

## PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES ANDOSOLS ET DES SOLS BRUNS ANDIQUES AU SUD DU MASSIF CENTRAL

P. BONFILS <sup>(1)</sup> et J. MOINEREAU <sup>(2)</sup>

avec la collaboration de B. CLÉMENT et J.M. KALMS

### RÉSUMÉ

*Les limites d'Atterberg et les états de l'eau ont été déterminés sur 124 échantillons, provenant d'andosols et de sols bruns andiques de deux plateaux basaltiques au sud du Massif Central (Escandorgue, Coiron). Les limites d'Atterberg ont été reliées aux teneurs en éléments fins et aux teneurs en matière organique, faisant apparaître une liaison étroite avec cette dernière pour les andosols, qui sont des matériaux compressibles et non plastiques, au contraire des sols bruns andiques dont la plasticité est liée à l'évolution des substances amorphes vers des formes d'argiles 1/1.*

*Les valeurs de la capacité de rétention et du point de flétrissement sont élevées pour les andosols, mais beaucoup moins que dans les sols sur cendres volcaniques des régions tropicales. L'eau utile est en relation avec le rapport limon fin/argile dans les sols bruns andiques, et avec les teneurs en matières organiques (substances humiques en particulier) dans les andosols. L'action des substances amorphes (allophanes, hydroxydes de fer, d'aluminium) est nette sur les différents états de l'eau, mais peu significative sur la disponibilité des réserves en eau.*

### SUMMARY

*The Atterberg consistency constants and the moisture values have been measured on 124 samples collected on both 8 andosols and 18 brown andic soils of basaltic highlands of the south of Massif Central (Escandorgue, Coiron).*

*The Atterberg limits have been correlated with fine fraction and organic matter contents ; a good correlation has been found with the latter for andosols, which are fluffy and not plastic materials. The andosols*

---

(1) Service d'Etude des Sols INRA, Montpellier.

(2) Chaire de Géologie, Pédologie ENSA, Montpellier.

*have a high moisture capacity and permanent wilting percentage, though lower than those of the andosols on volcanic ashes of tropical areas. There is a good correlation between the available water capacity and the silt/clay ratio in brown andic soils, and the humic matter contents in the andosols. The effect of amorphous compounds (alumino-silicates, hydroxides gels) is evident on the different moisture values but there is less significance with its availability.*

## INTRODUCTION

Au cours des dernières années, deux plateaux basaltiques de la bordure sud-orientale du Massif Central, l'Escandorgue et le Coiron, ont fait l'objet de prospections pédologiques détaillées (BERTRAND, 1969 ; MOINEREAU, 1966). Les caractères morphologiques, minéralogiques et chimiques des Andosols et des Sols Bruns « andiques » de ces régions ont pu être définis grâce au perfectionnement de techniques mises au point récemment. Le travail qui suit est une approche plus poussée des propriétés physiques fondamentales de ces deux groupes de sols.

Les deux unités étudiées se trouvent sur des roches-mères semblables : basaltes, tufs ou scories, mais à des altitudes différentes. Leurs caractères sont suffisamment éloignés pour qu'on les range dans deux classes différentes :

- d'une part, classe des andosols
  - groupe des andosols oligotrophes (dystrandepts), à des altitudes supérieures à 800 m, sous des conditions climatiques humides et fraîches.
- d'autre part, classe des sols brunifiés
  - groupe des sols bruns « andiques », à des altitudes variant de 400 à 800 m, sous conditions climatiques plus sèches.

Les déterminations ont porté spécialement sur la granulométrie après dispersion aux ultra sons, la densité apparente par la méthode densitométrique au champ et pycnométrique au laboratoire, les états de l'eau : limites d'Atterberg et courbes pF-humidité.

Des corrélations simples ont été cherchées entre les indices de plasticité, les valeurs de l'eau utile et les différents constituants du sol.

## 1. CONSTITUANTS PRINCIPAUX DES ANDOSOLS ET DES SOLS BRUNS ANDIQUES

### 1.1. GRANULOMÉTRIE

Les échantillons analysés sont efficacement dispersés à l'aide des ultra-sons en milieu ammoniacal à pH 8,5. La déferrication préalable par HCl est abandonnée car elle introduit de fortes variations de teneurs en argile dans des matériaux contenant de 10 à 15 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (BONFILS et DUPUIS, 1969).

ANDOSOLS. Les résultats sont présentés en considérant quatre horizons principaux :  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ , (B), C, en notant que l'horizon (B) peut être soit peu épais, soit confondu avec un  $A_3$  ou le sommet de C (horizon (B)/C).

Le matériau originel le plus fréquent est un basalte granulaire « à taches de soleil », avec des insertions de scories, juxtaposés ou superposés dans le même horizon d'altération.

TABLEAU I

GRANULOMÉTRIE DES ANDOSOLS SUR BASALTE. FRACTION EN POUR CENT DE TERRE FINE SÈCHE

Moyenne de 7 profils

| Horizons                | Profondeur (cm) | Terre fine | MO (%) | A (%) | LF (%) | LG (%) | SF (%) | SG (%) |
|-------------------------|-----------------|------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| $A_{11}$ .....          | 0-20            | 80         | 13,2   | 21    | 27     | 9      | 11     | 19     |
| $A_{12}$ et $A_3$ ..... | 20-40           | 75         | 7,1    | 21    | 31     | 8      | 11     | 22     |
| A/C ou (B) .....        | 40-60           | 60         | 4,1    | 20    | 28     | 12     | 13     | 23     |
| C .....                 | 60-80           | 50         | 2,1    | 10    | 25     | 14     | 15     | 34     |

En surface, la matière organique oscille entre 10 et 26 % et les profils les plus humifères se situent aux plus hautes altitudes de 850 à 1 000 m. La répartition de la matière organique à travers tout le profil est assez remarquable : on en retrouve encore 2 à 4 % dans les horizons C ou (B)/C à 80 cm de profondeur. Dans les premiers horizons, jusqu'en (B), le taux de colloïdes est assez constant, autour de 20 % avec des extrêmes de 15 à 30 % ; il diminue de moitié dans la roche-mère (10 %).

Les valeurs les plus élevées d'éléments fins  $A + LF = 60$  à 70 % correspondent à des profils sur scories et sur tufs, plus facilement et plus profondément altérés que les basaltes massifs, à cause de la plus grande porosité du matériau et de sa plus grande richesse en éléments de nature vitreuse.

#### SOLS BRUNS ANDIQUES

Dans les sols bruns andiques, la pierrosité est toujours élevée dès la surface, supérieure à 50 %, pour les basaltes. Dans les scories et les tufs le refus est constitué par des éléments de la taille des graviers et des gravillons. Les teneurs en matière organique ne dépassent pas 4 %, sous lande paturée, à des altitudes de 300 à 400 m.

Les différences granulométriques reflètent les différences de structure des roches-mères : basaltes, scories, tufs ; les compositions chimiques étant toujours très voisines d'après les analyses totales de roches [REMY et DUPUY 1967 (1), GRANGEON 1960].

Des variations importantes ont été observées dans les taux d'argile des horizons profonds (B)/C ou C, en relation avec le régime hydrique du profil et le drainage général. Par exemple, un profil sur scories, situé sur une légère pente en position très drainante, ne connaît qu'une faible argilification, la granulo-

(1) Résultats d'analyses communiqués à R. BERTRAND.

TABLEAU II

GRANULOMÉTRIE DE SOLS BRUNS ANDIQUES. FRACTIONS EN POUR CENT DE TERRE FINE SÈCHE

| Roches Mères                  | Horizons             | Profondeur (en cm) | Terre fine | MO (%) | A (%) | LF (%) | LG (%) | SF (%) | SG (%) |
|-------------------------------|----------------------|--------------------|------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Basalte<br>Moy.<br>10 profils | A <sub>1</sub> ..... | 0-20               | 51         | 3,9    | 20    | 35     | 17     | 10     | 14     |
|                               | A <sub>3</sub> ..... | 20-30              | 50         | 3,2    | 27    | 32     | 16     | 8      | 14     |
|                               | (B) .....            | 30-50              | 37         | 2,1    | 28    | 30     | 16     | 9      | 15     |
|                               | C .....              | 60-80              | 20         | 0,9    | 27    | 28     | 16     | 11     | 17     |
| Scories<br>Moy.<br>5 profils  | A <sub>1</sub> ..... | 0-15               | 70         | 3,1    | 16    | 30     | 17     | 15     | 19     |
|                               | A <sub>3</sub> ..... | 15-30              | 75         | 1,5    | 23    | 29     | 18     | 11     | 17     |
|                               | (B) .....            | 40-60              | 90         | 1,2    | 25    | 28     | 19     | 14     | 13     |
|                               | C .....              | 60-80              | 80         | 0,4    | 23    | 23     | 11     | 16     | 27     |
| Tufs<br>Moy.<br>4 profils     | A <sub>1</sub> ..... | 0-20               | 49         | 2,9    | 24    | 21     | 14     | 16     | 21     |
|                               | A <sub>3</sub> ..... | 20-40              | 53         | 1,4    | 31    | 19     | 15     | 14     | 20     |
|                               | (B) .....            | 40-60              | 30         | 0,8    | 38    | 21     | 13     | 9      | 18     |
|                               | C .....              | 60-100             | 68         | 0,3    | 37    | 21     | 18     | 8      | 16     |

métrie reste constante sur toute son épaisseur ; le fer libre et le fer amorphe ne représentent que le dixième du fer total. D'autres stations sur scories au contraire contiennent en profondeur des taux d'argile de 40 %, dans des stations temporairement engorgées.

Sur les basaltes compacts, la forte proportion de boules et de blocs en profondeur localise l'altération aux fissures inter-blocs où se produit une argilification très poussée : 44 % d'argile brun rougeâtre, avec des caractères fersiallitiques, sur le plateau de Carlencas. En règle générale, ce sont les tufs qui s'altèrent et s'argilifient le plus profondément mais l'âge des formations intervient également.

Des différences en éléments fins, liées aux roches-mères, expliqueront par la suite les différences constatées dans les états de l'eau des sols bruns andiques.

## 1.2. NATURE DE LA FRACTION MINÉRALE

Dans les andosols de l'Escandorgue et du Coiron, la présence de substance amorphes (allophane, hydroxydes) est révélée :

— par un flou important des diagrammes de diffractométrie X, après élimination de la matière organique,

— par un départ d'eau de constitution très important, à 140° - 160°, décelé à l'analyse thermique différentielle.

Après traitement alterné acide et basique (méthode cinétique de SEGALIN, 1968), les substances amorphes sont éliminées et le résidu, de nouveau analysé aux rayons X et à l'A.T.D. contient (1) :

(1) Déterminations de H. CHAMAYOU (Laboratoire de Pédologie ENSA, Montpellier).

— des silicates résiduels : labrador, augite en quantités importantes, serpentine, hornblende brune, olivine. à l'état de traces.

— des phyllosilicates de néoformation du type 1/1 : métahalloysite et halloysite.

La somme des substances amorphes extraites par la méthode SEGALIN est élevée dans les deux groupes de sols : ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_3$ ) compris entre 7 et 16 % dans les sols bruns andiques, et entre 13 et 25 % dans les andosols. La fraction sableuse, analysée avant tout traitement chimique et nettoyée aux ultrasons, est riche en augite et en olivine sur basalte, en verres volcaniques sur scories et tufs.

Dans les niveaux (B) d'argilification des sols bruns andiques, on retrouve les mêmes phyllosilicates 1/1 de néoformation que dans les andosols, cependant la métahalloysite y est plus abondante que l'halloysite.

### 1.3. NATURE DE LA FRACTION ORGANIQUE

La matière organique se trouve en quantité importante dans les andosols ; de plus, elle migre profondément jusque dans l'horizon d'altération. Elle est surtout fortement humifiée, à plus de 50 %. Les acides humiques et fulviques sont en quantités sensiblement égales dans la rhizosphère jusqu'à 40-50 cm de profondeur, puis les acides fulviques deviennent 4 à 5 fois plus importants que les humiques dans les horizons C, de 60 à 100 cm. Les liaisons matière organique - matière minérale sont très fortes, et les réactifs concentrés utilisés pour les séparer modifient toujours la constitution des composants.

## 2. POROSITÉ

Les calculs de porosité ont été effectués à partir de mesures :

- de densité réelle par la méthode pycnométrique,
- de densité apparente au champ avec le densitomètre à membrane et au laboratoire sur agrégats de sols enrobés de paraffine et plongés dans un pycnomètre à large ouverture.

### 2.1. DENSITÉ RÉELLE

Les densités réelles s'échelonnent de 2,32 à 2,70 pour les andosols ; le chiffre minimum correspond à l'échantillon de surface le plus humifère (25 % de matière organique). Les horizons profonds ont des densités de 2,60 à 2,70. Pour les bruns andiques, au contraire, la densité réelle varie peu de la surface à la profondeur, elle est de 2,60 en moyenne.

### 2.2. DENSITÉ APPARENTE ET POROSITÉ

Les mesures effectuées au densitomètre à membrane donnent des valeurs de densité apparente totale, dont il faut retrancher la part des éléments grossiers pour obtenir la densité apparente de la terre fine.

Les deux valeurs se déduisent l'une de l'autre par la relation :

$$D_{af} = \frac{D_a - x}{D_{ag} - x} \cdot D_{ag} \quad (\text{WACQUANT J.-P. 1968})$$

où  $D_a$  = densité apparente totale

$D_{af}$  = densité apparente de la terre fine

$D_{ag}$  = densité apparente des éléments grossiers (graviers, pierres)

$$x = \frac{\text{masse des éléments grossiers}}{\text{masse de l'échantillon total}}$$

TABLEAU III

POROSITÉ DE DEUX ANDOSOLS DE L'ESCANDORGUE

| Profil | Profondeur | $D_r$ | $D_a$ | $x$  | $D_{ag}$ | $D_{af}$ | Porosité (%) |
|--------|------------|-------|-------|------|----------|----------|--------------|
| N 12   | 25-35      | 2,61  | 1,10  | 0,30 | 2,40     | 0,91     | 65           |
|        | 35-65      | 2,70  | 0,93  | 0,20 | 2,40     | 0,80     | 70           |
| N 13   | 6-20       | 2,47  | 0,59  | 0,13 | 1,23     | 0,52     | 76           |
|        | 15-25      | 2,55  | 1,08  | 0,20 | 2,40     | 0,95     | 65           |
|        |            |       |       | 0,10 | 1,23     |          |              |
|        | 40-50      | 2,70  | 1,20  | 0,20 | 2,40     | 1,10     | 59           |
|        |            |       |       | 0,10 | 1,23     |          |              |

Le profil n° 12 contient des cailloux de basalte de densité 2,40, tandis que le profil n° 13 contient à la fois des cailloux de basalte et des graviers de nature pyroclastique (lapilli) de densité 1,23.

Pour les *andosols*, les valeurs de porosité les plus élevées : 65 à 76 % se situent dans la zone des rhizomes de fougères et des racines de genêts ; au-dessous, les porosités décroissent dans les basaltes, mais se maintiennent élevées, supérieures à 60 % dans les scories.

Dans les *sols bruns andiques* de l'Escandorgue et du Coiron, les densités apparentes totales sont élevées : 1,50 à 1,55, cependant du fait de la forte charge en cailloux dans tout le profil, les densités apparentes de la terre fine sont comprises entre 1,13 et 1,28, d'où des porosités de 52 à 57 %, valeurs supérieures à celles de sols minéraux moyennement texturés.

Parmi les caractères importants de différenciation des andosols vrais et des sols bruns andiques, on peut retenir une différence minimum de porosité de 10 % dans les horizons superficiels des deux unités.

### 3. CARACTÉRISTIQUES HYDRIQUES

L'étude des caractéristiques hydriques a consisté en déterminations des limites d'Atterberg et de l'eau retenue aux pF 2,0 et 4,2. Les regroupements des résultats ont fait ressortir nettement deux niveaux de valeurs, correspondant aux deux unités différentes « andosols » et « bruns andiques ».

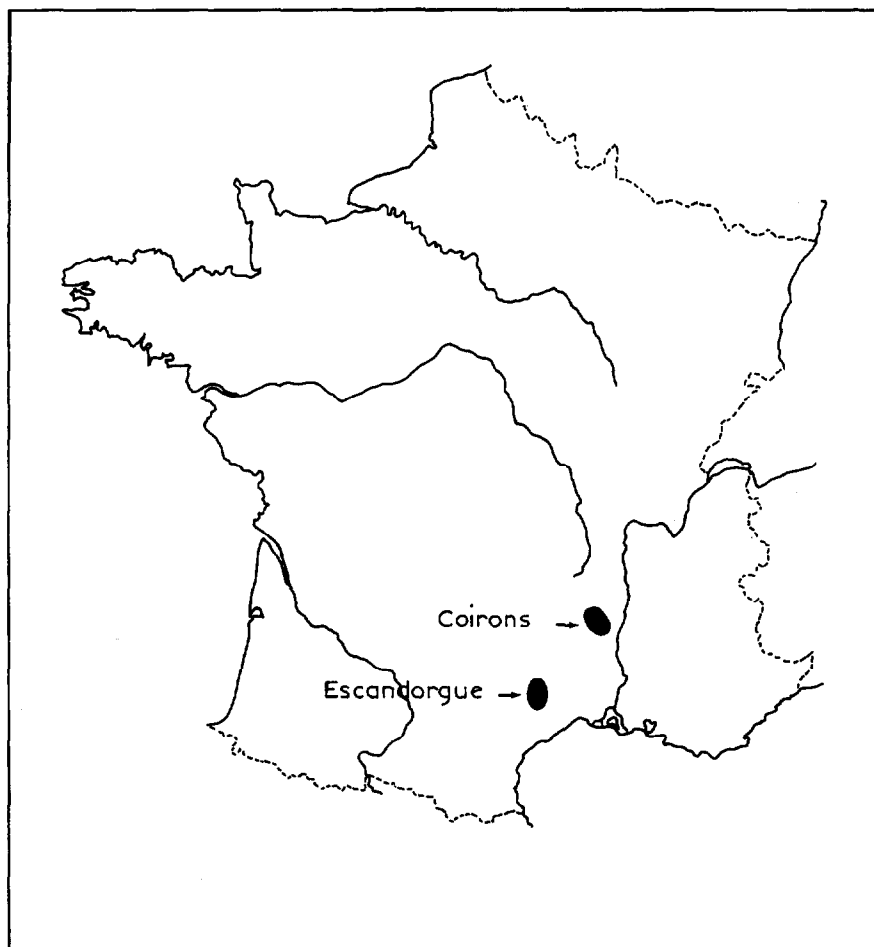


FIG. 1

Des caractéristiques importantes, comme l'indice de plasticité et l'eau utile, ont été reliées par des corrélations simples à divers constituants : taux d'éléments fins, teneurs en matières humiques, somme de substances amorphes.

### 3.1. LIMITES D'ATTERBERG

#### 3.1.1. Résultats des mesures

Toutes les mesures des limites d'Atterberg, comme des états de l'eau à différents pF, ont été effectuées sur échantillons conservés frais en boîte plastique.

ANDOSOLS. Les limites de liquidité LL, de plasticité LP et l'indice de plasticité IP ont été regroupés dans le tableau suivant :

TABLEAU IV  
LIMITES D'ATTERBERG POUR 8 ANDOSOLS EN POUR CENT DE TERRE SÈCHE

| Horizon                                  | LL   | LP   | IP  |
|------------------------------------------|------|------|-----|
| A <sub>11</sub> .....                    | 83,0 | 73,9 | 9,1 |
| A <sub>12</sub> et A <sub>13</sub> ..... | 59,9 | 55,3 | 4,6 |
| (B) .....                                | 53,7 | 46,4 | 7,3 |
| C .....                                  | 52,0 | 46,8 | 5,2 |

Dans les trois premiers horizons, les valeurs extrêmes vont de :

- 120 à 55 % pour LL,
- 114 à 50 % pour LP.

La limite de plasticité n'a pu être déterminée pour les échantillons à plus de 25 % de matière organique. Les limites d'Atterberg décroissent avec la profondeur en liaison avec les taux décroissants de matière organique. Les valeurs très élevées de la limite de liquidité et les valeurs très faibles de l'indice de plasticité permettent de classer les andosols comme :

- « limons » de forte compressibilité pour les horizons supérieurs organiques,
- « limons » de compressibilité moyenne pour les horizons moyens,
- sables sans cohésion ni plasticité pour certains horizons profonds sur basalte ou sur scories (fig. 2).

Avec des indices de plasticité inférieure à 10, il convient de parler de compressibilité plutôt que de plasticité. La valeur de l'indice IP dans les horizons (B) correspond à une teneur en argile un peu plus élevée dans ce niveau d'argilification. En profondeur, le matériau qui possède à la fois des valeurs élevées pour LL, LP, et des valeurs très faibles pour IP correspond à des scories et des tufs ; riches en sables vitreux, ils ont une forte porosité, mais sont sans cohésion et non plastiques.

#### SOLS BRUNS ANDIQUES

Moins humifères que les andosols, les sols bruns andiques sont un peu plus plastiques que ces derniers, ou moins compressibles.

Il n'y a pas de variations significatives de l'indice de plasticité du haut en bas du profil pour l'ensemble des valeurs. Si on compare les roches-mères, ce sont les sols sur tufs qui possèdent l'indice de plasticité le plus élevé de tout le profil : 12 % en moyenne, plasticité toute relative pour des teneurs en argile de 30 %. Dans le détail, le seul matériau vraiment plastique (IP = 24 %) est représenté par l'argile rouge, prélevée dans les fissures entre les blocs de basalte finement cristallisé sur les plateaux de moyenne altitude de Carlencas ; ces argiles ont des caractères nettement fersiallitiques.



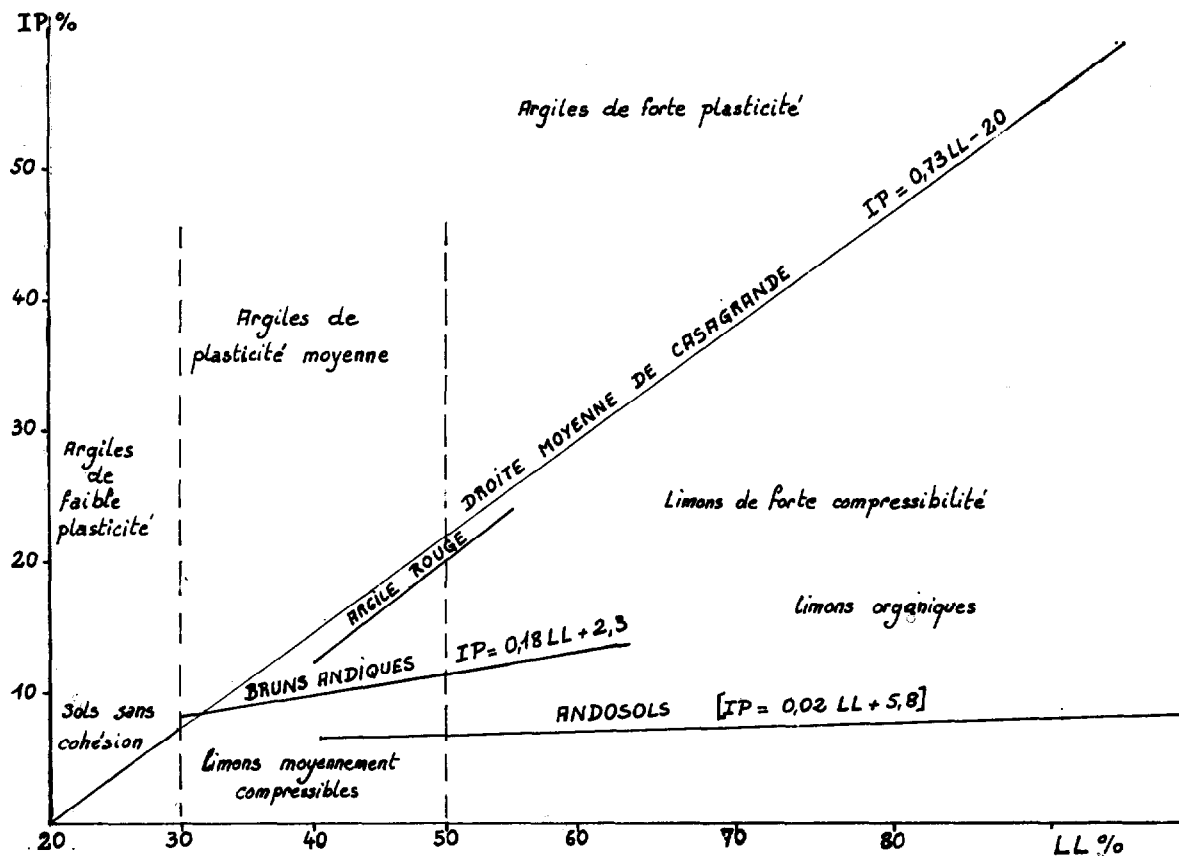


FIG. 2. — Place des andosols et des sols bruns andiques sur le diagramme de Casagrande.

### 3.1.2. Place des andosols et des sols bruns andiques dans le diagramme Plasticité - Compressibilité

Sur le diagramme de Casagrande, l'indice de plasticité est lié à la limite de liquidité par une relation linéaire définie comme « Droite moyenne de Casagrande »  $IP = 0,73 (LL - 20)$ . Les andosols et les sols bruns andiques forment deux populations distinctes, toutes deux éloignées de la droite moyenne représentant les matériaux plastiques.

Andosols  $IP = 0,02LL + 5,8$  Relation non significative

Sols bruns andiques  $IP = 0,18 LL + 2,3$  Relation significative (1)

Par contre les argiles rouges à caractères fersiallitiques se situent près de la droite moyenne de Casagrande.

(1) Toutes les corrélations sont données au seuil de probabilité  $P = 0,05$ .

TABLEAU V  
LIMITES D'ATTERBERG EN POUR CENT DE TERRE FINE SÈCHE

| Familles de sols                | Horizons                          | LL   | LP   | IP   |
|---------------------------------|-----------------------------------|------|------|------|
| Sols bruns andiques sur basalte | A <sub>11</sub> ou Ap             | 47,3 | 34,6 | 12,7 |
|                                 | A <sub>12</sub> ou A <sub>3</sub> | 42,0 | 33,5 | 8,5  |
|                                 | (B)                               | 41,1 | 31,1 | 10,0 |
| Moyenne 10 profils              | C                                 | 39,6 | 28,9 | 10,7 |
| Sols bruns andiques sur scories | A <sub>11</sub> ou Ap             | 46,1 | 40,0 | 6,1  |
|                                 | A <sub>12</sub> ou A <sub>3</sub> | 44,0 | 35,6 | 8,4  |
|                                 | (B)                               | 39,7 | 30,9 | 8,8  |
| Moyenne 4 profils               | C                                 | 43,6 | 33,0 | 10,6 |
| Sols bruns andiques sur tufs    | A <sub>11</sub> ou Ap             | 42,2 | 29,7 | 12,5 |
|                                 | A <sub>12</sub> ou A <sub>3</sub> | 40,7 | 28,8 | 12,9 |
|                                 | (B)                               | 38,6 | 27,8 | 10,8 |
| Moyenne 4 profils               | C                                 | 46,5 | 33,7 | 12,8 |

### 3.1.3. Relation entre les limites d'Atterberg et les éléments fins minéraux

Dans les sols bruns andiques, les limites d'Atterberg sont fonction des teneurs en éléments fins : Argile + Limon fin.

Pour 97 échantillons, nous avons les corrélations :

$$\left. \begin{aligned} LL &= 0,25(A + Lf) + 28,5 \text{ avec } r = 0,30 \\ LP &= 0,17(A + Lf) + 21,7 \text{ avec } r = 0,28 \\ IP &= 0,15(A + Lf) + 1,7 \text{ avec } r = 0,45 \end{aligned} \right\} \text{Corrélations significatives}$$

Pour les andosols, les liaisons : limites d'Atterberg x éléments fins ne sont pas significatives. Il est facile de démontrer que l'action de la matière organique l'emporte sur tous les autres facteurs.

### 3.1.4. Relations entre les limites d'Atterberg et la matière organique

Pour les sols bruns andiques et pour les andosols, les limites d'Atterberg peuvent se déduire des teneurs en matière organique MO par des relations linéaires :

SOLS BRUNS ANDIQUES, pour l'intervalle étroit 1 à 4 % de matière organique et 94 échantillons.

$$\left. \begin{aligned} LL &= 2,2 MO + 35,7 \text{ avec } r = 0,47 \\ LP &= 2,5 MO + 25,1 \text{ avec } r = 0,82 \end{aligned} \right\} \text{Corrélations significatives}$$

ANDOSOLS, pour l'intervalle 1 à 25,5 % de matière organique et 25 échantillons

$$\left. \begin{aligned} LL &= 2,7 MO + 41,1 \text{ avec } r = 0,82 \\ LP &= 2,7 MO + 34,3 \text{ avec } r = 0,83 \end{aligned} \right\} \text{Corrélations hautement significatives}$$

ou bien encore en fonction de la matière humique totale MHT exprimée en carbone ‰ dans l'intervalle 2,5 à 75 ‰ de carbone :

$$\left. \begin{array}{l} LL = 0,85 \text{ MHT} + 46,5 \text{ avec } r = 0,80 \\ LP = 0,89 \text{ MHT} + 38,8 \text{ avec } r = 0,82 \end{array} \right\} \text{Corrélations hautement significatives}$$

Par contre pour les deux groupes de sols, l'intervalle de plasticité IP n'a pas de relation avec la matière organique, ce qui confirme les résultats déjà obtenus avec des matériaux beaucoup moins humifères (BAVER, 1956 ; COMBEAU, 1964).

### 3.1.5. Conclusions pratiques : portance et façons culturales

La portance est définie par un facteur empirique

$$F = \frac{4\,250}{IP \times LL}, \text{ qui varie de 2 à 20}$$

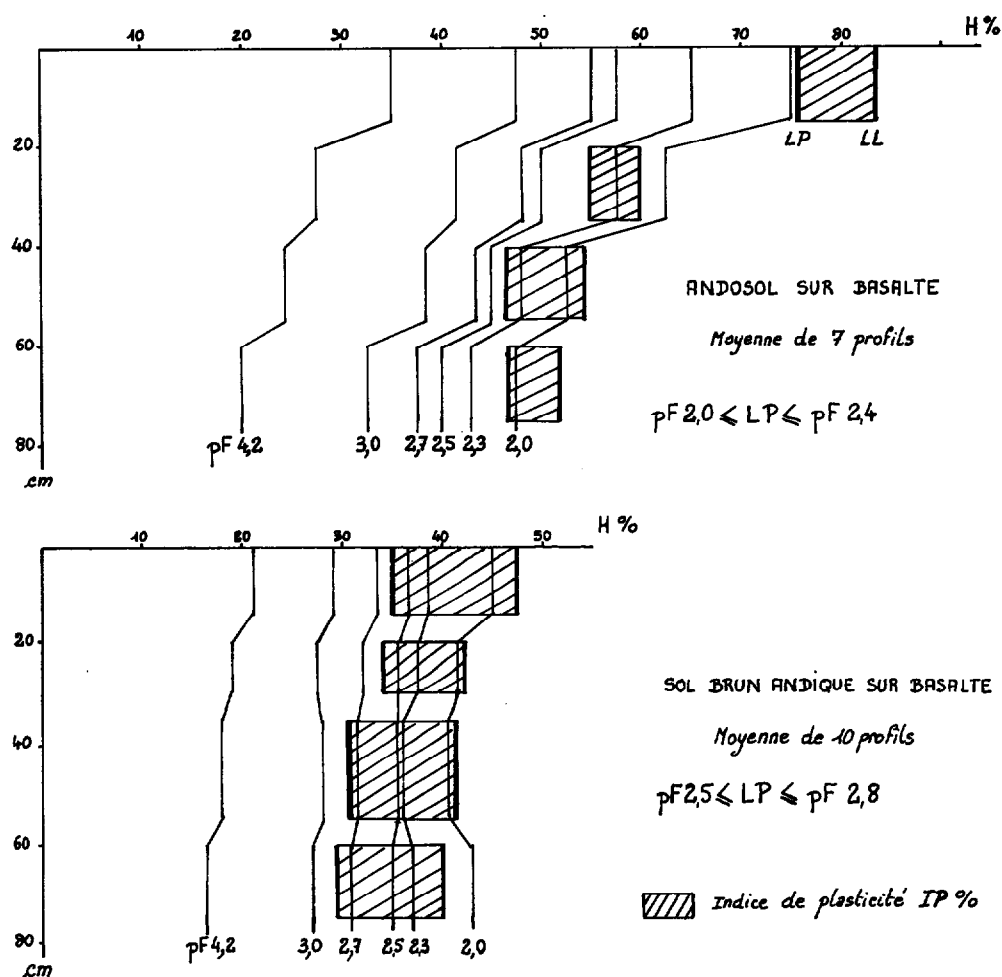


FIG. 3. — Etats de l'eau et limites d'Atterberg.

POUR LES ANDOSOLS :  $\bar{F} = \frac{9 \times 83}{4\,250} = 5,6$  et les valeurs calculées pour les 40 premières centimètres sont généralement inférieures à 10. La portance est inversement proportionnelle à la teneur en matière organique et peut s'abaisser jusqu'à 4.

POUR LES SOLS BRUNS ANDIQUES :  $\bar{F} = \frac{4\,250}{10 \times 45} = 9,5$  et la répartition des portances se fait entre 7 et 14, valeurs que l'on peut bonifier par la présence de cailloux.

Il est habituellement recommandé d'effectuer les labours et les façons culturales à un état hydrique voisin de la limite de plasticité pour obtenir des mottes qui se délitent et se brisent facilement. *Dans les andosols* cet état correspond à un pF de 2,0 et se trouve très près de la limite de liquidité (fig. 3).

Cette faible différence explique la facilité avec laquelle les andosols passent de l'état solide à l'état liquide sous l'effet de contraintes mécaniques. Lorsque le phénomène de thixotropie se déclenche, les engins mécaniques gâchent le sol et le réduisent en boue. Inversement, les labours en sol sec soulèvent un nuage de particules noires et donnent des volumes de terre soufflés. L'optimum d'humidité pour le labour correspond au pF 2,7 soit une valeur égale aux trois quarts seulement de la limite de plasticité, mais qui représente encore 50 à 60 % d'humidité.

DANS LES SOLS BRUNS ANDIQUES, la limite de plasticité est voisine de l'humidité à pF 2,7 et aucun phénomène de thixotropie n'est à craindre dans ce type de sol.

### 3.2. ETATS DE L'EAU A DIFFÉRENTS pF.

#### 3.2.1. Capacité de rétention et point de flétrissement

ANDOSOLS. Les humidités à différents pF, entre les valeurs 2,0 et 4,2 ont été regroupées par horizons, sauf pour l'horizon C du profil sur tufs qui s'écarte fortement de la moyenne des sols sur basalte. En effet, l'andosol sur tufs garde dans toute sa profondeur, des densités apparentes faibles et des porosités élevées (68 %) ; dans ce matériau originel, le point de flétrissement est 2,5 fois plus élevé que dans les horizons homologues sur basalte. Ces différences disparaissent dans les horizons (B) et dans les horizons superficiels, quelle que soit la roche-mère : basalte, tuf, scorie (fig. 3).

TABLEAU VI  
VALEURS DE L'HUMIDITÉ À DIFFÉRENTS pF. MOYENNE DE 7 PROFILS

| Horizons                                 | Profondeur (cm) | pF 4,2 | pF 3,0 | pF 2,7 | pF 2,5 | pF 2,3 | pF 2,0 | Eau utile (%) |
|------------------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| A <sub>11</sub> .....                    | 0- 20           | 34,0   | 46,5   | 54,0   | 56,5   | 63,5   | 74,0   | 20,0          |
| A <sub>12</sub> et A <sub>13</sub> ..... | 20- 40          | 27,5   | 41,0   | 48,5   | 50,5   | 56,5   | 62,0   | 21,0          |
| A/C ou (B) .....                         | 40- 60          | 24,5   | 38,5   | 43,0   | 45,0   | 48,0   | 52,5   | 18,5          |
| C basalte .....                          | 60- 80          | 20,0   | 32,5   | 37,0   | 40,0   | 43,0   | 47,0   | 17,0          |
| C tufs (1 échantillon) ....              | 120-160         | 49,0   | 58,0   | 63,0   | 63,5   | 64,5*  | 67,6   | 15,5          |

\* Valeur de pF adoptée pour la capacité de rétention en eau des tufs et des scories.

Le point de flétrissement est généralement supérieur à 30 % dans les horizons organiques ; quelques échantillons dépassent même 40 %. Dans les horizons profonds minéraux, les valeurs extrêmes vont de 14 à 25 % et la moyenne est de 20 %. Cette valeur est un des critères retenus comme essentiel pour les andosols dans la classification américaine. Sauf dans l'horizon profond de matériaux tuffacés, il y a décroissance des valeurs du point de flétrissement avec la profondeur en liaison avec la diminution de matière organique.

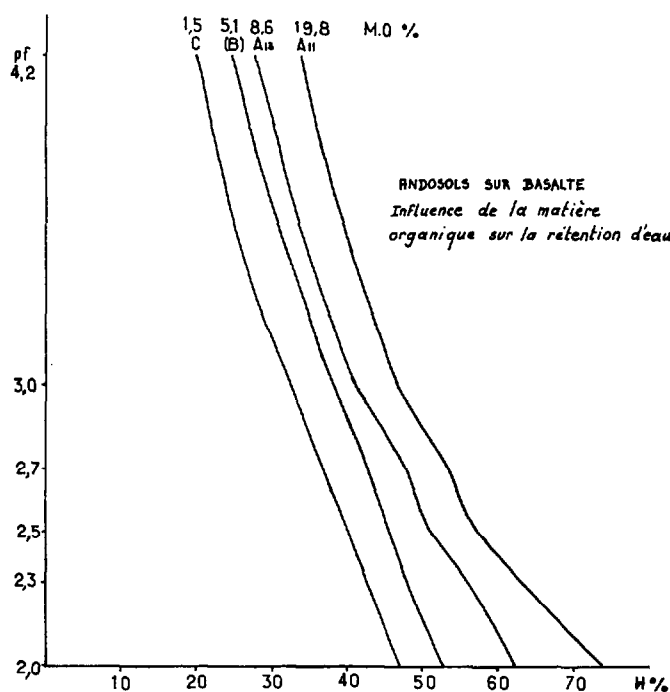


FIG. 4. — Courbes moyennes pF-humidité.

La valeur du pF 2,7 a été adoptée comme valeur de capacité de rétention en fonction des teneurs en éléments fins et en matière organique, sauf pour les horizons minéraux riches en sables vitreux où la valeur 2,3 a été retenue. C'est d'ailleurs dans la zone pF 2,5-2,7 que les courbes pF-humidité se rapprochent de la verticale indiquant une zone de grande variation de la rétention de l'eau par le sol pour une faible variation du volume d'eau.

Les capacités de rétention en eau dépassent 50 % dans les horizons superficiels et peuvent atteindre 70 %. Les valeurs moyennes font ressortir également la décroissance de la capacité de rétention avec la profondeur.

La rétention de l'eau est moins importante dans ces sols de régions tempérées que dans les andosols tropicaux (Antilles, Equateur, Nicaragua), formés surtout sur cendres volcaniques, où les points de flétrissement dépassent 100 % (COLMET-DAAGE, 1967).

#### SOLS BRUNS ANDIQUES

Les regroupements ont été effectués suivant les horizons et suivant les trois roches-mères couramment rencontrées : basalte granulaire, scories, tufs.

TABLEAU VII

VALEURS DE L'HUMIDITÉ À DIFFÉRENTS pF

| Roches mères               | Horizons                          | Profondeur (cm) | pF   | pF   | pF   | pF   | pF   | pF   | Eau utile (%) |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|---------------|
|                            |                                   |                 | 4,2  | 3,0  | 2,7  | 2,5  | 2,3  | 2,0  |               |
| Bruns andiques sur basalte | Ap <sub>1</sub> ou A <sub>1</sub> | 0-20            | 21,0 | 29,0 | 33,0 | 36,5 | 38,5 | 45,5 | 12,0          |
|                            | Ap <sub>2</sub> ou A <sub>3</sub> | 20-30           | 18,5 | 27,5 | 32,0 | 36,0 | 37,5 | 41,5 | 13,5          |
|                            | (B)                               | 30-60           | 18,0 | 28,0 | 31,5 | 36,0 | 36,5 | 41,0 | 13,5          |
|                            | C                                 | 60-80           | 16,5 | 27,0 | 31,0 | 35,0 | 37,0 | 43,0 | 14,5          |
| Bruns andiques sur scories | Ap <sub>1</sub> ou A <sub>1</sub> | 0-15            | 17,5 | 29,5 | 33,0 | 35,5 | 38,5 | 44,0 | 15,5          |
|                            | Ap <sub>2</sub> ou A <sub>3</sub> | 15-30           | 18,5 | 27,5 | 30,5 | 32,0 | 34,0 | 37,0 | 12,0          |
|                            | (B)                               | 40-60           | 18,5 | 28,0 | 31,5 | 34,0 | 35,5 | 39,5 | 13,0          |
|                            | C                                 | 60-80           | 21,0 | 33,0 | 36,0 | 39,0 | 42,0 | 45,0 | 21,0          |
| Bruns andiques sur tufs    | Ap ou A <sub>1</sub>              | 0-20            | 18,0 | 24,0 | 28,5 | 29,5 | 32,5 | 36,5 | 10,5          |
|                            | (B)                               | 40-60           | 20,0 | 26,5 | 29,5 | 31,0 | 35,0 | 37,5 | 9,5           |
|                            | C                                 | 60-80           | 23,0 | 35,5 | 36,0 | 40,0 | 42,0 | 44,5 | 19,0          |

Tandis que les valeurs de la rétention de l'eau diminuent avec la profondeur dans les andosols, dans les sols bruns andiques l'eau est retenue d'une façon égale dans tous les horizons où le taux d'éléments fins se maintient entre 50 et 60 %. En profondeur, la porosité naturelle du matériau devient prépondérante dans les sols sur tufs et sur scories, où les sables de nature vitreuse tiennent une place importante.

Les points de flétrissement varient de 17,5 à 21 % en surface et de 16,5 à 23 % en profondeur, les plus grandes variations étant toujours liées à la porosité du matériau originel (maximum d'écart dans les horizons C). Il est confirmé que les sols bruns andiques ont un point de flétrissement inférieur à 20 % tout au moins dans deux de leurs horizons.

### 3.2.2. Relation entre le point de flétrissement et différents états de l'eau

Le point de flétrissement HF peut se déduire de la limite de plasticité LP par une relation linéaire, pour les andosols comme pour les sols bruns andiques.

$$\text{Andosols} \quad \text{HF} = 0,36 \text{ LP} + 5,6 \quad \text{avec } r = 0,81$$

$$\text{Sols bruns andiques} \quad \text{HF} = 0,45 \text{ LP} + 3,8 \quad \text{avec } r = 0,73$$

relations toutes deux hautement significatives.

Pour de nombreux types de sols, le point de flétrissement a été relié à l'humidité équivalente, par la formule simple  $\text{HE} = k \text{ HF}$ , où  $k$  a une valeur moyenne de 1,84, mais peut être compris entre 1,2 et 3,4.

Le coefficient a été trouvé égal à  $1,58 \pm 0,12$  pour les andosols et à  $1,51 \pm 0,12$  pour les sols bruns andiques. Comme les deux moyennes ne sont pas significativement différentes pour les deux groupes de sols, les échantillons ont été regroupés en fonction de leur teneur en matière organique, supérieure ou inférieure à 5 %. Dans ces conditions, la relation devient :

HE = 1,50 HF pour les échantillons à moins de 5 % de matière organique (sols bruns andiques et horizons profonds d'andosols),

HE = 1,70 HF pour les échantillons à plus de 5 % de matière organique.

Ces relations peuvent être utilisées pour obtenir le point de flétrissement lorsqu'on ne dispose que de l'humidité équivalente, mesure rapide et facile à effectuer.

### 3.2.3. Liaison des états de l'eau avec les substances amorphes

La somme des substances amorphes ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) extraites par la méthode cinétique de Segalen sur échantillons frais est comprise entre les limites suivantes :

7 et 16 % pour les sols bruns andiques,

13 et 25 % pour les andosols.

En particulier, les quantités de fer extraites par l'acide 8 N sont très élevées sur ces roches, riches en éléments ferro-magnésiens. Les états de l'eau sont liés à la somme des substances amorphes S. Am. par relations significatives suivantes :

HR = 1,16 S. Am. % + 20,0 avec  $r = 0,54$

HF = 0,62 S. Am. % + 13,6 avec  $r = 0,42$

pour l'ensemble des andosols et des sols bruns andiques.

Les liaisons sont beaucoup moins fortes qu'avec la matière organique pour les andosols ou qu'avec les éléments fins pour les sols bruns andiques. Les deux dernières relations sont à la limite de la signification au seuil  $P = 0,05$ .

### 3.2.4. Influence de la dessiccation sur les courbes pF/humidité

COLMET-DAAGE (1967) a constaté que la dessiccation des échantillons à l'air libre diminuait fortement la rétention en eau des andosols fortement hydratés des régions tropicales. On constate un phénomène analogue, mais beaucoup plus réduit sur les andosols du Sud du Massif Central.

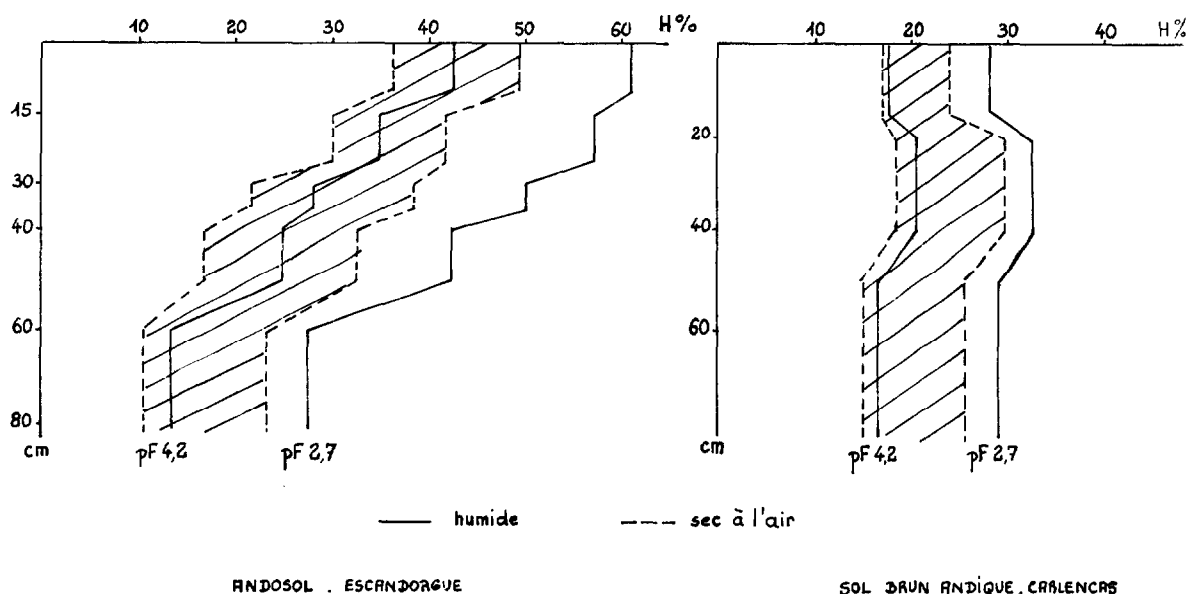


FIG. 5. — Influence de la dessiccation sur les états de l'eau.

Des mesures comparatives effectuées sur des échantillons frais et sur des échantillons séchés à l'air, à teneurs variables en matière organique, démontrent que pour les pF bas la matière organique accentue l'écart de rétention de l'eau et que cet écart est moins important pour les pF élevés (fig. 5). Des déterminations supplémentaires sont nécessaires pour montrer quelle est la part des substances amorphes.

TABLEAU VIII

ACTION DE LA DESSICCATION DES ÉCHANTILLONS SUR LES ÉTATS DE L'EAU

| Type de sol              | Profondeur (cm) | Matière organique (%) | Humidité % Echantillon frais |        |           | Humidité % Echantillon séché |        |           |
|--------------------------|-----------------|-----------------------|------------------------------|--------|-----------|------------------------------|--------|-----------|
|                          |                 |                       | pF 4,2                       | pF 2,7 | Eau utile | pF 4,2                       | pF 2,7 | Eau utile |
| Andosol de l'Escandorgue | 0-15            | 25,5                  | 42,7                         | 61,3   | 18,6      | 36,5                         | 49,1   | 12,6      |
|                          | 15-30           | 14,0                  | 35,2                         | 57,2   | 22,0      | 30,0                         | 41,7   | 11,7      |
|                          | 30-40           | 7,8                   | 28,1                         | 50,5   | 22,4      | 21,4                         | 38,5   | 17,1      |
|                          | 40-60           | 4,9                   | 24,8                         | 41,9   | 17,1      | 16,6                         | 32,6   | 16,0      |
|                          | 60-80           | 1,6                   | 13,3                         | 26,8   | 13,5      | 10,7                         | 23,0   | 12,3      |
| Brun andique Carlenas    | 0-20            | 3,4                   | 17,3                         | 27,3   | 10,0      | 16,5                         | 23,8   | 7,3       |
|                          | 20-50           | 1,6                   | 20,4                         | 32,7   | 12,3      | 17,8                         | 29,4   | 11,6      |

Pour les sols bruns andiques, les écarts d'humidité entre échantillons frais et séchés à l'air, respectivement aux pF 2,7 et 4,2, sont moins importants que pour les andosols.

### 3.3. VALEURS DE L'EAU UTILE

#### 3.3.1. Ordre de grandeur

L'eau utile, calculée comme la différence d'humidité entre les pF 2,7 (ou 2,5) et 4,2, a une valeur élevée (15 à 21 %) dans les andosols, et une valeur moyenne (10 à 15 %) dans les sols bruns andiques (tableaux VI et VII).

Dans les sols peu humifères, l'eau utile HU est proportionnelle à la teneur en limons fins LF et inversement proportionnelle à la teneur en argile A. C'est ce qui se vérifie pour les sols bruns andiques (85 échantillons)  $HU \% = 2,45 \frac{LF}{A} + 9,2$  avec  $r = 0,41$  ; tandis qu'il n'y a aucune liaison pour les andosols, où la rétention de l'eau par la matière organique prend le pas sur la rétention par les limons.

Pour confirmer cette assertion, l'eau utile a été reliée aux teneurs en matières humiques totales exprimées en carbone ‰ ; aucune corrélation n'a été trouvée pour les sols bruns andiques, tandis que pour les andosols la liaison est de la forme :

$$HU \% = 0,27 (MHT) \% + 14,2 \text{ avec } r = 0,84 \text{ pour } 16 \text{ échantillons.}$$



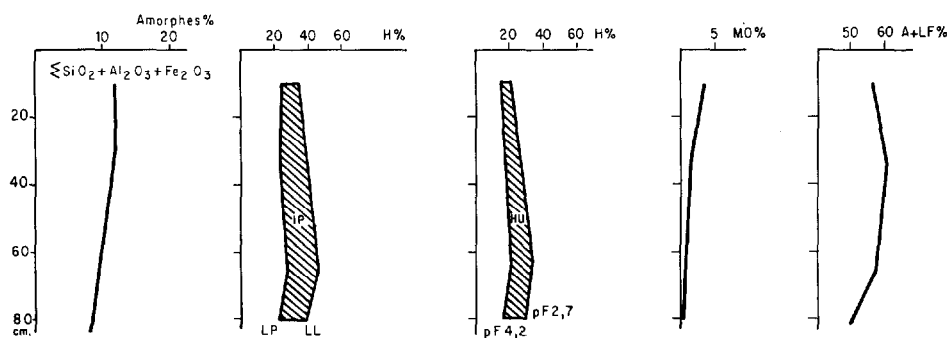
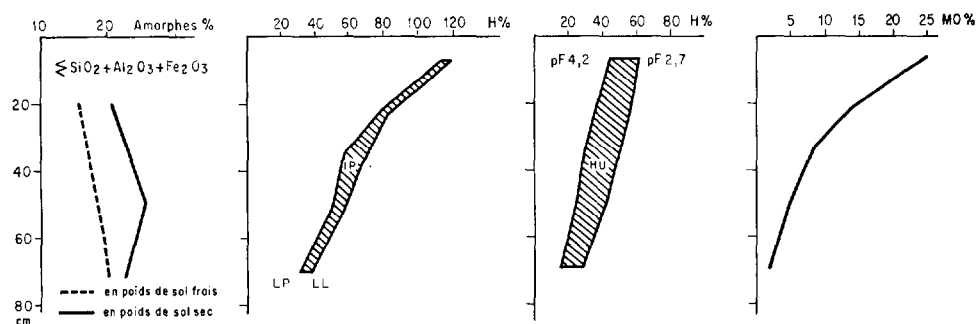
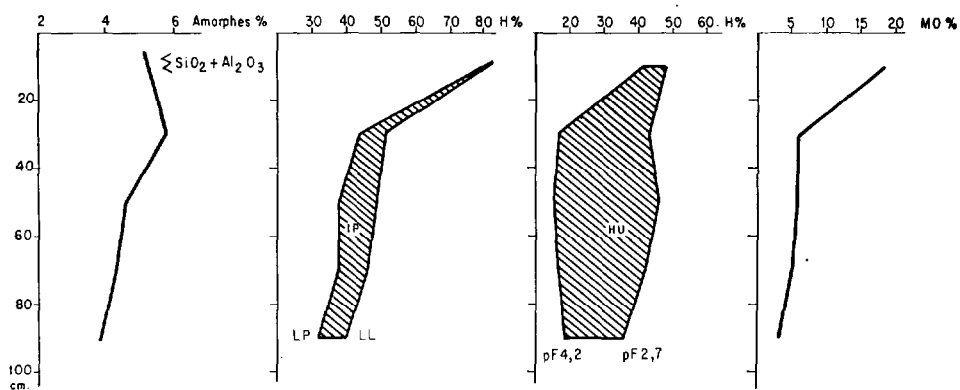


FIG. 6. — Relations entre l'indice de plasticité, l'eau utile et différents constituants.

Bien que les substances amorphes aient une action positive sur la rétention de l'eau à tous les niveaux d'humidité, la liaison entre l'eau utile et la somme des substances amorphes reste très lâche :

$HU = 0,54 \text{ S. Am. } \% + 6,5$  avec  $r = 0,47$ , relation tout juste significative au seuil  $P = 0,05$  pour 21 échantillons d'andosols et de sols bruns andiques.

### 3.3.2. Expression de la réserve totale et de la réserve utile

En cumulant les réserves en eau par horizons, la réserve totale d'un andosol s'établit entre 350 et 400 mm et la réserve utile à 125 mm, pour une profondeur de 80 cm et une pierrosité de 50 % dans l'horizon C. La réserve utile ne représente donc que 30 % de la réserve totale du profil.

Parallèlement, un sol brun andique, caillouteux sur toute sa profondeur, ne contient qu'une réserve totale de 155 mm et une réserve utile de 62 mm ; cette dernière représente alors 40 % de la réserve totale.

Le défaut d'être « séchard », reproché aux deux types de sols, peut être attribué à des causes différentes : le brun andique ne possède que de faibles réserves en eau sous un climat méditerranéen ; l'andosol d'altitude lui, peut se désécher rapidement au cours des premières journées d'été, du fait de sa grande porosité, et atteindre rapidement le point de flétrissement tout en gardant une humidité réelle importante. Ce serait là une des raisons de la forte concentration des rhizomes de fougères entre 20 et 40 mm de profondeur, en-dessous du premier horizon fortement desséché.

## 4. DISCUSSION

Dans les andosols de régions tempérées, la matière organique apparaît comme le facteur principal de la rétention de l'eau et également de sa disponibilité pour les plantes ; la désorption se fait rapidement sous l'effet de l'élévation de température et de l'absorption racinaire. Les substances amorphes sont également en relation avec les états de l'eau, mais l'eau utile ne semble pas liée avec ces substances, qui sont pourtant caractéristiques de ces sols. On peut l'attribuer à plusieurs causes :

- l'une de nature ; les substances amorphes sont fortement liées aux substances humiques, qui masquent leur effet surtout dans les horizons organiques.

- l'autre de méthode ; mal connues, les substances amorphes alumino-silicatées sont extraites d'une façon assez conventionnelle, et leurs relations avec les autres constituants restent imprécises.

- plus simplement, les substances amorphes augmentent parallèlement la capacité de rétention et le point de flétrissement ; l'eau utile, différence entre ces deux états de l'eau reste indépendante du taux de substances amorphes.

## CONCLUSION

Dans les sols bruns andiques du sud du Massif Central, les états de l'eau sont liés à la somme des éléments fins, tandis que dans les andosols ces états sont liés aux matières humiques. De ce fait, les

propriétés mécaniques des andosols se traduisent en termes de compressibilité, et non de plasticité. Pour les horizons profonds minéraux, la forte porosité de certains matériaux (scories, lapilli, tufs) s'altérant en sables de nature vitreuse, suffit à expliquer à la fois leur forte capacité pour l'eau et leur forte teneur en eau utile. Le rôle des substances amorphes (allophanes, hydroxydes de fer et d'aluminium) est important dans la rétention de l'eau à tous les potentiels mesurés, mais leur influence sur l'eau disponible ne paraît pas prépondérante en regard de celle des substances organiques.

Manuscrit déposé le 30 juillet 1971

## BIBLIOGRAPHIE

- BAVER (L.D.), 1956. — Soil physics. 3<sup>e</sup> ed. J. Wiley and Sons, New York, XVIII, 489 p.
- BERTRAND (R.), 1969. — Les sols des formations « volcaniques » de l'Hérault. Thèse. Sc. Paris, 3<sup>e</sup> cycle, IRAT, Paris, 102 p. *multigr.*
- BONFILS (P.), DUPUIS (M.), 1969. — Etude de la dispersion des colloïdes du sol à l'aide de vibrations ultra-sonores. *Bull. AFES*, n° 1, pp. 13-22.
- CLÉMENT (B.), 1970. — Etude des propriétés physiques des andosols et des sols andiques : recherches de corrélations entre les propriétés mécaniques et la rétention d'eau. DEA Pédologie, Fac. Sciences, Montpellier. 30 p. *multigr.*
- COLMET-DAAGE (F.), et al., 1967. — Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques, 1<sup>re</sup> partie : Essai de caractérisation des sols des régions tropicales humides. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. V, 1, pp. 3-82.
- COMBEAU (A.), 1964. — Remarques sur les facteurs de variations des limites d'Atterberg, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. II, 4, pp. 29-39.
- GRANGEON (P.), 1960. — Contribution à l'étude des terrains tertiaires, de la tectonique et du volcanisme du massif de Coiron. *Trav. Lab. Géol. Fac. Sci. Grenoble*, t. 36, 284 p.
- KALMS (J.M.), 1970. — Etude des propriétés physiques des andosols et des sols bruns andiques : recherches de corrélations entre la granulométrie, la densité apparente et les propriétés hydriques. DEA Pédologie, Fac. Sciences, Montpellier, 37 p.
- MOINEREAU (J.), 1966. — Etude des sols et des paléosols du Bas Vivarais. Thèse 3<sup>e</sup> cycle Fac. Sciences, Paris, 200 p. *multigr.*
- PÉRIGAUD (S.), 1964. — Travail du sol et limites d'Atterberg. *C.R. Acad. Agric.*, T. 50, pp. 57-66.
- SEGALEN (P.), 1968. — Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, vol. VI, 1, pp. 105-126.
- WACQUANT (J.P.), 1968. — L'analyse au laboratoire de la densité apparente des terres en vue de l'interprétation volumique des résultats d'analyses édaphiques. *Sci. du Sol*, n° 2, pp. 119-135.