapport de densité optique aux radiations 625 et 512 nm. pour les AHG

c'est le cas dans des andosols désaturés de climat tempéré-humide (HETIER, 1975).

Dans la partie inférieure du sol, il y a une quasi-disparition des acides humiques. Celle-ci est confirmée par la brusque disparition de l'alumine complexée. Ce fait marque une brusque minéralisation de l'humus. Il peut s'interpréter par une discontinuité dans le profil.

#### (b) Profil Vulture

Dans les horizons A<sub>11</sub> et A<sub>12</sub>, la répartition des différentes fractions humiques est semblable à celle de la partie supérieure du sol de Roccamonfina, marquant une certaine maturation et stabilisation des acides humiques.

Mais, dès l'horizon A<sub>3</sub>, un processus différent se développe vers les horizons B<sub>21</sub> et B<sub>22</sub>. On observe simultanément des acides humiques-pyrophosphate moins polymérisés et moins condensés (AHB = 33 à 25 %, AHG = 56 à 60 % et 625/512 nm = 0,55 à 0,64), et des acides humiques-soude très polymérisés et très condensés (AHG = 74 à 77 % et 625/512 nm = 0,70 à 0,72). Cependant, on note aussi une disparition des acides humiques bruns (AHB) de la fraction soude en B<sub>21</sub> et B<sub>22</sub> et à nouveau de A<sub>3</sub> à B<sub>22</sub> une augmentation progressive de la condensation des acides humiques pyrophosphate, qui marquent une maturation et une stabilisation.

Dans les horizons B<sub>21</sub> et B<sub>22</sub>, il y aurait donc bien superposition, ou conjonction, de deux processus. Le premier forme des acides humiques de néosynthèse, par condensation d'acides fulviques libres en acides humiques pyrophosphate, peu polymérisés et mobiles. Le second produit des acides humiques (fraction soude) très condensés et stables, par transformation d'une humine qui serait pré-existante dans un sol enterré. La diminution brusque de l'alumine complexée en B<sub>21</sub> et B<sub>22</sub> confirme ce deuxième processus.

L'abondance d'alumine complexée dans le haut du profil (A<sub>11</sub>, A<sub>12</sub> et A<sub>3</sub>), en relation avec une proportion plus importante d'acides humiques bruns dans la fraction soude, semble un caractère notable des andosols désaturés de climat tempéré.

## 2. FORMES DU PHOSPHORE

### 2.1. Méthodes

Les différentes formes du phosphore ont été extraites par la méthode de fractionnement de CHANG et JACKSON (1957), le phosphore organique a été dosé dans l'extrait par HCl concentré sur un sol calciné et non calciné, le résultat étant obtenu par différence entre les deux dosages.

Le phosphore total a été déterminé sur l'extrait

par l'acide nitrique concentré et bouillant, et le phosphore assimilable par la méthode OLSEN modifiée DABIN (1967) utilisant un mélange de bicarbonate de sodium 0,5 N et de fluorure d'ammonium 0,5 N.

### 2.2. Résultats (tabl. V)

#### (a) Profil Roccamonfina (fig. 3a)

Le taux de phosphore total est de 2 000 ppm environ dans la partie supérieure du sol (A<sub>11</sub>, A<sub>12</sub> et B<sub>1</sub>) puis descend brusquement à 1 300 ppm dans la partie inférieure. C'est une marque de discontinuité.

Le phosphore d'inclusion, au contraire, reste assez constant de 800 à 900 ppm dans l'ensemble du profil ; il augmente même dans l'horizon C à 1 000 ppm. Mais, dans la partie supérieure il représente un peu moins de la moitié du phosphore total, et dans la partie inférieure, plus des deux tiers jusqu'à 4/5. Cette prédominance du phosphore d'inclusion sur les autres formes, selon WALKER et SYERS (1976) marque une évolution avancée du phosphore en relation avec le degré d'altération minérale du sol. On observe donc que la partie supérieure du sol est sensiblement moins évoluée que la partie inférieure, d'où la discontinuité déjà constatée.

Le phosphore organique est localisé dans la partie supérieure du sol. Il décroît en fonction du taux de matière organique et disparaît brusquement dans les horizons B<sub>2</sub> et Cx.

Le phosphore lié à l'aluminium suit une courbe de répartition parallèle à celle de l'alumine complexée par la matière organique. Son taux est important (~ 400 à 500 ppm) dans la partie supérieure du sol. Il augmente en A<sub>11</sub> en A<sub>12</sub> puis diminue un peu en B<sub>1</sub>. Il décroît brusquement à près de 100 ppm dans les horizons B<sub>2</sub> et Cx.

Le phosphore lié au fer est peu abondant (50 à 150 ppm). Il augmente cependant en B<sub>2</sub> (150 ppm), en relation peut-être avec une illuviation d'acides fulviques libres.

Le phosphore lié au calcium n'est pas négligeable (100 à 300 ppm). Il provient des traces d'apatite résiduelle et du phosphore organique. Il augmente régulièrement de A<sub>11</sub> à B<sub>1</sub>, puis diminue vers la base du sol.

Le phosphore assimilable (OLSEN-DABIN) est assez abondant dans la partie supérieure du sol (200 à 300 ppm) pour que l'on n'ait pas à craindre une déficience grave en phosphore. La courbe de répartition est plutôt parallèle de celle de P<sub>al</sub>. Le phosphore assimilable est donc plus lié à l'alumine complexée par les acides humiques qu'au calcium. Sa disponibilité est sans doute lente ; ce que confirment

TABLEAU V

Formes du phosphore, en ppm de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Profil Echantillons	P ass.	P tot.	P sol.	P Al	P Fe	P Ca	P org.	P incl.
<b>Roccamanfina</b>								
6R A11	212	2000	tr.	378	113	184	425	900
6R A12	328	1975	tr.	501	129	216	357	772
67 B1	253	1775	tr.	416	53	310	157	839
67 B2	92	1325	tr.	122	150	163	12	878
6R C	188	1300	tr.	154	tr.	101	0	1045
<b>Vulture</b>								
3V A11	471	6125	tr.	851	78	2082	1898	1216
3V A12	474	6250	tr.	805	113	1852	2501	979
3V A3	436	6500	tr.	713	123	1852	3427	385
3V B21	576	8750	tr.	1058	117	2335	4473	767
3V B2	669	7000	tr.	1001	161	2059	3048	731
3V C	463	6750	tr.	517	180	4458	127	1468

P ass. = assimilable — tot. = total — sol. = soluble — Al, Fe, Ca = lié à Al, Fe, Ca — P org. = organique — P incl. = d'inclusion

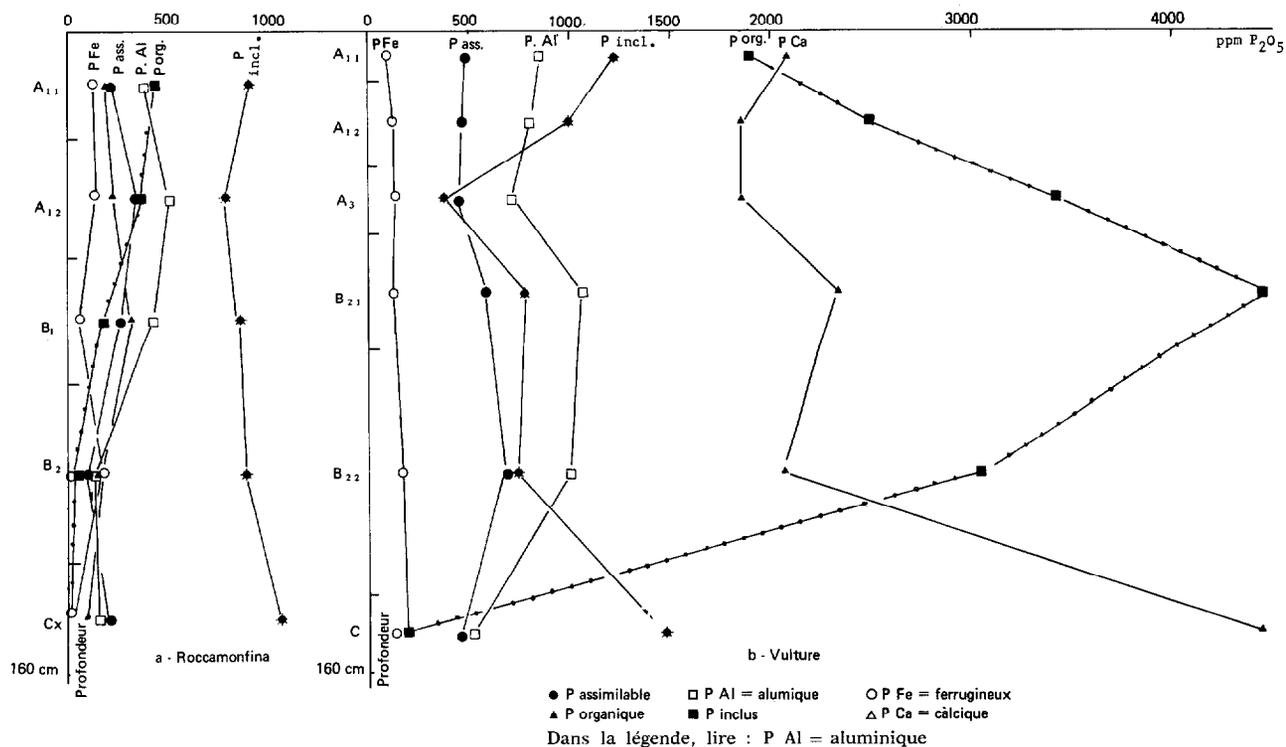


FIG. 3. --- Répartition des formes du phosphore dans les profils (en ppm sol < 2 mm)

les valeurs élevées du rapport C/N (en  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ ) signe d'une vie microbienne ralentie.

(b) *Profil du Vulture* (fig. 3 b)

Le taux de phosphore total est anormalement élevé dans tout le profil. Il l'est même plus en profondeur (7 000 à 9 000 ppm) qu'à la partie supérieure ( $\sim 6 000$  ppm) du sol, à l'inverse du cas de Roccamonfina. Une certaine discontinuité apparaît globalement entre les horizons  $A_3$  et  $B_{21}$ . Relativement au sol de Roccamonfina, le taux de phosphore total est trois fois plus grand dans le haut du profil ( $A_{11}$  à  $A_3$ ) et cinq fois plus en profondeur ( $B_{21}$  à C). Cette différence énorme entre les sols de Vulture et Roccamonfina peut s'expliquer, dans le premier, sans doute par un matériau originel plus riche en phosphore, mais aussi, nous allons le montrer, par une évolution minérale moins poussée du sol.

En effet, le phosphore d'inclusion, relativement au phosphore total, ne représente plus que 6 à 20 % au maximum. Les fractions organiques et liées au calcium, au contraire, deviennent prédominantes. Selon WALKER et SYERS (1976, fig. 4), cela indique que le sol est encore jeune et riche en minéraux altérables.

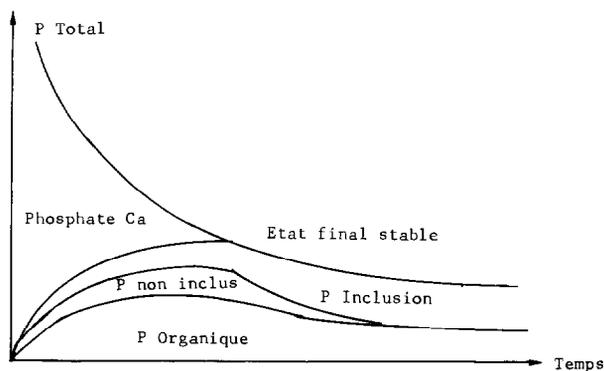


FIG. 4. --- Chronoséquence de Walker et Syers, évolution du phosphore

Le phosphore lié au calcium, de 2 000 à 4 500 ppm, provient sans doute pour la plus grande part de l'apatite. Celle-ci représente 0,4 à 0,5 % du sol dans l'ensemble du profil, sauf l'horizon C où elle atteint près de 1 %. Cet accroissement brusque correspond probablement à une discontinuité du matériau originel (observée sur le terrain et d'après l'analyse chimique).

Si l'on se réfère à la séquence de WALKER et SYERS (fig. 4), on aurait pu interpréter la discontinuité en  $P_{Ca}$  entre  $B_2$  et C, marquée par l'accroissement brusque de l'apatite et la forte diminution de

P organique et de  $P_{Al}$ , comme la marque d'une bien plus faible évolution minérale dans l'horizon C. Or, nous l'avons vu, il s'agit d'un autre matériau originel, plus ancien, et d'un autre type d'altération déjà avancée (produisant de l'hallowysite, au lieu de l'imogolite).

Le phosphore organique augmente d'une manière régulière et très rapide (de 2 000 à 4 500 ppm) de l'horizon  $A_{11}$  à l'horizon  $B_{21}$ . Ceci est en relation directe, sans doute, avec le processus d'illuviation des acides humiques et fulviques les plus mobiles. Puis, le phosphore organique régresse rapidement dans l'horizon  $B_{22}$  et surtout l'horizon C, où il a quasiment disparu, en même temps que les acides humiques.

Le phosphore lié à l'alumine est abondant dans tout le profil ( $\sim 700$  à 1 000 ppm), deux fois plus que dans la partie supérieure du sol de Roccamonfina. C'est un caractère typique d'andosol désaturé. Cependant, la courbe de répartition, de forme cyclique, suggère à nouveau une discontinuité entre la partie supérieure ( $A_{11}$  à  $A_3$ ) et la partie inférieure ( $B_{21}$  à C) du profil. Il y a d'abord une décroissance progressive, puis une augmentation brusque en  $B_{21}$  suivie d'une nouvelle diminution en C.

La répartition cyclique du phosphore lié à Al s'expliquerait plus par un processus complexe, sous l'effet d'une variation non uniforme des constituants minéraux et organiques, déjà évoquée, que par une simple discontinuité du matériau originel. En effet, le taux de  $P_{Al}$  décroît d'abord lentement de  $A_{11}$  à  $A_3$  (de 850 à 710 ppm), parallèlement à la diminution du taux de matière organique. Mais cet effet n'est pas constant et il semble ralenti par deux facteurs : le gain progressif d'allophane et l'accroissement relatif des acides humiques complexés avec Al. En  $B_{22}$  le doublement du taux de  $P_{Al}$  se justifie par le doublement du taux d'allophane et d'imogolite. En  $B_{21}$ , où l'accroissement de  $P_{Al}$  est plus brusque et son taux maximum, se cumulent les effets d'un gain d'allophane et de la forte illuviation d'acides fulviques et humiques complexés avec l'aluminium ( $> 60$  % de gain relativement à  $A_3$ ). En C, la forte diminution de l'allophane et des acides organiques complexants explique la brusque décroissance de  $P_{Al}$ .

Le taux de phosphore lié au fer, au contraire de celui lié à l'aluminium, est peu abondant et varie peu. Curieusement même, il augmente progressivement en profondeur ( $B_{22}$  et C), indépendamment du taux d'acides fulviques, peut-être en fonction du taux de fer libre non complexé.

Le phosphore assimilable, comme dans le sol de Roccamonfina, a une courbe de répartition assez parallèle à celle de  $P_{Al}$ . Ceci montre l'importance de la liaison avec l'alumine. On peut prévoir que les

échanges entre sol et solution seront plus lents, et donc la disponibilité pour les plantes restreinte en dépit des taux élevés de  $P_{ca}$ . Cependant, les taux élevés de P assimilable ( $\sim 500$  ppm) dans tout le profil, ne font pas présager une déficience en phosphore dans ce sol. Ce que semblent confirmer les basses valeurs du rapport C/N, signes d'une excellente activité microbienne, dans les horizons humifères. Ce n'était pas le cas du sol de Roccamonfina.

### 3. INTERPRÉTATION GÉNÉRALE

#### 3.1. Pédogenèse

##### (a) Roccamonfina

Le sol de Roccamonfina est complexe : andique et très humifère dans la partie supérieure ( $A_{11}$ ,  $A_{12}$ ,  $B_1$ ), brun-acide avec fragipan dans la partie inférieure (II  $B_2$ , II Cx). La morphologie du profil le suggère. Elle est confirmée par la micromorphologie, la minéralogie, les analyses physiques et chimiques.

La partie supérieure du sol a été rajeunie par des apports éoliens de cendres volcaniques, légèrement différentes du matériau originel sous-jacent. Il y a un accroissement brusque des minéraux primaires, surtout du quartz et des micas. Les taux de magnésium et de potassium du sol total, ainsi que le rapport molaire silice/alumine, augmentent.

La partie inférieure du sol a des caractères de sol brun-andique, très humifère et désaturé. Les caractères andiques sont : faible densité apparente, couleur foncée, très humifère, structure fine et friable,  $pH_{Na F} > 10$ , capacité d'échange variable. D'autres caractères les apparentent aux sols bruns-acides : large prédominance des minéraux argileux (halloysite surtout, + un peu d'illite et vermiculite) sur l'allophane dans la fraction  $< 2 \mu$ , présence notable de goethite, acidité d'échange élevée, taux de déshydratation irréversible faible, taux de capacité d'échange-variable faible en  $B_1$ , peu de silice « amorphe » et beaucoup d'alumine « complexée », structure polyédrique nette et consistance un peu plastique du sol humide en  $B_1$ , rapport C/N élevé d'un Mull-acide en  $A_{11}$  et  $A_{12}$ . La forme glomérulaire de l'halloysite indique un sol jeune.

Dans la partie inférieure, comme dans les sols bruns-acides, l'horizon  $B_2$  se marque par les caractères suivants : brusque diminution de la matière organique et du rapport C/N, accroissement des minéraux argileux (halloysite surtout) sans indice d'illuviation, disparition de l'allophane,  $pH = 5,5$ , désaturation accusée du complexe d'échange ( $S/T = 20$ ), acidité d'échange accrue. En outre, une légère

illuviation d'acides fulviques et d'alumine complexée, un  $pH_{Na F} \sim 10$  et un taux de capacité d'échange variable accru, sont des caractères aînés d'horizons spodiques, quoique discrets. La forme tubulaire de l'halloysite est plus fréquente, suggérant une argilification plus ancienne et plus avancée du sol. La composition de la fraction  $< 2 \mu$  marquée, d'une part par la large prédominance de l'halloysite sur les argiles 2:1 (illite, vermiculite) et le rapport molaire silice/alumine de 2, d'autre part par la présence importante de goethite et un taux fer libre/fer total de 50 %, font de ce sol un intergrade entre ferrallitique-kaolinitique (pénévolué) et fersialitique fortement désaturé rubéfié.

Le développement de l'halloysite, de plus en plus tubulaire, en  $B_2$  et en Cx, puis la précipitation de calcédoine qui cimente le fragipan (presque duripan), et la remontée du rapport molaire silice-alumine à 2,1 dans la fraction  $< 2 \mu$ , sont les signes d'une silicification progressive. Cet apport de silice (accompagné d'alumine complexée par des acides fulviques) semble favorisé par deux facteurs (déjà invoqués pour la genèse des duripans, in Soil Taxonomy, 1975, p. 41-42) : le rajeunissement superficiel par des cendres volcaniques et une saison sèche estivale (climat méditerranéen). Des duripans ont été observés sur l'Altiplano interandin en Amérique du Sud. De même, le développement de l'halloysite en profondeur, par silicification dans un matériau volcanique plus anciennement altéré, a été souvent notée au Japon (SUDO et SHIMODA, 1978) et ailleurs.

L'abondance relative de la forme « d'inclusion » du phosphore confirme que le sol de l'horizon  $B_2$  est à un stade avancé d'altération minérale. Au contraire, une diminution relative de cette forme dans le haut du profil souligne l'effet de rajeunissement.

L'étude de la matière organique a montré l'accumulation d'un humus plutôt acide (C/N élevé), qui se transforme lentement dans les horizons humifères ( $A_{11}$ ,  $A_{12}$  et  $B_1$ ), où il semble stabilisé, puis une brusque diminution et modification en profondeur ( $B_2$ , Cx). Dans la partie supérieure ( $A_{12}$ ,  $B_1$ ), les acides humiques sont fortement condensés (AH gris prédominants), complexés et stabilisés par une forte charge d'alumine. La faible part des acides humiques bruns expliquerait l'absence d'éluviation argileuse. Dans l'horizon  $B_2$ , brusquement disparaissent les acides humiques, laissant apparaître une certaine illuviation d'acides fulviques libres (signe de cryptopodzolisation très discrète), qui explique la présence d'un peu d'alumine complexée. La minéralisation de ces complexes, libérant de l'alumine, conjuguée aux apports de silice en solution, permet sans doute la genèse d'halloysite (comme cela est possible pour la kaolinite, SIFFERT et WEY, 1961, SIFFERT, 1962).

L'histoire du sol de Roccamonfina est donc complexe. Elle a comporté un enchaînement de processus, volcaniques, climatiques et géochimiques. A la fin du Pléistocène, la pédogenèse commence sur un dépôt de cendres trachy-andésitiques, en climat subtropical, plus chaud et régulièrement humide qu'à présent. Un andosol désaturé apparaît et commence à se transformer par un processus de ferrallitisation (sol à halloysite et goethite). A l'Holocène, un recouvrement de cendres trachyliques, plus siliceuses, rajeunit progressivement le sol en surface. En même temps un climat plus frais et à courte saison sèche estivale, entraîne la formation d'un sol brun-andique désaturé et très humifère. Cette ré-activation de l'altération minérale en haut du sol fournit des solutions riches en silice et aussi en alumine complexée par des acides fulviques. D'où la re-silicification du sol sous-jacent et la genèse abondante d'halloysite, et même la formation d'un fragipan, à la faveur de la saison sèche estivale. Il y aurait aussi des signes très discrets de cryptopodzolisation dans la partie supérieure du sol.

#### (b) *Vulture*

Sur le terrain, le sol paraît homogène, de couleur noire, très humifère jusqu'à l'horizon C. Il a les caractères évidents d'un andosol désaturé mélanique. Mais, une analyse approfondie montre une grande complexité, que l'on pourrait interpréter par la succession d'horizons : soit A<sub>11</sub>, A<sub>12</sub>, A<sub>3</sub>, B<sub>21</sub>, B<sub>22</sub> et II C si l'on fait l'hypothèse d'une cryptopodzolisation et d'une seule discontinuité du matériau entre B<sub>2</sub> et C, soit A<sub>11</sub>, A<sub>12</sub>, A<sub>3</sub>, II B<sub>21</sub>, II B<sub>22</sub>, III C, si l'on admet en outre une deuxième discontinuité du matériau entre A<sub>3</sub> et B<sub>2</sub>. De toute manière, il faut bien admettre une superposition aux caractères andiques prédominants de caractères podzoliques discrets.

La discontinuité dans le matériau originel n'est certaine qu'à la base du sol, dans l'horizon C. Celui-ci est formé de lapillis trachy-basaltiques, un peu plus basiques (plus de Ca, Mg, Fe) et aussi plus altérés (moins de minéraux primaires, SiO<sub>2</sub>/R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mol. inférieur, halloysite bien développée) que les cendres du sol qui le recouvre. Dans celui-ci, la nature des cendres est assez homogène ; mais une discontinuité discrète, soit par renouvellement du dépôt, soit plutôt par colluvion sur la pente, n'est pas exclue.

Le sol dans son ensemble a de prime-abord des caractères de jeunesse et d'andosol modérément désaturé, très humifère.

Les caractères de jeunesse sont : abondance de minéraux altérables (plagioclases, pyroxènes), phosphore d'inclusion en très faible proportion (10 à 20 %), large prédominance des produits d'altération « amorphes » ou cryptocristallins, pH proche de 7

dans tout le profil et complexe d'échange modérément désaturé.

Les caractères andiques sont : faible densité apparente (0,6-0,7), taux élevé de produits minéraux « amorphes », progression du taux d'allophane et d'imogolite de A<sub>11</sub> à B<sub>22</sub>, pH proche de 7 malgré une désaturation du complexe d'échange, acidité d'échange modérée ( $\Delta$  pH < 1), fort taux de  $\Delta$  CEC (25 à 29 mé/100 g  $\rightarrow$  59 à 69 %, en B<sub>21</sub> et B<sub>22</sub>), forte capacité de rétention en eau au point de flétrissement (> 40 %), taux élevé d'alumine complexée par des acides humiques. Certains des caractères de ces sols les apparentent à des andosols désaturés typiques (typic Dystrandeps) plutôt qu'au groupe oxic (oxic), ou perhydraté (hydric).

Cependant d'autres caractères surimposés dans les horizons A et les horizons B, notamment la répartition des fractions organiques et de l'alumine « amorphe-non allophanique », suggèrent une podzolisation discrète (crypto-podzolisation). Dans la partie supérieure du sol, de A<sub>11</sub> vers A<sub>3</sub>, il y a bien une maturation de l'humus vers des formes condensées et stabilisées par une forte charge d'alumine complexée. C'est un processus normal dans les andosols des pays tempérés (HETIER, 1975). Mais, le rapport acides fulviques/acides humiques est supérieur à 1 dans tout le profil, et il augmente fortement (de 1,8 à 3,7) de l'horizon A<sub>11</sub> à l'horizon B<sub>21</sub>, puis diminue en B<sub>22</sub>. Il y a surtout illuviation d'acides fulviques libres. C'est la marque d'un processus de podzolisation.

Cependant, d'autres caractères discordants compliquent le problème. On observe tout d'abord un double maximum d'illuviation des acides fulviques libres, en A<sub>12</sub> et en B<sub>21</sub>, quoique, en valeur relative, il y ait progression constante de A<sub>11</sub> vers B<sub>21</sub>. En outre, un taux d'humine anormalement élevé en B<sub>21</sub>, ainsi que le brusque accroissement du rapport C/N, sans augmentation notable du fer et de l'alumine complexés, suggèrent un horizon humifère enterré. Dans celui-ci, à l'humine héritée d'une pédogenèse antérieure, s'ajoute une illuviation d'acides fulviques libres. Il y aurait donc superposition de deux sols, avec amplification apparente de l'illuviation humique dans l'horizon B<sub>21</sub>.

Enfin, dans les horizons B, de B<sub>21</sub> à B<sub>22</sub>, il y a une nouvelle maturation de l'humus, tant des formes mobiles (ac. fulviques libres, ac. humiques bruns) que de l'humine héritée, vers des formes très condensées, stables et peu complexantes (ac. humiques gris, humine de précipitation, etc...); ce processus libère le fer et l'alumine complexés. Dans l'horizon C l'humus disparaît brusquement et ne comporte plus que des traces d'acides fulviques libres et d'humine ; c'est la marque évidente d'une discontinuité et d'un arrêt presque total de l'illuviation humique.

L'évolution minérale dans le profil montre un accroissement progressif de l'allophane de  $A_{11}$  vers  $A_3$ , puis de l'imogolite de  $B_{21}$  vers  $B_{22}$  et la brusque apparition d'halloysite dans l'horizon C. Dans la partie supérieure du profil, où le sol est le plus jeune et le plus humifère, se développe une intense altération minérale (hydrolyse, acido-complexolyse). La silice dissoute est pour une grande part lixiviée, alors que l'alumine, pour la plus grande part est complexée sous une forme stable. Mais, au fur et à mesure de la maturation de l'humus, une partie de l'alumine libérée et de la silice dissoute forment de l'allophane, qui augmente donc de  $A_{11}$  vers  $A_3$  et  $B_{21}$ . Puis en  $B_{21}$  et  $B_{22}$ , la libération rapide de l'alumine des complexes illuviés (ou autres) permet la formation soudaine d'imogolite, comme cela a été observé dans les horizons B spodiques des pays tempérés (TAIT, YOSHINAGA, MITCHELL, 1978, etc.) et dans les horizons B d'andosols désaturés (plutôt perhydratés) des pays subtropicaux (YOSHINAGA et AOMINE, 1962-FERNANDEZ-CALDAS *et al.*, 1980) et tropicaux (BESOAIN, 1969; COLMET-DAAGE *et al.*, 1969; SIEFFERMANN, 1969, QUANTIN, 1972, etc...). On peut penser aussi que la complexité de deux sols superposés ( $A_{11}$ - $A_{12}$ - $A_3$  sur  $B_{21}$ - $B_{22}$ ) favorise ce processus. La non-individualisation notable des oxyhydroxydes libres de fer et d'alumine dans les horizons B semble impliquer que ces deux éléments concourent à la genèse des argiles cryptocristallines (allophane, imogolite). Dans l'horizon C, comme à Roccamonfina, en l'absence d'acides humiques complexants, se produit un processus de re-silicification qui entraîne la formation d'argiles bien cristallisées, surtout d'halloysite. Ce processus est favorisé, à nouveau, par la discontinuité du matériau originel, moins poreux et déjà plus altéré.

La genèse du sol de Vulture est donc complexe, mais à la différence de Roccamonfina, non tant par une forte discontinuité des matériaux originels, que par la surimposition de deux processus : l'andosolisation, qui prédomine, et le développement discret de la podzolisation. Un non moins discret rajeunissement du sol semble avoir favorisé la genèse d'allophane en haut du profil et d'imogolite à la partie inférieure. Cette genèse s'est probablement réalisée récemment, durant l'Holocène, en climat régulièrement humide et plutôt froid ( $T_m \sim 8^\circ C$ ). Mais, à nouveau l'apparition de l'halloysite dans l'horizon C marque une forte discontinuité du matériau originel, moins poreux et plus anciennement altéré.

### 3.2. Classification

Compte tenu de la complexité des deux sols étudiés et de l'ambiguïté de leurs critères diagnos-

tiques, plutôt qu'une classification définitive, mais peu satisfaisante, pour chaque sol nous suggérons une alternative. Nous proposerons même aux classificateurs de créer de nouveaux sous-groupes, pour marquer le caractère intergrade de ces sols. Nous avons utilisé les systèmes français (CPCS, 1967) et américain (Soil Taxonomy, 1975). Mais, nous avons tenu compte des nouvelles propositions pour la révision de ces deux systèmes (Groupe de Travail Andosols, 1972 — ICOMAND, 1979).

#### (a) Roccamonfina

##### 1. Classification française (CPCS, 1967)

Le sol est complexe, à caractère brun-andique dans la partie supérieure et plutôt brun-acide en profondeur, sans évidence d'illuviation argileuse en  $B_2$ , mais plutôt des signes très discrets de cryptopodzolisation. Le paléosol pourrait être apparenté aussi à un sol fersiallitique désaturé rubéfié à fragipan. A cause du profond développement de la partie supérieure (0 à 88 cm), il est raisonnable de proposer la classification suivante :

Cl. Sols brunifiés.

S/Cl. des pays tempérés humides.

G, S/G. Brun-andique, F. dérivé de cendres trachytiques, sur paléosol brun-acide à fragipan, dérivé de lapilli trachyandésitiques.

Mais, par certains caractères de l'horizon  $B_1$  ( $C > 2\%$ ,  $AF/AH > 1$ , alumine complexée  $> 0,5\%$ ), ce sol pourrait être apparenté aux sols cryptopodzoliques bruns.

##### 2. Classification américaine (Soil Taxonomy, 1975)

Les caractères apparents des sols riches en substances amorphes (ECDAM) semblent suffisants (notamment  $d_a < 0,9$  et  $pH NaF > 9,4$ ) pour que ces sols soient classés parmi les Andepts. Le fragipan étant situé à plus d'1 m de profondeur, ce seraient des Dystrandeps. Étant donné l'évolution minérale déjà poussée (abondance d'halloysite, CEC  $< 30$  mé/100 g en  $A_{12}$  et  $B_1$ ), ce seraient plutôt des oxic Dystrandeps.

Mais, étant donné la faible quantité d'allophane, l'abondance des minéraux argileux (halloysite), le fort développement de l'épipédon umbrique (56 cm), il paraît plus judicieux de classer ces sols parmi les Umbrepts, avec qui ils ont une parenté évidente (cf. Soil Taxonomy p. 264-265). La présence d'un fragipan en profondeur et les caractères andiques en surface, les font classer parmi les andic Fragiumbrepts.

O. Inceptisols.

S/O. Umbrepts.

G. andic Fragiumbrepts.

(b) *Vulture*

1<sup>o</sup> *Classification française* (CPCS, 1967).

La majeure partie des caractères sont ceux d'andosols désaturés humifères typiques. Mais certains caractères de podzolisation précédemment évoqués ( $AF/AH \geq 2$ , taux  $\frac{Fe+Al \text{ Pyro}}{Fe+Al \text{ Dith.}} > 0,5$ , en  $B_{21}$  et en  $B_{22}$ ) mènent à une alternative.

a) Cl et S/Cl Sols Podzolisés de climat tempéré.  
G/ et S/G Sols cryptopodzoliques humifères.

β) Cl et S/Cl Andosols des pays froids.

G. Andosols humifères désaturés.  
S/G (à proposer) cryptopodzoliques, F. dérivé de cendres trachybasaltiques.

Cette deuxième solution, plus conforme aux caractères généraux du sol, qui l'apparentent plutôt à un andosol, aurait notre préférence.

— Proposition de 1972.

Dans le même esprit, nous ne retiendrons que la solution suivante :

Cl. S/Cl : Andosols à profil différencié.

G. Andosols désaturés, non perhydratés.  
S/G mélaniques (et à créer) cryptopodzoliques.  
F. dérivé de cendres trachy-basaltiques.

2<sup>o</sup> *Classification américaine*

— Soil Taxonomy, 1975.

La morphologie et les caractères (EGDAM) conduisent normalement à classer ce sol parmi les Andepts. Mais le critère de l'horizon spodique (taux  $\frac{Fe+Al \text{ Pyro.}}{Fe+Al \text{ Dith.}} > 0,5$ ) en  $B_{21}$  et  $B_{22}$ , nous avait

d'abord amené à le classer parmi les Spodosols, comme typic Haplohumod (LULLI et BIDINI, 1980). Il conviendrait alors de proposer un sous-groupe andic Haplohumod. Mais, pour les mêmes raisons que dans la classification française, il semble préférable d'adopter la première solution et de proposer un intergrade spodic parmi les Andepts (comme l'avait pressenti G. SMITH en 1978).

O. S/O : Inceptisols, Andepts.

G.G. Dystrandeps.  
S/G. (à créer) spodic.

— Proposition ICOMAND, 1979.

O. Andisols.

SO. Udands, G. G. Melanudands.  
S/G (à créer) spodic.

## 3.3. FERTILITÉ, APTITUDES

(a) *Roccamonfina*

La végétation naturelle indique que le sol est acide et humifère et que le climat est humide.

L'analyse du sol l'a confirmé : pH acide, forte désaturation en bases du complexe d'échange, teneur élevée en matière organique à rapport C/N élevé (mull acide), fort taux d'alumine « amorphe » qui restreint l'assimilabilité du phosphore.

Cependant, la partie supérieure du sol, sous l'effet d'un léger rajeunissement par des cendres volcaniques, offre de meilleures propriétés que la partie profonde : pH modérément acide, forte teneur en calcium et potassium échangeable, et moindre désaturation en bases du complexe, plus de réserves en minéraux altérables. Seule la part du phosphore assimilable demeure restreinte.

Dans la partie supérieure du sol (épédon umbrique) également, les propriétés physiques sont favorables : bonne porosité, assez forte capacité de rétention en eau. L'enracinement y est bien développé. Mais, en profondeur, la diminution de la porosité, l'accroissement de l'acidité et peut-être une toxicité aluminique, restreignent fortement la pénétration des racines.

La vocation naturelle de ce sol est la forêt. Mais il est utilisé traditionnellement, depuis longtemps, en châtaigneraie cultivée, parfois accompagnée d'un pâturage.

L'amélioration de la fertilité potentielle par un amendement phospho-calcique et une fertilisation azotée devrait permettre d'implanter des espèces fruitières, arborées ou arbustives, de meilleure productivité, adaptées au climat tempéré-humide, telles que le noisetier cultivé actuellement à plus basse altitude.

La susceptibilité à l'érosion du sol superficiel, partie la plus fertile, en cas de découvert du manteau forestier sur un relief aussi fort, incite à ne pas promouvoir une agriculture intensive, ni même l'implantation de prairies, sans précautions anti-érosives strictes et coûteuses. Par contre, l'aptitude forestière naturelle pourrait être mise à profit par le reboisement en essences productives.

(b) *Vulture*

La végétation naturelle indique un sol modérément acide, très humifère et régulièrement humide. La végétation introduite récemment, une sapinière, aurait pu induire l'acidification superficielle du sol, d'où la crypto-podzolisation observée par l'analyse du sol. Ce n'est pas évident, car le sol est resté peu acide dans l'horizon  $A_{11}$ , près de la surface.

L'analyse palynologique (ACCORSI et RODOLFI, 1978) du sol superficiel montre que ce sol a été

autrefois utilisé en châtaigneraie et prairie pâturée (comme à Roccamonfina).

La fertilité potentielle du sol est bonne sur une grande profondeur. Les propriétés physiques sont excellentes : bonne porosité, assez bonne capacité de rétention en eau (malgré une valeur élevée du point de flétrissement). Les propriétés chimiques sont dans l'ensemble favorables : faible acidité, richesse en minéraux altérables, fort taux de bases échangeables, surtout en calcium et potassium, forte teneur en humus à C/N bas (mull eutrophe). Certes, l'assimilabilité du phosphore est restreinte par l'effet d'une forte quantité d'alumine « amorphe » ; mais les teneurs en phosphore sont si élevées, notamment les réserves en apatite (phosphate calcique), qu'une déficience en cet élément est improbable.

Cependant le climat, bien que régulièrement humide, mais plutôt froid, restreint sensiblement les aptitudes du sol. En outre, le relief est fort et le sol, très meuble, est susceptible d'érosion en cas de découvert du manteau forestier. D'ailleurs un sol à caractères andiques aussi prononcés pourrait subir de graves effets, dus à la déshydratation irréversible, du fait de travaux culturels intensifs et d'une dénudation prolongée pendant la saison estivale.

La vocation naturelle de ce sol est donc forestière. Celle-ci a été mise à profit par l'installation d'une belle sapinière. Cependant, des essences calciphiles pourraient être plus intéressantes. Il est possible aussi que des espèces fruitières, arborées ou arbustives, adaptées à un tel climat, soient productives. Mais il est préférable de conserver et privilégier la vocation forestière des sols du Vulture, exceptionnelle en cette région.

## CONCLUSION

L'étude approfondie de deux sols à caractère andique du Sud de l'Italie, dérivés de matériaux volcaniques trachytiques d'âge récent et en condition de climat tempéré-humide, amène à des conclusions intéressantes. Cela a montré des différences importantes entre les deux sols, dues à des effets stationnels ; mais cela a aussi mis en lumière des aspects encore mal connus de la pédogenèse en région méditerranéenne.

Le sol de Roccamonfina est complexe du fait d'une discontinuité du matériau originel surtout, mais peut-être aussi d'une évolution du climat. Ainsi le sol a-t-il, du fait d'un rajeunissement volcanique, une superposition des caractères d'un sol brun-andique dans sa partie supérieure, de sol brun-acide en profondeur. Cette superposition a favorisé la genèse d'argiles (halloysite surtout) en

profondeur, et même d'un fragipan sous l'effet de la courte saison sèche estivale. Mais, l'hypothèse nouvelle, une cryptopodzolisation très discrète semble se superposer aux précédents processus.

Le sol de Vulture paraît d'abord plus simple : un andosol désaturé mélanique assez homogène jusqu'à 1,40 m de profondeur. Cependant LULLI et BIDINI (1978) avaient décelé aussi des caractères crypto-podzoliques humifères. En réalité le sol du Vulture est bien complexe, du fait de l'évidence des caractères andiques dans tout le profil et de la cryptopodzolisation nettement affirmée dans les horizons B<sub>21</sub> et B<sub>22</sub>. En outre, cette complexité aurait été amplifiée par l'effet (probable) de la superposition de deux sols, peut-être due à un colluvionnement récent. On remarque encore l'effet des discontinuités (et du rajeunissement volcanique) sur le genèse des argiles : celle de l'imogolite dans les horizons B<sub>21</sub> et B<sub>22</sub>, puis de l'halloysite dans l'horizon C.

Des conditions stationnelles différentes justifient la divergence des sols de Roccamonfina et du Vulture. Au Vulture, un climat plus régulièrement humide et plus froid, et l'âge probablement plus récent de la pédogenèse, expliquent la formation d'un andosol désaturé mélanique et très humifère, dont les caractères sont assez proches de ceux observés ailleurs en climat tempéré-humide (HETIER, 1975 et MOINEREAU, 1977). Mais la cryptopodzolisation n'avait jamais été mise aussi clairement en évidence dans de tels sols. On aurait pu pourtant la soupçonner d'après la forte quantité d'alumine « amorphe » non liée à l'allophane et donc probablement complexée par des acides humiques. Ce qui n'est pas le cas dans les andosols désaturés que nous avons observé en climat tropical humide (QUANTIN, 1972-79).

A la suite des travaux d'HETIER (1973) en climat tempéré et de ZEBROWSKI (1973) sur une séquence altitudinale en région tropicale, nous avons émis l'hypothèse d'une relation entre l'apparition de caractères podzoliques dans les andosols et l'incidence de climats plus froids (QUANTIN, 1974). SOKOLOV (1973) confirme que les sols andiques du Kamtchatka, qui dérivent de cendres andésitiques récentes, ont aussi des caractères de sol ocre-podzolique. FLACH (*et al.*, 1980) reconnaît la similitude des caractères entre Dystrandeps et Humods (sols crypto-podzoliques-humifères). WADA et HIGASHI (1976) ont remarqué également l'analogie des complexes humus-aluminium dans les horizons humifères des andosols et dans l'horizon spodique.

La comparaison des deux sols de Roccamonfina et du Vulture, bien qu'ils paraissent peu semblables et à des stades différents de la pédogenèse, suggère cependant une analogie de processus secondaire, la cryptopodzolisation. Celle-ci est extrêmement

discrète dans le premier sol, où l'effet du climat méditerranéen ambiant demeure sensible. La cryptopodzolisation s'affirme dans le second sol, en climat plus froid et plus régulièrement humide. Mais le fait que ces sols dérivent de matériaux volcaniques pyroclastiques riches en aluminium, pourrait expliquer que la podzolisation reste discrète en regard de l'andosolisation, comme l'avait déjà suggéré HETIER (1973).

En conclusion, l'étude des sols de Roccamonfina et du Vulture montre qu'en climat tempéré-humide faisant transition vers un climat froid, il conviendrait de ne plus distinguer trop hâtivement andosolisation et podzolisation.

Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.  
le 12 janvier 1983

## BIBLIOGRAPHIE

- ACCORSI (C. A.), RODOLFI (G.), 1978. — Analisi palinologica di alcuni suoli sulle vulcaniti de Vulture e di Roccamonfina; in LULLI et BIDINI, 1978.
- BESOAIN (E. M.), 1968. — Imogolite in volcanic soils of Chile. *Geoderma*, 2 : 151-169.
- CHANG (S. C.), JACKSON (M. L.), 1957. — Fractionation of Soil phosphorus. *Soil Sci.* 84 (2) : 133-144.
- COLMET-DAAGE (F.) *et al.* 1967-1969. — Caractéristiques de quelques sols d'Équateur dérivés de cendres volcaniques. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.* vol. V, nos 1 et 5 : 3-38 et 353-391, vol. VII, n° 4 : 493-560.
- Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols, 1967. — Classification des sols. E.N.S.A. Grignon, 87 p. *multigr.* — Groupe de Travail Andosols, 1972. — Projet de classification des andosols, *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. X, n° 3 : 302-303.
- DABIN (B.), 1967. — Sur une méthode d'analyse du phosphore dans les Sols tropicaux. Colloque sur la fertilité des Sols tropicaux, Tananarive (Madagascar), nov. 1967. Publ. IRAT, 99-115.
- DABIN (B.), 1971. — Étude d'une méthode d'extraction des matières humiques du sol. *Sci. du Sol*, n° 1 : 47-63.
- DUCHAUFOUR (Ph.), JACQUIN (F.), 1961. — Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. *Bull. ENSA*, Nancy, T. VIII, Fasc. 1.
- FERNANDEZ-CALDAS (E.), QUANTIN (P.), TEJEDOR-SALGUERO (M.), 1980. — Séquences climatiques de sols dérivés de roches volcaniques aux îles Canaries. *Geoderma*, 26 : 47-62.
- FLACH (K. W.) *et al.*, 1980. — Genesis and classification of Andepts and Spodosols, in Theng, Soils with variable charge. *New Zealand Society of Soil Science* : 411-426.
- HETIER (J. M.), 1973. — Caractérisation et répartition de quelques sols sur roches volcaniques du Massif Central. *Sci. du Sol*, 2 : 97-114.
- HETIER (J. M.), 1975. — Formation et évolution des andosols en climat tempéré. Thèse Univ. Nancy, 194 p. *multigr.*
- International Committee on the Classification of Andisols, 1979-80 — Circular letters nos 1, 2 et 3. (Dr. M. LEAMY, *New Zeal. Soil Bureau*).
- LULLI (L.), BIDINI (D.), 1978. — Guida escursione-dibattito sui suoli dei vulcani Roccamonfina e Vulture. Centro Genes. *Classif. Cartogr. Suolo, CNR, Univ. Firenze.* Publ. n° 51.
- LULLI (L.), BIDINI (D.), 1980. — A climosequence of soils from tuffs on slopes of an extinct volcano in Southern Italy. *Geoderma*, 24 : 129-142.
- LULLI (L.), BIDINI (D.), DABIN (B.), QUANTIN (P.), 1983. — Étude de deux sols andiques dérivés de roches volcaniques, d'Italie du Sud (Monts Roccamonfina et Vulture) à caractère cryptopodzolique. I. Environnement, morphologie et caractères des constituants minéraux. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XX, n° 1 : 27-44.
- MOINEREAU (J.), 1977. — Altération des roches, formation et évolution des sols sur basalte, sous climat tempéré humide (Velay, Vivaray, Coirons). Thèse Univ. Montpellier, 139 p.
- QUANTIN (P.), 1972. — Note sur la nature et la fertilité des sols sur cendres volcaniques, provenant d'éruptions récentes dans l'Archipel des Nouvelles-Hébrides. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. X, nos 2 et 3 : 123-151 et 207-217.
- QUANTIN (P.), 1974. — Hypothèses sur la genèse des andosols en climat tropical. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XII, n° 1 : 3-12.
- QUANTIN (P.), 1972-79. — Archipel des Nouvelles-Hébrides. Atlas des sols et de quelques données du milieu naturel. O.R.S.T.O.M., Paris, 7 fascicules et 18 planches de carte.
- SIEFFERMANN (G.), 1969. — Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Thèse Univ. Strasbourg, *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XX, n° 1, 1983 : 45-61.

- 285 p. multigr., publ. *Mém. de l'O.R.S.T.O.M.* n° 66, 1973, 183 p.
- SIFFERT (B.), WEY (R.), 1961. — Sur la synthèse de la kaolinite à la température ordinaire. *CR. Ac. Sci., Paris*, 254 : 1460-1463.
- SIFFERT (B.), 1962. — Quelques réactions de la silice en solution. La formation des argiles. *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.* n° 21, Strasbourg.
- SMITH (G.), 1978. — A preliminary proposal for reclassification of Andepts and some andic subgroups. *New Zeal. Soil Bureau*, 20 p. multigr.
- SOKOLOV (I. A.), 1973. — Volcanisme et pédogenèse ; sur l'exemple des sols du Kamchatka. *Izd. Nauka, Moscou*, 1973, traduction O.R.S.T.O.M., Bondy.
- SUDO (T.), SHIMODA (S.), 1978. — Clays and clay minerals of Japan. Elsevier, development in sedimentology n° 26, 326 p.
- TAIT (J. M.), YOSHINAGA (N.), MITCHELL (B. D.), 1978. — The occurrence of imogolite in some Scottish soils. *Soil Sci. Plant. Nut.*, 24 : 145-151.
- U.S.D.A., 1975. — Soil Taxonomy. *Soil Conserv. Serv., Agricult. Handbook* n° 436. Washington.
- WADA (K.), HIGASHI (T.), 1976. — The categories of aluminium and iron-humus complexes in Ando-Soils determined by selective dissolution. *J. Soil Sci.*, 27 : 357-368.
- WALKER (T. W.), SYERS (J. K.), 1976. — The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 15 : 1-19.
- YOSHINAGA (N.), AOMINE (S.), 1962. — Imogolite in some ando-soils. *Soil Sci. Plant. Nutrit.*, 8, 3 : 22-29.
- ZEBROWSKI (Cl.), 1973. — Quelques andosols de Madagascar et de la Réunion. Problème de la podzolisation sur un andosol. O.R.S.T.O.M., *Bull. liaison*, Thème D « andosols », n° 2 : 53-77.