Les andosols

Revue bibliographique des connaissances actuelles

P. QUANTIN

Pédologue de l'ORSTOM, SCC, Bondy

PLAN

AVANT-PROPOS

1. FACTEUR DE FORMATIONS, RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE
2. MORPHOLOGIE
3. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES
4. MINÉRALOGIE
5. CLASSIFICATION
6. GLOSSAIRE

BIBLIOGRAPHIE

AVANT-PROPOS

Cette mise au point bibliographique a été élaborée de 1968 à 1971 suivant les conseils de P. SÉGALEN. Elle a bénéficié des suggestions et critiques des chercheurs de l'ORSTOM, principalement de P. SÉGALEN, G. SIEFFERMANN, F. COLMET DAAGE et A. NOVIKOFF d'une part, et de chercheurs métropolitains d'autre part, notamment M. le Professeur G. MILLOT, M. le Professeur Ph. DUCHAUFOUR, et MM. J.M. HETIER, G. PEDRO, P. BONFILS et J. MOINEREAU. Une première épreuve multigraphiée a été publiée en octobre 1971 dans le Bulletin de Liaison du thème D des pédologues de l'ORSTOM ; mais elle n'a eu qu'une diffusion restreinte destinée seulement aux pédologues de l'ORSTOM et aux membres du Groupe de Travail sur le thème Andosols ; il a paru intéressant de la faire connaître à un plus grand nombre de lecteurs.

INTRODUCTION

Andosol provient des mots japonais « an do » qui signifient sol noir (FAO-UNESCO, 1964) : il s'agit, au Japon, de sols jeunes formés sur des cendres ou ponces volcaniques dont la caractéristique principale est le développement souvent très grand d'un horizon humifère gris foncé ; ceci est dû à une accumulation importante d'un humus ayant une couleur foncée et une valeur élevée du rapport carbone/azote (C/N).

A l'origine donc, la qualification « andosols » était appliquée à des sols noirs sur cendres ou ponces volcaniques caractérisés par un humus de type moder, un pH acide et la désaturation du complexe d'échange ; ceux-ci correspondaient en même temps à un matériau originel bien particulier : cendres ou ponces volcaniques, et, à un climat tempéré ou subtropical à forte pluviométrie et saison froide bien marquée. Ces conditions et des sols semblables se retrouvent par ailleurs en Nouvelle-Zélande, au Chili, sur les hauts plateaux des Andes, de Nouvelle-Guinée et d'Indonésie.

Une analyse plus approfondie a montré que les andosols avaient des propriétés physiques et chimiques très particulières, inconnues jusque-là dans les autres sols : notamment une capacité de rétention pour l'eau et une valeur de capacité d'échange anormalement élevées en comparaison des teneurs relativement faibles du sol en fraction inférieure à 2 µ, déterminée par l'analyse granulométrique « classique » ; d'autre part leur capacité de rétention pour l'eau s'abaisse très sensiblement et irréversiblement

Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. X, n° 3, 1972 : 273-301.

après dessiccation à l'air ; enfin la valeur de leur capacité d'échange varie très fortement en fonction de la valeur du pH. Ces particularités et de nombreuses autres ont conduit à entreprendre une analyse minéralogique et chimique poussée des constituants des andosols. On a remarqué principalement qu'ils contiennent une forte proportion de substances paraissant amorphes aux rayons X : soit des matières vitreuses « primaires » provenant des verres volcaniques originels, soit des colloïdes minéraux « secondaires », non cristallisés ou mal cristallisés, dont des gels d'hydroxydes et des alumino-silicates « amorphes » ayant des propriétés de gels, que l'on désigne généralement sous le nom « d'allophanes ».

Par la suite, l'appellation « andosol » a été étendue à tous les sols formés sur des cendres, ponces ou matériaux volcaniques meubles, ayant des caractéristiques physiques et chimiques analogues aux « an do » japonais, par suite de leur forte teneur en substances « amorphes » (aux rayons X). Le concept « andosol » a donc été considérablement élargi : par exemple de nombreux sols tropicaux rangés dans cette catégorie, ne présentent par l'horizon humifère très développé et de couleur noire des « an do » japonais ; leur humus caractérisé par une valeur du rapport C/N de 10 s'apparente au « mull-tropical » ; certains ont un complexe d'échange fortement saturé, d'autres l'ont fortement désaturé ; la composition de la fraction inférieure à 2 µ extraite du sol varie fortement ; dans certains sols elle est fortement siliceuse tandis que dans d'autres elle est fortement alumineuse.

La définition des andosols d'une part et leur classification d'autre part sont encore très imprécises, malgré l'abondance des travaux récents sur ce sujet dans tous les pays du monde, principalement au Japon, en Nouvelle-Zélande et en Amérique Centrale. La présence de substances « amorphes » ne peut suffir à définir les andosols, car de telles substances ont été reconnues dans des sols appartenant à des classes très différentes telles que sols ferrallitiques, podzols et sols peu évolués. Se limiter à la présence d'allophane dans le sol est également insuffisant, car sous ce nom ont été désignées des alumino-silicates de nature très diverse : à l'origine ce non a été donné par F. STROMEYER et .JF.L. HAUSMANN (1816) à une substance hyaline et alumino-silicatée, caractérisée par sa très forte teneur en eau (41,3 %) et une valeur du rapport Silice/Alumine de 1,15 ; ensuite les différents auteurs qui ont traité des andosols ont désigné sous le nom d'allophane des alumino-silicates ou des complexes de nature très diverse ne présentant pas de raies bien définies par diffraction aux rayons X (M. FIELDES, 1955 et 1966 ; N. YOSHINAGA et S. AOMINE, 1962 et 1966). L'identification des « allophanes » est encore insuffisamment précisée pour permettre de caractériser les andosols.

Actuellement la définition la plus communément admise pour les « andosols » est celle proposée pour les unités de la carte des sols du monde par la FAO et l'UNESCO (1968) : Les andosols sont des sols formés à partir de matériaux volcaniques pyroclastiques à dominance de constituants vitreux. Leur « complexe d'échange » est caractérisé par une dominance de substances « amorphes » alumino-siliceuses (d'après l'examen aux rayons X). Leur densité apparente est généralement faible et inférieure à 0,85. Un horizon (B) ou (B) — C les distingue des sols peu évolués, bien que cet horizon contienne encore le plus souvent une forte proportion de minéraux « primaires » ; ceux-ci sont constitués généralement par une dominance d'éléments vitreux. Il s'agit, le plus souvent de sols formés sur des matériaux volcaniques récents, encore jeunes, et pouvant évoluer ultérieurement vers d'autres formes.

1. FACTEURS DE FORMATION, RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE

1.1. Matériau originel

Il est généralement admis que les andosols se sont formés à partir de matériaux volcaniques pyroclastiques, cendres, lapillis, ponces et tufs, d'âge récent. Pour cette raison de nombreux auteurs (FAO-UNESCO, 1964) préfèrent le terme plus général de « sols dérivés de cendres volcaniques » à celui « d'andosols ». Les matériaux volcaniques pyroclastiques sont riches en verres très finement divisés ; cet état, pour la plupart des auteurs, (M. FIELDES, K.W... PERROT, 1966 ; I. KANNO *et al.*, 1968 : G. SIEFFERMANN, 1969), permet d'expliquer la rapidité de l'hydrolyse et de l'altération des cendres volcaniques, et la formation exceptionnellement abondante de substances « amorphes » dont les « allophanes ». Parfois l'origine de ce matériau volcanique pyroclastique n'est plus apparente dans le profil : c'est le cas des formations plus anciennes : coulées de laves, roches éruptives grenues, calcaires ou autres roches sédimentaires, faiblement rajeunis par des apports de cendres récents ; dans les cas où les

cendres sont déjà profondément altérées, on ne peut plus distinguer le sol superficiel du sol ancien ou de la roche-mère sous-jacente déjà altérée (H.S. GIBBS, 1968 ; G. TERCINIER et P. QUANTIN, 1968). Dans ce cas, sans un examen approfondi, on pourrait être tenté d'admettre qu'il existe des andosols issus d'autres matériaux originels que les produits volcaniques pyroclastiques dont ils sont probablement dérivés. Cependant, certains auteurs pensent que des andosols ont pu se former directement à partir de laves basaltiques dans le Massif Central français (J. MOINEREAU, 1965) ou sur les hauts plateaux éthiopiens (P. SÉGALEN, comm. orale). D'autre part, il ne faut pas penser a priori que sur des matériaux volcaniques pyroclastiques on observera toujours des andosols. D'autres facteurs orientent la pédogenèse, dont principalement l'âge des matériaux originels, le climat et la géomorphologie. Enfin, il faut signaler que si d'autres matériaux originels que volcaniques sont capables de produire des petites quantités d'allophane (R.J. FURKERT, M. FIELDES, 1968), ils n'en n'ont pas pour autant formé des andosols.

1.2. **Climat et pédoclimat**

Tous les auteurs s'accordent à reconnaître que les sols les plus riches en substances « amorphes » sont situés dans les régions les plus pluvieuses et les plus régulièrement humides (F. COLMET-DAAGE *et al,* 1965, 1967 et 1969 ; G. SIEFFERMANN, 1969, etc.). Cependant on peut observer aussi des sols à « allophanes » dans des régions moins pluvieuses et à longue saison sèche par exemple sur les Hauts-Plateaux des Andes (F. COLMET-DAAGE, 1969) ou sur les versants occidentaux du Nicaragua (F. COLMET-DAAGE, 1968). Il semble que le fort drainage interne des matériaux volcaniques meubles favorise en même temps le renouvellement rapide des solutions de sol et la formation des « allophanes » (G. SIEFFERMANN, 1969). Ce phénomène est évidemment accru en fonction de l'augmentation de la pluviométrie, ou réduit dans des conditions de mauvais drainage interne (hydromorphie) ou de climat à longue saison sèche.

D'autre part, il ne semble pas que la diminution de la température puisse limiter sensiblement la formation des substances « amorphes » et celle des andosols. F. COLMET-DAAGE (1967 à 1969) observe des andosols dans les Andes jusqu'à la limite des neiges permanentes ; cependant la nature de la matière organique et la morphologie du profil changent en fonction de la température moyenne annuelle (K.H. TAN, 1964 et 1966 ; S. TODUKOME et I. KANNO, 1965 et 1968). En dessous d'une certaine limite de température moyenne annuelle, correspondant approximativement à celle distinguant le climat tropical de celui tempéré chaud, il y a accumulation d'une matière organique de couleur plus foncée, caractérisée par une valeur du rapport carbone/azote plus élevée et une plus forte proportion d'acides humides « aromatiques » (S. TODUKOME et I. KANNO, 1968). C'est pourquoi la plupart des auteurs s'accordent à distinguer les andosols des pays « froids » de ceux des pays « chauds ».

1.3. **Age du matériau originel, ou degré de division de ce matériau**

Il a été souvent observé que les andosols sont fréquents sur des matériaux volcaniques jeunes, d'âge Quaternaire récent. S. AOMINE et N. MIYAUCHI (1963) ont proposé un âge de 8 à 9 000 ans pour la transformation des « allophanes » en une argile bien cristallisée : l'halloysite. G. SIEFFERMANN (1969) distingue nettement les andosols sur formation récentes du Mt Cameroun des sols ferrallitiques sur basaltes anciens de l'Adamaoua ; il fait remarquer cependant que sous des climats régulièrement très humides, les conditions sont favorables non seulement pour la formation massive « d'allophanes », mais aussi pour leur accumulation sous forme de complexes « allophano-fulviques », ce qui retarderait la cristallisation des argiles et prolongerait très sensiblement la durée de la formation et de la persistance des andosols.

D'autre part, de nombreux auteurs ont remarqué que les sols formés sur des cendres volcaniques d'âge très récent sont caractérisés par une fraction inférieure à 2 µ dont les substances « amorphes » sont très riches en silice (R.J. FURKERT et M. FIELDES, 1968 : S. SHOJI et J. MASUI, 1969 : G. TERCINIER et P. QUANTIN, 1968, etc.) ; tandis que les andosols d'âge plus ancien contiennent des substances « amorphes » riches en alumine (N. YOSHINAGA et S. AOMINE, 1962 a et b ; M. FIELDES et R.J. FURKERT, 1966 b et 1968) L'interprétation de ce fait est encore discutée ; mais son importance dans la distinction des sols est évidemment très grande.

Enfin, un fait moins fréquemment signalé est celui du changement progressif de la nature des sols en fonction de leur éloignement du centre éruptif ; ce changement va par exemple en zone tropicale du

passage de sols peu évolués à « allophanes » riches en silice, à des andosols typiques, puis à des sols bruns-eutrophes tropicaux et enfin à des sols ferrallitiques (A. PECROT *et al.*, 1962).

Cette genèse différente, indépendante dans une certaine mesure du climat et de l'âge des matériaux originels, s'explique par l'accroissement de la finesse des cendres et la diminution de l'épaisseur et de la fréquence des dépôts en fonction de l'éloignement du centre éruptif : il en résulte que les sols les plus éloignés du centre « évoluent » plus vite que les sols les plus proches.

1.4. **Répartition géographique**

En résumant les données précédentes, il est évident que les andosols sont localisés de préférence dans les régions éruptives récentes, les climats régulièrement humides non soumis à un gel permanent, sur des matériaux volcaniques pyroclastiques, en condition de bon drainage externe. Leur répartition dépend de l'âge du matériau originel, de la fréquence et de l'abondance de la pluviométrie, et aussi de leur situation par rapport au centre éruptif.

Les principales régions du monde où l'on observe des andosols sont donc celles d'activité volcanique récente ou actuelle :

— en Europe : Italie, Sicile, Sardaigne, France (Massif-Central),

— en Afrique et Océan Indien : Kenya, Kivu, Ethyopie, Mt Cameroun, Madagascar, La Réunion,

— en Amérique : Alaska, Mexique, Amérique Centrale, Cordillère des Andes, Antilles,

— Océan Pacifique, Asie : Iles Hawaï ; arcs volcaniques allant des Kouriles à la Nouvelle-Zélande, en passant par la Corée, le Japon, l'Indonésie, la Nouvelle-Guinée, les Iles Salomon et les Nouvelles-Hébrides ; Australie, Samoa, Tonga, etc.

2. MORPHOLOGIE — EXAMEN SUR LE TERRAIN

2.1. **Définition du profil**

Les profils d'andosols présentent des formes très variées. Ils se distinguent des sols peu évolués par un horizon (B) ou (B) - C, qui se différencie principalement des horizons A humifère et C d'altération par sa couleur et sa structure ; cependant, comme les sols peu évolués, ils sont le plus souvent encore riches en minéraux « primaires » altérables dans l'ensemble du profil. Normalement un profil d'andosol est constitué d'un ensemble d'horizons A, (B), C ou A, (B) - C, C.

Mais, du fait de la complexité et de la répétition des apports volcaniques pyroclastiques, les sols ont généralement un profil complexe ou « polyphasé ». Il est fréquent d'observer plusieurs sols superposés, correspondant aux intervalles entre les principales éruptions volcaniques ; ces sols successifs peuvent être semblables ou très différents : andosols, sols peu évolués, sols bruns eutrophes tropicaux, sols ferrallitiques, par exemple.

L'épaisseur des andosols est très variable ; elle dépend de l'importance des apports et de leur âge. L'horizon humifère, a souvent une couleur très foncée (brun-gris-foncé ou gris-très-foncé) et une grande épaisseur dans les régions climatiques froides (Japon, Hauts Plateaux des Andes, par exemple). Sur des formations volcaniques très récentes, la couleur est également très foncée, mais l'épaisseur peut être faible. En climat tropical la couleur paraît moins foncée et plus vive (brun-foncé à brun-rouge-foncé) et l'accumulation humifère moins importante qu'en climat plus froid, bien qu'elle dépasse nettement encore celle normalement observée dans les autres sols tropicaux. La structure est généralement grumeleuse et faiblement cohérente.

L'horizon (B) ou (B) - C se caractérise par une texture apparemment limoneuse quand il s'est formé sur des cendres volcaniques fines ou des tufs, ou sablo-graveleuse, quand il dérive de projections grossières. Sa couleur est très variable : brun-rouge-foncé quand le sol est issu de roches très basiques et riches en fer ; brun-foncé ou brun-jaune quand le sol provient de roches neutres ou acides. Il est remarquable que cette couleur s'atténue d'une manière très sensible après dessiccation. L'horizon (B) est souvent encore riche en matière organique bien que la teneur de celle-ci ne se manifeste parfois pas d'après la couleur, comme il est habituel de l'observer dans un horizon humifère. On remarque la structure particulière de l'horizon (B) : le sol est légèrement cimenté ; la structure paraît souvent continue, bien que le sol soit extrêmement poreux ; sa densité apparente est faible : inférieure à 0,85, elle peut descendre à 0,3. Bien qu'apparemment correctement drainé, le sol est gorgé d'eau, que l'on peut facilement exprimer entre les doigts. La consistance est faible ; le sol est plastique, mais il n'adhère

pas aux doigts, comme cela est le cas des sols contenant des argiles bien cristallisées. Ceci lui donne un toucher « onctueux » à l'état humide et l'apparence d'une texture limoneuse. A l'état sec le sol perd sa consistance, et il devient facilement friable et pulvérulent.

L'horizon d'altération se distingue par une couleur plus proche de celle du matériau originel. Parfois il paraît tacheté quand les projections volcaniques les plus grossières ne sont que superficiellement altérées et rubéfiées. La structure du matériau initial est conservée : particulaire ou très faiblement cimentée s'il s'agit de cendres ou de lapillis ; cimentée et plus ou moins litée s'il provient de tufs. Sa texture est apparemment plus grossière que celle de l'horizon (B), du moins quand ces deux horizons ont la même origine. Il est à noter qu'il existe des andosols sans horizon C apparent : c'est notamment le cas des sols peu épais formés à partir de cendres reposant sans transition sur une coulée de lave encore dure et peu altérée (G. SIEFFERMANN, 1969) ou sur une roche calcaire dure (P. QUANTIN, 1972).

On remarque en général une très profonde répartition des racines, parallèlement à celle de la matière organique, dans l'ensemble du profil. Cependant les sols des régions extrêmement humides ou présentant un horizon induré (« fragipan » ou tuf ?), font exception à cette règle : dans le cas des sols très humides et fortement désaturés, l'enracinement se limite principalement à l'horizon humifère.

2.2. Tests de terrain pour la reconnaissance des andosols

Devant la difficulté que présente la reconnaissance d'un profil d'andosol sur le terrain, les pédologues se sont ingéniés à faire des remarques ou à mettre au point des tests.

En dehors de la nature du matériau originel pyroclastique et des conditions climatiques « humides », qui peuvent permettre de prévoir l'existence d'un andosol, d'autres caractéristiques telles que la couleur foncée, l'abondance de la matière organique profondément répartie dans le profil et la faible densité apparente du sol ne sont pas des critères constants et suffisants.

— *Caractéristiques physiques remarquables au toucher*

La faible cimentation du sol dans l'horizon (B) ou (B) - C, en une masse continue ou fragmentée, très finement et densément poreuse, son manque d'adhésivité et son toucher « onctueux » donnant l'apparence d'une texture limoneuse, constituent un ensemble de caractéristiques correspondant bien à la présence « d'allophanes » et à l'absence de phyllites argileuses. Dans les sols très hydratés, une petite motte, une ponce ou un lapilli altérés, sous la pression des doigts résistent jusqu'à une certaine limite, puis brusquement donnent l'impression d'éclater en libérant de l'eau ou une masse fluide non collante ; c'est ce que certains auteurs américains désignent sous le nom de « thixotropie ». A l'état sec, le sol devient très friable et pulvérulent.

— *Le test de* « FIELES et PERROT »

En Nouvelle-Zélande, M. FIELDES et K.W. PERROT (1966), reprenant une découverte d'EGAWA (1960) sur la propriété des « allophanes » de développer avec la fluorure de sodium une réaction alcaline (pH 9,5 à 11), ont mis au point un test applicable sur le terrain ou au laboratoire. L'alcalinité d'échange provoquée par la réaction de l'allophane avec le fluorure de sodium peut être soit décelée sur le terrain par la coloration en rouge vif de la phénol-phtaléine, soit mesurée au laboratoire avec un pH-mètre.

— Sur le terrain, on dépose une pastille de sol humide sur un papier filtre imprégné de phénolphtaléine ; on verse sur celle-ci quelques gouttes de fluorure de sodium (solution saturée) jusqu'à saturation du sol ; en quelques secondes la coloration rouge de la phénol-phtaléine apparaît vivement si l'allophane est abondante, ou médiocrement si le sol n'en contient que des traces. Elle n'apparaît pas en seule présence d'argiles ou d'hydroxydes bien cristallisés.

— Au laboratoire on met en contact 1 g de sol et 50 ml de Na F, pendant une heure ; on mesure le pH qui doit atteindre 10 à 11 en présence d'une forte quantité d'allophane.

De nombreuses réserves ont été faites à ce test, notamment par J.E. BRYDON et J.H. DAY (1969) : les sols contenant des carbonates (sols calcaires), des hydroxydes d'alumine non cristallisés (B_2 de podzols), ou de la gibbsite finement broyée, certaines espèces d'illite ou de chlorite, réagissent aussi à ce test. Par contre, la présence abondante d'une matière organique très acide dans les sols de montagne peut masquer la réaction du fluorure avec les substances « amorphes » (alumine non cristallisée et « allophanes »).

Cependant il faut reconnaître, en dépit de réserves généralement prévisibles, que le test de FIELDES et PERROT est confirmé le plus souvent par les analyses de laboratoire et qu'il peut donc rendre d'appréciables services sur le terrain.

3. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES

3.1. **Densité apparente**

D'après les règles communément admises (U.S.D.A., 1967) la densité apparente des andosols est inférieure à 0,85 ; cette valeur peut descendre jusqu'à 0,3. Les cendres volcaniques encore peu altérées (sol peu évolué d'apport volcanique meuble) ont une densité apparente de 1 à 1,2. Il est à noter que les sols ferrallitiques formés sur des cendres, des tufs ou même des laves volcaniques ont une densité apparente de 0,7 à 0,9 (P. QUANTIN, 1972 a).

3.2. **Granulométrie.** Problèmes posés par la dispersion des substances « amorphes ».

Tous les auteurs qui ont étudié les andosols ont éprouvé de sérieuses difficultés à obtenir une bonne dispersion des substances secondaires « amorphes » (« allophanes » et gels d'hydroxydes), ou même des phyllites argileuses bien cristallisées. Ils ont tous remarqué que la faible quantité de fraction inférieure à 2 µ obtenue par l'analyse granulométrique classique ne correspondait pas aux valeurs élevées obtenues par ailleurs pour la capacité de rétention pour l'eau, la surface spécifique, les capacités d'échange tant anioniques que cationiques. D'autre part, l'analyse des fractions limoneuses ou sableuses obtenues par une granulométrie « classique », a montré qu'elles contenaient encore des substances minérales secondaires, « amorphes » ou argileuses (G. TERCINIER et P. QUANTIN, 1968).

Des travaux de nombreux auteurs dont principalement : N. YOSHINAGA et S. AOMINE (1962 a et b) ; S. AOMINE et N. MIYAUCHI (1965) ; S. AOMINE et K. EGASHIRA (1968) ; K.S. BIRREL 1966) ; L.E. de MUMBRUN et G. CHESTER (1964) ; N. AHMAD et S. PRASHAD (1970) ; F. COLMET-DAAGE, J. et M. GAUTHEYROU *et al.* (1970) et d'après nos propres observations sur les andosols des Nouvelles-Hébrides, il ressort les principales données suivantes :

Le sol doit être conservé, autant que possible, dans son état d'humidité initiale ; ceci d'autant plus qu'il s'agit d'un sol très hydraté et d'un horizon profond relativement pauvre en matière organique. Il faut premièrement détruire la matière organique par un traitement prolongé et renouvelé à l'eau oxygénée (ne contenant pas de phosphates). Il y a ensuite intérêt, si le sol contient une quantité importante de cations échangeables, à le désaturer par percolation d'acide chlorhydrique dilué (0,02 à 0,002 N, suivant les auteurs). Mais cette percolation peut entraîner dans certains cas de sensibles pertes de substances (hydroxydes de fer, alumino-silicates amorphes, aluminium) ; N. AHMAD et G. PRASHAD (1970) citent des pertes atteignant 16 et 36 % du total de la fraction inférieure à 2 µ ; cette opération doit donc être limitée autant que possible ; en plus de la désaturation, elle présente cependant l'intérêt d'éliminer une partie des hydroxydes de fer et d'alumine amorphes qui gênent la dispersion des argiles. Après destruction de la matière organique et la désaturation, le sol est prêt à être dispersé ; parfois il est bon de détruire les gros agrégats restants (étant donné que l'on est parti de sol humide) par un « mixage » de courte durée (pour ne pas briser les sables). Le sol est alors soumis aux ultra-sons (appareil utilisé pour les sols dont les caractéristiques varient de 10 à 35 Kc et 100 à 300 W), de manière à briser les faibles ciments formés par des gels d'hydroxydes ou « d'allophanes ». L'influence des ultra-sons sur la réduction éventuelle de la taille des minéraux primaires a été analysée par I. ARIMURA (1967) ; s'il est certain que certains minéraux particulièrement fragiles (déjà fissurés par altération ?) peuvent être ainsi réduits à une taille inférieure à 2 µ, il est cependant prouvé qu'il n'y a pas formation de nouveaux produits « amorphes » et que ce risque peut être réduit en limitant au minimum le temps d'exposition aux ultra-sons ; d'après de nombreux essais il semble qu'une durée de quelques minutes suffit, car ensuite l'accroissement de la fraction inférieure à 2 µ obtenu jusqu'à un maximum (en 20′ pour K. OBO et Y. KOBA, 1965 ; ou 30 à 45′ pour I. KANNO et S. ARIMURA, 1967) est relativement faible et ne justifie pas cette prolongation.

Les allophanes (du moins celles ayant une valeur du rapport $SiO_2/Al_2O_3 < 2$, et si elles ne sont pas trop humifères) ont la propriété de se comporter comme des colloïdes électro-positifs, au contraire des argiles qui sont électro-négatives (S. AOMINE et K. EGASHIRA, 1968). Ceci explique qu'en fonction de la composition de leurs substances colloïdales, certains andosols se dispersent en milieu acide, tandis que d'autres le font en milieu alcalin.

Ainsi, après destruction de la matière organique et désaturation, certains sols sont mis aussitôt en dispersion dans l'eau par les ultra-sons (colloïde $-H^+$ à pH variant entre 3,5 et 6). D'autres demandent à être acidifiés (par un peu d'HCl) jusqu'à un pH variant de 2 à 3,5 pour les sols riches en hydroxyde de fer amorphes (AHMAD et PRASHAD, 1970 ; COLMET-DAAGE, GAUTHEYROU *et al.*, 1970 ; de MUMBRUN et CHESTER, 1964 ; BIRRELL, 1966, etc.), ou seulement de 4 à 4,5 pour des sols à « allophane » pauvres en hydroxydes de fer (YOSHINAGA et AOMINE, 1962 b). D'autres encore se dispersent seulement en milieu alcalin (avec NaOH ou NH_4OH) à un pH supérieur à 8,5-9 : pour COLMET-DAAGE, GAUTHEYROU *et al.*, 1970, les sols riches en matière organique des horizons humifères se dispersent mieux à pH alcalin ; ceci rejoint l'observation d'AOMINE et EGASHIRA (1968) selon laquelle les allophanes-humifères des sols contenant plus de 10 à 15 % de matière organique se comportent en colloïdes électronégatifs, c'est-à-dire comme des argiles. Mais cette hypothèse ne peut être généralisée : ainsi YOSHINAGA et AOMINE (1962 b) séparent-ils sur certains andosols, après destruction de la matière organique et déferrification deux fractions : l'une en milieu acide qu'ils appellent « imogolite », l'autre en milieu alcalin qu'ils appellent « allophane ». Par ailleurs, il a été observé sur les horizons humifères d'andosols des Nouvelles-Hébrides, après destruction de la matière organique, tantôt une dispersion acide, tantôt une dispersion alcaline. Dans d'autres cas, ainsi que cela a été observé par de nombreux auteurs, il est possible d'obtenir une dispersion successivement en milieu acide puis alcalin, ou réciproquement, procurant soit des substances de nature voisine (COLMET-DAAGE et GAUTHEYROU, 1970), soit de nature différente (YOSHINAGA et AOMINE, 1962 b). D'après les observations sur les andosols des Nouvelles-Hébrides, il semble que les andosols jeunes, caractérisés par une fraction inférieure à 2 µ riche en silice ($SiO_2/Al_2O_3 > 2$) ou les sols plus évolués déjà riches en gibbsite et (ou) en argiles, se dispersent mieux en milieu alcalin, ou partiellement en phase acide et en phase alcaline ; tandis que les andosols à fraction inférieure à 2 µ pauvre en silice ($SiO_2/Al_2O_3 < 2$), en gibbsite et en argile et riche en sesquioxydes « amorphes », se dispersent mieux en milieu acide (QUANTIN, 1972 b).

Il est généralement admis que l'hexamétaphosphate de sodium (calgon) donne de très mauvais résultats et ne convient pas pour la dispersion des andosols ; peut-être est-ce dû à la forte capacité des « allophanes » et hydroxydes d'alumine amorphes à fixer les phosphates ; mais cette hypothèse semble contredite par les observations de COLMET-DAAGE et GAUTHEYROU (1970), montrant que la pyrophosphate de sodium peut permettre une bonne dispersion du sol séché à l'air des horizons humifères d'andosols.

COLMET-DAAGE et GAUTHEYROU (1970) ont constaté que les sables magnétiques, abondants en général dans les andosols, peuvent gêner une bonne dispersion des colloïdes ; ils proposent en conséquence d'extraire ces sables magnétiques avant la mise en dispersion. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la fraction inférieure à 2 µ contient de fines particules d'hydroxydes de fer magnétiques (K. HOUNG, 1964).

N. AHMAD et S. PRASHAD (1970) ont expérimenté sur les andosols des Caraïbes une méthode de dispersion par une solution de nitrate de zirconium (30 ml à 0,1 M/l ; pH = 3,0). Cette méthode a procuré des résultats meilleurs que les dispersions acides (par HCl) ou alcalines (par NaOH) ; ces auteurs expliquent que les ions Zr^{4+}, en se substituant aux ions Al^{3+} des allophanes permettent un accroissement de charge électro-positive et ainsi une dispersion meilleure en milieu acide.

Enfin, il est intéressant de noter les travaux de R.G. PARK (1969) sur la séparation des « allophanes » par électrophorèse. Cette méthode permettrait d'obtenir les « allophanes » sans les aléas apportés par les divers prétraitements précédemment utilisés.

3.3. **Stabilité structurale**

Du fait de la naturelle stabilité des « allophanes », les andosols ont une structure très stable à l'eau. Ceci explique à la fois leur forte porosité, et leur très faible susceptibilité à l'érosion (G. SIEFFERMANN, 1969).

3.4. **Capacité de rétention pour l'eau et phénomène de déshydratation irréversible**

Les andosols, par suite de leur richesse en substances « amorphes » très hydroscopiques, ont une capacité de rétention pour l'eau très élevée. La capacité « au champ » (mesurée à pF = 3) sur sol conservé à l'état humide initial, dépasse généralement 100 % du poids de sol sec (à 105°) ; elle peut atteindre jusqu'à 300 %. F. COLMET-DAAGE *et*

al, 1967) a étudié en détail cette propriété et il a constaté qu'au-delà d'un certain seuil de dessiccation (environ à pF = 4,2) il y a déshydratation irréversible du sol. Ce phénomène est particulièrement accentué et caractéristique dans le cas des andosols riches en substances « amorphes ».

3.5. **Surface active**

La forte capacité de rétention pour l'eau des andosols s'explique par la valeur très élevée de la surface spécifique des « allophanes » : S. AOMINE et H. OTSUKA (1968) ont déterminé sur des « allophanes » provenant d'andosols du Japon des valeurs de surface totale (1) variant de 474 à 533 m^2/g et des valeurs de surface externe (2) de 143 à 169 m^2/g ; ceci montre l'importance de la surface interne dans le cas des allophanes. G. SIEFFERMANN (1969) a mesuré sur des extraits d'andosols du Mt Cameroun des valeurs de surface externe (méthode B.E.T.) allant jusqu'à 400 m^2/g pour la fraction inférieure à 2 µ et à 330 m^2/g pour celle inférieure à 250 µ. En comparaison les argiles ou les gels d'hydroxydes présentent en général des valeurs de surface externe (2) sensiblement plus faibles : kaolinite, 20 à 45 m^2/g ; halloysite, 70 à 140 m^2/g ; montmorillonite, 60 à 120 m^2/g ; illite, 100 m^2/g ; hydroxyds frro-aluminux « amorphes », 50 à 80 m^2/g ; cependant, la surface totale (1) de la montmorilleonit atteint de 600 à 800 m^2/g et celle de la sépiolite 400 m^2/g (d'après Y. ESCART, 1952 : S. AOMINE et H. OTSUKA, 1968 : G. SIEFFERMANN, 1969).

La valeur élevée de la surface spécifique des « allophanes » permet d'expliquer la très forte activité physico-chimique des andosols, tant vis-à-vis de l'eau que des cations, anions, matière organique et enzymes.

Il a été proposé d'utiliser la mesure de la surface spécifique des andosols pour estimer par un calcul approximatif la quantité de substances « amorphes », à défaut de pouvoir en obtenir un détermination correcte par granulométrie (K.S. BIRREL, 1966).

(1) Méthode de HENDRIX et DYAL par absorption de liquides polaires, mesurant la somme de la surface externe et de la surface interne, appliquée initialement aux argiles gonflantes.

(2) Méthode de BRUNNAUER, EMMET et TELLER, par absorption d'azote gazeux, appliquée généralement aux argiles.

3.6. **Matière organique**

Les andosols sont généralement très riches en matière organique liée aux substances minérales « amorphes ». Cette teneur varie très largement : dans l'horizon humifère elle peut aller de quelques pour cent à 40 % (S. TODUKOME et I. KANNO, 1968). G. SIEFFERMANN (1969) a remarqué une certaine corrélation positive entre l'accroissement de la matière organique d'une part, et celui de la pluviosité et de la quantité des substances « amorphes » de taille inférieure à 2 µ d'autre part. Ceci conduit à penser qu'il existe des complexes « allophanes » — matières organiques très stables et résistants ; le fait que les matières organiques des andosols soient particulièrement difficiles à détruire par l'eau oxygénée, confirme cette hypothèse (F. COLMET-DAAGE et P. LAGACHE, 1965).

D'autre part, la matière organique est répartie profondément dans le profil. Il est fréquent d'en trouver encore quelques pour cents dans l'horizon (B), même à plus d'un mètre de profondeur, bien que cela ne se marque pas particulièrement dans la couleur du sol.

Il est convenu de distinguer deux familles principales de matière organique dans les andosols depuis les travaux de plusieurs auteurs (K.H. TAN, *in F.A.O.,* 1964 et 1966 ; R.H. JACKMAN, 1964 ; S. TODUKOME et I. KANNO, 1965 : F. COLMET-DAAGE *et al.,* 1967) :

Dans les régions à climat tropical humide de basse altitude la matière organique, de couleur brun-gris foncé ou brun-foncé, est caractérisée par une valeur moyenne du rapport Carbone/Azote d'environ 9 à 10, pouvant varier de 7 à 12, et une teneur relativement élevée des acides fulviques par rapport aux acides humiques : $A_cH/A_cF \leqslant 0{,}2$ (K.H. TAN, 1964). G. SIEFFERMANN (1969) note des teneurs de 20 à 30 g d'acides fulviques par kilogramme de terre (dans l'ensemble du profil), mais il remarque que ces acides sont liés aux « allophanes », avec lesquels ils forment des complexes stables, à la différence des podzols où les acides fulviques sont libres et jouent un rôle « lessivant » ou « dégradant ».

Dans les régions à climat plus froid : tempéré, subtropical ou tropical d'altitude élevée, la matière organique a une couleur très foncée ; l'accumulation humifère est plus abondante et plus marquée dans le profil que dans les andosols tropicaux. La matière organique est caractérisée par une valeur élevée du rapport Carbone/Azote, en moyenne d'environ 15 (S. TODUKOME et I. KANNO, 1965), et une teneur

relativement élevée des acides humiques par rapport aux acides fulviques : $A_cH/A_cF \geqslant 0,5$ (K.H. TAN, 1964). D'autre part, les acides humiques sont composés essentiellement de formes « aromatiques » très stables (S. TODUKOME et I. KANNO, 1965).

Il est intéressant de rappeler que c'est ce dernier type de matière organique, qui avait servi initialement à caractériser les « an-do » japonais.

3.7. **pH (eau et KCl)**

Les andosols, du moins dans leur horizon (B), sont généralement peu acides (pH = 5,5 à 6,5), même quand ils sont très fortement désaturés en bases (V <10 %) (G. SIEFFERMANN, 1969). Cependant, dans l'horizon humifère des sols de climat froid dont la valeur du rapport Carbone/Azote est élevée, le pH est le plus souvent acide (il varie de 3,5 à 5).

La faible acidité des andosols, quel que soit le taux de saturation en bases, s'explique par la valeur élevée du point isoélectrique des « allophanes » : 5,5 à 6,5 (M. FIELDES et R.K. SCHOFIELD, 1960). Le fait qu'il y ait peu de différence entre les valeurs de pH mesurées sur solution de sol en dilution dans l'eau pure ou dans du chlorure de potassium normal (environ 0,2 unité pH), confirme cette hypothèse (F. COLMET-DAAGE *et al.*, 1967). A Hawaï (R.L. VOSS, 1969) dans des andosols riches en alumine (hydrandepts), il est intéressant de remarquer que la valeur du pH mesuré en solution dans l'eau est légèrement inférieure à celle du pH mesuré en solution dans le chlorure de potassium pour le sol de l'horizon (B) et légèrement supérieure pour le sol de l'horizon humifère (influence de la matière organique sur le complexe d'échange).

Par contre, le fait que le point isoélectrique des argiles de la famille de la kaolinite et de l'halloysite soit voisin de 4, explique que l'horizon (B) des sols ferrallitiques fortement désaturés soit, au contraire de celui des andosols, très acide (pH = 4 à 5).

3.8. **Capacité d'échange de cations (T. ou C.E.C. et taux de saturation en bases (V)**

D'après la plupart des auteurs, la capacité d'échange de cations des andosols est une valeur très aléatoire : elle varie suivant l'état d'hydratation du sol, le pH de la solution d'extraction, le taux de saturation en anions (notamment en phosphates), et même suivant leur teneur en hydroxydes de fer et d'aluminium non cristallisés.

a — *Variation suivant le degré d'hydratation du sol*

La diminution sensible de la valeur de la capacité d'échange mesurée sur sol séché à l'air par rapport à celle mesurée sur sol humide, avait été remarquée par G.D. SHERMAN et ses collaborateurs (G.D. SHERMAN *et al.*, 1953 ; Y. KANEHIRO et G.D. SHERMAN, 1956 ; G.D. SHERMAN *et al.*, 1964). Elle a été retrouvée par F. COLMET-DAAGE *et al.*, 1965, 1967). G.D. SHERMAN a observé une diminution de la capacité d'échange allant de 30 à 91 % par simple dessiccation à l'air.

Ceci pourrait s'expliquer par une diminution irréversible de la surface « active » des « allophanes » par suite du phénomène de déshydratation irréversible de ces substances observé par F. COLMET-DAAGE et CUCALON (1965), G.D. SHERMAN *et al.* (1964).

b — *Variation suivant le pH*

De nombreux auteurs ont observé que la valeur de la capacité d'échange de cations des andosols varie suivant celle du pH de la solution d'extraction (K.S. BIRREL et M. GRADWELL, 1956 ; M. FIELDES et R.K. SCHOFIELD, 1960 ; K. IIMURA, 1960 ; K.S. BIRREL, 1961 ; N. YOSHINAGA et S. AOMINE, 1962 : K.H. HOUNG *et al.*, 1966 ; M.L. JACKSON, 1968).

On explique cette valeur « dépendante du pH », par le fait que les « allophanes » sont des colloïdes amphotères à point isoélectrique élevé (environ 6) dont les radicaux $Si(OH)_4$ et $Al(OH)_3$ sont faiblement liés entre eux et peuvent réagir indépendamment l'un de l'autre suivant le pH de la solution : les allophanes sont capables de retenir énergiquement les anions en milieu acide (pH = $\leqslant$4,5) et inversement les cations en milieu alcalin (pH = $\geqslant$9). La capacité d'échange de cation, dite « hydrolysable » ou « dépendante du pH », est proportionnelle à la richesse en alumine des « allophanes ». Elle varie donc fortement pour les « allophanes-riches en alumine » (imogolite ou allophane - Al) et faiblement pour les « allophanes-riches en silice » (allophane - halloysite) (d'après M.L. JACKSON, 1968). La valeur de la capacité d'échange de cations mesurée à pH = 10,5 peut atteindre 3 à 4 fois celle déterminée à pH = 7. De plus cette valeur, indépendamment du pH, peut varier suivant la nature du cation et la valeur de sa concentration dans la solution d'extraction, ou aussi, suivant le volume du lessivage par l'alcool (K.S. BIRREL, 1961).

En résumé, la fixation des cations se développe en milieu alcalin au fur et à mesure de la neutralisation

des radicaux silanols (Si-OH → SiONa), tandis que celle des anions se développe en milieu acide en même temps que sont rendus disponibles des radicaux = AlOH.

Pour remédier à la variabilité de la mesure de la capacité d'échanges des andosols due à la « dépendance du pH », certains auteurs, dont N. YOSHINAGA et S. AOMINE (1962), proposent de déterminer la différence entre la valeur maximum obtenue à pH = 10,5 et celle minimum mesurée à pH = 3,5. Cette valeur qu'ils appellent « C.E.C. Δ value » serait plus fidèle que celle déterminée à pH = 7 et de plus caractéristique des andosols. Ces auteurs ont par exemple déterminé les valeurs suivantes :

Type d'allophane	CEC à pH = 7 par Ca^{++} (mé/100 g)	CEC à pH = 3,5	CEC à pH = 10,5	Δ CEC
Imogolite	48	43	113	70
Allophane s.s. ..	151	49	178	129

S. COUTINET (1967) voulant tirer parti de cette observation a essayé d'estimer la quantité « d'allophanes » de quelques andosols d'après la mesure de Δ C.E.C. Il semble illusoire de vouloir obtenir ce résultat de cette façon, étant donné d'une part la difficulté de réalisation de cette méthode, d'autre part la variabilité de la nature des « allophanes » ou la complexité des mélanges.

c — *Influence des sesquioxydes « amorphes » sur la mesure de capacité d'échange des « allophanes »*

Utilisant la méthode de MEHRA et JACKSON (1958) pour la purification des « allophanes » de leurs revêtements d'hydroxydes amorphes, F. COLMET-DAAGE *et al.* (1969) a montré, sur des andosols des Andes, une nette élévation de la capacité d'échange de cations, celle-ci se rapprochant alors de la valeur obtenue à pH 9 sur sol non traité ; ceci indique que des sites d'échanges peuvent être masqués par l'absorption de sesquioxydes sur l'allophane. Par contre, l'élimination des « allophanes » par la technique SÉGALEN (1968 b) a réduit la capacité d'échange à une valeur extrêmement faible. Ce qui prouve bien l'importance de l'allophane dans le complexe d'échange. Le même phénomène a été aussi constaté par KAWAI (1969).

d — *Taux de saturation du sol en cations (V)*

Les valeurs calculées par rapport à la mesure de la capacité d'échange effectuée à pH = 7 sur sol séché à l'air, ne correspondent probablement pas à la réalité, étant donné la variabilité de cette mesure. Il serait plus rationnel de déterminer la capacité d'échange sur le sol humide initial et aux mêmes conditions de pH que celles du sol. C'est notamment le cas des andosols riches en « allophanes » et fortement désaturés.

En général les andosols des régions extrêmement humides ou de climat froid sont fortement désaturés dans leur horizon (B) : V < 10 %, tandis que ceux des régions de climat tropical ou subtropical modérément humide sont plus faiblement désaturés dans leur horizon (B) (H.S. GIBBS, 1968 ; F. COLMET-DAAGE *et al.*, 1965, 1967 et 1969 ; G. SIEFFERMANN, 1969 ; G.K. RUTHERFORD, 1962 ; FAO, UNESCO, 1964 ; P. QUANTIN, 1972 b).

3.9. Capacité d'échange d'anions (A.E.C.), fixation énergique du phosphore

De nombreux auteurs, notamment : M. FIELDES et R.K. SCHOFIELD, 1960 ; K. IIMURA, 1960 ; M. FIELDES, 1962 ; G.D. SHERMANN *et al.*, 1964, ont remarqué la rétention énergique du phosphore et de divers anions par les andosols. M. FIELDES (1962) pense que les « allophanes » développent des liaisons très fortes avec les anions, notamment le phosphore, suivant la formule suivante : $(\text{-SiO})_3 \equiv \text{Al - O - P}$. A pH très acide (<4) les gels composés de Si, Al, Fe (hydroxydes et « allophanes ») communs à tous les andosols, donnent avec les phosphates des précipités complexes dont par exemple de la variscite ($Al\,PO_4$, $2H_2O$), de la strengite ($Fe\,PO_4, 2H_2O$) ou de la taranakite [(NH_4) ou K_3 -$Al_6(PO_4)_6(OH)_2$, $18H_2O$]. Il semble que la taranakite apparaisse plutôt en présence de sels d'ammonium ou de potassium (M. FIELDES, 1962 ; G.D. SHERMAN *et al.*, 1964). La capacité d'échange anionique s'accroît donc avec l'abaissement du pH vers des valeurs très acides. Par affinité décroissante il serait possible de classer les anions dans l'ordre suivant : VO_4, PO_4, MoO_4, SO_4, Cl, CO_3, etc. (M. FIELDES et R.K. SCHOFIELD, 1960).

P. CLOOS, A. HERBILLON et J. ECHEVERRA (1968) ont étudié systématiquement l'adsorption et

la disponibilité des phosphates fixés par des gels synthétiques alumino-siliceux « semblables à l'allophane ». Ils ont utilisés 3 types de gels correspondant à 3 catégories de sols sur cendres volcaniques :

— gel très riche en silice (silice/alumine = 3,59), correspondant à celui d'un sol peu évolué — andique à « allophanes-siliceuses » ;

— gel moyennement riche en silice (silice/alumine = 1,73), correspondant à celui d'un andosol typique « à allophanes-halloysitiques » ;

— gel très pauvre en silice (silice/alumine = 0,36), correspondant à celui d'un andosol gibbsitique « à allophanes-riches en alumine ».

Ces auteurs ont particulièrement remarqué que le gel très riche en silice est doué de la plus forte capacité d'échange de cations (117,9 mé % g), la plus faible adsorption des phosphates (4,60 %) et réciproquement le plus fort taux de phosphates « disponibles » par rapport aux phosphates adsorbés (59,6 %). Par contre les gels plus riches en alumine manifestent une capacité d'échange en cations plus faible (82,3 à 13,4 mé % g), une plus forte adsorption des phosphates (6,92 %) et réciproquement ils ont un taux relativement plus faible de phosphates disponibles (55,2 à 44,8 %).

Ceci rejoint les observations faites sur les andosols par de nombreux auteurs : ceux qui sont encore riches en silice fixent plus faiblement le phosphore et ont une forte disponibilité en cet élément, tandis que ceux qui sont riches en alumine fixent très énergiquement le phosphore et n'ont qu'une faible disponibilité en cet élément (F. COLMET DAAGE et P. LAGACHE, 1965).

De nombreuses mesures faites sur des argiles « allophaniques » (G. TERCINIER et P. QUANTIN, 1968 et P. QUANTIN, 1972b) ont montré des taux de fixation allant jusqu'à 25 % de P_2O_5 par rapport au poids d'argile (séchée à 105 °C).

G. SHERMAN (*et al.*, 1964) ont remarqué, à l'appui de cette thèse, que les engrais ammoniacaux et potassiques sont fixés beaucoup plus énergiquement quand ils sont sous forme de phosphates que de chlorures. Par exemple, ils ont déterminé que la rétention du potassium, atteint 22 % quand il est apporté sous forme de phosphate, et seulement 2 % sous forme de chlorure.

Rappelons enfin, que tous les auteurs ont constaté que l'hexamétaphosphate de sodium utilisé habituellement comme dispersant en granulométrie, gêne ou même anihile totalement la dispersion des substances colloïdales des andosols.

3.10. **Composition chimique, sol total et fraction inférieure à 2 μ**

a — *Analyse totale et éléments échangeables*

L'ensemble des auteurs s'accorde à noter que les andosols (3), quel que soit leur degré d'évolution minérale (altération) et leur taux de saturation en bases échangeables sont relativement riches en silice, cations et phosphore, du fait de leur teneur encore élevée en minéraux primaires. Ceci explique que le classement des bases totales d'après leur importance relative est très différent dans le sol total et dans le complexe d'échange. G. SIEFFERMANN (1969), note par exemple dans des andosols fortement désaturés sur cendres basaltiques du Mont-Cameroun les répartitions suivantes :

— Dans le sol total :

Mg	Ca	Na	K
70 à 90 % (1)	8 à 25 %	1,5 à 5 %	0,4 à 3 %
(50 à 200 mé %)	(5 à 55 mé %)	(0,6 à 12 mé %)	(0,8 à 5,5 mé %)

— Dans le complexe d'échange :

H	Ca	Mg	K	Na
60 à 90 % (2)	6 à 14 %	2 à 5 %	0,5 à 1,5 %	0,5 %
	(2 à 7 mé %)	(≤2 mé %)	(≤0,3 mé %)	(≤0,2 mé %)

(1) en % du total des bases.

(2) en % de la capacité d'échange de cations.

(3) A l'exception des hydrandepts d'Hawaï, sols déjà évolués et proches des sols ferrallitiques, très riches en alumine et pauvres en silice, en cations et en phosphore.

b — *Rapport SiO_2/Al_2O_3 et SiO_2/R_2O_3*

Les valeurs des rapports SiO_2/Al_2O_3 et SiO_2/R_2O_3, sont pour la même raison, très différentes dans le sol total et dans la fraction inférieure à 2 µ. Il arrive même que les substances amorphes extraites par la technique SÉGALEN (1968) aient une composition différente de celle de la fraction inférieure à 2 µ, notamment dans leur teneur en silice et alumine. Par exemple, G. SIEFFERMANN (1969) montre que la valeur du rapport silice/alumine est nettement inférieure dans les extraits de substances « amorphes » (0,4 à 1,7 par rapport à celle de la fraction inférieure à 2 µ des mêmes sols (1 à 1,6). Ceci a été expliqué à la suite d'une étude minéralogique de la fraction inférieure à 2 µ, soit par la présence de silice « discrète » : diatomées (G. SIEFFERMANN, 1969) ou opales (S. SHOJI et J. MASUI, 1969) ; soit par l'existence de fins minéraux primaires résiduels (F. COLMET DAAGE, 1969 ; M. FIELDES, 1966).

L'interprétation minéralogique de la valeur des rapports SiO_2/Al_2O_3 et SiO_2/R_2O_3, tant dans le sol total que dans la fraction inférieure à deux microns, ne peut donc être faite qu'avec réserve. Il est cependant intéressant de remarquer que les andosols pourraient être classés d'après la valeur du rapport silice/alumine (Ki) de la fraction inférieure à deux microns, en trois catégories principales :

— des sols peu évolués formés sur des apports de cendres très récents, caractérisés par une valeur Ki très élevée pouvant même dépasser nettement celle du sol total ou du matériau initial, donc relativement enrichis en silice ;

— des andosols, caractérisés par une valeur Ki comprise entre 1 et 2, donc nettement appauvris en silice ;

— des andosols fortement désaturés, caractérisés par une valeur Ki comprise entre 1 et 0,4, donc très riches en alumine.

c — *Phosphore total et phosphore « assimilable »*

Il est important de rappeler que si les teneurs en phosphore total sont généralement élevées dans les andosols, parce qu'ils sont riches en minéraux primaires et qu'il y a une fixation énergique de cet élément par les substances « amorphes », les quantités de phosphore « assimilable » (méthode Truog) sont aussi généralement très faibles, à l'exception des sols peu évolués à substances « amorphes » très siliceuses.

4. MINÉRALOGIE

A la suite des travaux de nombreux chercheurs japonais (AOMINE, WADA, YOSHINAGA, KANNO, MASUI, SHOJI, UCHIYAMA, SUDO, MIYAUCHI, etc.) ou néozélandais (BIRREL, FIELDES, PERROT, FURKERT, GIBBS, etc.), les études plus récentes de COLMET-DAAGE en Amérique Centrale, de SIEFFERMANN au Cameroun et la note de synthèse de MITCHELL (*et al.*, 1964), permettent d'assez bien préciser les caractéristiques minéralogiques des andosols, bien qu'il reste encore un très gros effort à poursuivre dans l'analyse si complexe des substances « amorphes ».

Il est possible de distinguer dans les andosols plusieurs phases minérales : des minéraux primaires et verres inaltérés ; des minéraux primaires et verres en début d'altération et partiellement « hydratés », désionisés et désorganisés ; des substances secondaires « amorphes » formant des gels complexes, composés de silice, alumine, fer et peut-être dans certains cas de titane ; des minéraux secondaires plus ou moins hydratés et cristallisés : argile, hydroxydes et oxydes.

4.1. Minéraux primaires et verres inaltérés

Les andosols contiennent généralement beaucoup de minéraux « primaires » et de verres encore inaltérés et ceci d'autant plus qu'ils sont plus jeunes ou soumis à un climat moins agressif (plus froid ou moins pluvieux), ou formés sur un matériau pyroclastique plus grossier ou moins riche en verres.

D'après les travaux les plus récents, notamment ceux de K.S. BIRREL en Nouvelle-Zélande (*in FAO-UNESCO*, 1964), de S. AOMINE et K. WADA au Japon (1962), de F. COLMET-DAAGE en Equateur (1967, 1969) et de G. SIEFFERMANN au Cameroun (1969), il semble que la susceptibilité à l'altération des minéraux « primaires » suive approximativement l'ordre décroissant suivant : les verres volcaniques s'altèrent le plus vite, les plus basiques précédant peut-être les plus acides ; ensuite viennent les péridots et les feldspaths plagioclases, notamment les plus calciques ; puis succèdent les pyroxènes, à l'exception de l'hypersthène, et les amphiboles ; enfin arrivent l'hypersthène et les feldspaths potassiques que l'on peut trouver encore dans des sols très fortement altérés ; le quartz, la magnétite et l'ilménite ont tendance à s'accumuler, jusque dans des sols déjà ferrallitiques.

2. MINÉRAUX PRIMAIRES ET VERRES DÉSORGANISÉS ET HYDRATÉS (1), EN DÉBUT D'ALTÉRATION

M. FIELDES (1955, 1966 ; R.J. FURKERT et M. FIELDES, 1968) ont particulièrement étudié les débuts de l'altération des minéraux et des verres volcaniques, d'andosols de Nouvelle-Zélande, dans l'hypothèse d'un passage progressif des minéraux primaires aux substances « amorphes » appelées « allophanes ». En étudiant la fraction grossière des « argiles » (2 à 0,2 μ) extraite de sols peu évolués sur cendres volcaniques, ils remarquent qu'elle est composée en plus « d'allophane » et de cristobalite, comme l'avaient montré N. MIYAUCHY et S. AOMINE (1964), de fins morceaux de feldspaths et de verres déjà partiellement altérés et « hydratés », ayant des propriétés physico-chimiques « d'allophanes » : aux rayons X, il est encore possible de reconnaître les raies des feldspaths ; au microscope électronique, les fines particules de feldspaths et de verres « hydratés » ont une apparence très poreuse ; l'examen du spectre d'absorption des rayons infrarouges montre une bande à 800 cm^{-1}, que l'on n'observe pas avec « l'allophane » *sensu stricto* (N. YOSHINAGA et S. AOMINE, 1962a) ; aussi bien les verres que les feldspaths désorganisés et « hydratés » ne sont pas solubles dans une solution de soude (0,5 N) comme l'est l'allophane ; cependant ces minéraux « hydratés » ont des propriétés physico-chimiques analogues à celles des « allophanes » notamment de fortes valeurs de surface spécifique, de rétention en eau (courbes d'ATD) et de capacité d'échange de cations. Dans les andosols étudiés en Nouvelle-Zélande il y a environ 30 % de ces minéraux peu altérés dans la fraction de 2 à 0,2 μ. M. FIELDES (*et al.*, 1966, 1968) propose le terme « d'allophane B » pour représenter l'ensemble des fins minéraux primaires désorganisés et « hydratés » associés à des formes de silice discrète et probablement aussi à un peu de gels d'hydroxydes et d'alumino-silicates « amorphes ».

A propos des premiers stades d'altération de verres volcaniques, les expériences de J. TRICHET (J. TRICHET et D.R. SVORONOS, 1968 ; J. TRICHET et C. SELLA, 1968) ; J. TRICHET, 1970) semblent prouver l'hypothèse de M. FIELDES. L'altération d'un verre basaltique libère des billes subsphériques dont le diamètre varie de 2 000 à 8 000 Å et dont la composition est voisine de celle du verre initial, mais cependant sensiblement plus riche en silice et magnésium, plus pauvre en calcium, sodium et potassium, et privée de fer et de titane, de sorte que le rapport silice/alumine atteint une valeur de 7,8 légèrement plus élevée que celle du verre (5,9) et très voisine de celle observée dans la fraction inférieure à 2 μ des sols peu évolués sur cendres basaltiques (S. SHOJI et J. MASUI, 1969). D'autre part, J. TRICHET (1970) a pu montrer la forte analogie de ces produits d'altération de verres, avec les « allophanes » naturels.

La présence de fins minéraux primaires (feldspaths plagioclases et pyroxènes) dans la fraction 2-0,2 μ, a été récemment confirmée par F. COLMET-DAAGE (1969) dans les sols d'Equateur et G. SIEFFERMANN (1969) dans ceux du Cameroun ; mais ces auteurs n'ont pas précisé si ces minéraux primaires sont déjà altérés et « hydratés », ni s'ils ont des propriétés physico-chimiques « d'allophanes ».

D'autre part, si la présence de substances d'altération très riches en silice a été souvent observée dans les sols peu évolués sur cendres volcaniques, l'existence d'une forme alumino-silicatée d'altération dérivant directement des structures minérales « primaires » a été plusieurs fois mise en doute du fait de la découverte de diverses formes de silice dont de la cristobalite (N. MIYAUCHY et S. AOMINE, 1964), ou de l'opale d'origine biologique sous forme des diatomées (G. SIEFFERMANN, 1969) ou pédologique sous forme de fines sphères (S. SHOJI et J. MASUI, 1969). Cependant les observations de M. FIELDES sur les andosols d'une part et de J. TRICHET sur l'altération de verres basaltiques d'autre part, sont suffisamment précises pour que l'on puisse admettre l'existence de minéraux primaires désorganisés et « hydratés », partiellement altérés, ayant des propriétés « d'allophanes ».

4.3. **Produits secondaires d'altération « amorphes » ou cryptocristallin**

Dans les andosols ont été reconnus principalement des gels alumino-siliceux : les « allophanes », des gels d'hydroxydes de fer et d'alumine, éventuellement accompagnés de silice, manganèse, titane et phosphore. Cet ensemble complexe est généralement désigné sous le nom de substances « amorphes »

(1) Le terme « hydraté » est couramment donné par M. FIELDES à des minéraux primaires en début d'altération, en partie désorganisés, semblant retenir plus d'eau que les minéraux inaltérés.

parce que ses composants ne présentent pas de raies de diffraction de rayons X.

a — *Extraction des constituants « amorphes »*

Devant la difficulté, précédemment évoquée, à séparer les produits « secondaires-amorphes » des minéraux primaires, ou des substances « secondaires-bien cristallisées », plusieurs chercheurs ont essayé d'obtenir une méthode sûre. Citons notamment les travaux de M.L. JACKSON (1965) ceux de P. SÉGALEN (1968), et ceux de K. WADA et D.J. GREENLAND (1970).

La technique de P. SÉGALEN met à profit le fait que les substances « amorphes » sont beaucoup plus rapidement dissoutes que les produits cristallisés. C'est une méthode « cinétique » : on extrait successivement huit fois par voie alcaline (NaOH à 0,5 N) et acide (HCl à 8 N) toutes les substances facilement solubles. On dose simultanément à chaque extraction : silice, alumine, fer et manganèse. Des courbes cumulatives, il est facile de déduire approximativement les quantités d'éléments « amorphes » et en même temps la valeur des rapports SiO_2/Al_2O_3 et SiO_2/R_2O_3 caractérisant la nature de ces produits.

Cependant, quelques réserves doivent être faites à l'application de la méthode de P. SÉGALEN aux andosols, notamment à la suite des travaux de F. COLMET-DAAGE, J. et M. GAUTHEYROU et P. SÉGALEN 1970) : il ne semble pas y avoir de problème pour les sols ne contenant que des substances secondaires « amorphes » ; par contre, il y en a sûrement en présence de mélanges avec de l'halloysite et (ou) des hydroxydes de fer et d'alumine cryptocristallins ou mal cristallisés. En effet, l'halloysite semble se dissoudre beaucoup plus rapidement au cours des premières extractions qu'après plusieurs dissolutions ; il en serait de même des formes encore cryptocristallines des hydroxydes de fer et d'alumine. D'autre part, cette méthode ne permet pas la séparation des alumino-silicates « amorphes » (allophanes) des sesquioxydes « amorphes ».

b — *Allophanes*

Le terme allophane a souvent été accepté pour des substances silicatées très diverses, y compris pour l'ensemble des substances « amorphes » hydratées. Ce nom a été créé par F. STROMEYER et J.F.L. HAUSMANN (1816) pour désigner une substance étrange, de couleur bleu-ciel que les auteurs avaient cru être un minerai de cuivre. L'analyse leur a montré qu'il s'agissait d'un alumino-silicate hydraté caractérisé par une valeur du rapport $SiO/_2Al_2O_3$ = 1,15 et 41 % d'eau ; d'où le nom allophane tiré du grec, qui signifie « apprait différent ».

Depuis, sous le nom d'allophane ont été désignées des substances alumino-silicalitées « amorphes » et hydratées de composition très diverse dont la valeur du rapport $SiO/_2Al_2O_3$ varie de 0,4 à plus de 10. Actuellement il est généralement convenu de limiter la définition à celle de : substance alumino-siliceuse amorphe et hydratée.

Parmi les nombreux travaux faits sur les « allophanes », citons particulièrement ceux des auteurs japonais ; AOMINE, SUDO, WADA, YOSHINAGA ; néozélandais : BIRREL, FIELDES, FURKERT ; russes : CHUKROV *et coll.* ; américains : ROSS et KERR, SHERMAN *et coll.*, JACKSON *et coll.* ; français : COLMET-DAAGE, SIEFFERMANN ; anglais : MITCHELL *et coll.*

Pour expliquer certaines des caractéristiques propres aux andosols, les auteurs japonais ont émis l'hypothèse que les substances « amorphes » contenaient un alumino-silicate de composition relativement bien définie. Ils avaient tout d'abord remarqué au microscope électronique la grande impureté des « allophanes » (T. SUDO et H. TAKAHASI, 1955). Appliquant la technique de MEHRA et JACKSON (1960) pour la dissolution sélective des gels d'hydroxydes, N. YOSHINAGA et S. AOMINE (1962a) ont réussi à obtenir un alumino-silicate purifié qu'ils ont appelé allophane. Ensuite, utilisant successivement un mode de dispersion alcalin (solution de soude à pH 10,5-11), puis acide (solution chlorhydrique à pH 3,5-4), ils ont séparé deux fractions distinctes desquelles ils ont extrait pour chacune la fraction inférieure à 0,2 μ, de manière à éliminer tous les minéraux étrangers (dont la cristobalite). Les deux produits ainsi isolés se sont révélés à l'analyse être bien des alumino-silicates, mais de composition et surtout de structures différentes : l'extrait par voie alcaline, ne fournissant pas de raie par diffraction aux rayons X et n'ayant pas de forme bien définie a été appelé allophane *stricto sensu* ; tandis que pour l'extrait acide qui présente des raies de diffraction aux rayons X, et une forme bien définie en faisceaux de fibres, les auteurs (N. YOSHINAGA et S. AOMINE, 1962b) ont proposé le nom d'imogolite.

Ainsi la distinction de M. FIELDES (1955) entre allophane A et allophane B n'a pas été retenue par les auteurs japonais parce que l'allophane B correspond à un complexe contenant des minéraux primaires « hydratés », de la silice, et des gels d'hydro-

xydes. Par contre, ils ont distingué deux substances alumino-siliceuses : l'imogolite étant plus alumineuse et déjà cristallisée, dont la formule se rapproche du rapport idéal de $SiO_2/Al_2O_3 = 1$, tandis que l'allophane s.s. est plus siliceuse et encore apparemment mal organisée, dont le rapport SiO_2/Al_2O_3 varie de 1,3 à 2.

Définition de *l'allophane s.s.* (N. YOSHINAGA et S. AOMINE, 1962a ; N. YOSHINAGA, 1966) : c'est une substance alumino-siliceuse secondaire « amorphe » et très hydratée dont le rapport SiO_2/Al_2O_3 varie de 1,3 à 2. Elle est caractérisée par :

— rayons X : absence de raies de diffraction, mais une large bande entre 4,8 et 3 Å, renflée vers 3,5 Å ;

— analyse thermique différentielle : un pic endothermique de perte d'eau très important entre 160 et 180 °C ; un petit crochet exothermique entre 800 et 1 000 °C indiquant la cristallisation du silicate. Le pic exothermique à haute température peut être modifié sous l'influence des cations (MIYAUCHI et AOMINE, 1966) ou de la matière organique (CAMPBELL *et al.*, 1968) ;

— spectre infrarouge : la forme de la courbe d'absorption est identique à celle d'un gel synthétique alumino-siliceux (L.E. de MUMBRUN et C. CHESTER, 1964). La bande la plus caractéristique est celle de 2,9 μ qui correspond aux OH énergiquement liés. On remarque ensuite une bande importante vers 9,5 μ et des petites bandes vers 11,5 et 14 μ ; mais celles-ci peuvent indiquer la présence d'argiles ou d'hydroxydes. Le fait que tous les ions hydrogènes des oxhydriles liés à l'aluminium puissent être échangés avec du deutérium (deutération), provoquant ainsi un décalage de la bande des OH vers celles des DH, indiquerait d'après K. WADA (1966), que tous les OH sont situés à l'extérieur de la structure de l'allophane ; ce qui expliquerait leur forte activité anionique et la valeur « dépendante du pH » de leur capacité d'échange cationique ;

— microscopie électronique : l'allophane s.s. présente l'aspect d'amas floconneux de fines particules ou de fins glomérules, ou d'agglomérats de très fins filaments ;

— formule :

$n\ SiO_2, Al_2O_3$ - 2,5 (H_2O), 3,2 (H_2O) (n = 1,3 à 2)

Définition de *l'imogolite :* d'après les travaux récents de K. WADA et N. YOSHINAGA (1969), l'imogolite est une alumino-silicate secondaire cristallisé, à formule bien définie, constituant une espèce minérale.

— formule : SiO_2, Al_2O_3 - 2,75 (H_2O), H_2O ;

— structure : en chaîne, de longueur unitaire 8,4 Å et intervalle interchaîne 17,7 Å ;

— densité : 2,66 ;

— microporosité interne : 50 à 55 % ;

— rayons X : raie à 12-14 Å se déplaçant en s'affinant vers 17 à 18 Å par chauffage vers 200 à 250 °C. Cette raie n'est pas modifiée par glycérolage et de plus, elle disparaît totalement par chauffage à 500 °C. Il ne s'agit donc pas de montmorillonite ou d'une autre argile connue. La présence de cinq autres petites raies indiquerait la nature cristalline de l'imogolite (K. WADA, 1967) ;

— analyse thermique différentielle : fort départ d'eau entre 100 et 200 °C, avec pic endothermique intense vers 160 °C ; petit pic endothermique vers 420 °C (?), petit pic exothermique fin vers 910 °C ;

— spectroscopie infrarouge : pour YOSHINAGA et AOMINE (1962) une légère bande d'absorption entre 1 140 et 1 220 cm^{-1} distinguerait l'imogolite de l'allophane (?), et indiquerait une meilleure organisation des chaînes tétraédriques (de silice). Comme dans le cas de l'allophane le phénomène de deutération totale des oxhydriles (K. WADA, 1966) indiquerait que tous les OH sont situés à l'extérieur des chaînes octaédriques d'alumine ; ce qui expliquerait la forte analogie des propriétés physico-chimiques de l'allophane s.s. et de l'imogolite ;

— microscopie électronique : faisceaux de longues fibres (de 1 000 Å à quelques μ de long et de 50 à 300 μ de diamètre) ;

— diffraction électronique : raies principales à 4,1 - 4,2 Å, 2,1 Å et 1,4 Å. Chaque fibre serait constituée d'un assemblage de chaînes unitaires ayant un diamètre de 18-20 Å et une longueur de quelques centaines à quelques milliers d'Å ;

— dissolution dans NaOH (0,5 N) : il est à noter que l'imogolite, comme l'allophane s.s. est soluble dans une solution de soude (0,5 N) et qu'elle est donc extraite facilement avec les substances « amorphes » (K. WADA et I. MATSUBARA, 1968).

En conclusion, l'imogolite, malgré ses affinités très élevées avec l'allophane (par ses propriétés physiques et chimiques ne doit plus être considérée comme une substance « amorphe » mais comme une argile de rapport $SiO_2/Al_2O_3 = 1$; son existence a été reconnue, depuis sa découverte au Japon, dans la plupart

des andosols du monde ; par exemple : en Equateur (F. COLMET-DAAGE, 1969), au Chili (E.M. BESOAIN, 1968), au Cameroun (G. SIEFFERMANN, 1969), etc. Le terme imogolite a été approuvé par le Comité International de Nomenclature des Minéraux Argileux (G.W. BRINDLEY et G. PEDRO, 1970).

L'interprétation du mot « allophane » s.l. doit donc être acceptée avec une certaine réserve. Rappelons que les « allophanes-siliceuses » très riches en silice, contiennent soit des minéraux primaires partiellement altérés et « hydratés », soit de la silice sous forme de cristobalite, ou de diatomées, ou même d'opale ; les « allophanes très alumineuses » (SiO_2/Al_2O_3 = 1 à 0,4) contiennent en plus de l'allophane s.s. des hydroxydes d'alumine « amorphes » ou cristallisés (bayérite, boehmite et gibbsite). Les « allophanes-halloysitiques », ainsi que l'a montré F.U. CHUKROV *et al.* (1964) peuvent contenir de l'halloysite cryptocristalline. L'allophane s.s. peut être associée à de l'imogolite (N. YOSHINAGA et S. AOMINE, 1962) ; le mode de séparation de ces deux substances est d'ailleurs difficile et contesté (I. KANNO *et al.*, 1968) ; cette réserve est exprimée par K. WADA et N. YOSHINAGA (1969) eux-mêmes. Enfin l'allophane est souvent associée à des hydroxydes de fer, dont il est difficile de dire s'il n'y a pas de liaisons plus étroites entre les deux ; T. SUDO et T. NAKAMURA (1952), ont par ailleurs reconnu la présence d'hisingerite dans les andosols du Japon.

c — *Oxhydrates « amorphes »*

La technique SÉGALEN (1968) permet d'obtenir une bonne extraction des oxhydrates « amorphes ». Cette question a été excellemment résumée par G. SIEFFERMANN (1969). On a jusque-là surtout étudié les hydroxydes de fer et d'alumine.

— Hydroxydes de fer : les hydroxydes de fer amorphes peuvent dépasser couramment 15 % (de Fe_2O_3) dans les sols ferrallitiques et représenter de 33 à 45 % du total des substances « amorphes » dans les andosols désaturés du Cameroun (G. SIEFFERMANN, 1969).

U. SCHWERTMANN (*et al.*, 1968) explique le retard à la cristallisation des hydroxydes de fer par la facilité avec laquelle ils sont adsorbés par des substances soit organiques (acides fulviques, citrates, malates, tartrates, etc.), soit inorganiques (gels de silice, phosphates, etc.). Il est vraisemblable aussi que les « allophanes » peuvent adsorber les hydroxydes de fer (L.E. de MUMBRUN et G. CHESTER, 1964 ; G. PEDRO et A.J. MELFI, 1970), empêchant ainsi leur cristallisation.

— Hydroxydes d'alumine : les hydroxydes d'alumine « amorphes » peuvent être abondants dans les sols tropicaux : 8 % dans les sols ferrallitiques du Cameroun ; 32 à 48 % des substances « amorphes » dans les andosols du Cameroun (G. SIEFFERMANN, 1969).

Les hydroxydes d'alumine « amorphes » peuvent être soit liés à de la silice pour constituer de l'allophane, soit comme les hydroxydes de fer adsorbés par des substances organiques (acides fulviques), ce qui retarde leur cristallisation.

— Oxydes de titane, hydratés :

G.D. SHERMAN (*et al.*, 1964) pense que les oxydes de titane de certains andosols d'Hawaï seraient sous une forme hydratée TiO_2, nH_2O, cryptocristalline et apparemment « amorphe ». Leur cristallisation se produirait seulement par dessiccation lorsque les sols riches en titane sont exposés à l'air par la culture ; mais cette hypothèse n'a pas été confirmée ailleurs.

— Hydroxydes de manganèse : on ne connaît pas de travaux sur ce sujet. Il est possible, comme pour les hydroxydes de fer, qu'il existe des hydroxydes de manganèse « amorphes ».

d — *Silice « amorphe »*

La silice dosée comme « amorphe » dans les andosols peut atteindre des quantités importantes : au Cameroun, dans des andosols désaturés, G. SIEFFERMANN (1969), note des teneurs représentant de 12 à 33 % du total des substances « amorphes ». S. SHOJI et J. MASUI (1969), dans des sols peu évolués sur cendres volcaniques du Japon, ont déterminé des teneurs très élevées en silice :

fraction	SiO_2 en % fraction totale	% SiO_2 « amorphe »
1-2 µ	68 à 74 %	18 à 38 %
<0,2 µ	31 à 52 %	23 à 33 %

La silice « amorphe » est peut être soit combinée à de l'alumine pour constituer de l'allophane ou de l'imogolite, soit se présenter sous une forme « discrète » : diatomées dans les andosols désaturés du Cameroun (G. SIEFFERMANN, 1969) ; opale de formation pédologique dans les sols peu évolués sur cendres volcaniques du Japon (S. SHOJI et .J MASUI, 1969), ou à la base de sols peu évolués (hydrandepts) d'Hawaï sur laves et cendres basaltiques (G.D. SHERMAN *et al.*, 1964), ou phytolites dans le haut d'autres andosols d'Hawaï (K.H. HOUNG, 1964).

4.4. **Produits secondaires cristallisés (et hydratés)**

Il s'agit principalement des argiles, oxydes et hydroxydes.

a — *Argiles*

Les argiles de la famille de la kaolinite (halloysite, métahalloysite, kaolinite), sont généralement les plus abondantes dans les andosols. Cependant il a été aussi fréquemment observé des petites quantités de montmorillonite, de minéraux à comportement de vermiculite ou de chlorite, de l'illite et des minéraux interstratifiés.

— L'halloysite est l'argile la plus abondamment observée dans les andosols par l'ensemble des auteurs. Elle peut se présenter sous trois formes au microscope électronique : généralement de fines lamelles enroulées ou tubes ; parfois de glomérules ayant l'aspect de pelotes de fibres (formes en « oignon » de T. SUDO et H. TAKAHASI, 1955) ; rarement de plaquettes ou prismes à base pseudohexagonale (F.V. CHUKHROV et B.B. ZUYAGIN, 1966b). Les deux premières formes ont été particulièrement bien étudiées par G. SIEFFERMANN et G. MILLOT (1968), dans les sols du Cameroun. L'halloysite (dans son état hydraté) est caractérisée par diffraction aux rayons X par une raie intense à 10 Å, une bande large et asymétrique de 4,4 à 4 Å, culminant à 4,4 Å. La raie à 10 Å devient une bande asymétrique de 10 à 7,3 Å par déshydratation ; tandis que la raie à 4,4 Å s'accentue. D'autre part, l'halloysite gonfle légèrement au glycérol, la raie à 10 Å passant à 11 Å. L'hypothèse que l'halloysite dériverait directement des « allophanes » a été émise par de nombreux auteurs. Pour G. SIEFFERMANN (1969), la forme glomérulaire correspondrait au début de la cristallisation de l'allophane. F.U. CHUKROV (*et al.*, 1964) dans son étude sur les « allophanes » d'Europe montrent que certaines espèces ayant une valeur du rapport $SiO/_2Al_2O_3$ voisine de 2, sont en fait de l'halloysite encore mal cristallisée ou cryptocristalline. Les observations de F. COLMET-DAAGE (*et al.*, 1968) en Equateur et de S. AOMINE, K. WADA (1962) au Japon, montrent que l'halloysite apparaît après la formation des « allophanes » soit par enrichissement en silice du sol sous-jacent à l'horizon contenant exclusivement des « allophanes », soit par suite de l'âge plus ancien du sol.

Pour F.U. CHUKROV *et al.*, 1966a) l'halloysite est une espèce minéralogiquement différente de la kaolinite, non pas seulement par sa forte capacité de rétention pour l'eau et son degré de désordre plus élevé, mais surtout par son organisation cristalline particulière. L'hypothèse suivant laquelle la kaolinite pourrait dériver de l'halloysite par déshydratation, vieillissement et passage sous la forme déshydratée de la métahalloysite n'est donc pas fondée. D'ailleurs la déshydratation de l'halloysite en métahalloysite est reversible (U. VON HOFMANN et R. REINGRABER, 1969). Pour SIEFFERMANN (1969), la formation de l'halloysite correspondrait à des conditions particulières de pédogenèse : climat régulièrement humide, roche mère volcanique fortement drainée et solutions d'hydrolyse riches en cations.

— La métahalloysite est considérée comme une forme déshydratée de l'halloysite. Par diffractométrie aux rayons X, elle se distingue de la kaolinite par un ensemble de raies ou une bande étalée entre 7,2 et 7,6 Å, dominant vers 7,35 Å ; une bande large et dissymétrique entre 4 et 4,40 Å et une raie très atténuée à 3,56 Å, ne dépassant généralement pas celle à 4,40 Å. Dans les andosols elle est fréquemment observée dans les régions climatiques moins humides et de préférence dans le haut du profil (G. SIEFFERMANN, 1969).

— Un peu de kaolinite assez bien cristallisée a été observée au microscope électronique par G. SIEFFERMANN (1969) dans les andosols désaturés du Mt Cameroun. Cet auteur explique sa formation par suite de la très faible concentration des solutions en cations dans les sols des climats extrêmement humides (d'après l'hypothèse de G. MILLOT, 1964).

— La présence de montmorillonite en petite quantité, a été assez fréquemment observée dans les andosols encore « peu évolués » du Japon (N. UCHIYAMA, J. MASUI et Y. ONIKURA, 1962 ; N. UCHIYAMA, J. MASUI et S. SHOJI, 1968).

Elle a été aussi reconnue dans les andosols de Nouvelle-Guinée situés en altitude élevée (plus de 3 000 m = sols de climat froid) par G.K. RUTHERFORD (1962). G. SIEFFERMANN (1969) en a remarqué

aussi dans les andosols désaturés du Mt Cameroun ; il a montré que la montmorillonite dans ce cas particulier s'est formée à partir de minéraux ferromagnésiens (c'est-à-dire qu'elle représente un stade initial et transitoire d'altération dans le micro-milieu « confiné » que constitue un cristal en début d'altération). G. TERCINIER et P. QUANTIN (1968), ont par ailleurs remarqué dans des sols bruns eutrophes andiques sur cendres basaltiques des Nouvelles-Hébrides, la localisation d'une quantité importante de montmorillonite dans la fraction 50 à 200 μ alors que la fraction inférieure à 2 μ ne contenait qu'un mélange d'halloysite, de métahalloysite et d'hydroxydes.

D'autres minéraux argileux à trois couches ont été aussi fréquemment observés en petite quantité dans les andosols et plus particulièrement dans les sols les plus jeunes ou les sols de régions plus modérément humides ; de la vermiculite, ou un minéral « à comportement de vermiculite », a été déterminée par diffraction aux rayons X dans des andosols du Japon (T. EGAWA et Y. OSHIKAMO, 1963 ; H. KAWASAKI et S. AOMINE, 1966 ; N. UCHIYAMA, J. MASUI et S. SHOJI, 1968), de Nouvelle-Zélande (M. FIELDES, 1963), de Nouvelle-Guinée (G.K. RUTHERFORD, 1962), du Mt-Cameroun (G. SIEFFERMANN, 1969), d'Equateur (F. COLMET-DAAGE, *et al.*, 1969) et de France (J.M. HETIER et Y. TARDY, 1969). D'après certains de ces auteurs, ce minéral à comportement de vermiculite, pourrait être une montmorillonite-alumineuse. Par ailleurs des petites quantités de minéraux complexes, interstratifiés, ou mal définis par diffractométrie aux rayons X, ont été observés : G.P. BRINER et M.L. JACKSON (1969) ont déterminé un peu d'interstratifié vermiculite-smectite-chlorite dans un andosol d'Australie ; les auteurs japonais précédemment cités ont observé des traces de chlorite ou d'interstratifiés dans les andosols du Japon ; G.K. RUTHERFORD (1962) a remarqué des interstratifiés dans les andosols de Nouvelle-Guinée ; G. SIEFFERMANN (1969) signale aussi la présence « d'édifices-mixtes » dans les andosols du Mt Cameroun. Enfin, de l'illite a été observée assez rarement dans les andosols : au Japon (H. KAWASAKI et S. AOMINE, 1966 ; N. UCHIYAMA, J. MASUI et S. SHOJI, 1968) ; en Nouvelle-Zélande (M. FIELDES, 1963) ; en Italie, C. PALMONARI (1966), remarquent que l'illite est plus abondante dans la fraction grossière de l'extrait inférieur à 2 μ, tandis que l'halloysite domine dans la fraction la plus fine ; enfin, F. COLMET-DAAGE (*et al.*, 1969), signale un peu d'illite dans les andosols des régions sèches de la haute vallée interandine, en Equateur.

b — *Oxydes et hydroxydes cristallisés*

Les oxydes et hydroxydes « secondaires » sont très abondants dans les andosols, et ceci d'autant plus que les sols sont plus anciens ou plus « évolués ». Comme il a été dit précédemment, ils sont généralement « amorphes » pour une grande part, les formes cristallisées ne devenant abondantes que dans les régions moins humides ou dans les sols les plus anciens.

— Oxydes et hydroxydes de fer : de la goethite, parfois associée à de l'hématite (dans les régions les plus sèches) a été déterminée par G. SIEFFERMANN (1969) dans les andosols du Mont Cameroun. De la goethite a été aussi observée par F. COLMET-DAAGE et P. LAGACHE (1965) dans les andosols des Antilles, par G.D. SHERMAN (*et al.*, 1964), à Hawaï et G. SIEFFERMANN (1969) au Cameroun. Enfin, Y. MATSUSAKA et G.D. SHERMAN (1961) ont observé la formation de maghémite (γFe_2O_3) par déshydratation d'hydroxydes de fer amorphes et ils pensent qu'il en existe aussi dans les sols.

— Hydroxydes d'alumine : de la gibbsite a été fréquemment observée dans les andosols désaturés des régions les plus humides : aux Antilles (F. COLMET-DAAGE et P. LAGACHE, 1965) ; en Equateur (F. COLMET-DAAGE *et al.*, 1967 et 1969) ; au Cameroun (G. SIEFFERMANN, 1969) ; à Hawaï (G.D. SHERMAN *et al.*, 1964 ; P. LOGANATHAN et L.D. SWINDALE, 1969); en Nouvelle-Zélande (K.S. BIRREL, *in* FAO-UNESCO, 1964) ; au Japon (K. WADA et S. AOMINE, 1966 ; K. WADA et I. MATSUBARA, 1968). Un peu de bayérite a été signalée par F. COLMET-DAAGE aux Antilles (F. COLMET-DAAGE et P. LAGACHE, 1965) et peut-être un peu de boehmite en Equateur (F. COLMET-DAAGE *et al.*, 1967).

— Oxydes de titane : l'anatase est un oxyde de titane fréquent dans les sols sur basaltes du Cameroun (G. SIEFFERMANN, 1969) et d'Hawaï (G.D. SHERMAN *et al.*, 1964) ; ce dernier auteur pense qu'il dérive par déshydratation, d'une forme hydratée cryptocristalline.

4.5. **Silice cristallisée**

a — *Quartz*

Il arrive assez fréquemment d'observer un peu de quartz dans le haut des andosols. G. SIEFFERMANN (1969) qui l'a remarqué très souvent dans les sols du Cameroun, pense que c'est un minéral « pri-

maire » résiduel provenant soit de matériaux originels acides (trachytes et phonolites), soit de pollution superficielle par des apports éoliens récents. Il en a été aussi observé dans quelques andosols d'Equateur (F. COLMET-DAAGE *et al.*, 1967 et 1969) et de Nouvelle-Zélande (K.S. BIRREL, *in* FAO-UNESCO, 1964). G.D. SHERMAN (*et al.*, 1964) remarquant que la quantité de quartz s'accroît avec celle de la pluviométrie dans les andosols d'Hawaï, alors qu'il est impossible d'en détecter la trace dans le matériau originel, émet l'hypothèse d'une cristallisation secondaire d'α-quartz dans les sols des régions climatiques très humides.

b — *Cristobalite*

La cristobalite a été très fréquemment remarquée dans les andosols. Rappelons les travaux de N. MIYAUCHI et S. AOMINE (1964) au Japon, puis ceux de M. FIELDES et R.K. FURKERT (1966) en Nouvelle-Zélande montrant que la fraction 2 à 0,2 μ des andosols peut être riche en cristobalite. F. COLMET-DAAGE (*et al.*, 1965, 1967, 1969) a retrouvé de la cristobalite dans les andosols des régions très humides des Antilles et d'Equateur. La cristobalite est caractérisée principalement sur un diagramme de diffraction aux rayons X par une raie intense à 4,05 Å ; cette raie est particulièrement remarquable dans la fraction inférieure à 2 μ des andosols des régions très humides, très riches en substances amorphes ; elle peut être masquée ou difficilement interprétable en présence de feldspaths plagioclases ou d'argiles. La présence de cristobalite peut être interprétée comme un minéral résiduel, provenant de la forme β originaire du matériau volcanique, mais le fait qu'elle se concentre dans la fraction inférieure à 2 μ, peut suggérer la formation secondaire d'α-cristobalite dans les sols des régions très humides. Rappelons que dans ces conditions il se forme des nodules de substances opalines (S. SHOJI et J. MASUI, 1969) en même temps que l'on note la présence de cristobalite et même de quartz. Le fait que dans ces conditions les solutions de sol soient riches en silice 50 à 70 p.p.m., d'après B.P. RUXTON (1968) pourrait plaider en faveur de la formation secondaire d'opale et même de cristobalite. Dans des conditions analogues, G. MILLOT (1964) a signalé d'une part les travaux de BISQUE (1962) montrant la silicification d'une dolomite argileuse par une solution de silice de moins de 50 p.p.m., d'autre part, la découverte des raies d'α-cristobalite dans des opales par LEVIN et OTT (1933).

4.6. **Autres minéraux résiduels**

a — *Zéolites*

La présence de zéolites est parfois signalée dans la fraction sableuse des andosols (notamment aux Antilles par F. COLMET-DAAGE et P. LAGACHE, 1965). Les zéolites peuvent être considérés comme des minéraux résiduels provenant des roches volcaniques ayant subi des actions hydrothermales.

b — *Magnétite. Titanomagnétite*

Les minéraux magnétiques sont très fréquents, comme minéraux résiduels dans les andosols et même dans les sols ferrallitiques. Citons notamment à ce sujet les observations de Y. MATSUSAKA (*et al.*, 1965), et celles de G. SIEFFERMANN (1969). Il est possible que dans les sols ces minéraux se transforment par oxydation en maghémite et titanomaghémite. Ces minéraux sont difficiles à distinguer par diffraction aux rayons X, en présence de pyroxènes, feldspaths et zéolites, ce qui est malheureusement le cas de nombreux andosols (G. SIEFFERMANN, 1969).

5. CLASSIFICATION

Tous les pédologues sont d'accord pour faire ressortir l'importance de l'originalité des andosols au plus haut niveau de la classification des sols. Cependant une restriction doit être apportée dans l'emploi de ce terme : il ne s'agit pas de l'ensemble des sols dérivés de matériaux volcaniques pyroclastiques. Les andosols sont des sols formés à partir de matériaux volcaniques pyroclastiques et constitués pour une forte part de substances vitreuses ; leur « complexe d'échange » est caractérisé par une dominance de « substances amorphes » (d'après l'examen aux rayons X) ; leur densité apparente est généralement faible et inférieure à 0,85. On exclut ainsi de cette appellation : les sols Minéraux Bruts ou les sols Peu Evolués non climatiques d'apport volcanique caractérisés par une faible quantité de substances « secondaires-amorphes » ; les sols Bruns Eutrophes Tropicaux, déjà riches en argiles ; les sols Ferrallitiques, fortement « évolués », très pauvres en minéraux primaires et pauvres en alumino-silicates secondaires amorphes (« allophanes »).

5.1. Définition des unités pour la carte des sols du monde

En 1968, R. DUDAL, pour la carte des sols du monde projetée par la FAO et l'UNESCO, a proposé parmi les principales unités de sol celle des andosols ; il l'avait tout d'abord subdivisée en trois sous-unités : Haplic Andosols, Vitric Andosols et Gleyic Andosols. En 1970, R. DUDAL a revu cette première subdivision et proposé quatre nouvelles sous-unités :

— *Andosols (T) :* Ce sont des sols développés à partir de matériaux vireux et/ou ayant une densité apparente de moins de 0,85 (mesurée à la capacité du sol au champ sur la fraction « terre fine ») au moins dans certains sous-horizons jusqu'à 50 cm de la surface et un complexe d'échange dominé par des matériaux « amorphes », n'ayant pas d'horizons « diagnostiques » ou pas d'autres que (sauf s'ils sont enterrés à plus de 50 cm de la surface) un horizon de gley à plus de 50 cm de la surface, un horizon A ou un horizon B « cambique ».

— *Mollic Andosols (Tm) :* Andosols ayant un horizon A « mollique » (ayant une couleur foncée à « chroma » de moins de 3,5 à l'état humide, et « value » plus foncée que 3,5 à l'état humide et 5 à l'état sec ; un taux de saturation en cations échangeables, de plus de 50 % ; une teneur en matière organique de plus de 1 % et une profondeur de plus de 18 cm).

— *Humic Andosols (Th) :* Andosols ayant un horizon A «umbrique » (se distingue du A « mollique » par un taux de saturation en cations échangeables de moins de 50 %).

— *Ochric Andosols (To) :* Andosols ayant un horizon A « ochrique » (se distingue des horizons A « mollique » ou « umbrique » par une couleur moins foncée, ou une teneur en matière organique inférieure à 1 % sur au moins 18 cm, ou une profondeur inférieure à 18 cm).

— *Vitric Andosols (Tv) :* Andosols se distinguant des précédents par l'absence d'horizon A « mollique » ou « umbrique », une texture plus grossière que limoneuse (silty loam) jusqu'au moins 50 cm de profondeur et l'absence de « consistance-graisseuse » (smeary).

5.2. Soil classification, 7th approximation USDA - 1960, *Revue en 1967 :*

Les andosols sont désignés sous le nom d'Andepts et classés dans l'ordre des Inceptisols, qui correspond à la classe des sols peu évolués de la classification française.

Les Andepts sont des Inceptisols :

1. Qui ont l'une ou les deux caractéristiques suivantes :

a) une densité apparente de la terre fine (<2 mm) inférieure à 0,85 dans l'horizon A ou l'horizon B (cambric), ou les deux, et ayant un complexe d'échange dominé par des substances amorphes ;

b) plus de 60 % de cendres volcaniques vitreuses ou autres matériaux pyroclastiques vitreux, dans les fractions limon, sable et gravier.

2. Qui ne sont pas engorgés par l'eau à aucun moment et n'ont pas les caractères des Aquepts (sols hydromorphes).

3. N'ont pas d'horizon humifère remanié (plaggen epipedon).

Les Andepts sont subdivisés principalement en :

— *Cryandepts :* Andepts des pays froids, ayant une température moyenne annuelle de moins de 8 °C.

— *Durandepts :* Andepts des pays chauds (ayant une température moyenne annuelle de plus de 8 °C), ayant un horizon induré.

— *Dystrandepts :* Andepts des pays chauds, caractérisés par un horizon A « *umbric* » (à couleur foncée : chroma <3,5 sur sol humide, value <3,5 sur sol humide et <5 sur sols secs, *à taux de saturation en cations inférieur à* 50 %, profond d'au moins 18 cm) ou « *ochric* » (à couleur plus claire ; ou trop pauvre en matière organique : moins de 1 % sur 18 cm ; ou pas assez épais : moins de 18 cm, pour être « mollic », « umbric » ou « histic ») ; présentant le phénomène de « *thixotropie* » dans certains horizons ; ayant une capacité de rétention en eau supérieure à 20 % à pF 4,2 pour l'ensemble du sol entre 25 cm et 1 m de profondeur ; *n'ayant pas d'argiles qui se déshydratent irréversiblement* en formant des agrégats durs de la taille des graviers.

N.B. Les Dystrandepts correspondent aux Andosols des pays tropicaux désaturés, de la classification française.

— *Eutrandepts :* Andepts des pays chauds, caractérisés par un horizon A « *mollic* », se distinguant de « l'umbric » par un taux de saturation en cations supériur à 50 %.

N.B. Les Eutrandepts correspondent aux Andosols des pays tropicaux saturés de la classification française.

— *Hydrandepts :* Andepts des pays chauds se distinguent des Dystrandepts par la présence *d'argiles qui se déshydratent irréversiblement et formant des agrégats durs de la taille des graviers.*

N.B. Les hydrandepts correspondent aux Andosols des pays tropicaux désaturés et perhydratés de la classification française.

— *Vitrandepts :* Andepts des pays chauds, *qui ne présentent pas le caractère de « thixotropie »* dans chacun des horizons et dont la capacité de rétention en eau à pF 4,2 est inférieure à 20 % dans l'ensemble du sol entre 25 et 100 cm de profondeur ; *n'ayant pas d'argiles qui se déshydratent* irréversiblement en agrégats durs de la taille des graviers.

N.B. Les Vitrandepts sont des sols formés sur des matériaux pyroclastiques grossiers encore peu profondément altérés ; ils correspondent aux sols peu évolués non climatiques d'apport volcanique friable de la classification française.

5.3. **Classification française, C.P.C.S. (1967)**

G. AUBERT (1965) avait classé les Andosols en un groupe particulier des sols peu évolués non climatiques d'apport, en les définissant comme des sols riches en allophane.

La Commission de Pédologie et de Cartographie des sols (1967), a estimé préférable de créer une classe nouvelle, celle des Andosols, tenant compte ainsi au plus haut niveau de l'importance du fait qu'ils sont riches en allophanes.

Depuis, en raison de l'avancement des connaissances, une révision s'imposait. Un groupe de Travail sur le thème Andosols, en 1971, a élaboré une nouvelle classification des Andosols. Il n'est plus distingué les sols des pays froids de ceux des pays tempérés, mais l'accent est mis au niveau de la sous-classe sur le degré de différenciation du profil, à l'échelon des groupes sur le degré de saturation en cations du complexe d'échange, et à celui des sous-groupes sur des caractéristiques morphologiques du profil. Il est notamment proposé de différencier l'horizon humifère en mélanique et en chronique pour distinguer deux ensembles de sols qui paraissent importants du point de vue de leur répartition géographique. L'horizon *A1 mélanique* est défini par sa couleur à l'état humide de 2/0 - 2/1 sur le code Munsell (noir) et sa profondeur d'au moins 20 cm. Il n'est pas tenu compte du degré de saturation en bases échangeables. (Cet horizon est donc différent des horizons A mollique et umbrique de la classification américaine.)

L'horizon *A1 chromique* est défini par rapport au précédent : le plus souvent, le chroma de la couleur sur sol humide doit être au moins égal à 2 ; sinon la profondeur de cet horizon doit être inférieure à 20 cm. (Cet horizon est différent de l'horizon ochrique de la classification américaine.)

La nouvelle classification proposée est la suivante :

CLASSE DES ANDOSOLS

2. *Sous classe des Andosols peu différenciés,* à profil A - C

1.1. Groupe des *Andosols humiques,* généralement désaturés — à horizon A1 mélanique

1.2. Groupe des *Andosols vitriques,* généralement saturés — à horizon A1 chromique

2. *Sous-classe des Andosols différenciés,* à profil A - (B) - C

2.1. Groupe des *Andosols saturés* — à taux de saturation en cations dans l'horizon (B) supérieur à 50 %

2.1.1. Sous-groupe *mélanique,* à horizon A1 mélanique

2.1.2. Sous-groupe *chromique,* à horizon A1 chromique

2.1.3. Sous-groupe à *accumulation,* à différenciation d'un horizon à précipitation de carbonate ou de silice

2.2. Groupe des *Andosols désaturés, non perhydratés* — à taux de saturation en cations inférieur à 50 % et à dessiccation temporaire dans le haut du profil

2.2.1. Sous-groupe *mélanique,* à horizon A1 mélanique

2.2.2. Sous-groupe *chromique,* à horizon A1 chromique

2.3. Groupe des *Andosols désaturés perhydratés* — à taux de saturation en cations inférieur à 50 % et à hydratation constamment très forte dans l'ensemble du

profil se manifestant par les phénomènes de « thixotropie » et de « déshydratation irréversible » à leur maximum d'intensité dans l'horizon (B)

2.3.1. Sous-groupe *mélanique,* à horizon A1 mélanique

2.3.2. Sous-groupe *chromique,* à horizon A1 chromique

Il est proposé en outre de créer des groupes andiques pour les sols appartenant à d'autres classes, faisant transition vers les Andosols en raison de leur richesse en substances amorphes.

6. GLOSSAIRE

— *Allophane (s.l.) :* nom donné par F. STROMEYER et J.F.L. HAUSSMANN (1816) à une substance alumino-silicatée et hydratée, de couleur bleu-ciel, qu'ils avaient cru être un minerai de cuivre ; d'où l'origine éthymologique grecque signifiant « paraît différent » ; cette substance contenait 41 % d'eau et avait un rapport $SiO_2/Al_2O_3 = 1,15$.

Sous le nom d'allophane (s.l.) est rassemblée une grande variété de substances alumino-silicatées et hydratées, paraissant amorphes par diffraction des rayons X. Il peut s'agir éventuellement d'un mélange de gels d'alumino-silicates hydratés, de gels d'hydroxydes de fer et d'aluminium, et même de silice « amorphe ».

— *Allophane (s.s.) :* pour N. YOSHINAGA et S. AOMINE (1962 a), l'allophane est exclusivement un alumino-silicate amorphe et très hydraté, dont le rapport SiO_2/Al_2O_3 varie de 1,3 à 2. Cette substance ne donne pas de raies de diffraction aux rayons X, mais se caractérise par un diagramme présentant une large bande entre 4,8 et 3 Å, renflée vers 3,5 Å. A l'analyse thermique différentielle, elle fournit un pic endothermique très important entre 160 et 180°, correspondant à une forte perte d'eau, et, un petit crochet exothermique entre 800 et 1 000° indiquant la cristallisation du silicate. Au microscope électronique, elle présente l'aspect d'amas floconneux de fines particules globuleuses ou filamenteuses.

Formule : n SiO_2, Al_2O_3 - 2,5(H_2O), 3,2(H_2O) (n = 1,3 à 2).

— *Allophane A et allophane B :* M. FIELDES (1955) a distingué deux sortes d'allophane : l'une A correspond à celle définie par YOSHINAGA et AOMINE (1962) ; l'autre B est plus riche en silice et correspondrait selon FIELDES à une forme initiale d'allophane formant transition entre les alumino-silicates primaires en cours d'altération et l'allophane A.

N. MIYAUCHI et S. AOMINE (1964) ont montré que l'allophane B est en réalité un mélange d'allophane A et d'un peu de fins minéraux primaires et de cristobalite. Il n'y a donc pas lieu de distinguer l'allophane en deux formes A et B.

— *Allophane « siliceuse » :* certains auteurs désignent sous le nom d'allophane siliceuse des alumino-silicates hydratés amorphes dont le rapport SiO_2/Al_2O_3 est supérieur à 2. Il s'agirait probablement d'un mélange analogue à celui de l'allophane B décrite par FIELDES. Cette substance peut contenir en plus de l'allophane (s.s.) de la silice soit sous forme de cristobalite (MIYAUCHY, AOMINE (1964), soit sous forme d'opale provenant de diatomées (G. SIEFFERMANN, 1969), de phytolites ou d'origine pédologique (S. SHOJI, J. MASUI, 1969).

— *Allophane « riche en alumine » :* certains auteurs désignent sous le nom d'allophane riche en alumine, des alumino-silicates hydratés amorphes dont le rapport SiO_2/Al_2O_3 est inférieur à 1. Cette substance serait un mélange d'allophane (s.s.) et d'hydroxydes d'alumine.

L'alumine est fréquemment cristallisée sous forme de gibbsite. Ce cas est notamment représenté par les Hydrandepts d'Hawaï.

— *Andepts :* équivalents des Andosols dans la classification USDA (1960), les Andepts font partie des Inceptisols.

— *Andosol :* Ce mot vient du japonais « an do » qui signifie sol noir ; il désignait à l'origine des sols de couleur très foncée, riches en matière organique, formés sur des cendres et ponces volcaniques au Japon.

Les Andosols constituent un ensemble de sols généralement formés sur des matériaux volcaniques pyroclastiques d'âge récent, à profil AC ou A, (B), C, qui se caractérisent par l'abondance dans leur fraction minérale de produits alumino-siliceux hydratés, amorphes que l'on désigne généralement sous le nom d'allophane, et par des quantités souvent élevées de matières organiques.

Les caractéristiques particulières de l'allophane : très forte rétention de l'eau ; capacités d'échange anionique et cationique très élevées et dépendantes du pH, constituent l'originalité majeure des andosols.

La classification pédologique française (CPCS, 1967) fait des Andosols une classe qu'elle divise en deux sous-classes : Andosols des pays froids, correspontant aux climats froids et tempérés ; Andosols des pays tropicaux. Les Andosols des pays tropicaux sont subdivisés en Andosols saturés, fortement saturés en cations échangeables, et Andosols désaturés, faiblement saturés en cations échangeables.

— *Capacité d'échange anionique* (A.E.C.)

Par rapport aux argiles, l'allophane à la particularité de retenir de fortes quantités d'anions échangeables. Cette capacité varie suivant le pH ; elle est maximum à pH acide ; elle varie suivant la nature des anions ; elle est notamment très forte pour le phosphore. La fixation du phosphore s'accroît en fonction de la quantité d'alumine des allophanes.

— *Capacité d'échange cationique* (C.E.C.) dépendante du pH et Δ *C.E.C. value :*

L'allophane a aussi la particularité d'avoir une capacité d'échange cationique variable suivant le pH ; cette valeur est très élevée et maximum à pH alcalin. La mesure de capacité d'échange cationique à pH = 7 n'est pas significative. YOSHINAGA et AOMINE (1962) proposent de déterminer l'écart entre les mesures de la valeur maximum à pH = 10,5 et la valeur minimum à pH = 3,5 comme valeur significative qu'ils appellent « Δ C.E.C. value ». Cet écart peut être très élevé et atteindre 100 mé p. 100 g ; il est particulier aux Andosols.

— *Cristobalite :* Silice cristallisée sous forme pseudocubique (on trouve de la cristobalite dans la fraction inférieure à 2 μ). La cristobalite existe fréquemment dans les Andosols ; elle se présente sous deux formes : β, de haute température, provenant des roches volcaniques ; α, de basse température, pouvant être un minéral secondaire se formant dans les sols.

— *Cryandepts :* Andepts des pays froids à température moyenne annuelle inférieure à 8 °C.

— *Déshydratation irréversible :* Les Andosols très hydratés ont la propriété de se réhydrater moins fortement lorsqu'ils ont été soumis à une dessiccation prolongée à l'air (en dessous dc pF = 4,2).

— *Durandepts :* Andepts des pays chauds, ayant un horizon induré.

— *Dystrandepts :* Andepts des pays chauds, ayant un horizon A « umbric » désaturé, présentant le phénomène de « thixotropie » dans certains horizons.

— *Eutrandepts :* Andepts des pays chauds, ayant un horizon A « mollic », saturé.

— *Feldspaths hydratés,* minéraux hydratés : M. FIELDES (1955, 1966) désigne sous le nom de feldspaths ou de minéraux « hydratés » des feldspaths ou autres minéraux primaires, en début d'altération, partiellement désionisés et désorganisés par hydrolyse, ayant acquis une certaine hydratation et une activité physico-chimique.

— *Halloysite-métahalloysite :* Minéral argileux de la famille de la kaolinite, à rapport $SiO_2/Al_2O_3 = 2$. A l'état hydraté, l'halloysite présente une raie de diffraction aux rayons X à 10 Å ; à l'état déshydraté (après dessiccation à l'air vers 100°), la méta-halloysite ne présente plus de raie à 10 Å mais vers 7,35 Å. L'halloysite vue au microscope électronique, a le plus souvent la forme de petits tubes ou de minces plaquettes enroulées ; parfois elle a la forme de globules « écailleux » ou de pelotes de fibres ; CHUKHROV et ZVYAGIN (1966) signalent aussi une forme en plaquettes pseudo-hexagonales.

— *Hydrandepts :* Andepts des pays chauds, se distinguant des Dystrandepts par la présence d'argiles qui se déshydratent irréversiblement en formant des agrégats durs de la taille des graviers.

— *Imogolite :* Nom donné par YOSHINAGA et AOMINE (1962) à un alumino-silicate hydraté, à rapport SiO_2/Al_2O_3 voisin de 1, se distinguant de l'allophane par son état cristallin. Sa formule approximative est : SiO_2, Al_2O_3 - 2,75 (H_2O), H_2O. Par diffraction aux rayons X, elle donne une raie à 12-14 Å, se centrant vers 17-18 Å après chauffage vers 200-250°, et disparaissant au-dessus de 300°. Comme l'allophane, à l'analyse thermique différentielle, elle manifeste un fort crochet endothermique vers 160°correspondant à un fort départ d'eau, et un petit pic exothermique vers 910°, de cristallisation. Au microscope électronique l'imogolite apparaît sous forme de faisceaux de longues fibres. L'imogolite a été reconnue comme un minéral argileux par le Comité International de Nomenclature des Argiles (G.W. BRINDLEY et G. PEDRO, 1970).

— *Matériaux volcaniques pyroclastiques :* Matériaux volcaniques émis par explosion, plus ou moins finement divisés, fortement vitreux : cendres, lapilli scoriacés, ponces et tufs formés de ces éléments.

— *Opale :* Silice cristallisée sous une forme cryptocristalline, paraissant amorphe par diffraction aux rayons X. Elle se forme par précipitation dans des eaux très chargées en silice ; elle constitue aussi certains phytolites siliceux, ou le test de diatomées.

— *Palagonite :* Nom désignant une substance d'altération brune de verres basaltiques, contenant de l'allophane et des hydroxydes, paraissant isotrope ou fibreuse.

— *Sols andiques :* Certains auteurs désignent sous le nom d'andiques, des sols ayant pour une part seulement certains des caractères propres aux Andosols, parce qu'ils contiennent un peu d'allophanes. Ainsi l'on parle de Sols Bruns andiques, Sols Bruns Eutrophes Tropicaux andiques, ou de Sols Ferrallitiques fortement désaturés andiques.

— *Sol peu évolués d'apport volcanique friable :* Ce sont des sols peu évolués non climatiques d'apport, formés sur des matériaux volcaniques pyroclastiques très jeunes, encore relativement pauvres en allophanes.

— *Structure soufflée* (fluffy) : Les Andosols formés sur des cendres volcaniques ont une faible densité apparente et une structure faiblement cimentée et très fortement poreuse, donnant l'impression d'être « soufflée ».

— *Substances minérales amorphes:* Certaines substances minérales, notamment les produits secondaires d'altération des verres volcaniques constituant les « allophanes », ne donnent pas de raies de diffraction aux rayons X. Supposant qu'elles ne sont pas cristallisées, on dit qu'elles sont amorphes. Les substances minérales secondaires amorphes peuvent être constituées d'alumino-silicates hydratés appelés allophanes, de gels d'hydroxydes, et de silice (dont par exemple de l'opale).

La détermination quantitative des substances amorphes dans un sol, leur extraction et leur fractionnement pour une étude qualitative, sont des opérations délicates et aléatoires.

— *Test de* FIELDES et PERROT, *au NaF :* L'allophane a la propriété de développer une forte alcalinité d'échange avec une solution de fluorure de sodium (EGAWA, 1960), élevant le pH d'une solution initialement neutre à une valeur comprise entre 9,5 et 11. FIELDES et PERROT (1966) ont proposé d'utiliser cette réaction comme test de la présence d'allophanes :

- au laboratoire, il suffit de mesurer le pH de la réaction avec un pH mètre
- sur le terrain, on dépose une pastille de sol humide sur du papier filtre sans cendres imbibé d'une solution alcoolique neutre de phénolphtaleine à 1 % ; on imprègne ensuite le sol par quelques gouttes d'une solution neutre et saturée de fluorure de sodium. En présence d'allophane, il se développe rapidement une vive couleur rouge indiquant un pH supérieur à 9,5.

— *Thixotropie :* Le terme thixotropie, appliqué aux Andosols, signifie qu'une petite parcelle de sol normalement humide, soumis à une certaine pression des doigts, éclate brusquement en libérant de l'eau ou une masse fluide non collante.

— *Toucher onctueux ou graisseux* (smeary) : Dans l'horizon (B) d'andosols formés sur des matériaux pyroclastiques fins (cendres ou tufs), le sol normalement humide n'est pas collant, ni poudreux, ni rugueux ; il donne au toucher l'impression d'être doux et moux, sans adhérer, comme le contact d'un corps gras.

— *Vitrandepts :* Andepts des pays chauds, qui ne présentent pas le caractère de thixotropie dans aucun de leurs horizons, et dont la capacité de rétention pour l'eau à pF = 4,2 est inférieur à 20 % dans l'ensemble du profil.

Manuscrit reçu au S.C.D. le 31 octobre 1972.

BIBLIOGRAPHIE (1)

AHMAD (N.), PRASHAD (S.), 1970. — Dispersion, mechanical composition, and fractionation of West Indian Yellow Earth Soils (Andepts). *J. Soil Sci.*, 1 : 63-71.

AOMINE (S.), EGASHIRA (K-), 1968. — Floculation of allophonic clays by electrolytes. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 14, n° 3 : 94-98.

AOMINE (S), KAWASAKI (H.), 1963. — Vermiculite in some japanese soils. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 9, n° 1 : 18-27.

AOMINE (S.), JACKSON (M.L.), 1959. — Allophane determination in Andosoils by cation exchange capacity Delta Value. *Soil Sci. Amer. Proc.*, vol. 23 : 210-214.

(1) Cette bibliographie n'est pas complète ; elle mentionne les travaux les plus récents ou les plus importants cités dans cette note.

AOMINE (S.), KAWASAKI (H), 1963. — Influence of dispersion treatments on the properties of soil colloids. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 9, n° 6 : 238-243.

AOMINE (S.), MIYAUCHI (N.), 1962. — Clay mineral from diallage in warman and humid climats. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 8, n° 5 : 186-190.

AOMINE (S.), MIYAUCHI (N.), 1963. — Age of the youngest hydrated halloysite in Kyushu. *Nature*, Lond., 199 : 1311-1312.

AOMINE (S.), OTSUKA (H.), 1968. — Surface of soil allophanic clay. Int. Congr. Soil Sci., 9, 1968, Adélaïde, vol. I : 731-737.

AOMINE (S.), WADA (K.), 1962. — Differential weathering of volcanic ash and pumice resulting in formation of hydrated halloysite. *Amer. Mineralogist.*, 47, n° 9-10 : 1024-1048.

AOMINE (S.), WADA (K.), 1966. — Grade of weathering and fertility of volcanic ash soils of Aso volcano. *Soil Sci. Plant. Nutrit.*, 12, n° 2 : 73-79.

AOMINE (S.), YOSHINAGA (N.), 1955. — Clay minerals in volcanic ash soils in Japan, *Soil Sci.*, 79 : 349-358.

AUBERT (G.), 1965. — Classification des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. III, n° 3 : 269-288.

AUBERT (G.), SÉGALEN (P.), 1966. — Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IV, n° 4 : 97-112.

BERTRAND (R.), 1969. — Les sols des formations volcaniques de l'Hérault. Thèse 3e cycle, Paris IRAT, 102 p. multigr.

BESOAIN (E.M.), 1964. — Clay formation in some chilean soils derived from volcanic materials. *New Zeal. J. Sci.*, 7 : 79-86.

BESOAIN (E.M.), 1968. — Imogolite in volcanic soils of Chile. Geoderma, 2 : 151-169.

BESOAIN (E.M.), SERRATOSA (J.M.), HIDALGO (A.), 1964. — (Infrared absorption spectra of the clay fraction of some volcanic soils in Chile). *An. Edafol, Agrobiol.*, 23 : 293-303 (Sp. e.).

BIROT (P.), CAILLÈRE (S.), HENIN (S.), 1959. — Etude du problème des premiers stades de l'altération de quelques roches. *Ann. Agron.*, 103 : 257-265.

BIRREL (K.S.), 1961. — The absorption of cations from solution by allophane in relation to their effective size. *J. Soil Sci.*, 12 : 307-316.

BIRREL (K.S.), 1961. — Ion fixation by allophane. *New Zeal. J. Sci.*, 4 : 393-414.

BIRREL (K.S.), 1966. — Determination of clays content in soils containing allophane. *New Zeal. J. agric. Res.*, 9, n° 3 : 554-564.

BIRREL (K.S.), FIELDES (M.), 1952. — Allophane in volcanic ash soils. *J. Soil Sci*, 3, 1 : 156-166.

BIRREL (K.S.), GRADWELL (M.), 1956. — Ion exchange phenomena in some soils containing amorphous mineral constituants. *J. Soil Sci.*, 7 : 130-147.

BISQUE (R.E.), 1962. — Clay polymerization in carbonate rocks : a silification reaction defined. Nat. Conf. clays. Clay Min., 9, 1960, Lafayette, Indiana : 365-374.

BRINDLEY (G.W.), PEDRO (G.), 1970). — Rapport du Comité International de nomenclature A.I.P.E.A. des minéraux argileux. Tokyo 1969, *Bull. Gr. fr. Argiles*, XXII : 1-4.

BRINER (G.P.), JACKSON (M.L.), 1969. — Allophanic material in Australian soils derived from Pleistocène basalt. *Aust. J. Soil Res.*, vol. 7 : 163-169.

BRINER (G.P.), JACKSON (M.L.), 1970. — Mineralogical analysis of clays in soils develop from basalts in Australia. *Israël J. Chem*, 8, 3 : 487-500.

BROADBENT (F.E.), JACKMAN (R.H.), MCNICOLL (J.), 1964. — Mineralization of carbon and nitrogen in some New Zealand allophanic soils. *Soil Sci.*, 98 : 118-128.

BRYDON (J.E.), DAY (J.H.), 1969. — Use of the FIELDES an PERROT sodium fluoride test to distinguish the B horizons of podzols in the field. *Can. J. Soil Sci.*, vol. 50 : 35-41.

CAILLÈRE (S.), HENIN (S.), 1963. — Minéralogie des argiles. Masson, Paris, 343 p.

CAMPBELL (A.S.), MITCHELL (B.D.), BRACEWELL (J.M.), 1968. — Effect of particle size, pH and organic matter on the thermal analysis of allophane. *Clay Min.*, 7 : 451-454.

CHU (A.C.), SHERMAN (G.D.), 1952. — Differential fixation of phosphate by typical soils of the Hawaiian great Soil groups. Univ. Hawaii agric. Exp : *St. Bull.*, n° 16, 20 p.

CHUKHROV (F.V.), BERKMIN (S.I.), ERMILOVA (L.P.), MOLEVA (V.A.), RUDNITSKAYA (E.S.), 1964. — Le problème des allophanes. *Izvest Akad. Nauk SSSR, sér. Géol.*, n° 4 : 3-19 (en russe).

CHUKHROV (F.V.), ZVJAGIN (B.B.), RUDNITSKAYA (E.S.), ERMILOVA (L.P.), 1966. — Sur la nature et la genèse des halloysites. *Izvest. Akad. Nauk SSSR, sér. Géol.*, n° 5 : 3-20 (en russe).

CHUKHROV (F.V.), ZVJAGIN (B.B.), 1966 b. — Halloysite a cristallochemically and mineralogically distinct species. *Int. Clay. Conf.*, 1966, Jerusalem, vol. I : 11-25.

CLOOS (P.), HERBILLON (A.), ECHEVERRA (J.), 1968. — Allophane-like synthetic silico-alumina, phosphate adsorption and availability. 9. *Int. Congr. Soil Sci.*, Congr. 1968, Adelaïde, vol. II : 733-743.

COLMET-DAAGE (F.), CUCALON (F.), 1965. — Caractères hydriques de certains sols des régions bananières d'Equateur. *Fruits*, 20, I : 19-23.

COLMET-DAAGE (F.), LAGACHE (P.), 1965. — Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. III, n° 2 : 91-121.

COLMET-DAAGE (F.) et al., 1967 et 1969. — Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques :
— 1re partie : *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, V, 1967 : 3-38.
— 2e partie : *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, V, 1967 : 353-391.
— 3e partie : *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VII, 1969 : 493-560.

COLMET-DAAGE (F.) et al., 1970. — Caractéristiques de quelques sols dérivés de cendres volcaniques de la côte Pacifique du Nicaragua. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 2 : 113-172.

COLMET-DAAGE (F.), GAUTHEYROU (J. et M.), de KIMPE (C.), FUSIL (G.), 1972 a. — Dispersion et études des fractions fines des sols à allophane des Antilles et d'Amérique Latine. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 2 : 169-191.

COLMET-DAAGE (F.), GAUTHEYROU (J. et M.), SÉGALEN (P.), 1972 b. — Etude des sols à allophanes dérivés de matériaux volcaniques des Antilles et d'Amérique Latine, à l'aide d'une technique de dissolution différentielle. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol. A paraître.*

COUTINET (S.), 1967. — Contribution à l'étude des sols à allophane. *Agron. trop.*, 22 : 1157-1175.

DALRYMPLE (J.B.), 1964. — The application of soil micromorphology to the recognition and interpretation of fossil soils in volcanic ash deposits from the Nord Island, New Zeeland. «Soil Micromorphology» Proc. II int. working-meeting on Soil Micromorphology Arnhem. Elsevier Publ. Co, Amsterdam, London, New York : 339-349.

DUCHAUFOUR (Ph.), SOUCHIER (B.), 1966. — Sols andosoliques et roches volcaniques des Vosges. *Sci. de la Terre.*, XI, 3 : 345-365.

DUPUIS (J), HOREMANS (P.), 1966. — Observations sur quelques sols du Massif Central. *Ann. Inst. nation. agron.*, IV : 317-375.

ECKSTEIN (Y), YAALON (D.H.), YARIV (S.), 1970. — The effect of Lithium on the cation exchange behaviour of crystalline and amorphous Clays. *Israël J. Chem.*, 8, 3 : 335-342.

EGAWA (T.), OSHIKAMO (Y.), 1963. — Vermiculite type clay minerals in some «Kuroboku» soil distributed in Mia Prefecture, of west Japan. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 9, n° 3 : 111-116.

EGAWA (T.), SATO (A.), NISHIMURA (T.), 1960. — Release of OH ions from clays minerals treated with various anions, with special reference to the structure and chemistry of allophane. *Adv. Clay. Sci*, 2 : 252-262.

ESCART (J.), 1951. — Les méthodes d'adsorption — a) adsorption des gaz. *Bull. Gr. Argiles*, 3 : 79-84.

ESCHENA (T.), GESSA (C.), 1967. — Gli andosuoli della Sardagna. Studi. Dassari, 15, 2 : 363-386.

ESCHENA (T.), SOLINAS (V.), 1969. — Gli andosuoli del Vulcano Laziala. Studi. Dassari, 17, 3 : 279-301.

FAO-UNESCO, 1964. — Meeting on the classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, juin 1964. World Soil Resources reports, 14. FAO-UNESCO, 169 p.
Scope of volcanic Ash Soils, Thair Extent and Distribution, by M. Ohamasa ..... p. 7
The «Andosols» or «humic Allophane» Soils of South America, by A.C.S. Wright ..... p. 9
Report on Soils of Volcanic Ash Origin in El Salvador, by M. Rico ..... p. 23
The Andosols in Indonesia, by Tan Kim Hong .. p. 30
Hawaiian Soils from Volcanic Ash, by D. Sherman and L.D. Swindale ..... p. 36
Volcanic Ash Soils of Korea, by Shin Yong Hwa. p. 50
Volcanic Ash Soils of the Philippines, by J.A. Mariano ..... p. 53
Genesis and Morphology of Volcanic Ash Soils, by M. Ohmasa ..... p. 56
Genesis and Morphology of ash-derived soils in the United States of America, by K. Flach ..... p. 61
Properties of Volcanic Ash Soils, by K. Kobo .. p. 71
Some Properties of Volcanic Ash Soils, by K.S. Birrell ..... p. 74
The Properties of Soils Derived from Volcanic Ash, by L.D. Swindale ..... p. 82
Mineralogical Properties of Volcanic Ash Soils in Japan, by T. Egawa ..... p. 89
Volcanic Ash Soils of Chile, by E. Besoain .... p. 92

FAO-UNESCO, 1968. — Definitions of soils units for the soil map of the world. World Soil Resources Reports, n° 33, FAO, Revue, X, 72 p. multigr.

FIELDES (M.), 1955. — Clay mineralogy of New Zealand Soils Part. 2-Allophane and related colloïde. *New Zeal. J. Sci. Tech.* B, n° 37 : 336-350.

FIELDES (M.), 1962. — The nature of the active fraction of Soils Int. Soc. Soil Sci. Comm. IV et V. Joint meeting 1962. Palmerston North, New Zeal : 62-78.

FIELDES (M.), 1966. — The nature of Allophane in soils. 1. Significance of structural randomness in pedogenesis. *New Zeal. J. Sci.*, 9 : 599-607.

FIELDES (M.), FURKERT (R.J.), 1966. — The nature of Allophane in soils. 2. Differences in composition. *New Zeal. J. Sci.*, 9 : 608-622.

FIELDES (M.), PERROT (K.W.), 1966. — The nature of Allophane in soils. 3. Rapid field and laboratory test for allophane. *New Zeal. J. Sci.*, 9 : 623-629.

FIELDES (M.), SCHOFIELD (R.K.), 1960. — Mechanism of ion adsorption by inorganic soil colloids. *New Zeal. J. Sci.*, 3 : 563-579.

FOX (R.L.), et al., 1968. — Phosphate requirements of Hawaiian Latosols and residual effects of fertilizer phosphorus. *Int. Congr. Soil Sci.*, 9, 1968, Adelaïde, vol. II : 301-310.

FURKERT (R.J.), FIELDES (M.), 1968. — Allophane in New Zeeland Soil. *Int. Congr. Soil Sci*, 9, 1968, Adelaïde, vol. III : 133-141.

GIBBS (H.S.), 1968. — Volcanic ash soils in New Zealand. New Zeal. Dept. sci. industr. *Res. Inform. sér.* n° 65, 39 p.

GREENLAND (D.J.), QUIRK (J.P.), 1962. — Surface area of soil colloids. Int. Soc. Soil Sci. Comm. IV et V. Joint meeting 1962. Palmerston North, New Zealand : 79-87.

HETIER (J.M.), TARDY (Y.), 1969. — Présence de vermiculite-Al, montmorillonite-Al, et chlorite-Al, et leur répartition dans quelques sols des Vosges. *C.R. Acad. Sci. Fr., sér. D*, 260 : 259-261.

HOFMANN (V. von), REINGRABER (R.), 1969. — Einlagerung verbindungen in wasserarmen Halloysite. Zh. anorgan. *Allg. Chemie*, 369 : 208-211.

HOUNG (K.H.), 1964. — A study on the soils Containing amorphous materials in the Island of Hawaii. *Thèse Univ. Hawaii*, 187 p.

HOUNG (K.H.), UEMARA (G.), SHERMAN (G.D.), 1966. — On the exchange properties of allophanic clays. *Pacific Sci.*, 20, n° 4 : 507-514.

IIMURA (K.), 1960. — Ion adsorption curves in allophane. *Clay Sci. Jap.*, 1, n° 3-4 : 40-44.

IIMURA (K.), 1960. — Acidic property and ion exchange in allophane. *Clay Sci. Jap.*, 1, n° 1-2 : 28-32.

IIMURA (K.), 1966. — Acidic properties and cation exchange of allophane and volcanic ash soils. *Bull. Nation. Inst. Agric. Sci.*, Tokyo B, 17 : 101-157 (Jap.).

INGLES (O.G.), WILLOUGHBY (D.R.), 1967. — An occurence of Hisingerite with evidence of it genesis., *Soil Sci.*, 104, n° 5 : 383-385.

JACKMANN (R.H.), 1964. — Accumulation of organic matter in some New Zealand Soils under permanent pasture, *New Zeal. J. agric. Res.*, 7, n° 4 : 445-479.

JACKMANN (R.H.), 1966. — Organic matter, ploughing and the supply of available nutriants in pasture soils. *N.Z. agric. Sci.*, 1, n° 7 : 19-21.

JACKSON (M.L.), 1965. — Free oxides hydroxides and amorphous alumino-silicates. in : Methods of soil analysis. C.A. Black éd. *Amer. Soc. Agron.* Madison : 578-603.

JACKSON (M.L.), 1968. — Weathering of primary and secondary minerals in soils. *Int. Congr. Soil Sci.*, 9, 1968, Adelaïde, vol. IV : 281-292.

JACKSON (M.L.), TYLER (S.A.), WILLES (A.L.), 1948. — Weathering sequence of clay size minerals. *J. Phys. Chem.* 52 : 1237-1262.

KANEHIRO (Y.), SHERMAN (S.D.), 1956. — Effect of dehydratation-rehydratation on cation exchange capacity of Hawaiian Soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 20 : 341-344.

KANNO (I.), 1962. — Genesis and classification of humic allophane soils in Japan. Int. Soc. Soil Sci. Comm. IV et V. Joint meeting 1962. Palmerston North, New Zealand : 422-427.

KANNO (I.), ARIMURA (S.), 1967. — Dispersion of humic allophane soils with supersonic vibration. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 13, n° 6 : 165-178.

KANNO (I.) et al., 1968. — Weathering and clay mineralogical characteristics of volcanic ashes and pumices in Japan. *Int. Congr. Soil Sci.*, 9, 1968, Adelaïde, vol. III : 111-132.

KAWAI (K.), 1969. — Changes in cation exchange capacity of some Andosols with dithionite-citrate treatment, *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 15, 3 : 97-103.

KAWASAKI (H.), AOMINE (S.), 1966. — So called 14 Å clays minerals in some Andosols, *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 12, 4 : 144-150.

KOBO (K.), FUJISAWA (T.), 1964. — Studies on the clay-humus complex. 4. Preferential adsorption of humic acid by clay. *J. Sci. Soil Manure*, Tokyo, 35 : 40-46 (J.).

LEVIN (I.), OTT (E.), 1932. — X-rays study of opals, silica glass and silica gels. Z. Kristallogr., 81 : 305-318.

LOGANATHAN (P.), SWINDALE (L.D.), 1969. — The properties and genesis of four middle-altitude Dystrandepts volcanic ash soils from Maunea Kea, Hawaï. *Pacific. Sci.*, vol. XXIII, n° 2 : 161-171.

MASUI (J.), SHOJI (S.), UCHIYAMA (N.), 1966. — Clay mineral properties of volcanic ash soils in the north-eastern part of Japan. Tohoku *J. agric. Res.*, 17 : 17-35.

MATSUI (T.), 1969. — Clay mineralogy of the Volcanic Ash soils profiles on the Southern foot of the Zao volcanoes, Misc. Rep. Res. Inst. Nat. Resources, Jap., 79, 25 : 22-31.

MATSUI (T.), TOTANI (M.), 1963. — Studies on some functions of vermiculitic clays japanese soils. *Clay Sci. Jap.*, 1, n° 6 : 29-49.

MATSUSAKA (Y.), SHERMAN (G.D.), 1961. — Magnetism of iron oxides Hawaiian soils. *Soil Sci.*, 91 : 239-245.

MATSUSAKA (Y.), SHERMAN (G.D.), SWINDALE (L.D.), 1965. — Nature of magnetic mineral in Hawaiian Soils. *Soil Sci.*, 100, n° 3 : 192-199.

MEHRA (O.P.), JACKSON (M.L.), 1960. — Iron oxides removal from soils and clays by a dichionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. Nat. Cont. on Clays and clay Miner., 7, 1958, Washington : 317-327.

MILLOT (G.), 1964. — Géologie des argiles. Masson, Paris, 494 p. Ministry of Agriculture and forestry, Japanese Government — 1964 — Volcanic ash soils in Japan. Ministry of agriculture & forestry, Tokyo, 289 p. multigr.

MITCHELL (D.D.), FARMER (V.C.), MCHARDY (W.J.), 1964. — Amorphous inorganic materials in soils. Adv. in : Agron., 16 : 327-373.

MIYAUCHI (N.), AOMINE (S.), 1964. — Does « Allophane B » exist in Japanese volcanic ash soils., *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 10, n° 5 : 199-203.

MIYAUCHI (N.), AOMINE (S.), 1966. — Effects of exchangeable cation on the high temperature exothermic peack of allophane. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, n° 12, 1 : 13-17.

MOINEREAU (J.), 1965. — Observations pédologiques sur les sols du Massif Volcanique des Coirons. *Bull. A.F.E.S.*, 6-7 : 188-223.

MOINEREAU (J.), 1966. — Etude des sols et des paléosols du Bas-Vivarais. Thèse 3e cycle, Paris, 164 p.

MUMBRUN (L.E. de), CHESTERS (G.), 1964. — Isolation and characterization of some soils allophanes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28, n° 3 : 355-359.

OBO (Y.), KOBO (K.), 1965. — 1° Agregates in fine sand fraction of volcanic ash soils by sonic treatment. *J. Sci. Soil Manure*, Tokyo, 36 : 203-210 (en Jap.).

ONIKURA (Y.), 1964. — Factors relating to labile phosphate levels in volcanic ash soils. *Soil Sci. Plant. Nutrit. Jap.*, 10 : 20-27.

PALMONARI (C.), 1966. — Etude d'un matériau d'altération de roche pyroclastique. *Bull. Soc. fr. Ceram.*, 70 : 3-9.

PARK (R.G.), 1969. — The electrophoretic separation of mixtures of pure clays and the electrophoretic separation and characterization of a soil allophane. Thèse Univ. Idaho (U.S.A.).

PECROT (A.), GASTUCHE (M.G.), DELVIGNE (J.), VIELVOYE (L.), FRIPIAT (J.J.), 1962. — L'altération des roches et la formation des sols aux Kivu (Rép. du Congo). INEAC. *Publ. sér. Sci.*, n° 97, Bruxelles, 92 p.

PEDRO (G.), 1968. — Note sur le type d'altération superficielle caractérisant les projections volcaniques récentes du Puy de la Vache (Massif Central) ; Conséquences géochimiques. *Bull. A.F.E.S.*, 3 : 17-20.

PEDRO (G.), LUBIN (J.C.), 1968. — Etude sur l'évolution géochimique des gels alumino-siliciques et la formation des hydroxydes d'aluminium en condition de libre drainage. *Ann. agron.*, 19, n° 3 : 293-347.

PEDRO (G.), MELFI (A.J.), 1970. — Recherches expérimentales sur le comportement des hydrates ferriques et des constituants silico-ferriques amorphes en milieu lessivé. Pédol., XX, 1 : 5-33.

QUANTIN (P.), 1972 a. — Archipel des Nouvelles-Hébrides. Sols et quelques données du milieu naturel. Cartes pédologiques et notices, en cours de publication ORSTOM.

QUANTIN (P.), 1972 b. — Note sur la nature et la fertilité des sols sur cendres volcaniques provenant d'éruptions récentes dans l'archipel des Nouvelles-Hébrides. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, X, n° 2 : 123-151 et n° 3 (sous presse).

RICHÉ (G.), SÉGALEN (P.), 1969. — La Zonalité verticale en Ethiopie du Centre et du Sud-Est. *Bull. Bibliogr. Pédol.*, XVIII, fasc. 2 : 5-10.

ROSS (C.S.), KERR (P.F.), 1930. — The kaolin minerals. Geol. Surv. prof. Paper, U.S.A., 165-G : 151-180.

ROSS (C.S.), KERR (P.F.), 1934. — Halloysite and allophane. Geol. Surv. prof. Paper, U.S.A., 185-G : 135-148.

RUSSEL (J.D.), MCHARDY (W.J.), FRAZER (A.R.), 1969. — Imogolite : a unique alumino-silicate, Clay Miner., 8 : 87-99.

RUTHERFORD (G.K.), 1962. — The yelow Brown Soils of the Highlands of New Guinea. Int. Soc. Soil Sci. Comm. IV et V. Joint meeting 1962. Palmerston North, New Zealand : 434-439.

RUXTON (B.P.), 1968. — Rates of Weathering of Quaternary volcanic ash in North-East Papua. *Int. Congr. Soil Sci.*, 9, 1968, Adelaïde, vol. IV : 367-376.

SCHWERTMANN (U.), FISCHER (W.R.), PAPENDORF (H.), 1968. — The influence of organic compounds on the formation of iron oxides. *Int. Congr. Soil Sci.*, 9, 1968, Adelaïde, vol. I : 645-655.

SÉGALEN (P.), 1957. — Etude des sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar. *Thèse Mém. Inst. Sci.* Madagascar, D. VIII : 1-181.

SÉGALEN (P.), 1967. — Les sols de la vallée du Noun. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. V, n° 3 : 287-349.

SÉGALEN (P.), 1968 a. — Les sols Ando ou Andosols. ORSTOM, 8 p. multigr. (inédit).

SÉGALEN (P.), 1968 b. — Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 1 : 105-126.

SHERMAN (G.D.), KANEHIRO (Y.), MATSUSAKA (Y.), 1953. — The role of dehydratation in the development of laterits. Pacif. Sci., 7, 438 p.

SHERMAN (G.D.), MATSUSAKA (Y.), IKAWA (H.), UEHARA (G.), 1964. — The role of the amorphous fraction in the properties of the tropical soils. Agrochimica Ital., 8, n° 2 : 148-162.

SHOJI (S.), MASUI (J.), 1969. — Amorphous clay minerals of recent volcanic ash soils in HOKKAIDO. *Soil Sci. Plant. Nutrit. Jap.*, vol. 15, n° 4 : 161-168, et n° 191-201.

SIEFFERMANN (G.), 1969. — Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. *Thèse, Sci. Nat. Univ.* Strasbourg, 285 p. multigr.

SIEFFERMANN (G.), JEHL (G.), MILLOT (G.), 1968. — Allophanes et minéraux argileux des altérations récentes des basaltes du Mt Cameroun. *Bull. Gr. fr. Argiles*, XX : 109-129.

SIEFFERMANN (G.), MILLOT (G.), 1968. — L'halloysite des sols jeunes sur basaltes récents du Centre Cameroun. *Bull. Gr. fr. Argiles*, XX : 25-38.

SIEFFERMANN (G.), MILLOT (G.), 1969. — Equatorial and tropical weathering of recent basalts from Cameroun. Allophanes, Halloysite, Metahalloysite, Kaolinite and Gibbsite. *Int. Caly Conf.*, 1969, Tokyo, vol. I : 417-430.

SIMONSON (R.W.), RIEGERS (S.), 1967. — Soils on the Andepts suborder in Alaska. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 31, 5 : 692-699.

SINGER (A.), 1970. — Weathering products of basalt in the Galilée. *Israël J. Chem.*, 8, 3 : 459-468.

SOIL SURVEY STAFF, 1967. — Supplement to soil classification system (7th approximation). U.S.D.A. 207 p.

SNETSINGER (SK. G.), 1967. — High-alumina-allophane as a weathering product of plagioclase. *Amer. Mineralogist.*, 52, n° 1-2 : 254-262.

STROMEYER (F.), HAUSMANN (J.F.L.), 1816. — Allophan von Gräfentahl. Gött, Geol. Anz., 2, 125, *Gilb. Ann.*, 54, 120 p.

SUDO (T.), NAKAMURA (T.), 1932. — Hisingerite from Japan. *Amer. Mineralogist.*, 37 : 618-621.

SUDO (T.), TAKANASI (M.), 1955. — Shapes of halloysite particles in Japanese clays. Nat. Conf. on Clays and clay Miner., 4, 1955, Pennsylvania : 67-69.

SUNG-HO-LAI, SWINDALE (L.D.), 1969. — Chemical properties of allophane from Hawaiian and Japanese Soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33 : 804-808.

TAMINI (T.M.), KANEHIRO (Y.), SHERMAN (G.D.), 1963. — Ammonium fixation in amorphous Hawaiian soils. *Soil Sci.*, 95 : 426-300.

TAMINI (Y.N.), KANEHIRO (Y.), SHERMAN (G.D.), 1964. — Reactions of the ammonium phosphate with gibbsite and with montmorillonite and kaolinite soils. *Soil. Sci.*, 98, n° 4 : 249-255.

TAN (K.H.) ,1965. — The andosols in Indonesia. *Soil Sci.*, 99 : 375-378.

TAN (K.H.), 1966. — On the pedogenetic role of organic matter in volcanic ash soils under tropical conditions. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 12, n° 2 : 80-84.

TAN (K.H.), 1969. — Chemical and thermal characteristics of allophane in Andosols of the tropics. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33 : 469-472.

TERCINIER (G.), QUANTIN (P.), 1968. — Influence de l'altération de cendres et ponces volcaniques d'âge récent sur la nature. Les propriétés et la fertilité des sols aux Nouvelles Hébrides. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 2 : 203-224.

TOKUDOME (S.), KANNO (I.), 1964. — Characterization of humus of humic allophane soils in Japan. 1. Humic acids (Ch.)/Fulvic acids (Cf.) ratios. 2. Some physico-chemical properties of humic and fulvic acids. *Bull Kyushu agric. Exp. Stat.*, 10 : 185-204 (E.).

TOKUDOME (S.), KANNO (I.), 1965. — Nature of the humus of humic allophane soils in Japan. Part. I. Humic acids (Ch/ Fulvic acids (Cf.) ratios. *Soils Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 11, n° 5 : 185-192.

TOKUDOME (S.), KANNO (I.), 1965. — Nature of the humus of humic allophane soils in Japan. Part. 2. Some physico-chemical properties of humic and fulvic acids. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 11, n° 5 : 193-199.

TOKUDOME (S.), KANNO (I.), 1968. — Nature of the humus of some japanese soils. *Int. Congr. Soil Sci.*, 9, 1968, Adelaïde, vol. III : 163-173.

TRICHET (J.), 1970. — Contribution à l'étude de l'altération expérimentale des verres volcaniques ; thèse Sci. Nat., Paris Ecole Normale Supérieure, Travaux du laboratoire de Géologie, 4. Paris, 153 p.

TRICHET (J.), SELLA (C.), 1968. — Etude de la structure des verres volcaniques. Relation avec leur mode de formation et d'altération. *C.R. Acad. Sci. Fr., sér. D*, t. 267 : 1084-1087.

TRICHET (J.), SVORONOS (D.R.), 1968. — Etude des premiers stades d'altération d'un verre volcanique. *C.R. Acad. Sci. Fr., sér. D*, t. 266 : 1207-1209.

UCHIYAMA (N.), MASUI (J.), ONIKURA (Y.), 1962. — Montmorillonite in a volcanic ash soil. *Soil. Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 8, n° 1 : 13-19.

UCHIYAMA (N.), MASUI (J.), SHOJI (S.), 1968. — Crystalline clays minerals of the soils derived from recent volcanic ashes in HOKKAIDO, Japan. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 14, 4 : 125-140.

UEHARA (G.), IKAWA (H.), SHERMAN (G.D.), 196 . — Desilication of halloysite and its relation to gibbsite formation. *Pacific. Sci.*, 20, n° 1 : 119-124.

VIELLEFON (J.), BOURGEAT (F.), 1965. — Notice explicative ; cartes pédologiques de reconnaissance à 1/200 000 ; feuille d'Ambilobo — ORSTOM, notice n° 22, Paris, 92 p., 1 carte.

VOSS (R.L.), 1969. — The Characteristics and genesis of the Akaka and Hilo Soils of the Island of Hawaii. *Thèse Soil Sci.*, Univ. Hawaii, Honolulu, VII, 94 p.

WADA (K), 1959. — Reaction of phosphate with allophane and halloysite. *Soil Sci.*, 87 : 325-330.

WADA (K.), 1966. — Deuterium exchange of hydroxyl groupe in allophane. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 12, n° 5 : 176-182.

WADA (K.), AOMINE (S.), 1966. — Occurrence of gibbsite in weathering of volcanic materials at Kuroishibaru, Kumamoto. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 12 : 151-157.

WADA (K.), 1967. — A structural scheme of soil allophane. *Amer. Mineralogist.*, 52 : 690-708.

WADA (K.), MATSUBARA (I.), 1968. — Differential formation of allophane, imogolite and gibbsite in the Kitakami pumice bed. *Int. Congr. Soil Sci.*, 9, 1968, Adelaïde, vol. III : 123-131.

WADA (K.), YOSHINAGA (N.), 1969. — The structure of imogolite. *Amer. Mineralogist.*, vol. 54 : 50-71.

WATANABE (Y.), 1963. — Etude des argiles dans les sols au microscope électronique. Part 2, allophane et gels synthétiques, Part 3, fraction argileuse des sols dérivés de cendres volcaniques. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 9, Part 1 et 2, n° 4 : 6-14, Part 3, n° 5 : 1-4.

YOSHINAGA (N.), 1966. — Chemical composition and some thermal data of eighteen allophanes from andosoils and weathered pumices. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 12, n° 2 : 47-54.

YOSHINAGA (N.), 1967. — The behaviour of adsorbed water in clays on addition of inorganic electrolytes as aqueous solution. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 13, n° 1 : 1-8.

YOSHINAGA (N.), 1968. — Identification of imogolite in the filmy gel materials in the Imaïchi and the Shichihonzakura pumice beds. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 14, n° 6 : 238-246.

YOSHINAGA (N.), AOMINE (S.), 1962 a. — Allophane in some Ando Soils. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 8, n° 2 : 6-13.

YOSHINAGA (N.), AOMINE (S.), 1962 b. — Imogolite in some Ando Soils. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 8, n° 3 : 114-121.

YOSHINAGA (N.), YAMAGUCHI (M.), 1970. — Adsorption of polyphosphates by allophane. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 16, 3 : 121-127.

YOSHINAGA (N.), YOTSUMOTO (H.), IBE (K.), 1968. — An electrom microscopic study of soil allophane with an ordered structure. *Amer. Mineralogist.*, 53, n° 1-2 : 319-322.