

(N° 65)  
(1969)

F. COLMET-DARAGE

1<sup>er</sup> Panel on volcanic ash  
Soils in Latin America  
Turrialba, Costa-Rica, 1969

avec la collaboration de :

- C. de RIMPEL pour les études aux infrarouges et le microscope électronique
- G. SIEMPERMANN pour le microscope électronique
- J. et N. SAZDZIK pour les déterminations physico-chimiques
- L. RAMA, G. BOEL, F. TOKKOSI pour les examens aux rayons X, l'analyse chimique différentielle
- H. DELAUNE pour la minéralogie des sables

## I - INTRODUCTION

Les sols dérivés de cendres volcaniques ont souvent des propriétés particulières qui les différencient très nettement des autres sols sur formations volcaniques dures.

Ces propriétés originales doivent être attribuées à la présence, dans la fraction fine inférieure à 2 microns, de minéraux argileux assez rarement rencontrés dans les autres sols des tropiques. La connaissance de ces minéraux argileux, essentiellement substances amorphes allophaniques et halloysite avec de nombreuses variantes, est donc très utile pour la classification de ces sols et leur utilisation agronomique.

Dans les régions tropicales étudiées, l'évolution des sols sur cendres est d'abord conditionnée par la pluviosité ou plus exactement, les possibilités des sols de se maintenir humide tout au long de l'année, ou au contraire, d'être affectés par des dessiccations d'intensité variable durant certaines périodes.

Dans les régions de pluviosité élevée, ou à évapotranspiration réduite (zones ombragées), on observe l'apparition et le maintien de substances allophaniques amorphes ou peu organisées. Les substances amorphes sont fréquentes dans les sols tropicaux, mais elles correspondent généralement à des hydroxydes métalliques. Dans le cas des substances amorphes allophaniques, la silice est également présente en quantité notable.

L'altération des éléments primaires entraîne dans les formations déjà anciennes, un accroissement important quantitatif de ces substances allophaniques et les propriétés caractéristiques de celles-ci deviennent de plus en plus marquées. Cet accroissement peut être accompagné de modifications encore mal connues de la nature des substances allophaniques, sans changement notable de leurs propriétés essentielles.

La modification la plus évidente est l'apparition de la gibbsite.

PÉDOLOGIE

ANT. 69.3

Dans les régions de pluviosité modérée, avec saison sèche prononcée, entraînant une certaine dessiccation du sol, ou au moins, des horizons supérieurs, l'apparition de l'halloysite est un phénomène général, mais présentant de très nombreuses variantes, qu'il s'agisse de la proportion de l'halloysite ou de la nature de celle-ci. Précisons qu'il s'agit de l'halloysite caractérisée par la raie à 10 Å aux rayons X, avec passage de celle-ci vers 7,5 Å après chauffage à 100°. L'intensité de toutes les raies est variable mais c'est avec les rayons X que l'identification paraît la plus fiable. L'augmentation dans le temps de la proportion d'halloysite, en général accompagnée d'une soileuse cristallinité du minéral, parfois de sa déshydratation partielle en métahalloysite, entraîne la formation de sols à forte proportion d'argile, ayant un certain nombre de propriétés attribuables à l'halloysite. Les faciès les plus évolués avec individualisation de goéthite, de gibbsite, ou d'autres argiles kaoliniques : siro-clays, etc... perdent progressivement, en partie, ces caractères et s'apparentent aux sols ferrallitiques.

Cette différenciation schématique bien nette de l'évolution, amène la distinction de deux ensembles principaux : les sols à substances amorphes allophaniques hydratés et les sols à halloysite.

Dans l'état de nos connaissances, il semble utile de prévoir un troisième ensemble intermédiaire entre ceux-ci, qui correspond à certains sols encore jeunes, nombreux, dans lesquels, soit la présence d'halloysite quoique probable, n'est pas certaine, soit dans lesquels l'halloysite apparaît distinctement, mais où il est difficile de savoir si certains caractères observés, rappelant ceux des substances amorphes, doivent être attribués à une proportion importante de ceux-ci ou à une forme particulière encore jeune de l'halloysite. Dans l'incertitude, cet ensemble peut être nommé "soils en transition allophanes-halloysite ou sols jeunes à halloysites".

Dans les régions les plus sèches, la montmorillonite est souvent aussi individualisée, mais l'halloysite semble toujours également présente.

Ces distinctions correspondent aux sols que nous avons étudiés dans les régions de climat relativement humide. Il est possible que dans d'autres pays, surtout ceux à saison sèche marquée et où les sols résultent de pér érosion d'événements très lointains, de telles oppositions n'apparaissent pas et aussi nettement, qu'il conviendrait être avis sur d'autres aspects jugés plus importants.

13 MAI 1986  
O. R. S. T. O. M. Fonds Documentaire

N° : 21 016 156

Cote : B. 21.016

2-1 - CAS DES SOLS DES ANILLES ET D'EGUATEUR - SANS GIBBSITE -

Les propriétés des sols attribuables aux substances allophaniques sont d'autant plus marquées que la proportion en est importante. Il est donc préférable de prendre comme références, des sols relativement anciens, dans lesquels les phénomènes d'altération ont pu se dérouler sur des périodes de temps suffisamment longues pour avoir permis une certaine "argilisation" du sol, au sens granulométrique.

Ces propriétés sont les suivantes :

- L'absorption d'eau peut être considérable. Des valeurs de 100 à 150 d'eau p.100 g de sol séché étuve à 105°, sont très fréquentes. Des valeurs de 250-300 sont parfois observées dans des niveaux modérément organiques de profondeur pour une teneur de substances, inférieure à 2 microns, ne dépassant pas 50% du sol. Ces fortes teneurs en eau entraînent de basses valeurs de la densité apparente du sol : 0,3 à 0,3, parfois 0,25. Rapportés en volume du sol, les chiffres d'humidité indiqués sont nettement plus faibles. Une très grande partie de cette eau est perdue irréversiblement par dessiccation à l'air, à température ordinaire, si toutefois l'humidité descend à des valeurs inférieures à celles correspondant au pH 4,2. Ce phénomène est bien mis en évidence par les mesures de pH effectuées sur échantillons conservés dans leur humidité naturelle et tamisés, ou sur des échantillons réhumectés après séchage à l'air. Même après plusieurs mois de réhumectation, les valeurs primitives ne sont jamais à nouveau atteintes. Une très étroite corrélation existe entre les humidités observées sur le terrain, assez constantes au cours de l'année, ces sols se ressuyant très vite, et les valeurs obtenues au pH 2,5.

L'écart entre les humidités à pH 2,5 et à pH 4,2 mesuré sur échantillon frais est souvent très important (30 à 60 p.100 de sol), mais il devient d'autant plus faible sur échantillon préalablement séché à l'air, parfois presque nul, que les substances sont plus hydratées et apparemment le plus à l'état amorphe. L'écart entre pH 2,5 et pH 4,2 mesuré sur échantillon séché à l'air, s'accroît nettement lorsque l'humidité naturelle est plus faible et qu'un début d'organisation, mais en évidence par d'autres méthodes, apparaît. Le séchage à l'air des substances amorphes fortement hydratées, entraîne un effondrement complet du sol, qui se transforme en masses souvent dures, sans microporosité. Au contraire, en présence de substances mieux organisées, le sol conserve une certaine structure, mais la présence plus importante de limon et de sables fins peut modifier quelque peu ces observations.

La capacité d'échange de bases est importante, atteignant 40 à 100 mEq p.100 sol. Elle est élevée pour des sols ne contenant que 30 à 40% de substances inférieures à 2 microns. Elle est nettement plus élevée, mesurée sur échantillon conservé frais que sur

sol séché à l'air, ce phénomène étant d'autant plus marqué que l'échantillon est plus humide et moins organique. Avec l'acétate d'ammonium, les différences peuvent être très importantes, suivant que l'on opère à pH 4, 7 ou 9, l'écart pouvant aller du simple au double. Les lavages à l'alcool de l'exos d'acétate, entraînent des modifications très sensibles si les modes opératoires ne sont pas identiques. Aussi, est-il nécessaire d'observer rigoureusement une technique pour avoir des résultats comparables. Nous exécutons un premier lavage à l'alcool dilué à 50% neutralisé, puis les lavages suivant à l'alcool pur (éthanol).

Les teneurs en bases échangeables ne sont pas une caractéristique des sols à allophanes, mais reflètent le climat, l'intensité du lessivage, comme pour les sols ferrallitiques. A noter, cependant, les très faibles teneurs en magnésium. R. X. contre, le comportement du pH est très spécial, indépendant de l'état de saturation en bases. Des valeurs relativement élevées du pH eau, voisines de 6, peuvent être trouvées dans les niveaux profonds totalement désaturés. Les valeurs du pH mesurées dans le KCl normal sont voisines et parfois supérieures, phénomène qui n'est guère observé qu'avec certaines argiles rouges bauxitiques. En présence de matières organiques, c'est-à-dire dans les niveaux superficiels, pourtant souvent mieux saturés en bases échangeables, le pH est plus faible, parfois très acide.

Ce comportement très particulier du pH peut être rapproché de la dispersion de la fraction fine en milieu acide ou en milieu basique. Les niveaux superficiels, plus organiques se dispersent souvent bien en milieu alcalin, ammoniacal, mais les niveaux plus profonds ne se dispersent souvent qu'en milieu acide ou tout au moins mieux qu'en milieu ammoniacal. La présence de petits agrégats très stables qu'aucun prétraitement (benzène, etc...) ne semble pouvoir faire éclater sans dissolutions particulières, exige un traitement préalable aux ultrasons, systématiquement effectué. A noter aussi, que par élimination à l'aide de diverses particules sableuses, magnétites, etc..., on obtient des suspensions beaucoup plus stables sans que les raisons exactes soient bien connues. Le mode de dispersion est donc variable suivant les sols et souvent même, les horizons successifs, et seul, l'essai de diverses techniques, permet de donner un chiffre vraisemblable de la proportion de substances inférieures à 2 microns.

L'importance de ces substances inférieures à 2 microns pour les propriétés essentielles du sol et la validité des méthodes de dispersion, semble confirmée par les techniques de dissolution successive différentielle. Un seul traitement à l'acide chlorhydrique 0 N à froid (30°) suivi de soude 0,5N (5' à 100°), (MORILLON 1959), traitement qui laisse sensiblement inattaqués les réseaux des argiles cristallines, suffit pour dissoudre une quantité de substances (rapport  $SiO_2/Al_2O_3$  voisin de 1) qui correspond, sensiblement aux valeurs trouvées par l'analyse granulométrique. Après ce traitement, toutes les propriétés précédemment indiquées pour ces sols, disparaissent, en par-

ticulier, les valeurs de la capacité d'échange qui deviennent insignifiantes. La dissolution est d'autant plus rapide et complète que la substance semble à l'état amorphe et peu organisée. Un début d'organisation, en halloysite, imogolite, gibbsite, ou autres substances mal identifiées, mais dont les techniques d'étude de structure révèlent l'existence, l'ébauche, se traduit par une dissolution plus progressive, en particulier, de l'alumine. La répétition de ces traitements acides et basiques entraîne, pour la plupart des argiles classiques, kaolinites, montmorillonites, etc... ou les particules primaires, une dissolution relativement constante de la silice, du fer et de l'alumine. Le fer et l'alumine peuvent, toutefois, donner lieu, dans certains cas, à des dépôts importants au cours de la première extraction, tout comme les sols à allophanes, car il peut s'agir soit d'hydroxydes amorphes, soit d'éléments en positions superficiels ou inclus dans les feuillets, mais aisément extractibles, sans qu'il en résulte une modification sensible de la structure de ceux-ci.

Par contre avec les argiles ou autres substances cristallines, la dissolution de la silice est presque toujours constante et un départ beaucoup plus important de  $SiO_2$  à la première extraction, comme dans le cas des sols à allophanes n'est pas observé.

Il semble, toutefois, que la dissolution de l'halloysite, au moins de certaines formes, et de certaines montmorillonites ferrifères ou alumineuses, soit également importante par cette méthode. L'aspect des courbes de dissolution est cependant fort différent de celles obtenues avec les substances amorphes. Avec ces argiles, la dissolution est importante, mais relativement constante lors des premières extractions, puis les courbes de dissolution s'infléchissent progressivement, soit par suite de la diminution de la substance globale, soit de certaines formes relativement mieux solubilisées. Il n'y a donc pas la très forte dissolution constatée pour les allophanes dès la première attaque, en particulier de la silice, puis la diminution brutale dès la deuxième extraction, avec souvent arrêt presque total de la dissolution de l'alumine et du fer. Les phénomènes de dissolutions successives des substances amorphes et cristallines, s'opposent donc fort bien dans les cas extrêmes, mais dans le cas de mélanges ou de substances semi-organisées, ou d'ébauches de structure, l'interprétation est plus complexe. La présence très fréquente dans la fraction fine des sols légers de tests de diatomées est susceptible de fausser, par excès de silice, les résultats d'analyses totales de ces fractions.

Les substances inférieures à deux microns ou encore les substances aisément dissoutes, responsables des propriétés que nous avons examinées, présentent peu de raies visibles par diffraction aux rayons X et leur étude, par cette méthode, est ainsi limitée. Certaines raies, plus ou moins étalées, apparaissent cependant fréquemment. Quelques unes sont susceptibles d'appartenir à des minéraux primaires, surtout quand les autres associées, disparaissent. C'est le cas de la raie à 3,33 pour le quartz, quand la raie à 4,24 est aussi apparente également. La raie à 4,04 Å, très fréquente, est due soit à la cristobalite, soit à divers feldspaths, lorsque les autres raies sont sensibles.

20 Å, duquel émerge, parfois, des raies plus nettes vers 14 Å. apparaissent assez fréquemment. L'intensité de ces deux dernières raies, voire même leur apparition, peut dépendre de la taille des particules. Elles disparaissent ou sont souvent moins visibles dans les fractions les plus fines. La raie ou la bande vers 14 Å, sur échantillon orienté saturé en magnésium, ne gonfle pas au glycérol, mais passe, dans certains cas, semble-t-il, vers 18 Å par chauffage à 300°, ou le plus souvent disparaît, de même qu'à 500°. Ce phénomène qui indiquerait l'imogolite ou une substance similaire, paraît plus fréquent dans les formations fortement hydratées, enfouies, relativement anciennes, pour lesquelles la proportion de substance inférieure à deux microns est élevée, les fines particules déjà extrêmement altérées ou disparues, et l'auto-aluminisation importante. La présence d'une raie nette vers 13-14 Å est cependant fréquente aussi, dans des formations encore très jeunes. Il n'est pas impossible qu'il s'agisse, dans certains cas, de certaines formes transitoires de montmorillonite, probablement alumineuses, dont le gonflement au glycérol est rarement mis en évidence, mais quelque fois, cependant, on suit par certaines montmorillonites riches en alumine ou en fer inter-feuillets, sont difficiles à identifier par les méthodes usuelles, leurs propriétés de gonflement au glycérol et d'affondrement au chauffage, étant perturbées.

Outre ces raies fréquentes qui semblent présenter certains aspects des imogolites, mais n'apparaissent pas toujours nettement, il faut noter le cas de l'apparition d'une raie vers 4,37-4,45 qui caractérise l'ébauche d'une structure cristalline, confirmée par les autres techniques d'étude de la structure. L'accroissement d'intensité de cette raie, entraîne un affaiblissement des propriétés principales, concernant l'hydratation, la capacité d'échange de bases, etc...

L'analyse thermique différentielle est effectuée sur l'échantillon séché à l'étuve pour éviter des pertes d'eau trop considérables. Dans ces conditions, on constate un fort crochet endothermique vers 150 à 170°. Le crochet exothermique vers 300° a une intensité variable, et se produit à une température quelque peu différente, suivant les échantillons. Peu de relations précises ont été trouvées jusqu'ici, entre ces observations et le mode de formation des sols ou leurs propriétés. Le crochet semble plus affiné dans les sols les plus jeunes, plus étalé dans les formes peut-être déjà un peu organisées, plus anciennes.

Un crochet endothermique vers 420° est très fréquemment observé, surtout semble-t-il dans les formations fortement hydratées, déjà anciennes. La présence de ce crochet à 420° peut être associée ou non à l'existence de raies nettes vers 14 Å, avec passage probable de celle-ci vers 18 Å, sur échantillon saturé en magnésium ou dissolution par chauffage à 300°.

Des précautions spéciales, consistant en plusieurs traitements à l'eau oxygénée, après extraction de l'inférieure à 2 microns, de forts crochets exothermiques sont observés de 100 à 650°. Il semble qu'il s'agisse de liaisons avec des matières organiques particulièrement résistantes, puisque la répétition des traitements à l'eau oxygénée

4

8

fini par les résorber dans la plupart des cas, mais d'autres explications sont aussi possibles.

L'analyse thermique différentielle semble très sensible à l'apparition de l'hallowysite. L'existence d'une raie marquée vers  $4,4 \text{ \AA}$ , même sans raie apparente vers  $10 \text{ \AA}$  ou  $7 \text{ \AA}$ , entraîne aussitôt l'apparition d'un petit crochet endothermique vers  $500^\circ\text{C}$ - $550^\circ\text{C}$ , dont l'intensité croît, ainsi que la température, lorsque les caractères de l'hallowysite aux rayons X se précisent. Il est possible que certaines inflexions endothermiques vers  $300^\circ\text{C}$  puissent être attribuées à de la montmorillonite, mais on ne saurait vraiment l'affirmer. Si montmorillonite, il y a, il s'agit alors de formes aluminosées ou ferrifères, dont la température de décomposition est sensiblement abaissée. Les difficultés que possédait l'identification de cette argile avec les rayons X, se retrouvent ainsi avec l'analyse thermique différentielle.

L'analyse thermo-pondérale montre un départ d'eau progressif jusqu'à environ  $30\%$  sur échantillon préalablement séché à l'étuve. Il ne semble pas que cette technique que nous avons peu employée, puisse apporter, de ce fait, des enseignements très utiles.

La spectrographie dans l'infrarouge, par contre, semble bien adaptée et prometteuse pour un examen plus approfondi de la structure.

La bande d'absorption SiO peut passer, dans les substances étudiées, de  $940 \text{ cm}^{-1}$  à  $1050 \text{ cm}^{-1}$ . Ce passage traduirait la diminution de la perturbation engendrée dans le réseau silicique, par la présence d'atomes d'aluminium tétracoordonnés qui y sont inclus. Les mesures de fluorescence X et les études en infrarouge, ont montré, de façon certaine, que plus le contenu en Al octaédrique ou hexacoordonné augmente, plus la bande de vibration SiO se déplace vers les fréquences élevées. Le déplacement de cette bande semblerait donc indiquer l'ébauche d'organisation d'une couche octaédrique. C'est, de fait, dans les échantillons que les méthodes usuelles indiquent comme les plus amorphes, que la bande SiO est trouvée vers  $940 \text{ cm}^{-1}$ . On la rencontre à plus de  $1000 \text{ cm}^{-1}$ , soit dans les échantillons possédant déjà manifestement un début d'organisation sensible, soit aussi dans certains où l'ébauche d'organisation indiquée par les autres techniques est peu perceptible (cas des irrogolites). Certains autres indices semblent accompagner le déplacement de la bande SiO et son affinement, soulignant ainsi le début d'une structure et la sensibilité de la technique utilisée. La bande de déformation  $\text{Al}^{\text{IV}}\text{-O-H}$  vers  $1100 \text{ cm}^{-1}$  est progressivement plus nette, ainsi que la bande à  $1100 \text{ cm}^{-1}$ ; le doublet SiO vers  $440\text{-}470 \text{ cm}^{-1}$  se différencie. Le couple des bandes SiO-Al entre  $500$  et  $750 \text{ cm}^{-1}$  apparaît lentement. La bande d'absorption due aux hydroxyles vers  $3700$ , puis  $3620 \text{ cm}^{-1}$  se dessine progressivement, bien qu'une forte absorption persiste de  $3000$  à  $3700 \text{ cm}^{-1}$ .

La bande à  $800 \text{ cm}^{-1}$  qui serait (FRIPAT 1963) attribuable à la structure en anneau du tétraèdre de silice, apparaît rarement. Elle indiquerait un réseau silicique déjà bien agencé, pouvant appartenir soit à des matériaux résiduels, soit à la couche tétraédrique des substances néoformées. Cette bande à  $800 \text{ cm}^{-1}$  n'apparaît pas dans nos sols des régions tropicales chaudes. Il est possible qu'elle soit simplement masquée.

Les substances amorphes fortement hydratées se caractérisent donc par spectrographie infrarouge, par une large absorption entre  $3000$  et  $3700 \text{ cm}^{-1}$ , d'une part, entre  $900$  et  $1200$ , d'autre part, avec position variable du maximum ( $940$  à  $1050$ ) et une bande prononcée à  $1600 \text{ cm}^{-1}$ . Certains indices peuvent également apparaître, indiquant une ébauche d'organisation que les autres techniques moins sensibles ne mettent pas en évidence.

L'étude au microscope électronique, comme d'ailleurs l'étude aux infrarouges ou les mesures de surfaces, présente l'inconvénient d'opérer sur un échantillon parfaitement sec. On essaye d'y remédier en évitant toute dessiccation préalable de la fraction très fine, jusqu'à son évaporation sur la grille d'observation. Les modifications que risque d'entraîner cette dessiccation, rendent les observations délicates et d'importantes modifications peuvent en résulter.

La plupart des sols fortement hydratés se présentent sous deux facies principaux. Il peut s'agir de très très petits glomérules translucides, donnant souvent l'apparence d'un tissu cellulaire, plus ou moins déchiré ou d'un réseau de fines fibrilles enchevêtrées. L'un et l'autre peuvent être observés simultanément, mais il semble qu'avec certains facies, ce soient les glomérules qui l'emportent et dans d'autres les fibrilles. La transparence de ces éléments fait aussi que, suivant l'intensité de l'éclairage, le temps de pose, le contraste, certains de ces facies apparaissent plus ou moins nettement.

L'apparition d'une raie à  $4,4 \text{ \AA}$  indiquant l'ébauche de l'hallowysite, entraîne aussitôt, dans certains sols, la présence de quelques tubes courts et renflés, mais le phénomène ne semble concerner que les sols des régions chaudes tropicales.

## 2-2 - CAS DES SOLS À GIBBSITE -

La gibbsite n'apparaît que dans les sols à allophanes hydratés, relativement anciens et argilés. On ne la rencontre jamais dans les sols fortement hydratés, dérivant de formations récentes de cendres et ponces. Géographiquement, l'aire des sols à gibbsite est donc bien distincte de celle des sols sans gibbsite. Par leurs propriétés et leur aspect morphologique, les sols à gibbsite sont tout à fait semblables à ceux qui en sont dépourvus et seuls certains indices, comme les débris de ponces ou de cendres, peu altérés, épars ou en lits, l'examen des sables, indiquant des recouvrements plus récents, permettant d'établir une distinction relativement valable sur le terrain. Dans l'aire des sols à gibbsite, l'absence de ce minéral, peut être localement due à de récents recouvrements plus récents, qui ne sont maintenus à cet emplacement et ont été éliminés par l'érosion ailleurs. C'est ainsi qu'il y a davantage de possibilités de rencontrer la gibbsite près des sommets sur les rebords de fortes pentes, là où l'érosion est plus active et a fait disparaître d'éventuels recouvrements ultérieurs, que dans les parties basses concaves ou les replats, où ceux-ci ont pu persister ou même s'accroître.

La gibbsite apparaît d'autant plus rapidement que la pluviosité est plus

importante donc l'altération plus active. Dans les régions très humides toute l'année, nous avons pu observer des concrétions tubulaires, beige-blanchâtre, de gibbsite pure, qui semblaient remplir des canalicules d'anciennes racines, preuve de la migration possible de l'alumine dans ces sols. Dans d'autres cas, il s'agit de petits nodules blanchâtres.

Dans le cas des sols totalement désaturés en bases échangeables, avec présence de gibbsite en quantité importante, on trouve souvent un peu de kaolinite que les rayons X, l'infrarouge, le microscope électronique, indiquent relativement bien cristallisée. Il est connu que la néoformation de kaolinite bien cristallisée est fréquente en milieu totalement désaturé en bases, tandis que des teneurs notables en bases échangeables, calcium en particulier, favorisent la formation de l'hallyosite ou de kaolinites désordonnées (fire-clays), argiles le plus souvent observées dans les sols volcaniques des Antilles.

L'accroissement des teneurs en gibbsite finit par entraîner un affaiblissement notable de certaines propriétés des allophanes : hydratation, capacité d'échange, etc... La fixation du phosphore est particulièrement élevée.

La répartition de la gibbsite n'est pas homogène au sein de la fraction fine inférieure à 2 microns. Les fractions les plus proches de 2 microns, ou même certains limons fins, renferment très nettement plus de gibbsite que les fractions très fines. Il est donc utile pour comparer les teneurs en gibbsite des sols, d'opérer sur une classe de particules de même dimensions.

Par dissolutions successives (HCl 8 N à froid et soude 0,5N), on n'observe pas après la forte quantité d'alumine dissoute à la première extraction ( $SiO_2/Al_2O_3 = 0,5$ ), un ralentissement brutal de la solubilisation, comme c'est le cas dans les sols sans gibbsite. La dissolution se poursuit encore dans les extractions suivantes et ne devient constante qu'après plusieurs extractions répétées. Ce ralentissement très progressif de la dissolution est-il dû à la dimension variable des amas gibbsitiques inférieurs à 2 microns ou peut-il être attribué à diverses formes d'hydroxydes de solubilité différente : phases pré-gibbsitiques, différenciées ou non des amorphes et gibbsite bien cristallisée. Il semble donc que l'auto-aluminisation des substances amorphes, des imogolites, etc.. aboutisse lorsque le rapport  $SiO_2/Al_2O_3$  descend autour de 0,8, à l'individualisation de la gibbsite.

2-3 - CAS DU NICARAGUA -

Les sols à allophanes fortement hydratés décrits précédemment, sont observés en Martinique, Guadeloupe et Equateur, dans des régions de pluviométrie élevée, supérieure à 2 m par an, et à saison sèche relativement réduite ou évapotranspiration limitée par l'ombrage (Equateur). Il s'agit de cendres et ponces le plus souvent dacitiques, à dominance soit d'hypersthène, soit d'hornblende, rarement d'augite dans la fraction lourde.

Sur le versant Pacifique des Andes Equatoriennes, et les basses plaines tropicales chaudes, les sols fortement hydratés dans gibbsite, sont presque partout recouverts

par des sols plus jeunes, encore allophaniques, de 1m ou davantage d'épaisseur, dérivés de formations cendreuse plus récentes (niveaux humifères enterrés, poteries indiennes, etc...). On retrouve les mêmes sols, d'apparence et de propriétés identiques, à plus de 3000 mètres d'altitude sur les versants humides et ennuagés des zones tempérées froides. Le facteur température (entre 10 et 27°) n'a donc pas d'influence sensible sur la formation des sols, fortement hydratés à allophanes.

Sur le versant Atlantique d'Equateur, très humide (5 m par an) et sans périodes sèches, les sols sont très fortement hydratés sur tout le profil, avec des teneurs en eau au champ ou à pH 2,5 de 200 ou 250 p.100 de sol séché étuve. On observe un peu de gibbsite, diffuse ou accumulée en petites concrétions.

Au Nicaragua, les cendres paraissent plus basiques, riches en augite, et l'environnement même, en l'absence de données météorologiques bien précises, semble beaucoup plus sec. On trouve ainsi des sols fortement hydratés sur des plateaux d'altitude moindres, dans des conditions climatiques similaires à celles de régions des Antilles et d'Equateur où l'évolution des sols tend à la formation de l'hallyosite avec une hydratation du sol peu marquée.

De fait, certaines différences importantes existent entre les propriétés de ces sols et celles des sols fortement hydratés des Antilles et d'Equateur, précédemment étudiés.

L'hydratation est importante (100 d'eau p.100 g de sol), mais le caractère onctueux du sol n'apparaît pas. Une petite fraction seulement de cette eau (1/3 environ) est perdue irréversiblement par dessiccation à l'air, alors que pour les sols des autres régions, cette perte pouvait atteindre les 3/4 ou les 8/10 de l'eau initialement contenue dans le sol ressuyé ou à pH 2,5. La capacité d'échange est très importante (100 mé p.100 de sol) et peu diminuée par dessiccation du sol à l'air.

Par contre, comme dans les autres sols étudiés, elle varie beaucoup avec le pH et diminue considérablement après traitement acide et soude (de 100 mé à 5 mé p.100). La teneur en bases échangeables, ce qui est normal dans ces régions modérément humides, est importante : 20-25 mé p.100 de sol, beaucoup plus forte que dans les sols fortement hydratés des Antilles, où celle-ci oscillait de 0,5 mé pour les sols les plus hydratés, à 10 mé p. pour les sols les moins hydratés en régions plus sèches. La différence entre le pH eau et le pH KCl est notable. Les sols se dispersent également bien en milieu acide.

Par attaque acide/soude (HCl 8 N à froid et soude 0,5N) successive, une très importante proportion du sol est dissoute. Les substances aisément solubilisées renferment davantage de fer et le rapport  $SiO_2/Al_2O_3$  est sensiblement plus élevé que pour les sols précédemment étudiés, supérieur à 1.

Les rayons X révèlent l'ébauche d'une raie vers 4,4 Å, indice d'un début d'organisation. Les raies vers 8 Å et 14 Å sont faibles et n'apparaissent pas toujours.

A l'analyse thermique différentielle, un grand crochet endothermique vers

150-170°, est suivi de l'ébauche, souvent incertaine, de crochets à 420° et à 540°.

L'intensité du crochet exothermique à 950° est variable.

Le caractère amorphe de l'échantillon est souligné par spectrométrie dans l'infrarouge, par une large bande d'absorption de 3000 à 3700  $\text{cm}^{-1}$ , mais un début d'organisation de couche octaédrique, serait indiqué par le maximum d'absorption vers 1020  $\text{cm}^{-1}$  des renflements vers 910, entre 550 et 750 et l'amorce du doublet SiO vers 440-470  $\text{cm}^{-1}$ .

Le microscope électronique montre un enchevêtrement de fibres beaucoup plus nettes que pour les sols des Antilles et d'Équateur.

Certains des clichés rappellent tout à fait ceux de l'imogolite du Japon. De tous les échantillons étudiés, c'est, par cette technique d'observation, certainement ceux qui s'approchent le plus. Quelques rares tubes d'hallowysite sont également observés.

Une structure très énergétique pour l'eau, probablement liée à une ébauche de structure rappelant l'imogolite (au moins par son aspect au microscope électronique) distingue donc ces sols de ceux des Antilles et d'Équateur. Les raisons de ce comportement particulier qui explique seul le maintien de ces sols fortement hydratés dans ces régions ne sont pas bien connues. Il s'agit vraisemblablement d'un état instable et à la différence des sols des régions très humides des Antilles et d'Équateur, où il y a minéralisation et coiffure-aluminisation des substances amorphes ou peu organisées, l'évolution vers l'hallowysite est ici certaine et déjà amorcée.

### 3 - LES SOLS JEUNES A ALLOPHANES FAIBLEMENT HYDRATÉS

Ce sont tous les sols sur formations de cendres et ponces récentes, en climat humide. On retrouve sensiblement les caractéristiques des sols fortement hydratés, mais très atténuées par l'importante proportion de sables fins et graviers (plus de 60 % de fraction supérieure à 0,5 micron).

En Martinique, il s'agit de couches alternées de graviers ponceux et de cendres andési-dacitiques assez grossières.

En Équateur, ce sont de très fins dépôts de cendres, transportés au loin par le vent, jusque dans les plaines tropicales Pacifique, avec, parfois, de minces bandes de cendres plus grossières.

Dans le cas de formations très, très récentes, les caractères d'hydratation etc... peuvent être en partie masqués et n'apparaître que dans certains minces horizons de matériaux plus fins au départ, plus rapidement altérables. C'est avec une très grande vitesse, cependant, que l'allopheisation se produit en région humide. En Martinique, l'augmentation de la proportion de substances allophaniques est liée à une très rapide augmentation de l'hydratation, ce qui confère aux sols, même très sableux, une certaine cohésion, faible mais nette et très caractéristique sur le terrain. Des sols apparemment sableux, peuvent contenir 50 à 70, voire 100 d'eau p.100 de sol, une partie de cette eau étant irréversiblement perdue par dessiccation à l'air. Les ponces, en particulier, deviennent rapidement gorgées d'eau et spongieuses.

Le caractère irréversible de la déshydratation apparaît bien dans le cas de sols déjà notablement hydratés, mais la diminution de la capacité d'échange après dessiccation, est plus difficilement mise en évidence, du fait de l'abondance des matières organiques actives dans ces sols.

L'étude de la fraction fine argileuse est rendue plus délicate par l'abondance des fines particules primaires, en particulier avec les infrarouges.

Dans les sols fortement allophaniques, ces fines particules sont depuis longtemps altérées et ont disparues, seuls les éléments plus gros et plus résistants persistent. On retrouve les caractères des allophanes déjà décrits par les diverses méthodes et en particulier, une raie souvent très nette et bien découpée vers 13,5 Å. Une raie vers 3,7 est souvent apparente (certains sables noirs en possèdent aussi une). Le crochet vers 420° est rarement observé à l'analyse thermique différentielle et les liaisons matières organiques-allophanes semblent déjà très fortes, entraînant des départs exothermiques importants vers 400-600°, même après attaques répétées à l'eau oxygénée.

#### 4 - LES SOLS DE TRANSITION ALLOPHANES-HALLOYSITE - SOLS JEUNES A HALLOYSITE

Lorsque l'on passe des régions à pluviométrie élevée, dans lesquelles l'humidité du sol reste sensiblement constante au cours de l'année, vers les régions de pluviométrie plus faible ou à saison sèche et évapotranspiration plus prononcée, permettant une certaine dessiccation du sol, on constate aussitôt l'apparition de l'halloysite. Ce passage est particulièrement net aux Antilles, où les variations climatiques sont très brutales, en particulier dans les régions sous le vent. L'apparition de l'halloysite semble toujours précédée d'une phase relativement amorphe allophanique. L'importance de cette phase est très variable, suivant les régions, et plus ou moins facile à mettre en évidence. Plusieurs distinctions semblent nécessaires.

##### 4-1 - CAS DES SOLS DE TRANSITION ALLOPHANES-HALLOYSITE EN REGION RELATIVEMENT HUMIDES -

En Martinique et Guadeloupe, on passe souvent en quelques kilomètres seulement, des sols fortement hydratés à allophanes, aux sols déjà nettement argileux à halloysite.

##### 4-11 - Sols dérivés de formations relativement anciennes -

On assiste d'abord, en passant des régions humides, vers les régions sèches, à la diminution de l'hydratation, jusqu'à des valeurs d'environ 45 à 50 d'eau p.100 de sol, avec une déshydratation irréversible encore marquée. Le caractère spongieux du sol disparaît, il devient très friable, pseudosable. Il s'agit encore de sols allophaniques.

Puis la coloration foncée du sol, jusqu'ici limitée au niveau superficiel, gagne les horizons plus profonds, parfois jusqu'à 50 cm de profondeur ou davantage, bien que les teneurs en matières organiques soient souvent plus faibles. Ce phénomène serait attribuable à une diminution des liaisons des amorphes et de la matière organique. L'état de saturation en base s'élève. La présence d'argile n'est pas encore, toutefois, sensible au toucher, les sols ayant encore une apparence limoneuse.

À ce stade, l'halloysite est déjà très nettement indiquée par les rayons X, l'ATD, les infrarouges, le microscope électronique. La raie à 10 Å est souvent faible, mais celle à 4,37 Å et 2,51 sont bien marquées. Le crochet à 500-550° est encore peu développé, mais déjà bien noté. Les infrarouges, plus sensibles, indiquent déjà les bandes d'absorption classiques des imolinites, mais celles vers 3620-3700 cm<sup>-1</sup> sont peu accusées. Le microscope électronique est très sensible et même lorsque la raie à 10 Å est très faible, les bâtonnets de l'halloysite sont bien visibles. Ce sont des tubes encore courts et renflés, parfois aussi des masses arrondies, formées, semble-t-il, d'auroles concentriques.

L'apparition sur le terrain d'un peu d'argile, conférant au sol un caractère limone-argileux, se manifeste souvent d'abord dans les niveaux supérieurs, sauf cas de recouvrements plus récents. Les niveaux profonds restent encore allophaniques et souvent très hydratés. Dans ces niveaux légèrement argileux, la présence d'halloysite est très

clairement mise en évidence par toutes les méthodes. L'argile est aisément dispersée à l'ammoniaque. La raie à 10 Å, en particulier, est bien nette, le crochet endothermique passe progressivement de 500 à 550° en s'affinant et en devenant plus intense. Les tubes sont plus longs, plus fins, mieux formés, mais la présence de fibrilles est encore visible. La bande d'absorption à 910 cm<sup>-1</sup> devient plus sensible, de même que les doublets SiO vers 440-470 cm<sup>-1</sup> et les bandes Si-O-Al vers 500-750 cm<sup>-1</sup>. Les bandes vers 3620 et 3700 cm<sup>-1</sup> s'affinent, celle à 3620 étant nettement plus importante. La teneur en eau du sol, la capacité d'échange, s'abaissent sensiblement. Le caractère irréversible de la dessiccation est peu marqué.

Cette halloysite jeune paraît, cependant, encore très sensible à la dissolution par les acides à froid et la soude diluée. La dissolution est, cependant, beaucoup plus progressive, moins brutale que pour les substances amorphes allophaniques, sauf pour le fer qui semble persister sous des formes relativement amorphes. Il paraît difficile de déterminer dans ces sols, la proportion de substances ayant encore les caractères allophaniques et la proportion d'halloysite effective, du fait de l'existence très vraisemblable de formes intermédiaires, que pour le moment, on peut désigner comme halloysite jeune. Il est probable que, par des techniques adaptées de dissolution différentielle successive, on arrivera à une meilleure définition de ces mélanges ou de ces substances.

##### 4-12 - Sols dérivés de formations récentes -

Sur les cendres fines grossières et les ponces, en passant des zones humides vers les régions sèches, on constate aussi la diminution de l'hydratation, l'écart des humidités pour une même valeur de p<sup>r</sup> mesuré sur échantillons conservés humides ou séchés à l'air, devient très faible. La différence des humidités entre p<sup>r</sup> 2,5 et p<sup>r</sup> 4,2 décroît sur échantillons conservés fins, mais s'accroît sur échantillon préalablement séché à l'air, indice d'une meilleure organisation. La cohésion attribuable à la présence de substances amorphes, disparaît progressivement, la structure du sol devenant alors franchement particulière, sableuse, très friable. La coloration foncée attribuable à la matière organique, envahit davantage les niveaux profonds.

L'apparition de l'halloysite et le renforcement de ses caractéristiques est très net aux rayons X, ATD, infrarouge et microscope électronique. La fraction fine inférieure à 2 microns, extraite de ces sols apparemment sableux, présente souvent de belles raies à 10 Å aux rayons X, alors que l'ATD, le microscope électronique indiquent des formes encore jeunes d'halloysite - crochet à 550° modéré, tubes courts et renflés, présence, parfois encore, de quelques fibrilles ou masses amorphes.

Par suite de l'abondance de fines particules primaires encore peu altérées, la distinction entre amorphes, halloysite jeune, halloysite classique, s'avère plus délicate encore que dans les faciès plus anciens, où ces particules ont généralement disparues. Ces sols sableux hémifères, avec présence nette d'halloysite dans la fraction fine peuvent être appelés sols jeunes à halloysite. Ce passage des sols à allophanes hydratés à ces sols sableux à halloysite, est très bien observé sur de très courtes distances en

Martinique et sur de plus longues distances en Equateur, dans les basses plaines tropicales chaudes.

4-2 - LES SOLS JEUNES A HALLOYSITE - REGIONES A SAISON SECHE TRES MARQUEE -

Le passage des sols à allophanes hydratés des régions humides, aux sols jeunes à halloysite des régions plus sèches, qu'il s'agisse de formations déjà anciennes ou très récentes, n'est pas toujours observé. C'est ainsi qu'au Nicaragua, dans les vastes régions du Nord du pays, la saison sèche est partout très prononcée. Il en est de même pour les régions d'altitude d'Equateur, haute vallée interandine et prairies du paramo.

Par suite de ces périodes de dessiccation importante, l'altération progresse lentement et la transformation en produits mieux organisés, des substances amorphes a le temps de se produire avant que celles-ci existent en quantité notable, permettant une identification facile. L'abondance des particules fines primaires est aussi un handicap pour les observations par certaines méthodes.

Tous les sols que nous classons parmi les sols jeunes à halloysite, ont, sur le terrain, une apparence sableuse, sable grossier ou sable fin, plus ou moins enrobé de matières organiques. La présence d'argile n'est pas sensible au toucher ou fort peu sur le terrain, bien que des teneurs de 10 à 15 % soient fréquentes.

La présence de l'halloysite est, en général, nettement observée dans la fraction inférieure à 2 microns, mais les méthodes employées sont plus ou moins sensibles et indiquent des formes quelque peu différentes. La dispersion en milieu ammoniacal a aidé.

Aux rayons X, la raie à 10 Å est, en général, bien visible, mais les raies à 4,4 et 2,51 apparaissent d'abord avec plus d'intensité. Dans les sols les plus jeunes, la raie à 10 Å est peu visible, mais par chauffage à 100°, une raie vers 7,3 se précise davantage. Une petite raie est souvent visible vers 6,4, ainsi que diverses raies dues à des minéraux primaires : 3,18, 4,04...

A l'analyse thermique, le crochet vers 500-580° s'accroît et la température d'apparition semble s'élever progressivement. A noter l'existence fréquente d'un petit crochet vers 420° endothermique.

Aux infrarouges, l'organisation est plus sensible. Les deux bandes vers 3620 et 3700 cm<sup>-1</sup> sont nettes, sans être prononcées. La bande SiO a des composantes fines et importantes à des fréquences supérieures à 1020. La bande de déformation AlIV-O-H est bien développée à 910 cm<sup>-1</sup>. Le doublet Si-O vers 440-470 est bien découpé, indiquant une bonne séparation des couches tétraédriques et octaédriques. La bande vers 800 cm<sup>-1</sup> n'apparaît pas dans les sols de basse altitude, mais seulement dans certains sols d'altitude d'Equateur, en régions tempérées ou froides.

Le microscope électronique montre dans tous les sols des régions chaudes, la présence de bâtonnets très nets, quoique encore souvent courts et renflés. Ils sont associés à des glomérules à auréoles concentriques et parfois dans les faciès les plus jeunes, à quelques fibres ou masses amorphes. Ces tubes sont déjà nettement visibles

Dans les sols à altitude d'Equateur (vers 2000 m) par contre, la présence de tubes semble très incertaine. On observe de tous petits glomérules arrondis de 1,05 microns, qui paraissent aussi formés d'auréoles concentriques et ceci, même dans les sols où la raie à 10 Å est importante et bien effilée. S'agit-il d'une forme particulière de l'halloysite ? Existe-t-il une relation avec la bande à 800 cm<sup>-1</sup>, observée pour ces sols là seulement ?

Ces halloysites jeunes se dissolvent aisément dans l'acide chlorhydrique 3 N à froid et la soude 0,5N. La capacité d'échange diminue fortement, mais pas autant, cependant qu'avec les sols amorphes hydratés. Cette diminution moins importante de la capacité d'échange, après traitement acide/soude à froid, est bien l'indice d'une quantité notable d'halloysite, relativement bien cristallisée. Les halloysites glomérulaires semblent se dissoudre plus rapidement que les formes tubulaires, mais ce phénomène est peut-être attribuable à la présence en quantité plus importante de substances amorphes. De fait, les glomérules apparaissent souvent mêlés avec des formes déclinées, rappelant nettement les allophanes.

Dans les régions les plus sèches, la présence de la montmorillonite est parfois décelée. Il s'agit de sols très sableux, parfois bien humifères mais très souvent érodés et très pauvres en matières organiques et s'apparentant aux régosols.

Cette présence est parfois bien mise en évidence aux rayons X, par une raie à 14 Å, passant à 17 Å au glycérol, une raie à 4,40 Å prononcée et un crochet endothermique vers 700-800° à l'analyse thermique différentielle.

Très souvent aussi, la présence de la montmorillonite est probable, vraisemblable, mais difficile à prouver effectivement. La raie vers 14 Å n'apparaît pas nettement, ou bien le gonflement au glycérol demeure incertain. Le crochet endothermique à haute température n'est pas sensible. La raie à 4,40 Å est cependant très bien marquée même en l'absence de raies nettes à 10 ou 7,3 Å de l'halloysite. Les infrarouges indiquent des bandes d'absorption tout aussi nettes que pour les sols où l'halloysite est importante. Après attaque acide/soude, la diminution de la capacité d'échange est modérée. Il est possible qu'il s'agisse de montmorillonites aluminosées ou ferrifères, pour lesquelles les phénomènes de gonflement au glycérol, d'affaissement au chauffage à 100°, sont peu marqués, avec abaisses nettes de la température du crochet endothermique à l'analyse thermique différentielle. Ces hypothèses semblent appuyées par le fait que suivant le mode de préparation de l'échantillon, les résultats peuvent sensiblement différer.

La présence de montmorillonite serait donc vraisemblable dans certains sols sableux des régions très sèches d'altitude des Andes équatoriales et peut-être aussi de certaines basses plaines du Nicaragua.

4-3 Conclusion : Des difficultés apparaissent donc pour l'identification des formes jeunes de l'halloysite ou de certaines montmorillonites. Il peut s'agir de mélanges de substances amorphes et d'argiles cristallines vraies. C'est certainement le cas dans les sols de transition allophanes-halloysite, dérivés de formations relativement anciennes, en régions



de pluviosité encore assez importante, ou à saison sèche peu marquée. L'existence d'états intermédiaires comme les imogolites ou d'autres soit probable, le terme, sols de transition allophanes-halloysite, semble donc se justifier.

Le problème est plus complexe avec les sols très jeunes ou ceux des régions à saison sèche très marquée, dans lesquels certains caractères aidant à une identification facile des amorphes disparaissent. Faute de pouvoir clairement mettre en évidence leur caractère par leurs propres propriétés : hydratation, variation de la capacité d'échange, etc... Il semble donc préférable, lorsque la présence de l'halloysite est évidente, le terme d'halloysite jeune. Ce terme recouvre divers états cristallins ou semi-cristallins dont les propriétés se retrouvent au moins, en partie, comme pour le verrou dans les sols, non plus sableux, mais déjà franchement argileux à halloysite, ce qui donne une prescription pour des formes particulières de cette argile.

La présence en région à saison sèche marquée de substances ne présentant pas de raies caractéristiques aux rayons X et un aspect fibreuse au microscope électronique, a cependant été observée au Nicaragua sur les formations jeunes, recouvrant les conches de volcans, à proximité de sols un peu plus évolués, plus anciens sans doute, et à halloysite. C'est le cas également de certains sols des très hautes altitudes d'Amérique. Dans les régions des régions arides d'Equateur, l'halloysite est égale à un sol où la teneur en argile ne dépasse pas 2%.

5 - LES SOLS BRUN ROUILLE A HALLOYSITE

Dans tous les sols précédemment examinés, sauf certains horizons de sols de transition allophanes-halloysite, la présence de l'halloysite n'apparaissait pas de façon sensible au toucher, sur le terrain.

La proportion de cette argile s'accroissant, les sols deviennent de plus en plus argileux au sens ordinaire de ce terme.

La présence dominante de l'halloysite confère au sol un certain nombre de caractéristiques et, en particulier, une consistance un peu grasse, sans qu'il s'agisse de l'adhérence de la montmorillonite. La coloration est brun-rouille assez caractéristique et n'existe pas dans la table de couleur Munsell. Les surfaces des blocs sont luisantes, parfois très luisantes. Il est probable qu'il s'agisse de revêtements amorphes ferrugineux ou manganésiques. La couleur du sol écrasé humide, change nettement. Ces sols sont bien représentés aux Antilles, dans les basses plaines d'Equateur et du Nicaragua.

Les caractères de l'halloysite aux rayons X (souvent mêlés de métahalloysite), à l'analyse thermique différentielle, au microscope électronique, à l'infrarouge, sont très nets, mais donnent lieu à d'assez larges variations.

Les tubes paraissent, au microscope électronique, mieux formés, plus grands, moins trapus dans les faciès argilisés plus anciens. Les bandes d'absorption à 6200 et 6700 s'affinent. Dans les faciès les mieux cristallisés, ces bandes sont sensiblement égales, mais celle à 6200 est beaucoup plus importante dans les formes plus jeunes. L'intensité du crochet AED à 550-580 $\mu$ , s'accroît, ainsi que la température d'apparition dans les formes mieux cristallines.

L'intensité de la raie à 10 $\text{\AA}$  est variable, dépendant de la proportion de métahalloysite, mais les autres raies de l'halloysite sont prononcées.

Tous ces sols sont généralement bien pourvus en bases échangeables et modérément acides. Le caractère "argileux" au sens agronomique, s'accroît, non seulement avec la proportion d'argile, au sens granulométrique, mais aussi, avec la diminution de la proportion de substances amorphes ou semi-organisées. Les sols deviennent de plus en plus lourds et compacts.

En passant à des sols encore plus riches en argiles et plus anciens, la coloration brun-rouille s'estompe, le sol devient plus rouge, ou brun-rouge. Les luisances disparaissent, les faces des agrégats deviennent plus anguleuses, la goéthite apparaît de façon sensible. Les sols sont souvent plus acides, la capacité d'échange est plus faible, ils deviennent un peu plus friables et on atteint progressivement, en régions humides, à des sols ferrallitiques classiques, contenant de l'halloysite, la métahalloysite, des fire-clays, de la goéthite et parfois un peu de gibbsite. Les minéraux primaires altérables sont alors pratiquement absents.

L'apparition de la goéthite est donc très tardive. Elle n'est pas encore observée dans les sols bruns-rouilles qui renferment 6 à 7% de Fe $^{2+}$  libre DMB. Les dissolutions sélectives à froid, indiquent pour le fer aisément solubilisé, probablement amor-

phs, une teneur équivalente.

L'halloysite des sols bruns-rouilles est attaquée par l'acide chlorhydrique 8 N à froid et la soude 0,5N. La dissolution d'abord constante et importante, de la silice et de l'alumine se ralentit progressivement, mais une importante quantité de sol est dissoute. La capacité d'échange décroît souvent de moitié, après 3 ou 4 de ces traitements.

Pour les sols ferrallitiques, la dissolution est moins importante et la capacité d'échange reste inchangée après les premiers traitements. Ces différences de solubilisation correspondent-elles à deux formes d'halloysite, l'une plus jeune, moins résistante aux acides, l'autre plus évoluée, sans doute mieux cristallisée, un peu plus difficilement attaquable? ou à un mélange avec d'autres substances semi-cristallines.

Dans les régions à saison sèche marquée des Antilles et du Nicaragua, et à pluviométrie modérée, la montmorillonite coexiste avec l'halloysite. Les sols sont plus gras, souvent adhérents, à tendance parfois nettement verticale. La coloration est brun-rouille, mais les taches manganiques sont fréquentes près du niveau de départ. Des strates durcies de silice secondaire blanche précipitée, sont souvent observées dans les cordons conjugués, peu altérés, en bandes parallèles et en revêtements sur les formations durcies que ces dépôts ont recouverts.

#### 6 - LES SOLS ROUGES SUR CENDRES

Ces sols n'ont été observés que dans les basses plaines chaudes et sèches du Nicaragua. La pluviométrie annuelle est inférieure à 1 mètre, l'insolation prononcée, la saison sèche très longue.

Par leur aspect, ces sols s'apparentent à la fois, aux sols brun-rouille décrits et à des sols rouges ferrallitiques de régions semi-arides. Ils sont peu profonds et paraissent souvent en partie, constitués lorsqu'ils sont secs, de très petites particules arrondies soudées.

La capacité d'échange de bases déterminée à pH 7 (60 à 80 cm pour 100 g de sol) croît sensiblement à pH 9. Les rayons X indiquent des raies très prononcées à 4,41 Å, 3,52 Å, 2,51 Å, mais les raies vers 7,4 ou 10 Å de l'halloysite sont parfois fort peu visibles, même après des traitements acides à froid, destinés à enlever d'éventuels recouvrements amorphes ou ferrugineux. Toutefois les cristaux exothermiques à 550° sont nets, avec parfois renflement vers 420°. La présence de montmorillonite quoique vraisemblable, ne peut être prouvée véritablement dans tous les cas (raies à 14,6 et 19 sur échantillon orienté; 19 après traitement glycérol; 12,5 après chauffage à 500°) et l'existence de certaines formes d'amorphes ou autres substances peu organisées est probable? L'interprétation des

#### 7 - LES SOLS SUR TUFFS VOLCANIQUES MARINS

Aux Antilles comme au Nicaragua (côte Atlantique), de fortes épaisseurs de cendres volcaniques sont déposées en mer, comme en témoigne la présence de fossiles calcaires dans les niveaux d'âge plus récents ou intercalés.

Bien qu'essentiellement constituées de particules cendreuses, la possibilité d'un mélange avec des argiles sédimentaires, au cours du dépôt, n'est pas exclue. La néoformation des minéraux argileux à partir des minéraux primaires, n'est donc pas aussi certaine qu'avec les cendres volcaniques ou les ponces déposées en régions exondées. De plus, certaines transformations et altérations des minéraux ont pu se produire, soit en milieu marin, soit après leur exondation au cours des âges, avant le décapage des formations qui les recouvraient jusqu'à nos jours. De fait, ces tufs marins présentent une disposition particulière pour la formation de la montmorillonite.

L'étude des sols qui dérivent de ces formations serait trop longue et dépasse notre sujet. On se contentera de donner un aperçu très bref de certaines particularités de ces sols.

Quelques uns de ces tufs peuvent donner naissance à des sols bruns-rouilles à halloysite, voisins de ceux que nous avons étudiés, avec une tendance verticale accusée dans les régions sèches.

La plupart des tufs sont cependant à l'origine de sols bien différents de ceux examinés dans cet article.

En régions relativement sèches, de pluviométrie voisine de 1,5 à 2 m, et à saison sèche assez marquée, les vertisols magnésiens, parfois riches en sodium échangeable, et souvent acides, dominent presque exclusivement.

En régions humides, à saison sèche peu prononcée (2 m ou davantage de pluviométrie annuelle), on observe la formation, soit de sols argileux rouge vif ou brun-rouge, soit de sols argilo-limoneux jaune clair ou beige (Martinique et Nicaragua). Les teneurs en bases échangeables sont importantes : 30 à 50 mé p.100 ou davantage, avec dominance de magnésium, mais les pH présentent souvent de basses valeurs. L'écart des valeurs entre les pH mesurés dans l'eau ou le KCl, atteint 1,5 ou 2 unités pH. Lorsque le pH KCl descend en dessous de 4, les quantités notables d'aluminium extraites par le KCl normal apparaissent dans tous les cas, quelque soit le niveau de bases échangeables. Ces teneurs en aluminium déplacé par le KCl peuvent être, dans certains sols, très importantes et l'on note alors aux rayons X, MTD, la présence de boehmite. Dans tous ces sols, la dégradation de la montmorillonite en argiles de type kaoliniques, entraîne souvent de grandes différences entre les niveaux de surface et ceux de profondeur, même dans des sols d'épaisseur pourtant modérés : 1 à 2 mètres.

8 - CONCLUSION

Les méthodes d'études classiques des argiles, conçues essentiellement pour les substances cristallines, sont quelque peu en défaut dans le cas de mélanges avec des substances amorphes ou à ébauches de structure.

Le recours à un ensemble de techniques est indispensable. La spectrographie dans l'infrarouge, le microscope électronique, les techniques de dissolution successives différentielles, les variations de la capacité d'échange semblent les techniques les plus prometteuses pour ces études.

L'étude minéralogique des sables, de leur composition, de leur degré d'altération, est un complément indispensable. Elle permet, par la détermination de la concordance des différents dépôts, leur âge, leur nature pétrographique, d'effectuer des comparaisons valables entre des sols d'évolution différents. Cette technique a été largement utilisée aux Antilles et en Equateur.