

CHAPITRE II

LE SOL, SA DEFINITION, SES CONSTITUANTS

B.DABIN, P. SEGALEN

2.1. - Le sol : sa définition, ses horizons.

2.1.1. Historique

L'acceptation du mot sol a beaucoup varié au cours des temps ; elle a dépendu essentiellement de la façon dont on envisageait le sol et son utilisation.

Les premiers chercheurs étaient avant tout des agronomes qui avaient observé que toute plante puisait dans le sol les éléments nutritifs dont elle avait besoin pour son développement. Le sol fut donc considéré tout d'abord comme un support pour la végétation et une réserve pour son alimentation.

Certaines définitions furent donc très marquées par cette conception. C'est ainsi, par exemple, que MITSCHERLICH donne la formulation suivante : « Le sol est un mélange de particules solides pulvérisées, d'eau et d'air, qui servent de support aux éléments nutritifs des plantes ».

Puis RAMANN présenta le sol comme « la couche supérieure meuble de l'écorce terrestre. Elle comprend des roches qui ont été réduites en petits fragments et plus ou moins transformés chimiquement avec des débris de plantes et animaux qui vivent dessus et s'en servent ».

DOKUCHAEV avait considéré le sol sous un angle véritablement pédologique. Il prend une individualité propre différente de la roche-mère dont il est issu ; il est constitué par « les horizons supérieurs d'une roche qui a subi, plus ou moins, un changement sous l'influence de l'eau, de l'air et différentes espèces d'organismes vivants ou morts ; ce changement se traduit, dans une certaine mesure, dans la composition, la structure, la couleur des produits d'altération ».

Par la suite la définition se perfectionne encore et les différents auteurs s'efforcent de bien montrer l'individualité du sol qui est considéré comme un corps naturel. Pour JOFFE, « le sol est un corps naturel, de constituants organiques et minéraux, différencié en horizons d'épaisseur variable, qui diffèrent du matériau sous-jacent par leur morphologie, constitution physique, propriétés chimiques et composition des caractères biologiques ».

Cette définition insiste sur les points principaux suivants :

- 1 — L'individualité du sol (différent de la roche-mère dont il est issu).
- 2 — La constitution à la fois organique et minérale.

3 — La morphologie.

4 — Les propriétés physiques, chimiques et biologiques différentes de celles du matériau dont il dérive.

DEMOLON attire l'attention sur le fait que le sol est situé à la limite de l'atmosphère et de la lithosphère et qu'il apparaît comme la résultante de l'une sur l'autre. Le sol est alors « la formation naturelle de surface à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche-mère sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques ».

Il convient de rappeler ici qu'un « sol agricole » résulte de la transformation par l'homme des sols vierges en vue de l'obtention de récoltes. Cette transformation s'accompagne de modifications de la morphologie, des propriétés, et de la composition des sols.

L'examen du sol ne peut se faire que par l'observation soit dans une fosse creusée à cet effet, soit grâce à une coupe naturelle. Le sol se présente comme constitué d'un certain nombre de couches plus ou moins horizontales ayant des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques définies et dénommées **horizons**. L'ensemble des horizons depuis la surface jusqu'à la roche sous-jacente du sol est dénommé le **profil**.

2.1.2. Désignation et nomenclature des horizons

Les pédologues du monde entier désignent les différents horizons par des lettres majuscules A.B.C.R. Ils y attachent une signification qui peut varier légèrement d'un pays à l'autre. Les pédologues français ont adopté la terminologie suivante :

Horizon A

Cet horizon est subdivisé en A_{00} - A_0 - A_1 - A_2 - A_3 . L'horizon A est un horizon majeur occupant la partie supérieure ou l'ensemble du profil et présentant l'un ou l'autre des caractères suivants ou les deux en même temps :

a. Présence de matière organique.

b. Appauvrissement en constituants tels que argile, fer, alumine, etc.

Les horizons A_{00} , A_0 d'une part, les horizons A_1 , A_2 , A_3 d'autre part, se superposent dans l'ordre indiqué quand ils sont présents simultanément dans le profil.

A_{00} - Horizon de surface, formé de débris de végétaux facilement identifiables (feuilles, brindilles et autres) et non reliés ensemble par du mycélium. Cet horizon correspond à ce que divers auteurs désignent parfois par la lettre L.

A_0 - Horizon constitué principalement de débris végétaux partiellement décomposés et pratiquement non reconnaissables sur le terrain. Les horizons peuvent être subdivisés en F et H. La couche H se distingue de F par l'absence complète de structure végétale. A l'analyse, ils contiennent en général plus de 30 % de matière organique totale. Ils sont mesurés de bas en haut à partir du sommet de A_1 . Certains de ces horizons peuvent manquer.

L'horizon A_1 est un horizon minéral présentant en général moins de 30 % de matière organique bien mélangée à la partie minérale, et de couleur généralement sombre. Il peut être ou non un horizon éluvial.

L'horizon A_2 est un horizon de couleur plus claire que l'horizon sus-jacent ; il est appauvri en fer, en argile, en aluminium avec concentration corrélative de minéraux résistants. C'est un horizon d'éluviation par lessivage de matériaux en solution ou suspension. Les éléments se déplacent généralement à l'état dissous ou dispersés vers l'horizon B et/ou hors du profil.

L'horizon A_3 est un horizon de transition entre A et B, mais il est plus proche de A que de B. Si l'horizon de transition ne peut être valablement attribué à l'un ou à l'autre, on écrira AB.

Horizon B

Horizon majeur situé au-dessous de A et caractérisé par des teneurs en argile, ou en fer, plus élevées qu'en A ou C. Cet enrichissement peut être dû, soit à des transformations sur place des minéraux préexistants, soit à des apports illuviaux. On désigne alors cet horizon par B.

Si la variation de teneur est très faible et que la différenciation avec A ou C ne porte que sur la consistance, la structure ou la couleur, on désignera cet horizon par (B).

Une lettre minuscule, placée après B, précisera la nature de l'enrichissement ou de la différenciation.

L'horizon est divisé en :

B₁ Horizon de transition avec A, mais plus proche de B que de A

B₂ Horizon constituant la partie essentielle de B, correspondant soit à l'accumulation principale, soit au développement maximum de la différenciation.

B₃ Horizon de transition avec C, mais plus proche de B que de C.

N.B. On peut affecter les horizons d'un nouveau chiffre secondaire (tel que B₂₁, B₂₂, etc.) sans autre signification que d'avoir introduit une subdivision.

Horizon C

Horizon minéral, autre que la roche brute, placé sous B (ou sous A, s'il n'y a pas de B), analogue ou différent du matériau dont dérive la coupe AB et relativement peu affecté par les processus pédogénétiques ayant conduit à l'individualisation des horizons A et B sus-jacents et ne présentant pas leurs caractéristiques.

Horizon R

Roche brute sous-jacente.

En cas de discontinuité lithologique, on désigne chaque matériau originel par un chiffre romain qui précèdera l'horizon. S'il n'y a qu'un seul matériau, on omet le chiffre romain. Dans le cas de plusieurs matériaux, celui du dessus (I) peut être omis.

Ex. : A₁ - A₂ - B₁ - B₂₁ - II B₂₂ - II B₃ - II C₁ III C₂ - IV R.

Symboles utilisés pour désigner les caractéristiques particulières des horizons précédents :

Ca	Accumulation de calcaire	cf., ch. 5 pour plus de détails
cs	Accumulation de sulfate de calcium	
cn	Accumulation de concrétions ferroalumineuses	
g	Pseudogley	
G	Gley	
sa	Sels plus solubles que le sulfate de calcium	
p	Horizon labouré (ou perturbé)	
B _{2h}	Horizon d'accumulation humique	} des podzols
B _{2h} fe	Horizon d'accumulation ferrugineuse	
Bt	Horizon d'accumulation d'argile (textural)	
x	Fragipan : horizon induré à l'état sec, mou à l'état humide	
m	Horizon massif à forte cimentation	

2.1.3. Quelques définitions concernant des horizons particuliers ou bien des éléments caractéristiques des profils.

Certaines de ces définitions s'appliquent plus spécialement aux sols des régions tempérées mais peuvent, dans de nombreux cas, s'appliquer aux sols des régions méditerranéenne et intertropicale. On donne également quelques termes extraits de la 7^e Approximation de la classification américaine.

Horizons de surface ou horizons organiques

Les pédologues français et européens utilisent un certain nombre de termes pour désigner les horizons organiques qui diffèrent suivant qu'ils sont formés en milieu aérobie ou anaérobie.

- En sols bien aérés on connaît :

- Mor** La matière organique est mal décomposée et non incorporée à la matière minérale ; les transformations sont dues essentiellement aux champignons ; elle constitue un A₀ net et épais, de pH inférieur à 5,0.
- Moder** La matière organique est incorporée incomplètement à la matière minérale, il n'y a pas de complexe argilo-humique ; il existe des micro-agrégats organiques juxtaposés aux particules minérales ; les transformations biologiques sont fortes et dues aux insectes. La saturation est faible et le pH inférieur à 5,0.
- Mull** Le complexe argilo-humique est constitué et l'incorporation de la matière organique à la matière minérale est assurée dans l'horizon A₁. La microstructure est à base d'agréats de 0,1 à 1 mm ; les transformations biologiques sont fortes, l'action des vers est importante le pH va de 5 à 6,5. On parle de **mull calcique** lorsqu'il y a saturation par du calcium et magnésium, ou bien lorsqu'il y a du calcaire actif en abondance. La structure est en gros grumeaux très stables. Il y a synthèse d'une grande quantité d'acides humiques ; le pH va de 7,5 à 8,5.
- En sols non aérés, on connaît les produits suivants :
- Tourbe** L'incorporation de la matière organique à la matière minérale est nulle ou très faible ; les transformations biologiques sont peu importantes et des débris végétaux sont généralement bien reconnaissables.
- Anmoor** L'incorporation est à peu près complète ; la transformation biologique très forte avec une humification très poussée.

Les termes de mor et moder sont rarement employés pour les sols des zones méditerranéenne et intertropicale ; les pédologues discutent pour savoir si le terme de mull convient. Les termes de « mull calcique, tourbe et anmoor » semblent s'appliquer très bien à certains sols tropicaux et méditerranéens. En zone intertropicale on peut parler « d'humus équatorial » acide ou très acide, au C/N voisin de 10-12 (1) où l'acide fulvique l'emporte nettement sur l'acide humique, d'« humus tropical », moyennement acide au C/N voisin de 13-15 où l'acide humique et l'acide fulvique sont en proportions à peu près égales, d'« humus subaride » généralement peu abondant neutre, ou presque, au C/N voisin de 10 où l'acide humique l'emporte sur l'acide fulvique.

Les Américains ont subdivisé le profil en deux parties.

La partie supérieure est l'« **épipédon** », qui peut comprendre tout ou partie de A, éventuellement une partie de B. Elle est assombrie par la matière organique. Un certain nombre de types d'épipédons ont été distingués :

épipédon ochrique. La couleur est peu foncée. Les teneurs en matière organique sont faibles, le rapport C/N voisin de 10, les teneurs en bases modestes. De nombreux sols tropicaux présentent un tel épipédon.

épipédon umbrique. Les couleurs sont sombres, les teneurs en matière organique fortes, le cation dominant est l'hydrogène, le rapport C/N élevé. De tels épipédons sont présents dans les zones montagneuses fraîches mais pluvieuses de la zone intertropicale.

épipédon mollique. Les couleurs sont sombres, mais les teneurs en matières organiques peuvent être modestes, les cations bivalents saturent le complexe ; le rapport C/N est proche de 10 ; la structure est caractéristique. Cet épipédon est fréquent dans certains sols des zones assez sèches (il est comparable à l'horizon tchernozyémique et au mull calcique).

épipédon histique. Les couleurs sont sombres ; le plus souvent très acide et associé à l'eau (équivalent de tourbe).

Horizons de profondeur ou horizons minéraux

Les pédologues de langue française utilisent fréquemment, pour désigner les horizons profonds, quelques expressions dont les plus courantes sont rappelées ici.

Horizon B

— Horizon B **Textural** — Cet horizon B est enrichi en colloïdes (argile ou fer).

(1) La vitesse de minéralisation de la matière organique augmente lorsque le rapport C/N baisse et atteint son maximum pour une valeur optimum de 10 (DUCHAUFOR).

- Horizon « **structural** » ou (B) — Cet horizon diffère de l'horizon C par son degré d'altération plus prononcé et de l'horizon A par une structure plus marquée, en général plus compacte.
- Horizon **B de consistance** — Ce terme s'applique à un horizon B dont une caractéristique sera une consistance plus forte que dans A et C.
- Horizon **B de couleur** — Une caractéristique importante est une couleur prononcée.

L'horizon **tacheté** est caractérisé par une alternance de taches rouges ou ocre avec des plages blanches ou grises indiquant un mouvement local de fer.

Une **cuirasse** désigne un horizon riche en sesquioxydes de fer, aluminium et/ou titane et manganèse, associés à de la kaolinite, du quartz, suffisamment indurés pour ne se fragmenter qu'à l'aide du marteau ou de la barre à mine.

Une **carapace** a sensiblement la même constitution mais se fragmente beaucoup plus facilement (piochon ou pelle).

Le terme de **croûte** désigne un niveau durci riche en carbonate de calcium.

Un **alios** est un horizon durci riche en hydroxydes de fer et humus qui s'observe dans les podzols.

Les pédologues américains distinguent un certain nombre d'horizons qu'ils qualifient de caractéristiques et qui leur servent dans l'identification de certains sols.

L'horizon **argillique** correspond à un horizon illuvial où l'argile s'est accumulée, qu'on peut identifier par une augmentation importante d'argile ou bien par des revêtements sur les agrégats.

L'horizon **natrique** est une variété d'horizon argillique ayant une structure particulière en colonnes et plus de 15 % de sodium dans le complexe absorbant. On peut observer cet horizon dans les sols halomorphes.

Dans l'horizon **cambique** se produisent des changements tels qu'individualisation d'argile, de fer. La roche originelle n'est pas reconnaissable. Cet horizon constitue une transition vers l'horizon argillique ou oxisque. On l'observe dans des sols encore peu développés.

L'horizon **oxisque** est caractérisé par des oxydes ou hydroxydes de fer et aluminium et de la kaolinite. Il est poreux, n'a pas de structure très nettement définie, les couleurs sont variables. L'horizon oxisque est en fait l'horizon B des sols ferrallitiques.

Éléments particuliers dans les profils des sols des zones méditerranéenne et intertropicale.

Le terme **Gilgai** correspond à un microrelief rencontré dans des sols où l'argile montmorillonitique est abondante mais qui peut exister aussi dans des sols à kaolinite. On a une succession de petites dépressions avoisinant des buttes.

Mulch : formation d'une structure polyédrique fine aplatie en surface. On utilise aussi le terme « self-mulching » pour désigner un sol où cette structure s'obtient spontanément sans intervention humaine.

Slickenslides : appellation désignant des surfaces obliques de glissement dans un sol argileux (vertisol par exemple).

Concrétion : accumulation d'oxyde ou hydroxyde de fer et alumine ou d'oxyde de fer seul, généralement de petite taille et de forme arrondie, de structure concentrique, avec souvent une pellicule de couleur différente (plus foncée) que l'on trouve dans les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux.

Amas concrétionné : accumulation analogue, quant à la composition, à la précédente. Mais la forme est variable, avec des cavités plus ou moins importantes ; la taille est en gros celle du poing.

Gravillon : accumulation assez analogue aux précédentes mais provenant du fractionnement d'une cuirasse ou d'une carapace ; le plus souvent, elle est recouverte d'une patine sombre.

Nodule : accumulation de carbonate (de chaux surtout) arrondie, dure, de la taille d'un poids ou d'une bille que l'on trouve dans certains sols tels que les vertisols.

« **Stone-line** » : cette expression désigne une couche de cailloux (quartz, débris de roche ferruginisée ou débris de cuirasse), située à faible profondeur dans un profil et épousant en gros la topographie. C'est l'équivalent de nappe de cailloux ou nappe de gravats.

2.2. - Les constituants du sol.

2.2.1. Les constituants organiques des sols.

On distingue traditionnellement :

- les constituants organiques ;
- les constituants minéraux.

La matière organique des sols provient de la décomposition des produits d'origine animale et des produits végétaux qui s'accumulent à sa surface : débris de tiges, de feuilles, mais également de racines pouvant constituer une source de matière organique importante.

La décomposition s'effectue par voie biologique, les microorganismes : bactéries et les champignons attaquent les substances hydrocarbonées (cellulose) qui constituent des matières énergétiques et également les protéines ou matières azotées, qui peuvent être décomposées en acides aminés puis en ammoniacque.

Les matières carbonées sont souvent éliminées à l'état de gaz carbonique. L'ammoniacque est oxydée en nitrate qui sert à l'alimentation des plantes, ou est parfois réintégrée dans les microorganismes, ou éliminée dans les eaux de drainage. Cette production de gaz carbonique, de nitrates ou d'autres composés minéraux, phosphates, sulfates, à partir de la matière organique en décomposition, s'appelle la **minéralisation**.

Cette minéralisation est un processus essentiel pour la vie des plantes supérieures ; elle règle le cycle de la vie végétale et animale sur terre.

2.2.2. L'humus, son fonctionnement.

Outre la minéralisation, il se produit dans le sol une accumulation d'un résidu de couleur noire, résistant à la décomposition. Ce résidu qui possède des propriétés particulières porte le nom **d'humus** ; il est plus ou moins fortement lié à la matière minérale du sol.

Le complexe argilo-humique peut être séparé de la matière végétale non décomposée ; en agitant le sol dans une liqueur lourde de densité 2, l'humus stable est entraîné par densité avec les matières minérales lourdes. L'analyse de cet humus stable, montre qu'il est riche en carbone et azote, avec un rapport C/N voisin de 10. Il y a donc un fort enrichissement en azote par rapport à la matière végétale d'origine qui n'en contient pas plus de 2 %, avec un rapport C/N voisin de 50.

Chimiquement, cet humus peut être extrait par des solutions alcalines après décalcification du sol, ou par des sels alcalins complexants, comme le pyrophosphate de sodium à pH = 10. On obtient une solution noire d'humate de sodium. Cette solution noire est précipitée par un acide comme l'acide sulfurique.

La fraction insoluble en milieu acide est constituée par des composés appelés **acides humiques** qui sont très colorés.

La fraction restant en solution est incolore, mais contient néanmoins des composés organiques appelés **acides fulviques**.

La matière organique résistante aux attaques alcalines s'appelle l'**humine**.

2.2.3. Composition chimique de l'humus.

De nombreuses méthodes ont été appliquées pour déterminer la composition de l'humus :

- Analyse élémentaire.
- Hydrolyse et analyse des produits hydrolysés.
- Etude des spectres d'absorption aux rayons ultra-violetes ou infra-rouges.

L'analyse après hydrolyse a montré que l'humus contenait des corps à noyau aromatique avec des fonctions acide, phénol ou aldéhyde, tel l'acide vanilique.

On a constaté en outre, que, par exemple, la lignine extraite d'une paille en décomposition, présentait à l'analyse aux rayons ultra-violetts ou infra-rouges, un spectre très voisin de celui des acides humiques. Il semble donc que la lignine des végétaux soit une source essentielle de l'humus.

Des études plus récentes ont montré qu'il était possible d'hydrolyser les produits de décomposition de la lignine pour obtenir des composés résistant à une oxydation en milieu alcalin, soit en présence d'une diastase (la phénoloxydase), soit en présence de cultures de champignons, on provoque la formation de dimères puis de polymères donnant des produits colorés dont les propriétés sont très voisines de celles des acides humiques naturels. Une simplification des molécules et une augmentation de la proportion des noyaux aromatiques se produisent au cours de la polymérisation par décarboxylation, déméthylation, etc. ; il y a fixation d'acides aminés au cours de la polymérisation, avec des processus de désamination.

L'humification se produit donc en deux phases :

1) Destruction de la molécule de lignine et d'autres produits organiques en noyaux plus simples.

2) Recombination des noyaux et polymérisation (l'oxygène et un milieu alcalin la favorisent). La polymérisation des noyaux aromatiques peut être plus ou moins importante et l'on aboutit à des composés de poids moléculaires variables.

En schématisant le processus, les molécules peu polymérisées constituent les **acides fulviques**. Les molécules moyennement polymérisées constituent des acides humiques dits **Bruns**. Les molécules fortement polymérisées forment des acides humiques **Gris**.

Les acides humiques **Bruns et Gris** sont précipitables par les acides et il est possible de les séparer par une **électrophorèse**. Les **acides humiques** bruns sont plus mobiles et migrent vers l'anode. Les **acides humiques** gris se déplacent très peu sous l'action du courant électrique. Il est possible d'effectuer des diagrammes d'acides humiques et de déterminer leurs proportions relatives.

2.2.3. Formation des acides humiques.

En milieu mal aéré et fortement inondé, les champignons ne peuvent attaquer la lignine, et elle s'accumule, les autres composés étant décomposés par voie anaérobie (cas des tourbes).

En milieu aéré et très acide, les champignons attaquent la lignine et donnent des composés acides peu polymérisés, les acides fulviques. La polymérisation est favorisée par la présence de l'ion calcium et une alternance d'humidité et de sécheresse. La proportion d'acides humiques gris augmente dans les sols riches en calcium, et sous les climats alternés humides et secs. La proportion d'acides humiques bruns et fulviques augmente dans les sols acides et les climats humides.

Les podzols et les sols ferrallitiques très désaturés sont riches en acides humiques bruns, et pauvres en acides humiques gris. Les sols calcimorphes des régions sèches, les vertisols, les sols isohumiques sont riches en acides humiques gris ; la proportion d'acides humiques bruns peut être variable suivant les cas.

L'argile, et en particulier la montmorillonite, favorisent la fixation de l'humus sur le sol, et jouent un rôle protecteur contre la destruction de l'humus.

L'humification des matières végétales dépend de la température, de l'humidité, du pH.

Dans les régions froides, en montagne, dans les sols fortement inondés ou très acides, la matière organique s'accumule sous forme grossière et s'humifie peu. Le rapport C/N est supérieur à 15 ou 20.

Dans les régions chaudes, aux sols bien drainés et peu acides, la matière organique se décompose bien ; le rapport C/N est voisin de 10, la proportion d'acides humiques est plus importante.

2.2.4. Les propriétés de l'humus.

La nature de la matière organique grossière ou humifiée, la proportion relative des acides humiques ou fulviques, dépendent donc étroitement des conditions de climat, de roche-mère, de drainage, et aussi de la nature des produits végétaux (plus ou moins ligneux), c'est donc un élément en étroite liaison avec les conditions de la pédogenèse ; elle en est à la fois un excellent reflet et une cause importante de la formation des sols, par l'action dissolvante ou complexante des produits organiques formés.

Enfin, l'humus est un facteur essentiel de fertilité :

- par ses propriétés physiques sur la structure du sol ou la rétention d'eau ;
- comme réserve d'azote pour les plantes, et aussi de phosphore et de soufre ;
- comme colloïde possédant une forte capacité d'échange de bases (de l'ordre de 300 mé. pour 100 g) ;
- comme siège principal de la vie microbienne dans le sol ;
- comme élément tampon agissant sur presque tous les métabolismes de la nutrition des plantes ;
- comme source de substances de croissance.

2.3. - Les constituants minéraux.

On trouve dans les sols une variété assez grande de constituants minéraux ; mais dès le départ, il est essentiel de faire une distinction fondamentale entre les constituants dits « primaires » ou « hérités » qui proviennent intacts ou, en tout cas, peu modifiés de la roche dont est issu le sol, et les constituants « secondaires » formés dans le sol par transformation d'un minéral préexistant ou bien par synthèse après destruction complète des minéraux primaires.

2.3.1. Les minéraux primaires.

Ce sont, en général, les plus résistants des minéraux des roches-mères, ceux qui subissent le minimum de modifications par dissolution, hydrolyse, oxydation ou réduction dans le sol. Le plus important est le **quartz** abondant dans des roches comme les granites, gneiss, ou des roches sédimentaires comme les grès. Il faut un temps très long pour le faire disparaître des sols. D'autres minéraux primaires comme l'**ilménite**, la **magnétite**, le **zircon**, la **tourmaline**, etc., sont très résistants à l'altération et se retrouvent dans la fraction sableuse des sols évolués des régions tropicales. On peut également trouver des minéraux **altérables** comme les **feldspaths**, **amphiboles**, **pyroxènes**, etc. Ils indiquent alors que l'on a affaire à un sol peu évolué, ou bien que l'on est près de la zone de départ.

On peut trouver également dans un sol des minéraux argileux (formés généralement à partir des minéraux silicatés). S'ils se sont formés dans le sol où on les observe, ils sont typiquement de synthèse et sont passés en revue plus loin. Certains se sont formés dans des milieux tout à fait particulier, très riches en sels de magnésium et aboutissent à la formation de minéraux fibreux comme la **sépiolite** et l'**attapulgite**. Ces minéraux sont généralement peu stables dans les sols et sont rapidement remplacés par d'autres. Dans certains cas, cependant, on observe dans les sols des minéraux propres aux sols mais provenant des roches-mères situées au-dessous. Dans les régions méditerranéennes, les sols dérivés de calcaires renferment souvent des minéraux argileux contenus dans les roches sous-jacentes (kaolinites, illites ou montmorillonites). Il s'agit dans ce cas **d'héritage**. Les climats semi-arides étant relativement peu agressifs, il n'y aura que très peu de transformation ou de synthèse, mais plus spécialement **conservation**.

2.3.2. Les minéraux secondaires.

Ces minéraux se sont constitués au cours de la pédogenèse. Ils sont stables dans les conditions hydratantes, oxydantes ou réductrices du sol.

Ils résultent de « **transformations** » de minéraux préexistants sans modifications fondamentales de la structure LUCAS (1962). C'est le cas, par exemple, de la transformation de mica en hydro-mica. Ce minéral est en réalité un interstratifié de mica et vermiculite. Il résulte de l'enlèvement d'une partie des tenons potassium, non échangeables, et de l'introduction dans certains espaces interfoliaires d'ions magnésium et de molécules d'eau. Bien d'autres transformations sont possibles dans le sol.

Cependant, un grand nombre de minéraux résultent de « **synthèses** ». La structure des minéraux primaires (feldspathoïdes, feldspaths, amphiboles, pyroxènes, péridots, etc.) est très différente de celle des minéraux secondaires. On est donc amené à penser que les molécules primitives sont détruites jusqu'à former des ions. Ceux-ci réagissent avec l'eau pour former des hydroxydes, ou bien entre eux pour former des molécules complexes de silicates d'alumine, de fer, de magnésium. Dans la partie très humide de la zone tropicale, les hydrolyses sont très intenses, les synthèses sont prépondérantes et n'aboutissent qu'à un petit nombre de produits stables dans ces conditions. Par contre, dans les zones plus sèches, l'hydrolyse est moins intense et l'on aboutit à une gamme plus variée de produits.

On a pu distinguer plusieurs types de milieux générateurs de produits secondaires (MILLOT, 1964). Le milieu lessivé est fortement privé en bases et partiellement privé de silice ; il est favorable à la formation d'hydroxydes de fer et alumine et de kaolinite relativement pauvre en silice. Le milieu confiné est plus riche en bases et en silice. Ce milieu est peu favorable à l'individualisation de produits ferrugineux et alumineux mais par contre, la formation de minéraux argileux 2 : 1 est prépondérante.

Certains minéraux peuvent être considérés comme primaires ou secondaires. Le carbonate de calcium peut exister dans le sol lorsque la roche-mère est calcaire. Il s'agit alors d'un produit résiduel. Par contre, dans certains sols dérivant de roches non calcaires, l'abondance d'ions calcium, un drainage peu efficace, peuvent favoriser la formation de carbonate qui s'accumule dans le sol sous des formes très variables (pseudo-mycélium, nodules, croûtes, etc.).

2.3.3. Les produits de synthèse cristallisés.

On peut distinguer trois grandes catégories de produits : sels, silicates, oxydes et hydroxydes.

2.3.4. Les sels solubles.

Les sels apparaissent dans les sols surtout dans les conditions d'aridité marquée, ou bien lorsque le drainage est contrarié et déficient. Les métaux sont le plus souvent des alcalins ou alcalino-terreux, parfois aussi du fer. Les anions sont : l'ion carbonique fourni par le gaz carbonique de l'air ou la décomposition de la matière provenant de la matière organique ou de roches qui peuvent les contenir. D'une manière générale, le chlorure de sodium, le sulfate de chaux ne sont pas synthétisés dans le sol mais proviennent de dissolution de ces sels dans les sédiments qui les contenaient.

Le carbonate de calcium (CO_3Ca : le plus souvent calcite, rarement aragonite) est un produit facile à identifier grâce à sa réaction avec les acides. Il forme des accumulations très variées qui ont été étudiées par de nombreux auteurs, tels DURAND, RUELLAN et WILBERT (cf. chap. 5). Les sols de la zone méditerranéenne sont particulièrement riches en formes diverses d'accumulation calcaire (sols isohumiques, vertisols, etc.). Dans la zone intertropicale, ces accumulations sont peu fréquentes : pseudo-mycélium et nodules dans certains sols halomorphes, nodules dans les vertisols.

Le carbonate de magnésium ou giobertite, CO_3Mg , est peu fréquent. On l'observe en Nouvelle-Calédonie où les roches magnésienne (péridotites) sont abondantes.

Le carbonate de sodium, CO_3Na_2 , n'existe que dans les zones endoréiques où arrivent des solutions renfermant du sodium provenant de l'altération de roches à minéraux calco-alcalins (andésites, gneiss et granites divers). Si aucun autre anion n'est présent en proportion notable, il y a précipitation de **natron**, CO_3Na_2 , CO_3NaH , $2 \text{H}_2\text{O}$. C'est le cas de bassins fermés d'origine volcanique (Vallée de Mexico, Lac Natron au Kenya) ou bien de cuvettes lacustres rassemblant des eaux provenant du socle cristallin (cuvette tchadienne).

Le sulfate de sodium ou thénardite SO_4Na_2 est peu fréquent. Il est signalé dans le désert de Sonora au Mexique.

Les sulfures (de fer ou troilite, de sodium) ne constituent que des accumulations diffuses dans certains sols hydromorphes riches en matières organiques soufrées (mangroves). La boue est colorée en noir et a une odeur fétide caractéristique.

Les phosphates correspondent à des formes oxydées comme la **strengite** PO_4Fe , $2\text{H}_2\text{O}$, ou les **tarakanites** $(\text{PO}_4)_8\text{Al}_5\text{K}_3\text{H}_6$, $18 \text{H}_2\text{O}$ ou $(\text{PO}_4)_8\text{Al}_5(\text{NH}_4)_3\text{H}_6$, la **variscite** PO_4Al , $2\text{H}_2\text{O}$ et paraissent correspondre à l'action d'engrais phosphatés sur des sols ferrallitiques riches en fer et alumine.

Les formes réduites sont la **vivianite** $(\text{PO}_4)_2\text{Fe}_3$, $8\text{H}_2\text{O}$ qu'on peut observer dans les horizons de gley des sols hydromorphes sous forme de nodules verdâtres.

Les silicates d'alumine hydratés sont essentiellement les minéraux argileux. Il s'agit de minéraux phylliteux constitués de l'assemblage d'une ou deux couches tétraédriques et une couche octaédrique. Les tétraèdres, dont les sommets sont occupés par des ions oxygène ou des radicaux hydroxyle, sont centrés sur le silicium. Les octaèdres dont les sommets sont semblables sont occupés par Al , Fe^{3+} ou Fe^{2+} , Mg . Les différents groupes de minéraux argileux peuvent être classés de manière pratique, d'après l'épaisseur du feuillet élémentaire.

Famille de la Kaolinite La formule du minéral peut s'écrire 2SiO_2 , Al_2O_3 , $2 \text{H}_2\text{O}$ ou $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Son épaisseur est $d = 7,1 \text{ \AA}$ et comprend une couche tétraédrique et une couche octaédrique d'où la dénomination 1 : 1). Ni la couche tétraédrique siliceuse, ni la couche octaédrique alumineuse ne présentent de substitution. Deux feuillets consécutifs sont reliés par des ponts hydrogène qui assurent la cohésion en formant des paquets de feuillets, ou cristallites, visibles au microscope électronique. Aucun cation ne peut s'introduire entre les feuillets. La capacité d'échange (1) est peu élevée (5 à 15 mé/100 g) ; elle traduit l'existence de positions d'échange sur les bordures des cristallites.

La kaolinite bien cristallisée, qu'on peut trouver dans certains sédiments, est rare dans les sols. On observe fréquemment un minéral mal cristallisé dont le spectre de rayons X est caractérisé par l'absence de certaines raies et l'affaiblissement d'autres. Il s'agit de **Fire-clay**.

L'Halloysite est une variété de kaolinite présentant une couche d'eau insérée entre les feuillets, ce qui porte l'espacement de 7,1 à 10,1 Å . Cette eau peut être déplacée par chauffage de manière irréversible. Un peu d'eau peut subsister au hasard entre les feuillets, ce qui fait que l'espacement reste proche de 7,3 Å . C'est la **métahalloysite**. La capacité d'échange peut atteindre 40 mé/100 g. Au microscope électronique, le produit se présente sous forme de tubes.

Les argiles de la famille de la kaolinite sont très fréquentes et très abondantes dans les sols ferrallitiques. Elles sont également abondantes dans les sols ferrugineux tropicaux. Dans les autres sols de la zone intertropicale, ces minéraux ont un caractère subordonné ou sont absents. Ils sont responsables de la faible capacité d'échange et du faible pouvoir de fixation des bases telles que calcium et potassium. Leur rapport silice/alumine est très proche de 2,0. La présence d'alumine libre, dans les sols ferrallitiques, peut entraîner une diminution notable de ce rapport.

Famille de l'illite. Les minéraux ont une distance réticulaire invariable de 10 Å , avec une couche octaédrique enserrée entre deux couches tétraédriques.

La structure d'une illite est voisine de celle d'un mica. Dans la couche tétraédrique, environ 1 Si sur 6 est remplacé par Al. Il s'ensuit que des cations compensateurs sont nécessaires pour assurer l'équilibre des charges. Ce sont des ions K^+ (mais également Ca^{2+} ou Na^+ ou Mg^{2+}). Ces cations servent de ponts entre les feuillets ; ils ne sont pas hydratés ni échangeables. La dimension des particules d'illite est beaucoup plus faible que celle du mica. La capacité d'échange est de l'ordre de 30 mé/100 g. Le rapport silice/alumine est de l'ordre de 3,0.

Dans certaines illites, une partie de l'aluminium est remplacée par du fer trivalent : d'où le nom d'illite ferrique. La **sérlcite** est un produit dont les relations avec l'illite paraissent certaines.

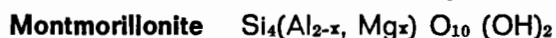
(1) Capacité d'échange = somme de cations, exprimée en milléquivalents, que peut fixer un sol.

Elle apparaît comme intermédiaire entre les feldspaths et la kaolinite. La **glauconite** appartient également à la famille de l'illite.

Dans les sols des régions tropicales humides, l'illite ne saurait être considérée comme un constituant habituel, si ce n'est dans un stade de jeunesse, ou bien par suite d'héritage (à partir de schistes par exemple). Dans les sols des pays subarides ou méditerranéens, l'illite est fréquente mais ne saurait être considérée comme caractéristique d'un type précis de pédogenèse.

Famille des Montmorillonites (dans les ouvrages anglais, ces produits sont dénommés **smectites**).

Les minéraux de cette famille ont une distance réticulaire variant de 12 à 14 Å, et l'espacement entre deux feuillets est variable. Le feuillet présente trois couches : une octaédrique avec comme métaux Al, Fe ou Mg et deux couches tétraédriques. Des substitutions peuvent avoir lieu dans les couches tétraédriques et octaédriques. La compensation des charges nécessitera la présence dans l'espace interfoliaire de nombreux cations hydratés.



Si tout ou une grande partie de l'aluminium de la beidellite est remplacé par du fer, on aura un produit nommé **nontronite**. Il est difficile de tracer une frontière précise entre les divers produits ; en fait, il y a presque toujours des substitutions et dans la couche tétraédrique (Si par Al) et dans la couche octaédrique (Al ou Fe par Mg) ce qui fait que les montmorillonites, au sens large, constituent une famille assez homogène.

Les nombreuses substitutions, en couche tétra ou octaédrique, sont compensées par la présence de nombreux cations interfoliaires hydratés et échangeables. Leur présence fait que l'espacement est porté à 14 Å environ. L'eau interfoliaire est déplaçable réversiblement, à moins de chauffer par trop l'échantillon. La capacité d'échange est de 80 à 120 mé/100 g. Le rapport silice/alumine est le plus souvent compris entre 3 et 4.

Les montmorillonites sont fréquentes dans les sols des pays subarides ou associés à un drainage défectueux. Certains sols rouges tropicaux en renferment des proportions notables. Elles constituent l'essentiel de la fraction argileuse des vertisols. Certains sols rouges des régions méditerranéennes (dérivés de basalte par exemple) en renferment de fortes proportions.

Famille des vermiculites.

Les minéraux de cette famille ont un feuillet de 10 Å, 2 couches tétraédriques et 1 couche octaédrique. Le cation dominant de la couche octaédrique est essentiellement bivalent (Mg^{2+} ou Fe^{2+}) ; la couche tétraédrique est fortement substituée avec une capacité d'échange de 100 à 150 mé. Les cations compensateurs interfoliaires sont du magnésium fortement hydraté, ce qui amène l'espacement à 14 Å.

La **vermiculite** résulte de l'altération des micas. Si elle est banale dans les sols des pays tempérés, il ne semble pas en être de même dans les sols des pays tropicaux où elle est rarement signalée, si ce n'est à la base de certains profils.

Famille des chlorites.

Les minéraux de cette famille ont une équidistance stable de 14 Å. Ils sont composés de deux parties : la première est un feuillet de type mica trioctaédrique, avec des substitutions à la fois tétraédriques et octaédriques ; la seconde est un feuillet (1) où le magnésium non échangeable compense les déficits de charge de la couche de mica. La capacité d'échange est due aux valences libres des bords des cristaux et est de l'ordre de 30 mé/100 g.

(1) dit Brucitique par analogie avec celui de la Brucite $\text{Mg} (\text{OH})_2$.

Les pseudo-chlorites (ou chlorites gonflantes).

Ces minéraux ont des analogies certaines avec les chlorites. Le feuillet brucitique où les octaèdres sont occupés par Mg mais aussi par Al ou Fe^{3+} est incomplet ou discontinu. Il se forme des « piliers » qui n'empêchent pas le gonflement de l'édifice sous l'influence du glycol mais empêchent l'écrasement de la structure à la chaleur. Ce sont des chlorites imparfaites qualifiées de « chlorites gonflantes ».

Les minéraux interstratifiés sont constitués par l'empilement régulier ou irrégulier de feuillets de différents types, ayant des structures de minéraux connus. Les interstratifiés sont de plus en plus souvent observés dans les sols.

Les oxydes et hydroxydes.

Divers produits sont présents dans les sols tropicaux en proportion variable sous forme d'oxydes et d'hydroxydes. Les dérivés du fer et de l'alumine sont très abondants ; ceux du titane et du manganèse le sont beaucoup moins, bien que très constants.

Le fer et l'alumine ont beaucoup de points communs : ils forment des sesquioxydes M_2O_3 , des hydroxydes MOOH et $\text{M}(\text{OH})_3$ présentant des structures identiques. Une différence fondamentale est la possibilité pour le fer d'exister sous deux valences (2 et 3), tandis que l'aluminium n'en possède qu'une. Dans la littérature, on trouve souvent une abondance de noms pour désigner les produits ferrugineux du sol (Ilmonite, limnite, turgite, xanthosiderite, hydrohématite, etc.) ; ces noms désignent en fait des produits impurs, des mélanges. La mise en œuvre de techniques d'analyses modernes a réduit le nombre des constituants ferrugineux du sol au petit nombre qui suit.

Les oxydes.

Le corindon Al_2O_3 , la magnétite Fe_3O_4 ne sont pas formés dans les sols. Si on a pu les y identifier, ce n'est que par suite d'héritage. L'oxyde de fer Fe_2O_3 existe sous deux formes : hématite et magnétite.

La maghémite Fe_2O_3 est un produit magnétique, cristallisant dans le système cubique. Il résulte de l'oxydation de la magnétite, ou bien de la déshydratation ménagée de la lépidocrocite. Il est encore mal connu dans les sols où il semble associé aux phénomènes d'oxydoréduction.

L'Hématite α Fe_2O_3 est au contraire un produit banal des sols tropicaux. Il cristallise dans le système rhomboédrique ; il se présente sous forme de petits cristaux rouge sombre ou gris foncé ou sous forme de poussière rouge vif. Sa densité est de 4,9 à 5,3, sa dureté 5 à 6.

Elle apparaît fréquente dans ces sols qui sont assurés d'un bon drainage et se développent dans des climats à saison sèche très marquée. Elle n'a pas de capacité d'échange et ne paraît pas jouer un rôle particulier dans le sol.

Les Hydroxydes : Deux familles d'hydroxydes de formule MOOH et $\text{M}(\text{OH})_3$.

Les hydroxydes MOOH peuvent se subdiviser en deux groupes α et γ qui diffèrent par leur système de cristallisation. Les hydroxydes α sont représentés par le diaspore et la goéthite.

Le **Diaspore** α AlOOH est présent dans certaines bauxites qui ont été soumises à des compressions et chauffage. Ce n'est pas un produit des sols.

La **Goéthite** α FeOOH est, au contraire, un minéral ferrugineux banal à la fois des sols des régions tempérées et tropicales. Sa couleur est brune à rouge, sa poussière jaune. Sa densité 3,8 à 4,4 ; la dureté 5.

La goéthite apparaît comme un constituant très courant des sols ferrallitiques développés sous des climats à longue saison des pluies. Mais on l'observe également dans les sols ferrugineux tropicaux et ceux des régions méditerranéennes. Dépourvu de capacité d'échange, ce produit ne paraît pas jouer de rôle particulier. Les hydroxydes γ sont la boémite et la lépidocrocite.

La **Boémite** γ AlOOH est un constituant banal des bauxites du midi de la France. Il est assez connu dans les sols ; il a cependant été identifié dans un certain nombre de cuirasses. Sa genèse

est alors expliquée comme une déshydratation de la gibbsite. La boehmite est un produit blanc, de densité 3,01 à 3,06, dureté 3,5 à 6,5. Pas de capacité d'échange.

La lépidocrocite γ FeOOH est encore peu connue dans les sols et les roches. Sa couleur est jaune orangé, sa densité 3,95, dureté 5. On l'observe dans certains sols hydromorphes, rarement ailleurs.

La Gibbsite Al(OH)₃ (autre nom : hydrargillite) n'a pas d'équivalent ferrugineux. Ce minéral est extrêmement fréquent dans les sols ferrallitiques dont il est un constituant banal. Il est absent des autres sols à sesquioxydes tels que ferrugineux tropicaux ou méditerranéens. Le minéral est blanc, dureté 2,5 à 3,5, densité 2,3 à 2,4. Il peut exceptionnellement se présenter sous forme de paillettes incolores, constituer de petits nodules ou des amas assez gros. Mais la plupart du temps, il est finement dispersé. La structure de ce minéral est phylliteuse, et résulte de la jonction par leurs arêtes d'octaèdres où Al occupe les centres et OH les sommets. La capacité d'échange est nulle.

Autres produits : quartz ; oxydes et hydroxydes de titane et manganèse. Alors que les produits précédents présentent des teneurs souvent élevées (25 % pour certains d'entre eux), les dérivés du titane et du manganèse dépassent rarement quelques pour cent, mais leur présence est très fréquente sinon constante.

Plusieurs auteurs ont signalé du **quartz de néoformation** dans certains sols ferrallitiques. Dans la très grande majorité des cas, le quartz des sols des régions intertropicale et méditerranéenne est hérité de la roche-mère.

Dérivés du Titane : Les produits titanés du sol sont essentiellement des oxydes. On trouve certes du **Rutile** TiO₂, de l'**Ilménite** FeTiO₃, mais il s'agit de produits hérités. L'altération de minéraux plus complexes comme le **Sphène** Ca,Ti(OH, F),SiO₄ ou l'**augite titanifère** des basaltes, aboutit à l'**anatase** TiO₂ (système cristallin différent du rutile). On parle souvent de la **Leucoxène**, mais il s'agit de rutile micro-cristalline.

Les sols tropicaux et plus spécialement les sols ferrallitiques accumulent un peu de titane (0,5 à 3 % dans les sols dérivés de roches acides, 2 à 6 % dans les sols dérivés de roches basiques). Dans certains cas exceptionnels, on atteint 18 % (aux îles Hawaï).

Dérivés du Manganèse : Les produits manganésifères du sol sont peu nombreux, malgré l'extrême diversité des combinaisons possibles résultant des nombreuses valences du métal. Le produit le plus courant est la pyrolusite MnO₂, poudre noire, qui existe dans de nombreux sols, et surtout dans les sols dérivés de roches volcaniques. Ce produit participe à l'élaboration de certaines cuirasses. Sur le terrain, il est possible de le mettre en évidence facilement ; il fait dégager l'oxygène de l'eau oxygénée. Mais, il n'est pas seul à communiquer au sol une couleur noire.

2.3.5. Les produits amorphes.

La définition de ces produits par rapport aux produits cristallisés est plutôt négative, puisqu'on les définit par des propriétés qu'ils n'ont pas, plutôt que par celles qu'ils ont.

Les produits amorphes sont donc des produits non cristallisés. Ils n'ont pas de diagramme X. Ils ont un comportement thermique différent : l'eau de constitution (essentiellement celle qui provient des OH) part à très basse température, etc. Ils n'ont pas de formule de constitution définie. Par contre, ils sont généralement plus riches en eau que les produits cristallisés et ont vis-à-vis de celle-ci un comportement assez particulier. Ils ont une surface spécifique plus grande que les produits cristallisés et on leur attribue une capacité d'échange également plus élevée. Ils réagissent beaucoup mieux à l'acide phosphorique que les produits cristallisés. Les produits amorphes, s'ils sont plus difficiles à étudier et caractériser que les produits cristallisés représentent donc une fraction beaucoup plus « active ». On peut diviser les produits amorphes en deux catégories : les oxydes et hydroxydes d'une part, les silicates hydratés d'autre part.

Les Oxydes et Hydroxydes. Un certain nombre d'entre eux sont suffisamment abondants et connus. Ils ont un nom et leurs propriétés sont étudiées depuis longtemps.

L'opale $\text{SiO}_2, n \text{H}_2\text{O}$ avec un n compris entre 2 et 15. En première approximation, il s'agit d'un produit amorphe : pas de diagramme X, départ important d'eau à basse température. Actuellement, les spécialistes pensent qu'il s'agit de produits cryptocristallins. La **calcédoine** est constituée de fibres où des cristaux de quartz alternent avec des couches d'opale. Dans chaque fibre, les empilements s'effectuent sous une forme hélicoïdale.

La silice amorphe est présente dans le sol lorsqu'il y a hydrolyse de minéraux silicatés en climat sec, insuffisamment d'eau pour la dissoudre ou de produits alcalins pour former des silicates. L'opale est également le constituant des **phytolites**, résidu siliceux des tissus végétaux.

Les hydroxydes de fer ou **stilpnosidérite** $\text{Fe}_2\text{O}_3, n \text{H}_2\text{O}$ sont fréquents dans les sols et dans les roches. Il en est de même pour les hydroxydes d'aluminium ou $\text{Al}_2\text{O}_3, n \text{H}_2\text{O}$ dénommés **clachite** ou **alumogel**. Ces matériaux sont présents dans de nombreux sols et n'ont pas été recherchés systématiquement jusqu'à présent. Il n'est pas douteux que les hydroxydes amorphes sont des constituants ordinaires des sols de la zone intertropicale.

Les silicates de fer et alumine amorphes $x\text{SiO}_2, y\text{Fe}_2\text{O}_3, n\text{H}_2\text{O}$ **Hisingérite**, $x\text{SiO}_2, y\text{Al}_2\text{O}_3, n\text{H}_2\text{O}$ **allophane**. Ces matériaux ont été identifiés depuis fort longtemps puisqu'on en parle depuis 1816. Mais ce n'est qu'assez récemment que leur étude a pris une certaine ampleur. Ils ont été reconnus dans les îles du Pacifique, en Amérique du Sud, Centrale, du Nord, en Afrique, etc. Ils sont liés, très souvent, à des matériaux vitreux et tout spécialement à des cendres d'origine volcanique. Les techniques d'étude se sont perfectionnées, dans le domaine chimique. L'utilisation des techniques thermiques, des rayons X, l'introduction de spectrographie dans l'Infra-Rouge a beaucoup contribué à améliorer leur connaissance. Malgré cela, la connaissance intime est encore peu avancée, malgré les travaux de chercheurs comme AOMINE et YOSHINAGA, 1953 ; BIRRELL et FIELDS, 1952, etc.

Les matériaux amorphes ont des rôles très variés dans les sols. Ils sont responsables d'un comportement très particulier vis-à-vis de l'eau qui est beaucoup plus abondamment retenue que par les argiles, mais aussi de manière plus lâche. Ils rendent difficile toute analyse mécanique. Ils provoquent une augmentation de la capacité d'échange. Ils ont une forte surface spécifique.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Secrétariat d'État aux Affaires Étrangères

techniques rurales en afrique

10

pédologie et développement

B. D. P. A.

O. R. S. T. O. M.

1970

techniques rurales en afrique

10

pédologie et développement

A la demande du Secrétariat d'Etat
et pour faciliter la tâche des ingénieurs travaillant en Afrique

Ce document a été établi par un groupe de travail
auquel ont collaboré,

l'Office de la Recherche Scientifique et Technique
Outre-mer,

le Bureau pour le Développement de la Promotion
de l'Agriculture.

