

# Séquence climatique des sols anciens de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canaries)

## 3<sup>e</sup> partie : typologie, pédogenèse et classification (1)

M.L. TEJEDOR SALGUERO\*, Paul QUANTIN\*\*, E. FERNANDEZ-CALDAS\*

\**Centro de Edafología y Biología Aplicada, Sta Cruz de Tenerife*

\*\**ORSTOM, 70, route d'Aulnay, 93140 Bondy*

### SOMMAIRE

#### I. TYPOLOGIE, PÉDOGENÈSE ET CLASSIFICATION

1. Sols ferrallitiques
  - a) typologie
  - b) pédogenèse
  - c) classification
2. Sols fersiallitiques
  - a) typologie
  - b) pédogenèse
  - c) classification
3. Vertisols
  - a) typologie
  - b) pédogenèse
  - c) classification

#### II. CONCLUSIONS : Evolution de la séquence topo-climatique des sols anciens du nord de Ténérife.

1. Evolution des caractéristiques
  - a) morphologie
  - b) matière organique
  - c) caractéristiques physiques
  - d) caractéristiques chimiques
  - e) caractéristiques minéralogiques
2. Relation entre la pédogenèse et la zonalité climatique actuelle

#### BIBLIOGRAPHIE

---

(1) Les deux premières parties de cet article ont paru *in Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVII, n° 1 et 2, 1979 : 37-46, 119-127, avec résumés.

## INTRODUCTION

Dans la première et la deuxième partie de cette étude, nous avons décrit les caractéristiques des différents sols d'une séquence topo-climatique de la région nord de Ténérife. Dans cette dernière partie, nous proposerons une classification de ces divers sols, en partant d'une synthèse de leurs caractéristiques et d'une approche de leur pédogenèse. Puis nous montrerons la relation entre la genèse des sols et leur position dans la séquence topo-climatique. Enfin nous aborderons le problème du caractère climacique ou paléo-climacique de la zonalité observée.

## I. TYPOLOGIE, PÉDOGENÈSE ET CLASSIFICATION

### 1. Sols ferrallitiques

#### a) TYPOLOGIE

Les sols ferrallitiques présentent le plus souvent un profil complexe, du fait d'un rajeunissement superficiel : ils sont enterrés par un andosol et (ou) un sol brun-andique. On ne les observe que rarement en surface, dans les régions fortement affectées par l'érosion (Massifs de Anaga et de Tenos).

Leurs propriétés sont assez caractéristiques des sols ferrallitiques sur roches basiques des pays tropicaux.

**Morphologie** : une couleur brun-rougeâtre; une texture argileuse; une structure polyédrique moyenne ou fine, très friable; une faible densité apparente et une forte microporosité. L'aggrégation en pseudo-particules fines et friables est parfois telle, que le sol a une apparence limoneuse (structure « aliatique », caractéristique des oxisols). Quelques sols présentent des concrétions blanches de gibbsite à la base du profil, dont certaines atteignent 1 cm de diamètre (Las Lajas).

**Propriétés physico-chimiques** : ces sols sont acides ou modérément acides (pH = 5 à 6). La différence de pH de 0,7 à 1,1 unité, entre les valeurs mesurées dans H<sub>2</sub>O et en solution de KCl (N), indique la présence importante de minéraux argileux à forte capacité d'échange (halloysite) et d'assez bonne cristallinité. Leur capacité d'échange cationique de 20 à 25 mé/100 g, dépasse souvent les valeurs habituellement observées dans les sols ferrallitiques à kaolinite; mais cela est dû à l'halloysite et à la présence éventuelle d'un peu d'allophane (provenant des apports superficiels de cendres volcaniques). Seul l'horizon IIB du profil Poleo, particulièrement riche en gibbsite, présente une plus faible capacité d'échange (15 mé/100 g). La teneur en bases échangeables, de 5 à 7 mé/100 g, n'est

pas négligeable; mais le taux de saturation de la capacité d'échange est d'environ 20 % dans l'horizon B. Ce sont des sols moyennement à fortement désaturés en bases. Ils sont riches en matière organique dans l'horizon humifère (~ 10 %) et caractérisés par une valeur du rapport C/N de 12 à 14 et un rapport AH/AF < 1. Le rapport molaire SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> < 2, indique que les produits d'altération, relativement au matériau basaltique originel, ont subi une forte lixiviation en silice et un enrichissement relatif en alumine, de même qu'en oxydes de fer et de titane.

**Composition minéralogique** : les sols ferrallitiques sont constitués surtout d'halloysite et de goethite, et éventuellement d'hématite et de gibbsite. Ils contiennent aussi de très petites quantités de minéraux primaires altérables résiduels, d'argiles 2 : 1 (Al-vermiculite) et d'allophane. Ils peuvent avoir des quantités importantes d'alumine facilement extractible.

#### b) PÉDOGENÈSE

Par leurs caractéristiques géochimiques et minéralogiques : rapport SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mol. < 2 en B, argiles 1 : 1, oxydes et hydroxydes de fer et d'alumine, ces sols sont nettement apparentés aux sols ferrallitiques. Ils sont situés actuellement sur les matériaux volcaniques les plus anciens, en climat forestier sempervirent et en condition climatique perhumide, sur le versant nord des îles, entre 800 et 1.600 m d'altitude. Mais la complexité des profils et certaines propriétés physico-chimiques exceptionnelles, dues au rajeunissement volcanique superficiel, font que ces sols présentent des caractères intermédiaires entre les sols ferrallitiques humifères et les andosols. Des sols analogues, à halloysite, ont été décrits dans d'autres régions volcaniques, mais en climat tropical, notamment par COLMET-DAAGE aux Antilles, (1965); SIEFFERMANN au Cameroun (1969); et QUANTIN aux Nouvelles Hébrides (1972-1976). Comme le remarque CHATELIN (1974), dans sa synthèse bibliographique sur le processus d'altération dans les sols ferrallitiques, le processus ferrallitique est favorisé par la géochimie particulière des roches basiques, un bon drainage interne du sol, une pluviométrie suffisante et plutôt régulièrement répartie. Ainsi que l'avait noté SIEFFERMANN (1973), les roches volcaniques basiques favorisent la genèse de l'halloysite, plutôt que de la kaolinite. La formation de sols ferrallitiques à halloysite se fait à la suite des andosols désaturés, après un temps suffisamment long (QUANTIN, 1974). Les conditions climatiques les plus communément admises sont celles de la zone intertropicale chaude et humide. Mais dans le cas des îles Canaries, il s'agit de conditions subtropicales et régulièrement humides, intermédiaires entre le climat méditerranéen et le climat tropical. Il faut tenir compte de la durée suf-

fisamment longue (> 10.000 ans, aux Canaries) pour la genèse de tels sols. Mais le rajeunissement volcanique superficiel a apporté une complication supplémentaire, qui rend difficile la classification de ces sols.

#### c) CLASSIFICATION

##### *Classification française*

La morphologie du profil, l'altération très intense des minéraux primaires, l'élimination d'une grande partie de la silice et des bases, la présence de minéraux argileux de type 1 : 1 et l'individualisation importante d'oxydes et hydroxydes de fer (goethite, hématite) et surtout d'aluminium (gibbsite) nous font classer ces sols dans :

Classe : Sols Ferrallitiques

##### *Profil Poleo*

Sous-classe : « Sols ferrallitiques moyennement désaturés en (B) » (Il est à la limite de la sous-classe des sols faiblement désaturés).

Groupe : « Sols ferrallitiques moyennement désaturés en (B) rajeunis »

Sous-groupe : « Avec érosion et apport éolien volcanique, à caractère andique superficiel peu développé ».

##### *Profil Las Lajas*

Sous-classe : « Sols ferrallitiques fortement désaturés en (B) »

Groupe : « Sols ferrallitiques fortement désaturés humifères, rajeunis »

Sous-groupe : « Avec érosion et apport éolien volcanique, à caractère andique superficiel bien développé ».

##### *Classification américaine*

La présence d'halloysite et de petites quantités d'alophaque, qui augmentent la capacité d'échange à plus de 16 méq/100 g, rend difficile la classification de ces profils dans les Oxisols. Cependant, ils présentent certaines caractéristiques de ces sols : un degré élevé d'altération, laissant seulement de petites quantités de minéraux primaires très résistants, comme le quartz et la sanidine; une lixiviation intense des bases; une teneur en argile élevée, etc.

Si l'on admettait l'élévation de la limite supérieure de la capacité d'échange des Oxisols dans le cas des sols riches en halloysite à une valeur voisine de la capacité d'échange de cette argile (25 méq/100 g), on pourrait classer ces sols dans l'ordre des Oxisols.

Sous-ordre : « Humox »

##### *Profil Poleo*

Grand-groupe : « Gibbsihumox »

Sous-groupe : « Andeptic Gibbsihumox »

##### *Profil Las Lajas*

Grand-groupe : « Sombrihumox »

Sous-groupe : « Andeptic Sombrihumox »

Mais, dans l'actuelle classification américaine, ces sols seraient plutôt à classer :

Ordre : Ultisols

##### *Profil Poleo*

Sous-groupe : « Udults »

Grand-groupe : « Paleudults »

Sous-groupe : « Andeptic Paleudults »

##### *Profil Las Lajas*

Sous-classe : « Humults »

Grand-groupe : « Palehumults »

Sous-groupe : « Andic Orthoxic Palehumults ».

## 2. Sols fersiallitiques

### a) TYPOLOGIE

*Morphologie* : les sols fersiallitiques présentent dans l'horizon B une couleur rouge très vive dans le haut de la séquence, qui s'assombrit en bas de séquence, près des vertisols. Certains sols sont faiblement rajeunis et plus limoneux dans la partie supérieure du profil; mais cet effet a souvent disparu du fait de la culture et de l'érosion. La texture est normalement très argileuse. La structure paraît nettement plus dense, plus largement développée et plus cohérente que dans les sols fersiallitiques : plutôt polyédrique large, parfois prismatique avec les caractères vertiques de surfaces gauchies et striées bien nettes. En bas de séquence, les prismes sont revêtus de cutanes noirâtres (ferromanganes). Mais on observe rarement de nets cutanes argileux, dus à l'illuviation, et seulement à la base des profils (horizon B/C).

*Propriétés physico-chimiques* : ces sols sont modérément acides (pH ~ 6). Leur capacité d'échange cationique, voisine de 30 méq/100 g dans l'horizon B est légèrement supérieure à celle de l'halloysite, par suite de la présence de montmorillonite. Le taux de saturation en bases dans l'horizon B varie de 35 à 60 %. Ce sont des sols modérément désaturés. La teneur en matière organique dans l'horizon A, de 2 à 6 %, est sensiblement moindre que dans les sols fersiallitiques. Le rapport C/N, voisin de 10 et le rapport AH/AF proche de 1, indiquent une rapide évolution de la matière organique. La valeur du rapport molaire SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dans le sol total (minéraux primaires inclus) oscille entre 2,3 et 4,2, ceci indique une évolution importante des termes les plus altérés, sous l'effet de la lixiviation de la silice et des bases; mais sans atteindre le stade des sols fersiallitiques. Ces sols sont également riches en fer et notamment en oxydes et hydroxydes de fer libres (6 à 16 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

*Composition minéralogique* : les sols du haut de la séquence, proches des sols fersiallitiques, contiennent en prédominance de l'halloysite (à 10 et à 7,4 Å). Mais ils présentent aussi des interstratifiés (I-V, I-M) et un peu de montmorillonite, dont ils s'enrichissent progressivement vers le bas de la séquence. Ils sont constitués encore de goethite et d'hématite (qui leur donne la couleur rouge vif), et d'un peu de minéraux

primaires résiduels (quartz, sanidine, micas, pyroxènes et amphiboles très altérés). L'enrichissement en sanidine, micas et quartz, indique une venue de cendres phonolitiques ou d'autres pollutions éoliennes. Il est intéressant de remarquer que les sols rouges à prédominance d'hallowysite présentent des structures vertiques de gonflement aussi développées que les sols à montmorillonite.

#### b) PÉDOGENÈSE

Par leurs caractéristiques géochimiques et minéralogiques : rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 2$ , mélange d'argiles 1 : 1 et 2 : 1, quantité de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  libre  $> 3 \%$  et couleur rouge due à l'hématite, ces sols sont fersiallitiques dans le sens de BOTELHO DA COSTA (1959). Ils sont caractérisés, malgré une forte altération minérale, par une évolution moins poussée de la désilicification que les sols ferrallitiques et une forte individualisation des oxydes de fer. Ces sols présentent aussi, dans quelques cas, des cutanes (ferriargilanes) d'illuviation à la base de l'horizon B. Ils apparaissent dans des conditions climatiques particulières : climat à deux saisons, humide et aride bien contrastées. La végétation naturelle à Ténérife était forestière; mais elle a été déboisée et fortement cultivée depuis deux à trois siècles, ce qui a fortement accru l'effet du contraste saisonnier sur la structure des sols. Mais cela a produit aussi le remaniement ou l'ablation des horizons superficiels de sol précédemment rajeuni par des cendres volcaniques. Certains sols présentent encore des marques de ce rajeunissement. La présence dans cette même zone climatique de sols plus jeunes, moins évolués, de type brun eutrophe ou brun-andique, indique que les sols rouges sont relativement plus anciens et formés probablement au cours du Pléistocène. Les sols fersiallitiques rouges des îles Canaries sont cependant situés dans des conditions climatiques analogues à celles établies par LAMOUROUX (1972) au Liban, pour des sols présentant des caractéristiques très semblables. Des sols analogues ont été observés en climat tropical, outre BOTELHO DA COSTA (1959), par MARTIN (1966) et QUANTIN (1972-76). Il s'agit de climats relativement plus pluvieux (1.200 à 1.800 mm/an) et plus chauds, mais aussi à longue saison sèche, et de sols sur roches basiques.

#### c) CLASSIFICATION

##### *Classification française*

La classification du C.P.C.S. (1967) limitait la définition des sols fersiallitiques au cas des sols méditerranéens et les plaçait comme sous-classe des sols à sesquioxydes de fer, sur le même niveau que les sols ferrugineux tropicaux. Il nous a paru plus logique d'élever les sols fersiallitiques au niveau de la classe, sur le même plan que les sols ferrallitiques, et d'en

élargir le concept, comme l'avait proposé déjà BOTELHO DA COSTA pour les sols rouges tropicaux. Nous distinguons les sous-classes d'après le taux de saturation en bases de la capacité d'échange cationique, en sols saturés, faiblement désaturés et moyennement désaturés; les groupes d'après l'existence ou non d'horizon argilique, et les sous-groupes par l'intensité du processus fondamental ou par l'existence d'un processus secondaire : modal, hydromorphe, verticale, andique, etc.

Les trois profils de sols fersiallitiques que nous avons décrits aux Canaries sont à classer comme sols moyennement désaturés, à horizon B/C argilique, rubéfiés. Le profil Las Rosas se distingue par des caractères vertiques dans l'horizon B/C. Les profils Las Carboneras et La Mina présentent des caractères andiques peu accusés dans l'horizon A, par suite d'un rajeunissement volcanique superficiel; de plus leurs caractéristiques minéralogiques et structurales dans l'horizon B sont intermédiaires avec les sols ferrallitiques.

##### *Classification américaine*

Les trois profils ont un horizon argilique et un taux de saturation supérieur à 35 %. C'est pourquoi nous les classons dans :

Ordre : « Alfisols »

Sous-ordre : « Ustalfs », parce que le régime climatique est de type « ustic ».

Grand-groupe : « Rhodustalfs », parce que la couleur à l'état humide est de 2,5 YR.

##### *Profil Las Rosas*

Sous-groupe : « Oxic Rhodustalfs », parce que la capacité d'échange dans l'horizon argilique est inférieure à 24 méq/100 g.

##### *Profil Las Carboneras et La Mina*

Sous-groupe : « Andic Udic Rhodustalfs », à cause du caractère andique très net dans l'horizon de surface.

### 3. Vertisols

#### a) TYPOLOGIE

*Morphologie* : ce sont des sols de couleur gris foncé ou brun très foncé, très argileux, à structure prismatique dans l'horizon B, caractérisée par des faces de glissement gauchies et striées très nettement et largement développées, à consistance très forte et présentant de larges fentes de retrait à l'état sec; à l'état humide le sol devient plastique et collant. Le profil présente toujours une accumulation calcaire friable à la base de l'horizon B, le plus souvent en nodules, parfois en encroûtement friable.

*Propriétés physico-chimiques* : la teneur en matière organique du sol superficiel est souvent faible (1 à

2 %); celle-ci est caractérisée par un rapport C/N  $\ll$  10. Le pH est faiblement alcalin (7 à 8) dans le haut du profil; il peut atteindre 8 à 9 dans l'horizon calcaire (B<sub>Ca</sub>). La teneur en calcaire est très faible (1 à 2 %) ou nulle en dehors de l'horizon d'accumulation carbonatée. La capacité d'échange cationique est très élevée, en raison de la forte teneur en montmorillonite; elle varie de 40 à plus de 60 mé/100 g. En haut de séquence, le sol est faiblement désaturé dans la partie supérieure du profil. Mais le plus souvent, le sol est totalement saturé en bases, principalement en calcium et en magnésium. Cependant la teneur en ion Na<sup>+</sup> augmente en profondeur, où elle atteint 5 à 6 mé/100 g; ce qui indique un début d'alcalisation (Na<sup>+</sup>/T  $\sim$  10 %). La valeur du rapport molaire SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, supérieure à 4, indique une évolution géochimique très limitée. Il n'y a pas ou très peu de « fer libre ».

**Composition minéralogique :** l'argile largement prédominante est la montmorillonite (ferrifère); il s'y ajoute un peu de kaolinite et de métahalloysite dans l'ensemble du profil, et des quantités variables d'illite dans le haut du profil, en même temps que du quartz (pollution éolienne). On observe aussi souvent des traces de minéraux primaires peu altérés (feldspaths, pyroxènes, amphiboles) dans l'ensemble des profils. Ceci proviendrait de l'incorporation des minéraux arrachés au cortex d'altération du basalte par les mouvements de masse particuliers aux vertisols. L'observation micromorphologique montre des assemblages plasmiques caractérisés par de multiples orientations de domaines biréfringents (RODRIGUEZ HERNANDEZ *et al.*, 1978); ce qui indique nettement des effets de pressions et de mouvements de masse.

#### b) PÉDOGENÈSE

Les vertisols sont localisés dans la partie inférieure de la séquence du versant septentrional, en-dessous de 300 m d'altitude, sur une pente d'environ 5 %. Une partie des argiles du sol peut provenir de l'altération du basalte situé à la base du profil. Mais la partie supérieure vient le plus souvent de colluvions et d'éventuels apports éoliens superficiels qui y sont incorporés. Cependant, même si le contact sol-roche dure est souvent tranché, on observe au microscope une altération progressive du basalte, qui indique que l'argile peut en provenir directement. Les conditions climatiques actuelles, avec une pluviométrie inférieure ou égale à 300 mm/an, ne semblent pas favorables à l'altération en argile, en dehors d'une période très brève chaque année où le sol est gorgé d'eau. Mais c'est le processus d'accumulation du calcaire qui semble prédominer, accompagné même d'un début d'alcalisation en profondeur. C'est pourquoi nous émettons l'hypothèse que l'argilification a précédé la formation des accumulations calcaires et qu'elle s'est

produite pendant une période climatique plus humide, d'âge fin Pléistocène. La datation des croûtes calcaires, de 20.000 à 30.000 ans (DELIBRIAS, 1976), indiquerait que les vertisols se sont formés précédemment. La végétation actuelle, souvent modifiée par la culture en terrasse, comporte des plantes xérophytiques de l'association Klénio-Euphorbion, qui indiquent des conditions climatiques sub-arides.

#### c) CLASSIFICATION

##### *Classification française*

Les caractéristiques morphologiques (fentes de retrait, slickensides) et les caractéristiques minéralogiques (dominance de montmorillonite) nous font classer le profil Bajamar dans :

Classe : « Vertisols »

Sous-classe : « à drainage externe possible »

Groupe : « à structure fine et arrondie sur les 15 premiers centimètres ».

Sous-groupe : il faudrait proposer le sous-groupe « à accumulation calcaire » et « intergrade halomorphe ».

##### *Classification américaine*

Ordre : « Vertisols »

Sous-ordre : « Usterts »

Grand-groupe : « Pellusterts »

Sous-groupe : « Typic Pellusterts », il faudrait proposer le sous-groupe « Calcic Pellusterts ».

## II. CONCLUSIONS : EVOLUTION DE LA SÉQUENCE TOPO-CLIMATIQUE DES SOLS ANCIENS DU NORD DE TÉNÉRIFE

En conclusion de l'étude des caractéristiques des sols les plus anciens de la séquence septentrionale de Ténérife, nous essaierons de dégager : premièrement, le sens de l'évolution des caractéristiques en fonction du gradient climatique apparent, deuxièmement, la relation entre la pédogenèse et les conditions climatiques actuelle.

### 1. Evolution des caractéristiques

La comparaison des sols correspondant aux trois zones écologiques de la séquence septentrionale, à savoir du sommet vers le bas du versant, sols ferrallitiques, fersiallitiques et vertisols, montre très nettement l'évolution suivante de leurs caractéristiques :

a) MORPHOLOGIE : Le profil, de complexe par suite d'un rajeunissement volcanique superficiel très évident dans les sols ferrallitiques, se simplifie et devient peu profond dans les vertisols. Les sols ferrallitiques présentent le plus souvent un horizon humifère très développé, à caractères évidents d'andosol, et parfois

aussi un sol brun andique intermédiaire, qui correspond à un apport intercalaire de cendres volcaniques ; le sol ferrallitique « stricto sensu » a ainsi l'aspect d'un sol enterré. Le sol rouge fersiallitique, légèrement appauvri en argile, ou rajeuni, dans l'horizon  $A_p$ , et faiblement illuvié en argile à la base de l'horizon B, a la morphologie d'un sol faiblement lessivé en argile. Le vertisol manque souvent d'horizon A et il présente une accumulation calcaire à la base du profil, dans l'horizon B ; de plus le passage du sol argileux à la roche mère sous-jacente y est rapidement tranché, presque sans horizon d'altération.

Ainsi l'horizon humifère, très développé au sommet des sols ferrallitiques, en condition écologique forestière et perhumide, disparaît presque dans les vertisols, en condition climatique subaride.

L'horizon B (ou IIB) des sols ferrallitiques est brun-rougeâtre (ou rouge, si lithochrome), argilo-limoneux, à structure polyédrique fine, microporeuse, peu dense et très friable. Dans le sol fersiallitique il est plus rouge, paraît plus argileux et plus dense, la structure est plus développée, polyédrique grossière ou prismatique, avec des caractères vertiques nets à la base (slikensides), des revêtements fréquents, brunâtres ou noirâtres, une cohésion forte. Le vertisol prend une couleur très foncée, une structure prismatique large et très fortement cohérente, et il présente des slikensides très développés. On assiste donc à un accroissement de la densité et à un élargissement très accentué de la structure, du haut vers le bas de la séquence.

L'horizon C d'altération, bien développé dans les sols ferrallitiques et fersiallitiques, disparaît presque dans les vertisols. Une accumulation calcaire friable apparaît à la base des vertisols.

b) MATIÈRE ORGANIQUE : dans l'horizon humifère, la teneur en matière organique, proche de 10 % dans les sols ferrallitiques, varie de 2 à 6 % dans les sols fersiallitiques, et elle est toujours inférieure à 2 % dans les vertisols. Dans le même sens, le rapport C/N de 12 à 14, passe à 10, puis devient inférieur à 10 ; le rapport AH/AF nettement inférieur à 1 devient supérieur à 1.

c) CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES : la texture apparente dans l'horizon B, argilo-limoneuse dans les sols ferrallitiques devient de plus en plus argileuse en allant vers les vertisols. Au contraire la porosité et la capacité de rétention en eau diminuent très sensiblement, en même temps que les caractères de gonflement et de retrait des argiles se développent.

d) CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES : le pH, franchement acide (5 à 6) dans les sols ferrallitiques, s'élève légère-

ment dans les sols fersiallitiques (~ 6), et il devient alcalin dans les vertisols (7 à 8). La capacité d'échange cationique s'accroît sensiblement dans le même sens : de 15-20 mé/100 g dans les sols ferrallitiques, à plus de 40 mé dans les vertisols. Le taux de saturation en bases, proche de 20 % en haut de séquence, atteint 100 % à sa partie inférieure, en même temps qu'apparaissent l'accumulation de carbonates et une légère alcalisation ( $Na^+/T \sim 10\%$ ) du sol en profondeur.

L'évolution géochimique de l'altération, marquée par une perte relative en bases et en silice des produits minéraux secondaires, est reflétée par l'évolution du rapport molaire silice/alumine. Dans les sols ferrallitiques, nettement marqués par l'allitisation, ce rapport est inférieur à 2 ; il varie entre 2,3 et 4 dans les sols fersiallitiques et il dépasse 4 dans les vertisols.

e) CARACTÉRISTIQUES MINÉRALOGIQUES : les sols ferrallitiques sont caractérisés par la prédominance d'halloysite, de gibbsite, d'hématite et de goéthite. Les sols fersiallitiques présentent en mélange halloysite (prédominante) et argiles 2/1 (illite et montmorillonite), associées à de l'hématite. Les vertisols sont constitués en majeure partie de montmorillonite, à l'exclusion presque complète d'oxydes de fer libres. L'évolution minéralogique comme l'évolution géochimique, apparemment liées à la variation de l'intensité de la percolation de l'eau dans les sols, est donc très rapide et très bien caractérisée dans cette séquence.

## 2. Relation entre la pédogenèse et la zonalité climatique actuelle

La bonne concordance entre la distribution des sols anciens et la zonalité écologique pourrait amener à penser que ces sols se sont formés dans des conditions climatiques invariables et toujours identiques à celles observées actuellement. Nous avons précédemment décrits les sols jeunes formés sur les produits volcaniques les plus récents de la partie supérieure de la même séquence (QUANTIN, FERNANDEZ CALDAS, TEJEDOR SALGUERO, 1978). Nous avons conclu que les andosols désaturés, où il apparaît déjà de la gibbsite, dans conditions climatiques perhumides, pourraient avec un temps beaucoup plus long se transformer en sols ferrallitiques, comme cela a été observé dans divers îles volcaniques tropicales. De même, les sols bruns andiques situés dans la zone climatique suivante, à deux saisons, où il se forme en mélange de l'halloysite, des argiles 2 : 1 interstratifiées et de la goéthite, pourraient également évoluer vers des sols fersiallitiques. Les vertisols apparaissent en bas de séquence comme cela est observé sur le versant « sous le vent » des îles tropicales (COLMET-DAAGE, 1965), ou dans les régions tropicales à longue saison sèche (BOCQUIER, 1973).

Mais cette analogie, apparemment parfaite, entre la distribution des sols canariens les plus anciens et certaines séquences de sols volcaniques en région tropicale pose cependant un problème. Actuellement à Ténérife, le climat n'est pas tropical, mais plutôt subtropical, et même tempéré en altitude. En outre, les intensités pluviométriques annuelles sont très sensiblement inférieures à celles reconnues généralement pour la formation de tels sols : de 600 à 1.000 mm dans la zone supérieure correspondant aux sols ferrallitiques, 300 à 600 mm pour la zone intermédiaire relative aux sols fersiallitiques, 200 à 300 mm pour la zone inférieure où se trouvent les vertisols. Seul concorde apparemment le régime annuel de distribution des pluies : perhumide au sommet, à deux saisons bien contrastées au milieu, à saison sèche prédominante à la base de la séquence.

On pourrait en conclure que la zonalité écologique a persisté, depuis au moins le Pléistocène, sous l'effet d'un gradient topo-climatique, engendré par l'orientation prédominante des vents alizés venant du nord et la persistance d'une zone nuageuse à la même altitude, qui y conditionne un climat perhumide. Mais, au cours des fluctuations climatiques quaternaires, l'intensité pluviométrique aurait varié très sensiblement, tout en conservant le même régime annuel de distribution dans chacune des zones. Le processus d'altération et de genèse des constituants minéraux secondaires aurait été ainsi accéléré pendant les périodes de forte pluviométrie, pour se rapprocher des conditions tropicales.

Nous avons conclu de l'étude des sols les plus récents de la même séquence (QUANTIN, TEJEDOR SALGUERO et FERNANDEZ CALDAS, 1978), que le processus de ferrallitisation se poursuit encore dans les andosols désaturés de la zone perhumide, mais moins rapidement peut-être. De même, le processus de fersiallitisation semble atténué actuellement dans la zone intermédiaire, où il apparaît par contre des processus secondaires tels que l'illuviation des argiles et le développement d'une structure verticale à la base du profil, processus qui nous paraissent consécutifs d'un climat devenu plus aride. Enfin, dans les vertisols et la zone inférieure de la séquence, la genèse des argiles y paraît presque stoppée; mais la structure verticale s'y est développée au maximum, en même temps, ou un peu avant, que soient apparus successivement l'accu-

mulation calcaire, puis un début d'alcalisation, à la base du profil, processus consécutifs aussi d'une aridification croissante du climat (et peut être en outre de la modification importante de la végétation naturelle causée par la colonisation européenne).

Autrement dit, la reconstitution de l'histoire de la pédogenèse conduit à imaginer que les sols se sont formés dans des conditions en apparence analogues à celles actuelles, mais avec une variation importante de l'intensité pluviométrique, sans changement important du gradient topo-climatique, ni du régime annuel de distribution des pluies, et cependant en provoquant en bas de séquence une aridification récente et progressive du climat.

L'histoire des sols « anciens », au-delà de 10.000 à 20.000 ans, peut paraître une fois de plus comme complexe. Elle pose le problème de la concordance entre les conditions actuelles de leur environnement et les causes réelles de leur genèse. S'agit-il d'un phénomène monogénétique ou d'un processus polycyclique? Dans le cas de notre séquence septentrionale de Ténérife, des caractères évidents indiquent qu'il s'agit, au moins pour une part, de paléosols. Certains processus semblent se poursuivre, quoique probablement atténués, comme la ferrallitisation, dans les andosols désaturés. D'autres, nouveaux, sont apparus récemment, comme l'accumulation des carbonates de calcium, puis l'alcalisation dans les vertisols. On pourrait comparer la séquence de sols « anciens » du nord de Ténérife à une séquence climatique tropicale, sur laquelle se seraient sur-imposés récemment les effets, d'une part, du rajeunissement volcanique en haut de séquence, d'autre part, de l'aridification du climat en bas de séquence.

La séquence méridionale que nous avons précédemment décrite (TEJEDOR SALGUERO, QUANTIN, FERNANDEZ CALDAS, 1978), par son caractère plus aride encore, présente plus d'analogies avec les sols méditerranéens d'Afrique du Nord (RUELLAN, 1971). Ceci a l'intérêt de nous montrer qu'il existe, aux confins des régions méditerranéennes et tropicales, des analogies à établir entre ces deux régions et d'utiles comparaisons à faire, pour éclairer nos connaissances de la pédogenèse dans ces deux domaines, méditerranéen et tropical, arbitrairement séparés à nos yeux et dans nos esprits par le désert du Sahara.

*Manuscrit reçu au Service des Publications de l'ORSTOM le 10 décembre 1979.*

## BIBLIOGRAPHIE

- ALEIXANDRE (T.), PINILLA (A.), 1968. — Algunas modificaciones en las técnicas aplicadas al estudio de las fracciones gruesas o arenas. *Anales de Edaf. y Agrob.* Tomo XXVIII : 812-821.
- BOCQUIER (G.), 1973. — Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. Thèse, Mém. ORSTOM, n° 62, 350 p.
- BOTHELHO DA COSTA (J.), 1959. — Ferralitic, tropical ferralsitic and tropical semi-aride soils. C.R. 3<sup>e</sup> Conf. Interafr. Sols. Dalaba, vol. 1 : 371-419.
- BREWER (R.), 1964. — Fabric and mineral analysis of soils. J. Wiley, New York.
- 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, 2 : 91-121.
- COLMET-DAAGE (F.), *et al.*, 1973. — Etude des sols à allophane dérivés de matériaux volcaniques des Antilles et d'Amérique Latine à l'aide de techniques de dissolution différentielle. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XI, 2 : 92-120.
- CHATELIN (Y.), 1974. — Les sols ferrallitiques. Tome III : l'altération. ORSTOM *Sér. Init. Docum. Tech.*, n° 24.
- C.P.C.S., 1967. — Classification des sols. Lab. Géol. Pédol. de l'E.N.S.A. de Grignon, 68 p.
- DELIBRIAS (G.), 1976. — Datations de croûtes calcaires de sols de Ténérife. CNRS, Laboratoire des Faibles Radioactivités, Gig-sur-Yvette, rapport inédit.
- DELVIGNE (J.) *et al.*, 1975. — Report of the first meeting of the Subgroup on rock and mineral alteration. Gent, 23 p.
- ESWARAN (H.), BANOS (C.), 1976. — Related distribution patterns in soils and their significance. *Anales de Edaf. y Agrob.* 35 : 33-45.
- FEDOROFF (N.), RODRIGUEZ (R.A.), 1977. — Micromorphologie des sols rouges de Ténérife et de la Palma (Iles Canaries). Comparaison avec les sols rouges méditerranéens. Congrès Intern. Micromorphologie, Granada, avril 1977, 16 p., *multigr.*
- FEDOROFF (N.), BULLOCK (P.), 1977. — Principes et méthodologie de la description microscopique des sols. V<sup>e</sup> Int. Work. Meet. on Soil Micromorpho. Granada. Espana.
- FERNANDEZ CALDAS (E.), TEJEDOR SALGUERO (M.L.), QUANTIN (P.), 1979. — Séquence climatique des sols anciens de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canaries). 1<sup>re</sup> Partie : Ecologie, morphologie, caractéristiques physico-chimiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVII, n° 1 : 37-46.
- LAMOUREUX (M.), 1972. — Etude des sols formés sur roches carbonatées. Pédogenèse ferralsitique au Liban. Thèse, Strasbourg, *Mém. ORSTOM*, n° 56, 256 p.
- LAMOUREUX (M.), QUANTIN (P.), 1973. — Utilisation des courbes de vitesse de dissolution dans la méthode cinétique de Ségalen. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*; vol. XI, n° 1 : 3-15.
- MARTIN (D.), SIEFFERMANN (G.), VALLERIE (M.), 1966. — Les sols rouges du Nord Cameroun, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. n° IV, 3 : 3-26.
- MEHRA (O.F.), JACKSON (M.L.), 1960. — Iron oxides removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Nat. Confer. on Clays and Clay minerals*, 7, 1958 : 317-327.
- PEREZ MATEOS (J.), 1965. — Analisis mineralogico de arenas. *Manuales de Ciencia Actual* n° 1, C.S.I.C. Madrid.
- QUANTIN (P.), LAMOUREUX (M.), 1974. — Adaptation de la méthode cinétique de Ségalen à la détermination des constituants minéraux de sols variés. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XII, n° 1 : 13-46.
- QUANTIN (P.), 1972. — Archipel des Nouvelles Hébrides. Sols et quelques données du milieu naturel; Vaté, notice explicative, 1, carte h.t. ORSTOM, Paris 22 p.
- QUANTIN (P.), 1974. — Hypothèses sur la genèse des andosols en climat tropical. Evolution de la « pédogenèse initiale » en milieu bien drainé, sur roches volcaniques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XII, n° 1 : 3-12.
- QUANTIN (P.), 1976. — Sols des Nouvelles Hébrides. Note de synthèse, accompagnée de cartes schématiques des îles à 1/500.000<sup>e</sup>, avec une légende de corrélation entre classification française et les unités de la FAO. Paris, ORSTOM, 43 p.
- QUANTIN (P.), TEJEDOR SALGUERO (M.L.), FERNANDEZ CALDAS (E.), 1977. — Climato-séquence de la région méridionale de l'île de Ténérife (Iles Canaries). 1<sup>re</sup> Partie : Ecologie, morphologie, caractéristiques physico-chimiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XV, n° 4 : 391-407.
- QUANTIN (P.), FERNANDEZ CALDAS (E.), TEJEDOR SALGUERO (M.L.), 1978. — Séquence climatique des sols récents de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canaries). 2<sup>e</sup> Partie : Caractéristiques minéralogiques. Interprétation et classification. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVI, n° 4 : 397-412.
- RODRIGUEZ HERNANDEZ (C.M.), 1976. — Vertisoles y suelos de caracter vertico de las Islas Canarias Occidentales. Tesis Doctoral. Universidad de La Laguna.
- RODRIGUEZ HERNANDEZ (C.M.), FERNANDEZ CALDAS (E.), FEDOROFF (N.), QUANTIN (P.), 1978. — Les vertisols des îles Canaries Occidentales. Etude physico-chimique,

- minéralogique et micromorphologique. *Pédologie*, Gand, (Sous presse).
- RODRIGUEZ RODRIGUEZ (A.), 1977. — Contribution al estudio de los suelos fersialíticos de las Islas Canarias Occidentales (Ténérife, La Palma). Tesis Doctoral, Univ. La Laguna.
- RUPELLAN (A.), 1971. — Les sols à profil calcaire différencié des plaines de la Basse-Moulouya (Maroc Oriental). Thèse, *Mém. ORSTOM* n° 54, 302 p.
- SEGALEN (P.), 1968. — Note sur une méthode de détermination des produits amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*; Vol. VI, n° 1 : 105-126.
- SIEFFERMANN (G.), 1973. — Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Thèse, Strasbourg, 1969; *Mém. ORSTOM* n° 66, 183 p.
- TEJEDOR SALGUERO (M.L.), QUANTIN (P.), FERNANDEZ CALDAS (E.), 1978. — Climato-séquence de la région méridionale de l'île de Ténérife (Iles Canaries). 2<sup>e</sup> Partie : Caractéristiques minéralogiques. Interprétation et Classification. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVI, n° 1 : 83-106.
- TEJEDOR SALGUERO (M.L.), QUANTIN (P.), FERNANDEZ CALDAS (E.), 1979. — Séquence climatique des sols anciens de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canaries). 2<sup>e</sup> partie : Caractéristiques minéralogiques et micromorphologiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVII, n° 2 : 119-127.
- U.S.D.A., 1975. — Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys, 175 p.