

**Proposition du taux de capacité d'échange de cations dépendante du pH,  
comme critère de classification  
des andosols des Nouvelles-Hébrides, (Vanuatu) <sup>(1)</sup>**

Paul QUANTIN, *Pédologue O.R.S.T.O.M.*

Avec la collaboration technique de M<sup>me</sup> Annie BOULEAU

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

RÉSUMÉ

*La valeur élevée de  $\Delta C.E.C.$ , différence de la capacité d'échange cationique entre pH acide et pH alcalin est un caractère des andosols. Mais des études antérieures ont montré que cette valeur varie selon la composition chimique des argiles allophaniques. Ce fait est confirmé par des mesures sur différents groupes d'andosols des Nouvelles-Hébrides. Plutôt que la valeur absolue de  $\Delta C.E.C.$  nous proposons de comparer le taux de  $\Delta C.E.C.$  des différents groupes d'andosols :  $\frac{C.E.C. (pH 9) - C.E.C. (pH 4)}{C.E.C. (pH 9)} \times 100$ . Cela met en évidence des intervalles, qui distinguent les divers groupes d'andosols étudiés. En outre, il y a une relation étroite entre le taux de  $\Delta C.E.C.$  et un couple de données suivantes : la composition chimique des produits allophaniques (rapport  $SiO_2/Al_2O_3$  mol. des fractions  $< 2\mu$  et « amorphes ») et les conditions de leur genèse (durée de formation et pluviosité du climat). Le taux de  $\Delta C.E.C.$  est donc proposé comme l'un des critères de classification des andosols.*

ABSTRACT

ABOUT THE RATIO OF pH DEPENDENT C.E.C., AS A CRITERION FOR THE CLASSIFICATION OF ANDOSOLS  
IN NEW HEBRIDES (VANUATU)

*The high  $\Delta C.E.C.$  value, which is the difference between Cation Exchange Capacity at acid and alkaline pH, is an andosol characteristic. However, previous studies showed that this value depends on the chemical composition of allophanic clays. This fact is confirmed by measures on different New-Hebrides andosols. Instead of absolute  $\Delta C.E.C.$  value, we propose to compare the different andosol groups on the basis of the  $\Delta C.E.C.$  ratio :  $\frac{C.E.C. (pH 9) - C.E.C. (pH 4)}{C.E.C. (pH 9)} \times 100$ . This brings out some intervals which allow to distinguish the diverse groups of andosols we have studied. Moreover, there is a close relationship between the  $\Delta C.E.C.$  ratio and the pair of following data : The chemical composition of allophanic products ( $SiO_2/Al_2O_3$  molar ratio of the less than  $2\mu$  and « amorphous » fractions) and their genesis conditions (formation time and rainfall). Therefore the  $\Delta C.E.C.$  ratio is proposed as a criterion for andosols classification.*

(1) CONGRÈS DE L'ASSOCIATION INTERNATIONALE DE SCIENCE DU SOL, New-Dehli (8-16 février 1982). L'A.I.S.S. ne publiant pas les communications faites au Congrès de New-Dehli, les cahiers de l'O.R.S.T.O.M. de Pédologie présentent le texte suivant.

TABLEAU I

C.E.C., taux de capacité d'échange variable, déshydratation irréversible et autres données de sols andiques du Vanuatu et de minéraux (argiles, oxydes) de référence

Sol - Groupe	Ile	Echant. N°	C.E.C. mé/100g			ΔCEC		Déshydratation irréversible		Produits "amorphes"		SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mol.		Matière organi. %	Densité Da g/cc	Surface spécif. < 2μ m <sup>2</sup> /g
			pH 4	pH 7	pH 9	mé/100g	Taux %	ΔpF <sub>3</sub> %	Taux %	Σ %	SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mol.	< 2mm	< 2μ			
TROPORHENTS Andic (à opale)	Tanna	5161	2,31	4,19	5,14	2,83	55,1	22,0	79,7	0,7	0,6	5,5	~15	2,0	1,0	-
"	Ambrym	2111	4,53	7,74	10,49	5,96	56,8	17,3	66,0	5,4	3,3	5,2	~15	2,2	1,1	-
VITRANDEPTS Umbric	Tanna	5162	5,35	8,66	15,60	10,25	65,7	24,0	58,4	( 5,0	4,7	4,4	4,2	1,3	0,8	170
"	"	5181	"	"	"	"	"	"	"	(11,5	1,0	3,8	5,0	7,7	"	250
VITRANDEPTS Mollic (régime udic)	"	5151	10,16	22,50	24,85	14,65	59,1	30,3	64,3	4,5	4,2	5,3	14,7	6,1	0,9	180
"	"	5171	"	"	"	"	"	"	"	32,2	1,8	3,9	5,7	7,4	0,85	225
(à allophane " + halloysite)	Ambrym	2112	17,23	27,57	33,57	16,34	48,7	11,5	33,4	-	-	3,7	4,5	1,1	-	-
"	Aoba	2431	17,67	46,07	49,04	31,37	64,0	14,2	33,2	17,4	3,6	4,7	6,2	13,4	0,8	-
"	"	2432	14,58	28,58	32,67	18,09	50,0	17,6	49,6	(21,0	4,2	5,4	7,1	4,35	0,75	-
"	"	2433	"	"	"	"	"	"	"	(24,2	4,4	4,7	-	0,7	-	-
"	Tongoa	1561	25,26	41,01	47,70	22,44	47,0	12,2	25,3	-	-	2,6	2,25	7,1	-	-
(régime ustic)	Aoba	2472	24,50	37,53	41,71	17,21	41,3	4,2	15,2	23,5	4,3	5,6	4,3	2,2	-	-
EUTRANDEPTS Udic (à allophane " + halloysite)	Ambrym	2114	25,97	42,00	51,90	25,93	50,0	11,8	22,7	34,4	2,8	3,3	3,4	0,6	0,8	145
"	Aoba	2444	12,64	19,62	25,26	12,62	50,0	42,0	67,1	24,2	2,2	4,0	2,6	1,3	-	-
"	"	2453	19,61	33,73	41,46	21,85	52,7	26,9	47,0	25,6	2,4	4,0	3,4	2,4	-	-
"	"	2532	29,45	43,68	62,06	32,61	52,3	11,2	20,7	-	-	3,6	2,5	0,8	-	120
EUTROPEPTS Andic (régime udic)	Tongoa	1542	18,70	29,95	43,78	25,08	57,3	13,2	31,3	24,2	2,5	2,2	2,1	1,7	-	-
"	"	1544	24,49	38,64	51,72	27,23	52,6	18,1	35,4	51,9	1,9	2,0	2,0	0,8	-	-
EUTRANDEPTS Udic (à allophane " + halloysite)	Banks	2301	23,75	50,70	56,68	32,93	58,1	26,1	37,2	8,5	2,0	2,5	2,0	17,5	-	110
"	"	2302	17,88	31,04	39,98	22,10	55,3	34,0	44,3	14,5	2,0	2,2	1,3	9,45	-	130
"	"	4661	18,75	38,59	56,77	38,02	67,0	25,2	39,8	-	-	2,6	2,45	7,7	-	150
"	"	4663	16,27	20,10	40,12	23,85	59,4	13,1	23,8	32,3	2,2	2,3	2,7	0,6	-	330
EUTROPEPTS Andic (régime udic)	Tanna	5153	16,04	24,54	38,90	22,86	58,8	22,5	34,5	28,3	2,8	3,4	3,0	1,2	0,65	180
"	"	5302	22,05	30,36	47,90	25,85	54,0	20,6	29,1	-	-	2,2	2,1	1,0	0,7	140
(à halloysite)	"	5342	25,81	30,15	68,40	42,59	62,3	20,5	31,9	-	-	2,7	3,1	0,9	-	150
"	Santo	503	21,39	22,50	51,33	29,94	58,3	18,9	29,0	-	-	1,9	-	0,85	0,8	170
"	Pentecôte	2252	25,50	38,81	56,50	31,00	54,9	26,7	36,3	-	-	1,9	1,8	0,5	-	-
DYSTRANDEPTS Typic (à allophane)Hydric	Banks	2311	19,95	33,19	51,46	31,51	61,2	58,9	59,9	32,7	0,7	0,8	0,8	17,0	-	340
"	"	2313	12,34	23,23	38,54	26,20	68,0	79,7	73,1	37,0	1,3	0,7	0,9	2,8	-	260
"	"	4611	26,33	57,20	77,03	50,70	65,8	58,9	53,8	-	-	2,2	1,9	19,9	-	390
"	"	4613	16,85	41,86	56,23	39,38	70,0	51,3	48,8	-	-	2,0	1,6	3,8	-	400
"	Tanna	5163	15,97	21,29	67,08	51,11	76,2	49,5	46,3	-	-	2,2	2,2	0,7	-	320
DYSTRANDEPTS Oxide (ou Andic Dystropepts)	"	5164	27,93	33,46	70,40	42,47	60,3	17,0	26,7	-	-	2,4	2,6	0,5	0,55	130
"	"	1103	21,08	28,99	40,47	19,39	47,9	33,9	44,3	-	-	2,3	2,1	1,0	-	130
"	Vaté	3112	22,29	33,86	72,45	50,16	69,2	39,2	45,6	-	1,3	2,1	2,0	0,9	0,7	-
"	Erromango	5003	21,50	31,78	47,03	25,53	54,3	18,2	31,3	-	-	2,2	2,1	0,9	0,8	120
(à halloysite)	"	5092	18,78	23,20	49,47	30,69	62,0	19,2	28,7	-	-	2,3	-	1,1	-	220
"	"	5103	13,24	16,22	43,91	30,67	69,8	44,0	53,5	-	-	2,0	2,0	1,5	-	-
"	Pentecôte	2272	11,46	15,42	43,54	32,08	73,7	33,9	45,1	-	-	1,4	1,6	0,6	-	-
HYDRANDEPTS Typic (à imogolite)	Banks	4441	17,10	44,86	69,54	52,44	75,4	172,5	77,5	(37,2	0,6	2,0	2,5	27,7	-	420
"	"	4551	"	"	"	"	"	"	"	(15,6	0,5	3,0	1,3	24,5	-	200
"	"	2332	10,85	11,70	35,44	24,59	69,4	229,2	90,5	33,8	0,5	1,25	-	6,8	0,3	-
"	"	4552	"	"	"	"	"	"	"	29,2	0,6	1,7	1,25	11,1	0,3	260
"	"	2333	14,90	17,84	49,96	35,06	70,2	158,2	81,9	(-	-	0,7	-	3,4	0,3	-
"	"	4554	"	"	"	"	"	"	"	(37,2	0,6	0,75	1,2	3,2	-	450
"	"	4631	16,42	67,56	79,23	62,81	79,3	184,6	78,1	-	-	2,4	2,0	31,4	-	-
"	"	4632	18,67	20,22	64,29	45,62	71,0	161,3	77,9	(43,6	0,7	1,2	1,25	14,1	0,3	590
"	"	4652	"	"	"	"	"	"	"	(45,6	0,7	1,15	1,1	10,1	-	350
"	Tanna	5182	15,20	22,83	60,53	45,33	74,9	-	-	54,4	0,9	1,3	1,8	3,6	-	740
"	Pentecôte	2152	15,54	16,18	51,26	35,72	69,7	100,2	67,5	-	-	1,6	-	3,4	-	-
"	"	2171	13,23	32,40	53,47	40,24	75,3	138,1	80,8	-	-	4,3	-	21,4	-	-
intergrade + Oxide	Maewo	2631	"	"	"	"	"	50,0	53,7	-	-	1,1	-	11,9	0,55	-
"	"	2632	12,99	21,11	40,21	27,22	67,7	85,0	67,0	32,7	0,8	0,9	1,0	3,0	-	-
HYDRANDEPTS Oxide (à gibbsite)	Santo	3582	7,00	7,98	28,29	21,29	75,3	87,3	76,4	(-	-	0,3	0,3	3,3	-	-
"	"	3593	"	"	"	"	"	"	"	(22,8	0,1	0,25	0,25	4,5	0,5	160
"	Futuna	5362	9,50	14,42	35,23	25,73	73,0	73,4	71,6	-	-	0,5	0,4	4,6	0,5	140
EUTROPEPTS Typic (à smectites)	Malikolo	4142	44,21	57,01	64,05	19,84	31,0	14,9	21,1	-	-	3,2	3,25	1,4	-	90
"	"	4182	52,70	66,85	69,67	19,67	24,4	14,6	21,3	-	-	3,9	3,7	1,35	0,75	80
"	Maewo	2702	69,50	71,0	73,6	4,1	5,6	10,6	20,2	-	-	4,2	3,8	1,1	-	-
"	Santo	3773	43,92	50,22	52,71	8,79	16,7	2,0	5,8	-	-	3,2	2,8	1,5	1,2	70
ARGILES Kaolinite	Géorgie	K	2,2	5,4	6,7	4,5	67,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Métahalloysite	Nelle Calédonie	mH	6,8	10,4	20,5	13,7	66,8	-	-	-	-	-	-	-	-	40
Halloysite	Vaté	H	33,4	38,9	60,1	26,7	44,4	-	-	-	-	-	-	-	-	160
Illite	New York	I	11,3	13,2	17,2	5,9	34,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vermiculite	Montana	V	29,3	31,4	46,5	17,2	37,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Montmorillonite	Pensylvanie	M	41,25	44,3	64,1	22,85	35,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bentonite	Wyoming	B	53,9	61,9	59,4	8	12,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OXIDES Gibbsite	Baya (Brésil)	Gi	0,42	1,11	4,29	3,87	90,2	-	-	-	-	-	-	-	-	80
Goethite	Nelle Calédonie	Go	2,8	4,7	39,3	36,5	92,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## ZUSAMMENFASSUNG

Das hohe  $\Delta K.U.K.$ -Wert (unterschied zwischen kationeumtauschkapazität-Wert bei saurem and alkalinischem pH, ist ein bekannte Eigenschaft der Ando-Böden. Durch vorhergehende Studien weiss man auch das die  $\Delta K.U.K.$ -Wert von der chemischen Zusammensetzung der tonminerale abhängt, besonders in der Ando-Böden der Neuen-Hebriden. Wir schlagen hier vor die verschiedenen Ando-Böden durch das Verhältniss:  $\frac{K.U.K. (pH 9) - K.U.K. (pH 4)}{K.U.K. (pH 9)} \times 100$ , zu kennzeichnen eher als durch den absoluten  $\Delta K.U.K.$ -Wert. Man zeigt das die verschiedenen Ando-Böden Gruppen sich durch ganz unterschiedliche Werte dieses Verhältniss kennzeichnen lassen.

Man kann ebenfalls einen engen Zusammenhang zeigen zwischen diesem Verhältniss, und der chemischen Zusammensetzung der allofane ( $SiO_2/Al_2O_3$  Der unter  $2\mu$  und amorfen Fraktion) und den Bodenbildung Faktoren (regenhöhe und Geschwindigkeit der Bodenentwicklung). Wir schlagen also vor dieses verhältniss als Grundlage der Bodenklassifikation der Ando-Böden zu benutzen.

## RESUMEN

El alto valor de  $\Delta C.I.C.$ , diferencia de la capacidad de intercambio de cationes, entre un pH ácido y un pH básico, es un carácter de los andosuelos. Pero unos estudios anteriores mostraron que este valor cambia con la composición química de las arcillas alophanicas. Este hecho se confirma por unas medidas sobre diferentes grupos de andosuelos de las Nuevas-Hébridias. En lugar del valor absoluto de  $\Delta C.I.C.$ , proponemos comparar el porcentaje de esta variación, según la fórmula:  $\frac{C.I.C. (pH 9) - C.I.C. (pH 4)}{C.I.C. (pH 9)} \times 100$ , entre diferentes grupos de andosuelos.

Esta comparación señala unos intervalos de  $\Delta C.I.C.$  que permiten diferenciar varios grupos de andosuelos. Además, hay una relación estrecha entre el porcentaje de  $\Delta C.I.C.$  y un par de datos siguientes: la composición química de los productos alofanicos ( $SiO_2/Al_2O_3$  mol. de las fracciones  $< 2\mu$  « amorfas »), y las condiciones de formación de éstos (duración de desarrollo y pluviosidad del clima). Entonces, proponemos que el porcentaje de  $\Delta C.I.C.$  sirva como criterio de la clasificación de los andosuelos.

## INTRODUCTION

Il est bien connu que les andosols ont une capacité d'échange cationique (C.E.C.), qui est très dépendante du pH de la solution (BIRREL et GRADWELL, 1956, WADA et ATAKA, 1958, FIELDS et SCHOFIELD, 1960, etc.). La différence de C.E.C. entre pH 10,5 et 3,5, ou valeur  $\Delta C.E.C.$ , a été proposée pour déterminer quantitativement l'allophane (AOMINE et JACKSON, 1959). Cependant, deux des principaux constituants des andosols, l'allophane et l'imogolite, ont des valeurs différentes de  $\Delta C.E.C.$  (YOSHINAGA et AOMINE, 1962). En outre les études antérieures ont montré que la valeur  $\Delta C.E.C.$  dépend de la composition chimique des argiles allophaniques, d'après leur rapport molaire  $SiO_2/Al_2O_3$  (WADA, 1967). C'est pourquoi nous avons voulu vérifier si cette valeur  $\Delta C.E.C.$  pourrait servir à caractériser divers groupes d'andosols, en fonction de leur évolution géochimique et de leurs conditions climatiques. Une formule du taux de C.E.C. variable a déjà été proposée comme critère des sols à complexe d'échange dominé par des produits amorphes (E.C.D.A.M.), notamment les andosols (U.S.D.A., 1975 — ICOMAND, 1979). Notre formule est différente, puisqu'elle exprime le pourcentage de variabilité de C.E.C. entre deux valeurs extrêmes : à pH 9 et à pH 4.

## MATÉRIAUX ET MÉTHODES

## Échantillons

Nous avons utilisé 52 échantillons de sols de l'archipel volcanique des Nouvelles-Hébrides (QUANTIN, 1978). Ces sols dérivent de produits volcaniques pyroclastiques, apparentés à des basaltes, andésites, ou dacites. Le climat est tropical, plus ou moins humide (régime d'humidité : perudic ; udic ou ustic). Parmi ces sols prédominent des andosols ou des sols à caractères andiques. Les groupes principaux sont désignés selon la classification française (C.P.C.S., 1967), modifiée d'après les propositions du groupe de travail des andosols (1972), et d'après leur équivalence dans la taxonomie des sols américaine (1975) : Andosols vitriques (andic Troprothents, umbric ou mollic Vitrandepts), Andosols saturés (udic Eutrandedpts), sols bruns eutrophes-andiques et sols ferralitiques faiblement désaturés à halloysite (andic Eutropepts), Andosols désaturés typiques (typic Dystrandedpts), ou perhydratés (typic Hydrandedpts), sols ferralitiques ou fersialitiques désaturés andiques à halloysite (oxic Dystrandedpts), sols ferralitiques andiques, perhydratés, riches en gibbsite (pour lesquels nous proposons le groupe oxic Hydrandedpts). Nous avons ajouté quelques sols

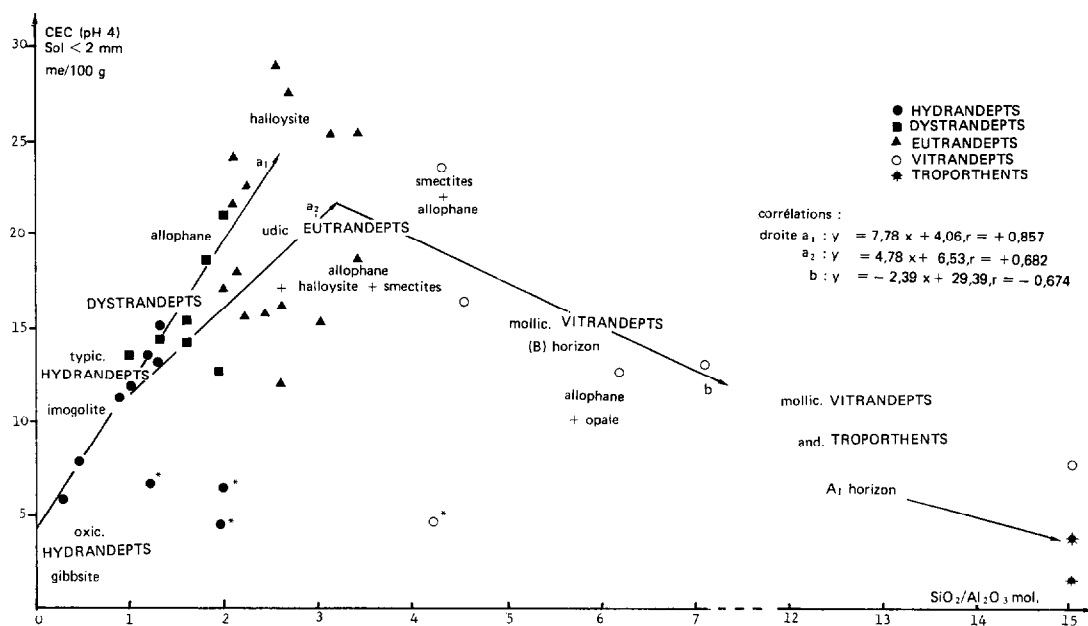


FIG. 1. — Relation C.E.C. (pH 4) sol < 2 mm et SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mol fraction < 2 μ d'andosols du Vanuatu. C.E.C. (pH 4) valeur corrigée (— 0,38 me/1 g Matière Organique)  
\* valeur aberrante (échantillon très humifère)

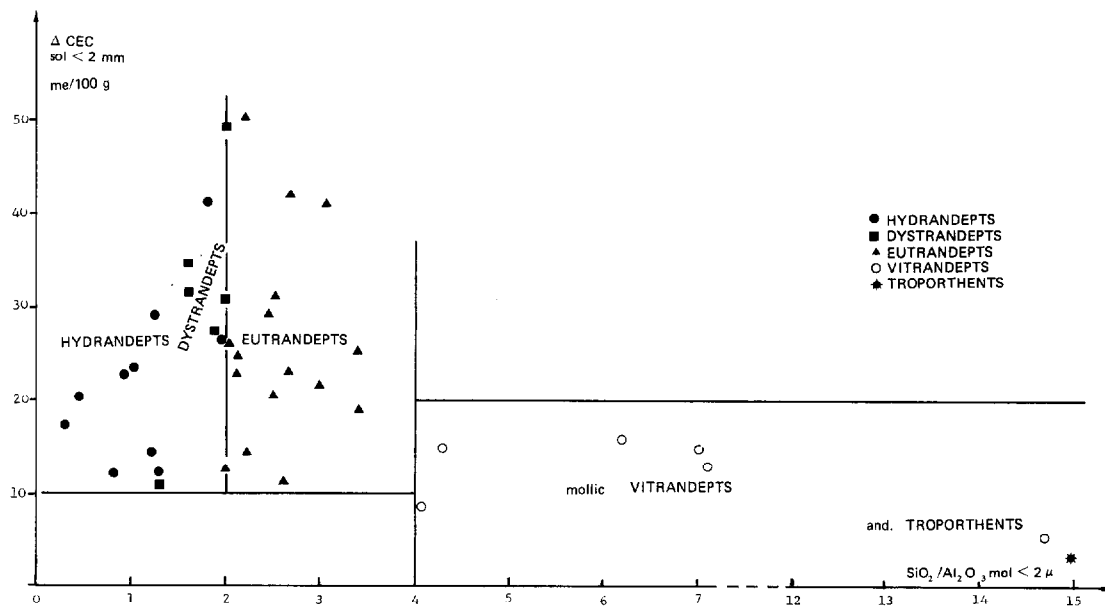


FIG. 2. — Relation Δ C.E.C. (sol < 2 mm) et SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mol (fraction < 2 μ) d'andosols du Vanuatu. Δ C.E.C. entre pH 9 et pH 4 valeur corrigée (— 1,15 me/1 g Matière Organique)

bruns eutroques ou fersialitiques saturés (typic ou vertic Eutropepts) et 9 échantillons de minéraux argileux et 2 d'oxy-hydroxydes, pour la comparaison (tabl. I). Pour simplifier dans la suite du texte et les illustrations, nous ferons souvent appel à la nomenclature américaine.

Les différents groupes d'andosols et sols andiques choisis, constituent une séquence géochimique d'altération, en fonction du temps (des moins aux plus évolués), et selon trois filiations climatiques (régime d'humidité : perudic, udic et ustic).

## Méthodes

Nous avons mesuré la C.E.C. sur le sol global (< 2 mm), conservé humide, afin de prévenir les effets d'une déshydratation irréversible sur les colloïdes du sol. Nous n'avons utilisé aucun pré-traitement, pour éviter une modification des colloïdes minéraux et mesurer le comportement global réel du sol. Mais, il faudra tenir compte de l'effet des acides humiques sur les valeurs de C.E.C. et  $\Delta$ C.E.C (nous l'avons estimé par une approche statistique).

La C.E.C. a été mesurée à trois valeurs de pH : 4, 7 et 9, avec le seul et même cation :  $\text{NH}_4$ , et en solution-tampon :

— pH 4 ou 7, par  $\text{NH}_4$  oxalate — acide oxalique,  
— pH 9, par  $\text{NH}_4\text{Cl} - \text{NH}_4\text{OH} + \text{Triéthanolamine}$ ,  
— lavage par éthanol, déplacement du  $\text{NH}_4$  par  $\text{KCl}$ , dosage de  $\text{NH}_4$ , après oxydation en  $\text{NO}_3$ , par colorimétrie au bleu d'indophénol (Berthelot) avec l'auto-analyseur Technicon (DABIN *et al.*, 1965).

Les valeurs de C.E.C. ont été calculées en  $\text{m}\ell/100$  g de sol < 2 mm séché à 105 °C. La valeur  $\Delta$ C.E.C. est la différence entre les deux mesures extrêmes à pH 9 et à pH 4. Le taux de C.E.C. dépendante du pH est donné par la formule :

$$\text{Taux } \Delta\text{C.E.C.} = \frac{\Delta\text{C.E.C.}}{\text{C.E.C. (pH 9)}} \times 100$$

Les résultats sont rassemblés dans le tableau 1 et mis en parallèle avec d'autres données (déshydratation irréversible, produits « amorphes »,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  mol., matière organique, densité apparente et surface spécifique), pour leur être comparées.

## RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

### I. Valeurs de C.E.C.

1. Les valeurs de C.E.C. mesurées à pH 4, 7 ou 9, utilisées séparément, sont trop variables, à l'intérieur de chacun des groupes, pour permettre de classer les andosols. En outre dans ces andosols, il est impossible

de déduire des résultats globaux, la valeur réelle de C.E.C. de la fraction argileuse.

2. Cependant, une relation entre la C.E.C. minimum, mesurée à pH 4, et le rapport molaire  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  de la fraction < 2  $\mu$  (fig. 1), suggère une corrélation avec le degré d'altération et la nature des produits argileux. On observe un accroissement de la C.E.C. minimum, des andosols vitriques (Vitrandepts) aux andosols saturés (udic Eutrandepts), en raison de l'enrichissement en produits argileux, puis une décroissance, des andosols saturés aux andosols désaturés perhydratés les plus riches en hydroxydes d'alumine (oxic Hydrandepts).

Mais il n'y a pas de limite précise entre les principaux groupes d'andosols, car la valeur globale de C.E.C. dépend non seulement de la nature des produits, mais aussi de leur quantité (celle-ci est difficile à évaluer avec précision). On observe cependant une corrélation élevée entre valeurs de C.E.C. et de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  molaire, dans les andosols les plus évolués, à allophane, imogolite et halloysite (pour  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  mol. de 0,3 à 2,5  $\rightarrow$  droite  $a_1$ , fig. 1).

### II. Valeur de $\Delta$ C.E.C.

Les valeurs de  $\Delta$ C.E.C. entre pH 9 et pH 4, sont aussi trop variables pour être significatives de divers groupes d'andosols. Cependant, il semble encore qu'il y ait une relation entre la valeur  $\Delta$ C.E.C. et le taux ou la nature des produits argileux.

1. Il y a une relation très confuse entre la valeur  $\Delta$ C.E.C. et le rapport molaire  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  de la fraction < 2  $\mu$  (fig. 2). On aperçoit un maximum dans les sols les plus riches en allophane et halloysite (udic Eutrandepts), puis la valeur  $\Delta$ C.E.C. diminue dans les sols les plus riches en hydroxydes d'alumine (oxic Hydrandepts).

2. Par contre, il y a une corrélation positive très nette (fig. 3), entre la valeur  $\Delta$ C.E.C. et le taux de produits « amorphes » (méthode SÉGALEN, 1968). Ces produits sont donc responsables de la variabilité de C.E.C. en fonction du pH.

3. Une relation paraît plausible entre les valeurs  $\Delta$ C.E.C. et les rapports molaires  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  des produits « amorphes » (fig. 4). Le graphique met en évidence trois groupes principaux : Vitrandepts, Eutrandepts, et Hydrandepts. Mais, dans ce dernier groupe les valeurs de  $\Delta$ C.E.C. sont, à elles seules, trop variables (en fonction des taux de produits « amorphes » et d'acides humiques), pour permettre une distinction avec les autres groupes. C'est pourquoi nous avons calculé la valeur relative, ou taux de  $\Delta$ C.E.C.

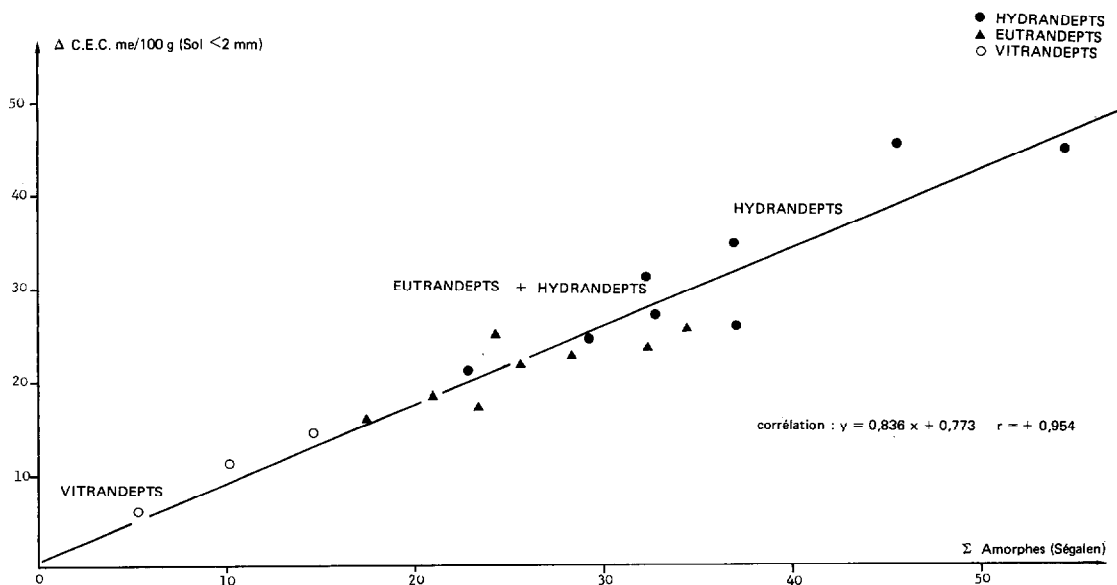


FIG. 3. — Relation  $\Delta$ C.E.C./taux extraits « amorphes » ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), méthode SÉGALEN, Andosols du Vanuatu

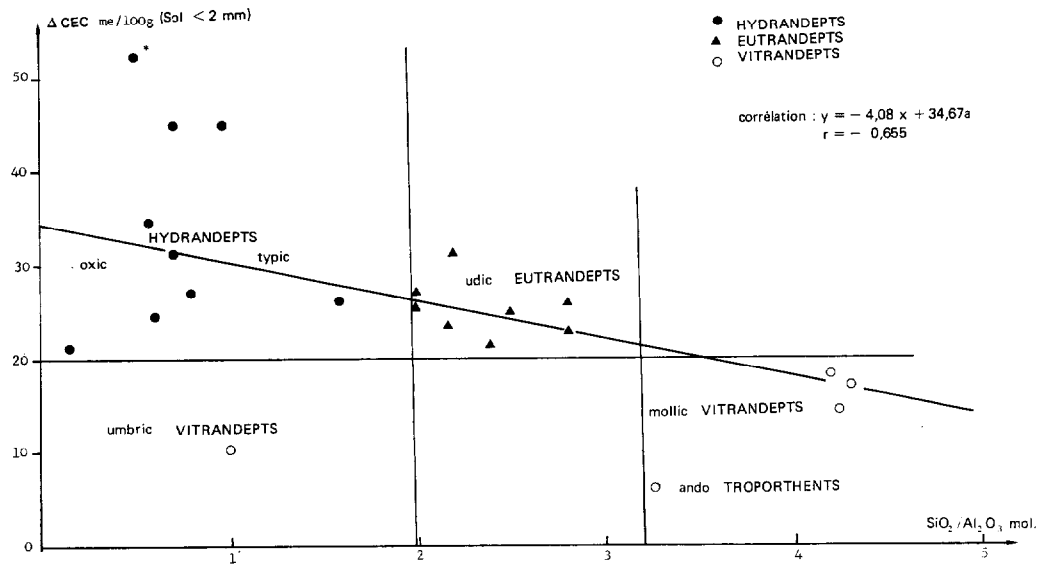


FIG. 4. — Relation  $\Delta$ C.E.C. -  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  mol. extraits « amorphes » (Ségalen), andosols du Vanuatu  
\* échantillon très humifère

$$\text{III. Taux de } \Delta\text{C.E.C.} = \frac{\Delta\text{C.E.C.}}{\text{C.E.C. pH9}} \times 100$$

Le taux de C.E.C. dépendante du pH (Taux de  $\Delta\text{C.E.C.}$ ), est plus significatif que la valeur  $\Delta\text{C.E.C.}$ . Ce taux excède 40 % dans tous les andosols étudiés. Les valeurs semblent peu dépendantes du taux de matière organique et assez peu variables dans un même profil. En outre, il apparaît des intervalles de valeur qui sont assez spécifiques de certains groupes d'andosols. Ces intervalles sont surtout en relation

avec le régime d'humidité, qui conditionne la genèse des colloïdes minéraux du sol, et aussi avec leur degré d'altération. Nous observons successivement les relations suivantes.

1. Une relation (fig. 5) entre le taux de  $\Delta\text{C.E.C.}$  et le rapport molaire  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  de la partie altérée du sol (extrait  $\text{HClO}_4$  de la fraction  $< 2 \text{ mm}$ ), ressort de l'étagement des valeurs en trois groupes principaux : Andosols saturés (Eutrandepts), Andosols désaturés (Dystrandepts), et Andosols perhydratés

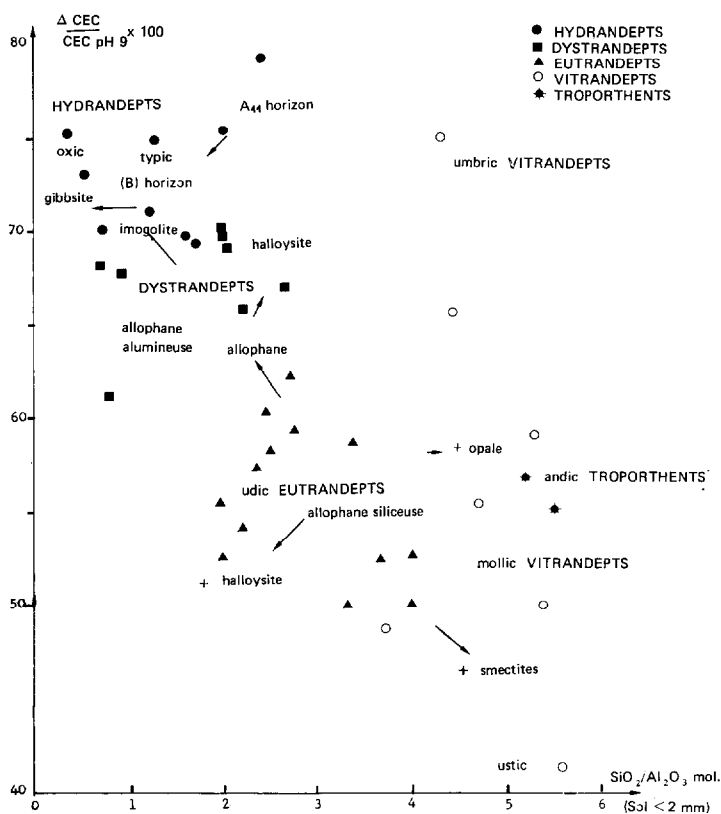


FIG. 5. — Relation taux  $\Delta\text{C.E.C.}$  -  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  mol. ( $\text{HClO}_4$  extr.) Sol  $< 2 \text{ mm}$ , des andosols du Vanuatu

(Hydrandepts). Le graphique montre que le taux de  $\Delta\text{C.E.C.}$  augmente à l'inverse du rapport molaire  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , donc en relation avec le degré d'altération minérale et d'aluminisation du sol. Celui-ci est relié lui-même au degré d'humidité du climat.

La distribution en trois étages des valeurs du taux de  $\Delta\text{C.E.C.}$  reflète bien une différence dans la nature des constituants :

— allophane, opale et halloysite (plus ou moins smectites), dans les Eutrandepts ;

— plus d'allophane et d'hydroxydes d'alumine, dans les Dystrandepts ;

— imogolite et beaucoup d'hydroxydes de fer et d'alumine (gibbsite), dans les Hydrandepts.

2. Le taux de  $\Delta\text{C.E.C.}$ , contrairement à la valeur  $\Delta\text{C.E.C.}$ , ne dépend pas du taux global de produits « amorphes » (SÉGALEN), mais il y a une corrélation négative très nette avec le rapport molaire  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  de ces produits (fig. 6). Il est évident dans les andosols perhydratés (Hydrandepts), que l'accroissement du taux de  $\Delta\text{C.E.C.}$  va de pair avec l'enrichissement en hydroxydes d'alumine cryptocristallins. Donc l'aluminisation développe les charges variables du complexe d'échange.

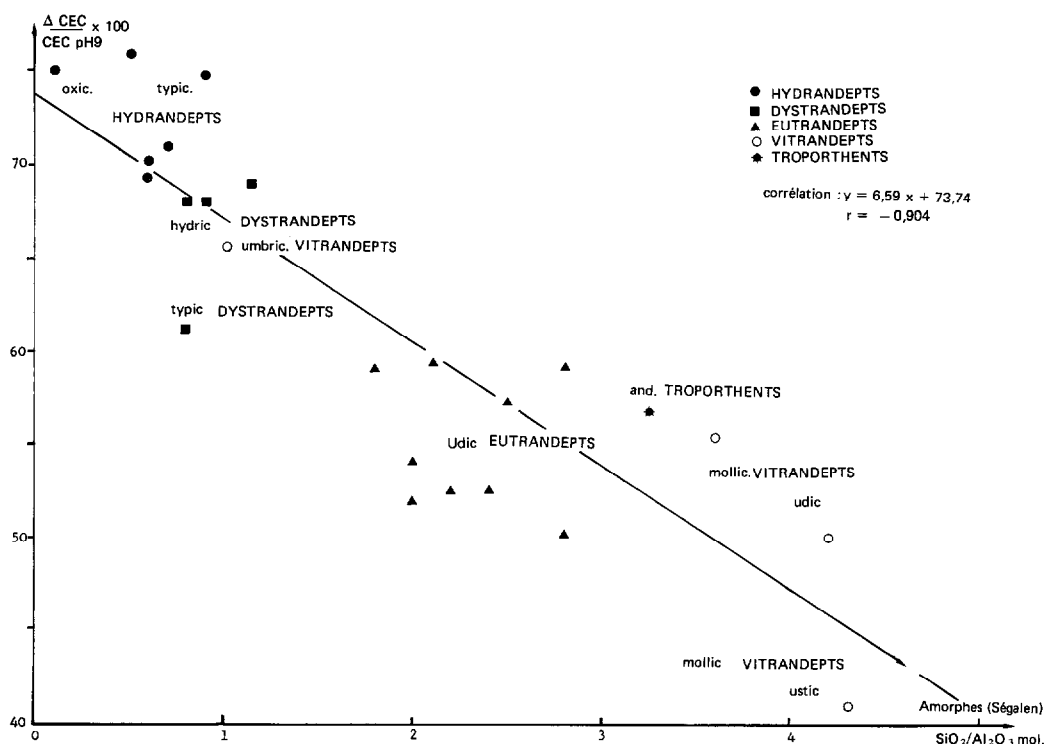


FIG. 6. — Relation taux C.E.C. -  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  mol. « produits amorphes » (Ségalen) des andosols du Vanuatu

3. Le taux de  $\Delta\text{C.E.C.}$  est probablement corrélé avec les propriétés de surface des minéraux secondaires. Mais, la relation avec la surface spécifique n'est pas simple. Le taux de  $\Delta\text{C.E.C.}$  et la surface spécifique sont bien corrélativement plus élevés dans les andosols perhydratés typiques (Typic Hydrandepts). Cependant, la surface spécifique diminue dans les sols riches en gibbsite (Oxic Hydrandepts), tandis que le taux de  $\Delta\text{C.E.C.}$  demeure élevé.

4. Il y a une corrélation entre le taux de  $\Delta\text{C.E.C.}$  et le taux de déshydratation irréversible (Taux  $\Delta pF_3$ ). Celui-ci est une autre propriété caractéristique des andosols (COLMET-DAAGE et CUCALON, 1965 ; G. SMITH, 1978).

La courbe (fig. 7) qui relie le taux de  $\Delta\text{C.E.C.}$  et la valeur  $\Delta pF_3$  (écart de la capacité de rétention en eau, ou valeur  $pF_3$ , entre l'état humide naturel et celui après dessiccation de l'air), n'est pas linéaire, mais parabolique. La valeur  $\Delta pF_3$  s'accroît brusquement plus vite (de 60 à 230 % du poids minéral sec) dans les Hydrandepts, andosols formés en climat perhumide. Cet accroissement va de pair avec le développement de l'état de gel des colloïdes minéraux, ainsi que le suggère le développement concomitant de leur surface spécifique (de 200 à 700  $\text{m}_2/\text{g}$ ).

On observe une assez bonne corrélation entre le

taux de  $\Delta\text{C.E.C.}$  et le taux  $\Delta pF_3$ , ou taux de déshydratation irréversible (fig. 8), et donc probablement avec le développement de l'état de gel des colloïdes minéraux. Cet état s'accuse lui-même avec l'humidité climatique. Sur le graphique (fig. 8), les divers groupes d'andosols sont distribués en ordre croissant de  $\Delta\text{C.E.C.}$  des Vitrandepts aux Hydrandepts, en fonction de leur degré d'évolution minérale et du régime progressivement plus humide du climat.

5. Finalement, il est possible schématiquement (fig. 9) de caractériser divers groupes d'andosols par divers intervalles du taux de  $\Delta\text{C.E.C.}$  en fonction de deux conditions de leur genèse : la pluviosité et le régime d'humidité d'une part, la durée d'altération d'autre part. Trois grands ensembles et filiations apparaissent, en fonction du régime d'humidité :

— en climat perhumide (régime perudic), les andosols perhydratés (Hydrandepts); où il se forme progressivement de l'allophane, de l'imogolite, des gels d'hydroxydes (Fe, Al), puis de la gibbsite, ont un intervalle du taux de  $\Delta\text{C.E.C.}$  de  $\sim 69$  à  $79$  % ;

— en climat humide (régime udic), successivement dans les andosols saturés (mollic Vitrandepts, udic Eutrandepts), puis les andosols désaturés (Dystrandepts), où il se forme progressivement de l'allophane



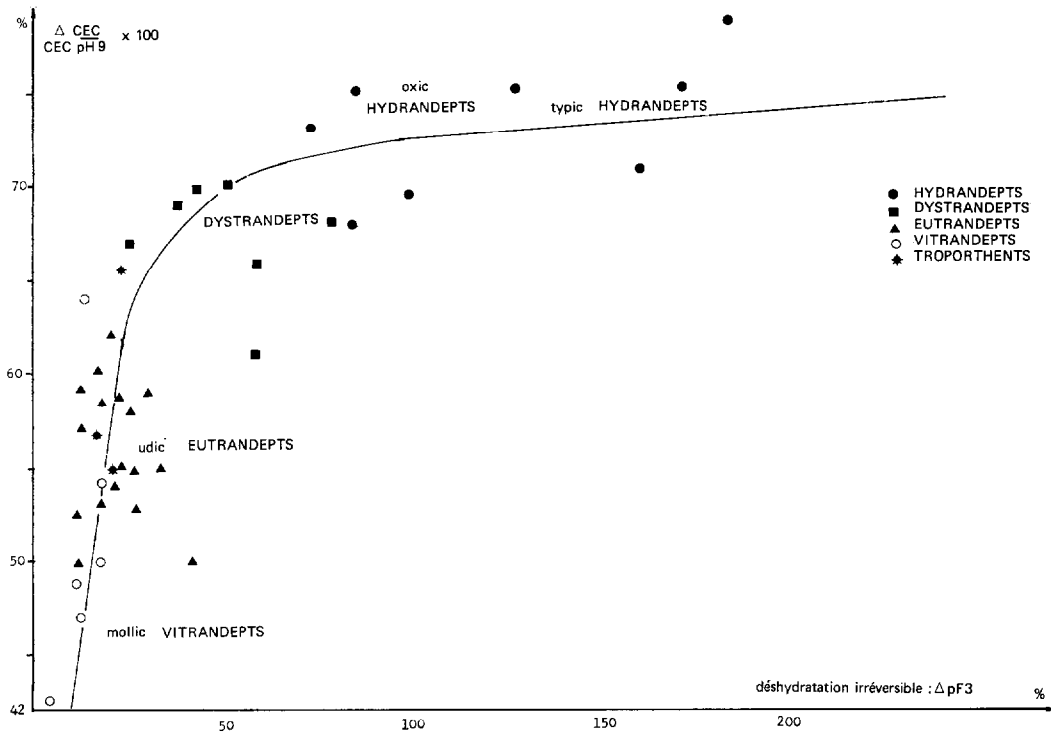


FIG. 7. — Relation  $\Delta C.E.C. - \Delta pF_3$  (déshydratation irréversible), andosols du Vanuatu

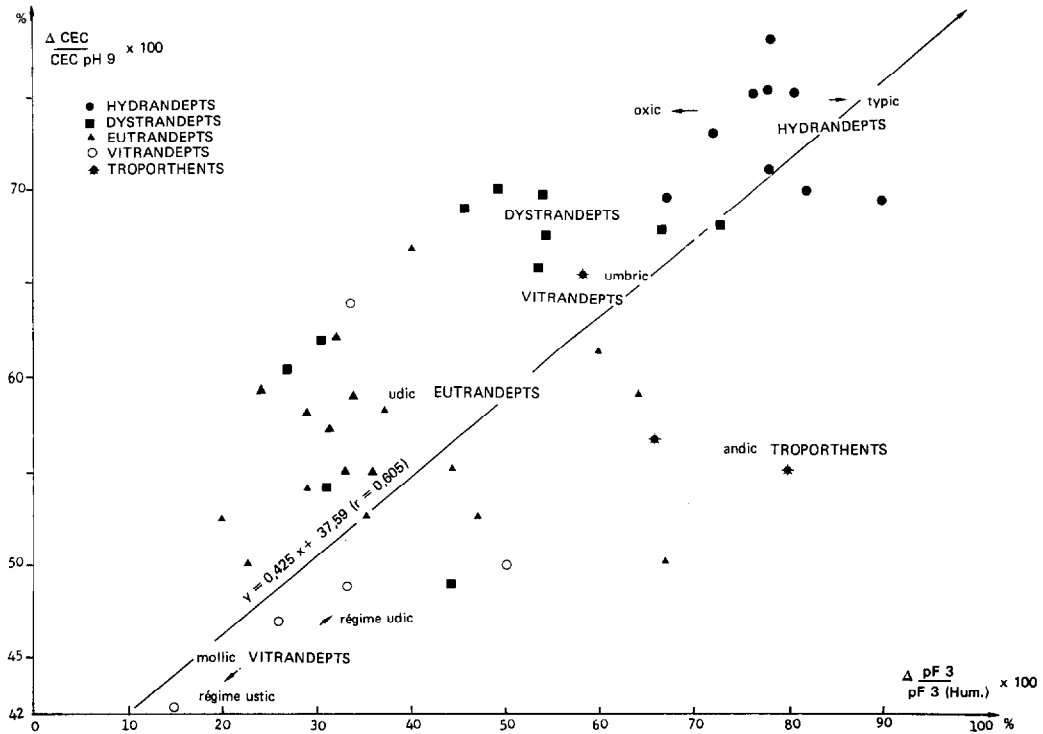


FIG. 8. — Relation taux  $\Delta C.E.C. -$  taux de déshydratation irréversible, andosols du Vanuatu

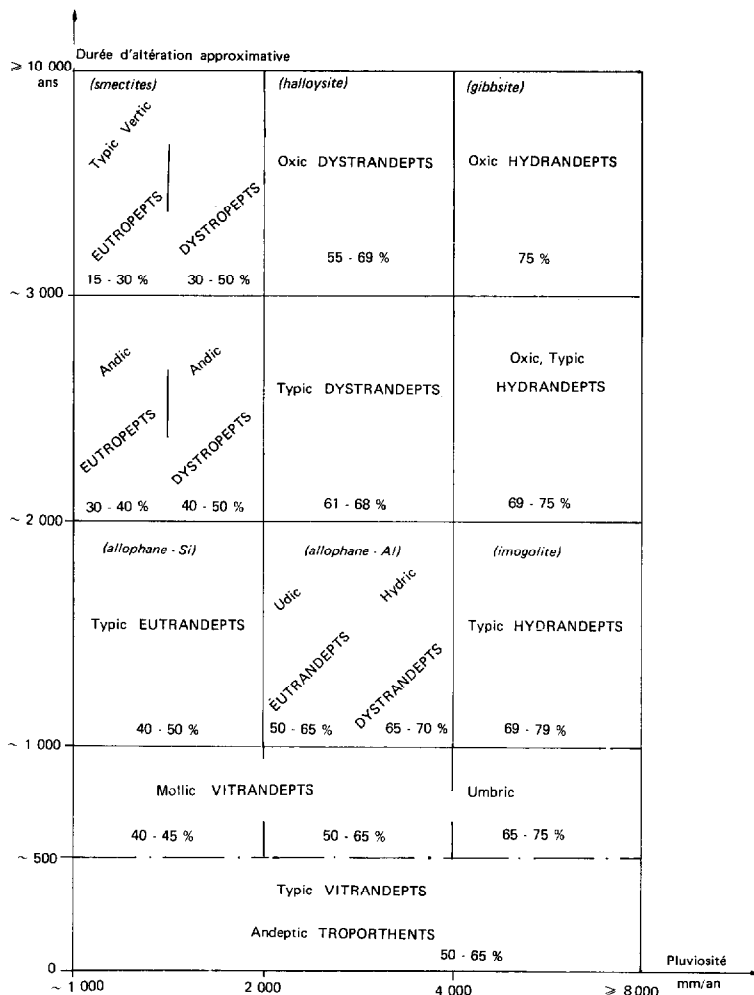


FIG. 9. — Schéma de la relation entre le taux  $\Delta$ C.E.C. des andosols du Vanuatu (et sols dérivés) et leurs facteurs de formation (âge, pluviosité)

et de l'opale, puis de l'halloysite et des hydroxydes de fer et d'alumine, l'intervalle du taux de  $\Delta$ C.E.C. est de  $\sim 50$  à  $69$  % ;

— en climat à courte saison sèche (régime ustic), successivement dans les andosols saturés (mollic Vitrandepts, typic Eutrandedepts), puis les sols fersialitiques ou les sols bruns vertiques (andic Eutropepts, andic Dystropepts, typic ou vertic Eutropepts), où il se forme progressivement de l'allophane et de l'opale, puis des smectites et de la métahalloysite, l'intervalle du taux de  $\Delta$ C.E.C. est de  $\sim 40$  à  $50$  % dans les andosols ou sols andiques et de seulement  $15$  à  $30$  % dans les sols riches en smectites.

6. Une analogie apparaît entre ces résultats et ceux obtenus sur des minéraux argileux et des oxyhydroxydes (tabl. I) :

— sols riches en hydroxydes de fer et d'alumine (Hydrandedepts), de régime perhumide, et une goëthite fine ou une gibbsite fine provenant des sols, dont le taux de  $\Delta$ C.E.C. est  $\sim 90$  % ;

— sols riches en allophane et, ou, en halloysite, de régime humide, et des argiles 1:1, kaolinite et métahalloysite bien cristallisées, dont le taux de  $\Delta$ C.E.C. est  $\sim 67$  à  $69$  % ;

— sols riches en allophane-siliceuse (hisingérite + opale) et, ou, en smectites-ferrifères, et des argiles 2:1, illite, vermiculite et montmorillonite, dont le taux de  $\Delta$ C.E.C. est  $\sim 34$  à  $37$  %.

Cette analogie suggère une filiation. Elle souligne la relation étroite entre le taux de  $\Delta$ C.E.C., la nature des colloïdes minéraux et les conditions de genèse.

Enfin, un tableau (tabl. II), résume pour chaque groupe d'andosols les intervalles du taux de  $\Delta C.E.C.$  et deux propriétés significatives de leurs colloïdes minéraux, le rapport  $SiO_2/Al_2O_3$  molaire et le taux de déshydratation irréversible (Taux  $\Delta pF_3$ ).

CONCLUSION

Il y a une relation évidente entre la valeur de C.E.C. minimum à (pH 4), et la quantité et la nature plus ou moins alumineuse des colloïdes minéraux

composant les andosols. En outre, il y a une corrélation certaine entre la valeur  $\Delta C.E.C.$  (entre pH 9 et pH 4), et la quantité de produits minéraux « amorphes » (méthode Ségalen), et dans une certaine mesure l'aluminisation de ces produits. Mais, ni les valeurs absolues de C.E.C., ni celles de  $\Delta C.E.C.$ , ne permettent de classer les principaux groupes d'andosols.

Le taux de  $\Delta C.E.C.$ , qui exprime d'une manière relative la variabilité de la capacité d'échange cationique en fonction du pH, est plus significative. Il y a une corrélation entre ce taux et la nature plus

TABLEAU II

Intervalles du taux de  $\Delta C.E.C.$  des grands groupes d'Andosols du Vanuatu et comparaison du rapport  $SiO_2/Al_2O_3$  mol. (Fractions amorphes,  $< 2 \mu$ ) et du taux de désydratation irréversible à  $pF_3$  (1) en % sol sec à 105 °C, (2) valeur relative en % de la valeur sur sol humide

GROUPES D'ANDOSOLS	$\Delta C.E.C.$ Taux %	$SiO_2/Al_2O_3$ mol.		Déshydratation irréversible		
		Fraction Amorphe	Fraction < 2 $\mu$	$\Delta pF_3$ % (1)	Taux $\Delta pF_3$ % (2)	
And. Perhydratés HYDRANDEPTS	Oxic	69 - 75	0,3 - 1	0,3 - 1	80 - 100	70 - 80
	Typic	69 - 79	0,5 - 1	0,9 - 1,8	120 - 230	70 - 90
And. Désaturés DYSTRANDEPTS	Oxic	55 - 69	1 - 2	2 - 2,5	40 - 50	40 - 60
	Typic	61 - 68	0,8 - 1	0,9 - 1,9	50 - 60	50 - 60
	Hydric	65 - 70			70 - 80	50 - 70
And. Saturés EUTRANDEPTS	Udic	50 - 65	2 - 2,5	1,9 - 2,7	20 - 40	20 - 70
	Typic	40 - 50	2,2 - 3,0	4 - 7	10 - 20	20 - 50
And. Vitriques VITRANDEPTS	Umbric	65 - 75	-	> 4	-	70 - 80
	Mollic	50 - 65	3,5 - 4,5	5 - 15	10 - 20	50 - 70
	Ustic	40 - 45	4,5	> 4	> 5	10 - 20

ou moins alumineuse des produits minéraux d'altération, et surtout des produits « amorphes », qui constituent la fraction colloïdale des andosols et en déterminent les propriétés de surface. C'est pourquoi des intervalles du taux  $\Delta C.E.C.$  permettent de distinguer plusieurs grands groupes d'andosols.

En outre, il y a une relation évidente entre le taux de  $\Delta C.E.C.$  et le taux de déshydratation irréversible (Taux  $\Delta pF_3$ ), qui est lié lui-même à l'état de gel des colloïdes minéraux. Ceci permet d'affirmer aussi une relation entre le taux de  $\Delta C.E.C.$  et le climat, surtout le régime d'humidité, qui conditionne la genèse des andosols.

Il y a donc, finalement, dans les andosols, une relation étroite entre le taux de variabilité de la capacité d'échange cationique du sol, en fonction du pH, et leur environnement climatique, et consécutivement la nature plus ou moins bien cristallisée des

produits minéraux d'altération qui constituent leur fraction colloïdale.

C'est pourquoi le taux de  $\Delta C.E.C.$  est un critère très utile pour classer les grands groupes d'andosols. Ce critère a une signification écologique (donc génétique). Il a aussi une signification importante pour la fertilité, notamment à cause de sa relation avec l'énergie de fixation du phosphore, ou de la variation de la capacité de rétention des bases échangeables en fonction du pH du sol. Cependant, il est évident que le taux de  $\Delta C.E.C.$  ne peut être utilisé seul comme critère de classification des andosols, et que les intervalles de valeur proposés à la suite de cette étude devront être testés sur un plus grand nombre de sols et dans des régions différentes.

Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.  
le 19 octobre 1982

## BIBLIOGRAPHIE

- AOMINE (S.) et JACKSON (M. L.), 1959. — Allophane determination in Ando-Soils by cation Exchange Capacity Delta Value. *Soil Sci. Soc. Amer. Proceed.*, 23 : 210-214.
- BIRREL (K. S.) et GRADWELL (M.), 1956. — Ion Exchange phenomena in some soils containing amorphous mineral constituents. *J. Soil. Sci.*, 7 : 130-147.
- COLMET-DAAGE (F.) et CUCALON (F.), 1965. — Caractères hydriques de certains sols des régions bananières d'Équateur. *Fruits*, 20, 1 : 19-23.
- Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols, France (C.P.C.S.), 1967. — Classification des sols. Note E.N.S.A. Grignon, 67 p. *Mulligr.*
- DABIN (B.) *et al.*, 1965. — Dosage de l'azote total dans les sols. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. III, n° 4 : 335-348.
- FIELDS (M.) et SCHOFIELD (R. K.), 1960. — Mechanism of ion adsorption by inorganic soils colloids. *New Zealand J. Sci.*, 3 : 563-579.
- Groupe de Travail des Andosols (C.P.C.S., France), 1972. — Proposition de classification des Andosols. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. X, n° 3 : 302-303.
- International Committee on the Classification of Andisols (I.C.O.M.A.N.D.), 1979. — Circular letter n° 1, 3 avril 1979. — Soil Bureau, D.S.I.R., New Zealand.
- QUANTIN (P.), 1972. — Les Andosols. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. X, n° 3 : 273-301.
- QUANTIN (P.), 1974. — Hypothèses sur la genèse des andosols en climat tropical. Évolution de la « pédogenèse initiale » en milieu bien drainé sur roches volcaniques. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XII, n° 1 : 3-12.
- QUANTIN (P.), 1978. — 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 couleurs.
- SEGALEN (P.), 1968. — Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. VI, n° 1 : 105-126.
- SMITH (G.), 1978. — A preliminary proposal for reclassification of Andepts and some Andic subgroups. Letter to U.S. Soil Conservation Service, for the revision of Andept Suborder and the creation of I.C.O.M.A.N.D. group, New Zealand Soil Bureau, 10, April 1978.
- U.S.D.A., Soil Conservation Service, 1975. — Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soils surveys. *Agricult. Handbook*, n° 436.
- WADA (K.) et ATAKA (H.), 1958. — The ion uptake mechanism of allophane. *Soil plant Food (Tokyo)*, 4 : 12-18.
- WADA (K.), 1967. — A structural scheme of soil allophane. *Amer. Mineralogist*, 52 : 690-708.
- YOSHINAGA (N.) et AOMINE (S.), 1962 a. — Allophane in some Ando-Soils. *Soil. Sci. Plant Nutr.*, 8, 3 : 114-121.
- YOSHINAGA (N.) et AOMINE (S.), 1962 b. — Imogolite in some Ando-Soils. *Soil. Sci. Plant Nutr.*, 8, 3 : 114-121.