

Essai sur la classification génétique des sols

Michel GAVAUD

Pédologue ORSTOM (*)

Centre polydisciplinaire de l'ONAREST à Yaoundé, R.U. Cameroun

RÉSUMÉ

Pour rajeunir les classifications génétiques, on propose d'assouplir la définition de l'unité taxonomique élémentaire et de l'élargir à celle d'état synchronique de système-sol, ensemble d'éléments interdépendants conçu comme un système ouvert, à limites naturelles concrètes, situé dans son histoire. Les volumes matérialisant le système-sol (géons, catéons, faciès) sont définis ainsi que les volumes de taille inférieure (sous-systèmes, compartiment apical, volume minimum d'échantillonnage) ou supérieure (séquons). Les attributs utilisables en taxinomie sont passés en revue et un catalogue des altérations et des fractions minérales actives est esquissé. Les techniques de classification en usage sont analysées. Leur principe commun, la hiérarchisation descendante d'attributs, est mis en évidence avec ses conséquences, la réduction taxonomique et la création de nœuds vides. Deux tentatives réformistes sont proposées. L'une, plus ambitieuse, envisage une reconstruction par voie ascendante fondée sur des corpus suffisants de données, régie par les ressemblances, les propriétés génétiques et sociologiques, contrôlée par les techniques numériques d'agrégation et d'analyse. L'autre, plus réaliste, propose une amélioration de la hiérarchie descendante d'attributs qui tiendrait compte davantage des propriétés spécifiques des sols, entre un petit nombre d'unités supérieures et les taxons élémentaires. On a tenté de dresser une liste de ces unités supérieures et de stratifier l'une d'elles.

ABSTRACT

The taxonomic unit is considered as an open system with actual limits and definite history. Definitions of materializing volumes of this so-called soil system synchronic state, such as genons, catenons, facies are propound together with smaller volumes (sub-systems, apical compartment, minimal sampling volume) and larger ones (sequons). Pedosociologic and phylogenic properties are commented. Monopedomorphic, Poly-pedomorphic synchronic development states may be marked by appropriate writing rules. Attributes of taxonomic value are reviewed and an alterations and active mineral bulks list is outlined. Usual classification technics are analysed. They have a downward attribute hierarchization as a common principle which involves a taxonomic reduction of definitions and the creation of some taxa with only potential, not actual, meaning ('empty nodes'). Two reforming ways are proposed. The more daring first one considers an upward aggregation founded on consistent data corpus, ruled by likeness, genetic and sociologic properties, checked by numerical aggregation and analysis methods. The more realistic second one proposes a downward attribute hierarchy improvment with better specific soil properties utilization, from some upper units towards elementary taxa. An upper taxa list and a stratification of one of them have been tentatively sketched.

(*) Etude réalisée à l'Institut de Recherches Agricoles et Forestières de l'ONAREST, République Unie du Cameroun.

SOMMAIRE

1. OBJETS ET CONCEPTS UTILISÉS EN CLASSIFICATION DES SOLS

- 1.1 Définition du sol et du système-sol
- 1.2 Limites
- 1.3 Compartiment du sol
 - 1.3.1 Compartiments, sous-systèmes
 - 1.3.2 Modules transactionnels, péripédons
 - 1.3.3 Horizons
 - 1.3.4 Pédon, polypédons, génons
 - 1.3.5 Habitus
 - 1.3.6 Séquons et caténons
 - 1.3.7 Faciès
 - 1.3.8 Horizons anthropiques, métapédogenèse
 - 1.3.9 Apexsol, compartiment apical
- 1.4 Etats synchroniques du sol
 - 1.4.1 Terminologie de Boulaïne
 - 1.4.2 Valeur taxinomique de la pédode
 - 1.4.3 Sols monopédomorpes, phylogenèse
 - 1.4.4 Sols polypédomorpes
 - 1.4.5 Classification des états synchroniques ; règles d'écriture
- 1.5 Objets naturels d'ordre taxinomique supérieur au sol
- 1.6 Objets intermédiaires

2. ATTRIBUTS UTILISÉS EN CLASSIFICATION DES SOLS

- 2.1 Constitution
 - 2.1.1 Constitution des matières organiques
 - 2.1.2 Constitution minéralogique
- 2.2 Organisation
 - 2.2.1 Organisation générale en horizons, le profil
 - 2.2.2 Organisation des horizons ; classifications par horizons caractéristiques
 - 2.2.3 Organisation du matériau de sol à une échelle inférieure à celle de l'horizon
- 2.3 Transformations, relations internes
 - 2.3.1 Transformations géochimiques, altérations
 - 2.3.1.1 Catalogue des altérations
 - 2.3.1.2 Fractions minérales actives de quelques grandes unités de sol
 - 2.3.2 Translocations
 - 2.3.3 Flux internes
- 2.4 Relations externes
 - 2.4.1 Flux externes
 - 2.4.2 Facteurs de formation

3. TECHNIQUE TAXONOMIQUE

- 3.1 Classification par hiérarchie d'attributs
- 3.2 Modes de hiérarchisation des attributs
 - 3.2.1 Hiérarchisation causale
 - 3.2.2 Hiérarchisation temporelle
 - 3.2.3 Hiérarchisation d'expression
 - 3.2.4 Hiérarchisations pratiques
 - 3.2.5 Réduction taxinomique, image et clef
- 3.3 Utilisation taxinomique des variables
 - 3.3.1 Utilisation dans les hiérarchies d'attributs
 - 3.3.2 Utilisation en taxinomie numérique
- 3.4 Quelques critères de présentation

4. MÉTHODES AMÉLIORÉES DE CLASSIFICATION

- 4.1 Méthode mixte, ascendante, à ensembles naturels et à hiérarchie d'attributs
 - 4.1.1 Objets classés
 - 4.1.2 Données de base
 - 4.1.3 Agrégation, construction de l'arbre taxinomique
 - 4.1.4 Construction de la clef et définition des images taxinomiques
 - 4.1.5 Stratification et nomenclature
- 4.2 Méthode par hiérarchie descendante d'attributs
 - 4.2.1 Actualité, réforme possible
 - 4.2.2 Les unités supérieures
 - 4.2.3 Hiérarchisation des unités supérieures
 - 4.2.4 Essai de hiérarchisation d'une unité supérieure, les sols ferrugineux

1. OBJETS ET CONCEPTS UTILISÉS EN CLASSIFICATION DES SOLS

1.1. Définitions du sol et du système-sol

Seule une définition aussi générale que celle de Mattson (1930) convient à une classification universelle : le sol est un milieu naturel résultant de la transformation de matériel minéral et organique sous les actions variablement combinées de l'atmosphère, de l'hydrosphère et de la biosphère au contact de la lithosphère. Le modèle conceptuel le plus commode du sol ainsi entendu est le système ouvert (Bertalanffy, 1973), ensemble d'éléments interdépendants réagissant sur le milieu et sur le système lui-même, échangeant de l'énergie avec l'extérieur. Il peut faire l'objet d'une description *interne* : constitution, ou nature des substances organiques et minérales, organisation, relations de transformation entre constituants et entre éléments architecturaux (processus, mécanismes), ou *externe* : facteurs de formation, relations entre systèmes. Les limites du système-sol sont naturelles ; ce sont des interfaces aux travers desquelles sont définis les flux d'échange mais à l'intérieur desquelles il est toujours possible, par nature ou par artifice, d'isoler des « compartiments » possédant un certain degré d'homogénéité interne, réel ou fictif. Le système-sol possède un ou plusieurs axes d'organisation, vertical ou obliques. En évoluant dans le temps il peut prendre plusieurs « états synchroniques », quelques-uns correspondant à des états stables, non réversibles, fonctionnant en régime stationnaire (ou permanent), d'autres à des états beaucoup plus transitoires ; tous sont considérés comme des taxons différents par les classifi-

cations. Les variables du système-sol, dont Boulaïne (1969) donne une liste, fluctuent ainsi sur des périodes de temps soit courtes et correspondant aux conditions actuelles de pédogenèse, ce sont les variables « d'activité » (cf. 1.4.), soit plus longues et correspondant à des équilibres plus difficilement modifiables, ce sont les variables de « structure ». Au « sol » usuel, vertical, artificiellement limité dans l'espace et dans le temps, nous proposons de substituer comme objet élémentaire de la classification l'état synchronique du système-sol, volume naturel situé dans son histoire.

1.2. Limites

Les limites dépendent de la définition du système et leur généralité de celle des variables utilisées, aussi vaut-il mieux approcher le plus possible de l'enveloppe commune des domaines d'existence des éléments internes en circonscrivant le sol. Verticalement, vers la profondeur, on prendra par exemple toute la zone d'altération (catazone), toute la rhizosphère. Se restreindre au *solum*, défini par la disparition des organisations de la roche, a cet inconvénient que les relations entre l'altération et le *solum* peuvent être aussi fortes qu'à l'intérieur de ce dernier. Les limites latérales et internes sont associées à de nombreux volumes pédologiques, naturels ou pas, dont nous produisons ci-dessous un essai de nomenclature.

1.3. Compartiments du sol

1.3.1. COMPARTIMENTS, SOUS-SYSTÈMES

Un compartiment est un volume quelconque de sol, soit possédant une limite naturelle, soit isolable fictivement un peu à la façon d'une « boîte noire », éventuellement, mais non obligatoirement, doté d'une certaine homogénéité ou régularité spatiales naturelles ou de convenance. Un sous-système est un compartiment individualisable par sa constitution, par son organisation, par ses relations internes, par des limites naturelles, à l'intérieur du système.

1.3.2. MODULES TRANSACTIONNELS, PÉRIPÉDONS

Le système-sol échange matière et énergie avec un certain volume extérieur ou pédosphère (Boulaïne, 1969) au travers de volumes privilégiés situés sur ses frontières qui sont les modules transactionnels. Ils

sont, par nature ou par convenance, considérés comme internes ou externes ou partagés. Ce sont des compartiments ou sous-systèmes de nature pédologique ou pas. Boulaïne (1969) nomme « péripédon extragénique » les modules externes tels la litière non décomposée, les parties contiguës d'un autre système. Les modules internes n'ont pas de nom spécifique ; l'un d'eux, très important, est le compartiment « apical » (cf. 1.3.9.). Le « péripédon intragénique » de l'auteur précité est tout différent et désigne l'environnement immédiat du « pédon » (échantillon de sol vertical, cf. 1.3.4.) situé tout entier dans le « polypédon » (sol vertical). Certains compartiments d'un « caténon » (sol oblique, cf. 1.3.6.), sont inclus dans le péripédon extragénique dans l'optique verticaliste, intragénique dans la nôtre ; aussi, pour lever toute ambiguïté, convient-il de nommer modules transactionnels internes, externes ou partagés, les volumes frontaliers du système-sol.

1.3.3. HORIZONS

Ce sont les sous-systèmes fondamentaux du sol. Leurs limites supérieures et inférieures sont généralement conformes à celles du système-sol. Ils ont une existence physique évidente. Ils sont individualisables par leur constitution, leur organisation, leurs relations internes ou externes. On nomme par extension horizons des compartiments en couches définis par un nombre limité de caractères à l'exclusion des autres, telle la minéralogie, à des fins de réduction taxinomique (cf. 3.2.5.) ou autres. Ce sens ne sera plus utilisé dans la suite du texte. Les volumes plus petits que l'horizon sont les « traits pédologiques » dont Brewer (1964) a dressé le catalogue.

1.3.4. PÉDONS, POLYPÉDONS, GÉNONS

Le pédon (USDA, 1960) est dans l'optique verticaliste le plus petit volume de sol où toutes les caractéristiques matérielles peuvent être définies avec leur part de variabilité aléatoire ou répétitive, ainsi que les transformations internes et la partie intragénique des relations externes. C'est un compartiment de volume restreint à limites latérales fictives. Le polypédon ne contient que des pédons semblables mais possède des interfaces réels ; c'est au moins un sous-système, sinon un système. Le pédon est soit une sorte d'individu-échantillon du polypédon, soit une réduction statistique de ce dernier, sens pour lequel l'expression « isopédon modal » de Boulaïne (1969) est préférable. Le génon du même auteur est un

concept voisin de celui de polypédon ; nous proposons de préciser : un génon est un polypédon superposable à un système-sol, lequel est alors à organisation verticale.

1.3.5. HABITUS

Les habitus sont les apparences morphologiques usuelles des pédons, répertoriées par une longue expérience. Peu précis et surtout incomplets dans leur contenu ils ne peuvent nommer des taxons mais en sont des attributs descriptifs très utiles. Tels sont les habitus « sol brun », « sol gris », « planosol », « sol lessivé glossique », etc.

1.3.6. SÉQUONS ET CATÉONS

Le séquon est un système-sol ou un ensemble de systèmes-sols contigus dont la direction d'organisation commune est oblique. Systèmes et sous-systèmes varient alors selon des gradients latéraux. Une définition plus juste et générale mais actuellement impraticable devrait faire référence à plusieurs axes obliques d'organisation mutuellement subordonnés. Comme il en est du pédon relativement au génon il existe un volume minimum d'échantillonnage du séquon permettant d'en définir statistiquement l'essentiel ; les limites de l'élément minimal ne sont réelles que dans la direction de l'axe d'organisation.

Bocquier (1973) et Boulet (1974) ont montré qu'il existait entre les horizons de certains séquons des relations de même nature et aussi fortes qu'entre les horizons de systèmes-sols verticaux, relations dues à des translocations latérales intenses d'éléments solubles et insolubles. Ces séquons particuliers sont des unités élémentaires de systèmes-sols au même titre que les génon ; nous les nommerons catéons. Leurs sous-systèmes ou horizons sont latéralement décalés. Leurs compartiments verticaux n'ont qu'une valeur d'habitus.

Lorsque l'interdépendance des compartiments est nulle ou incertaine le séquon n'est pas, par définition, un système unique et doit être découpé en plusieurs génon ou catéons. Tel est le cas des « toposéquences » dont le gradient est dû à des variations latérales des facteurs de formation le long d'une pente. Sont également exclus des catéons, peut être provisoirement, les séquons où ne sont observés que des gradients hydriques et des gradients géochimiques dus uniquement à des migrations en solution, comme les séquons à sols bruns et rouges fersiallitiques (Tobias).

Cette distinction passablement arbitraire tient à la fois à la difficulté de prouver ce type de migrations et à la répugnance à se séparer de vieilles habitudes.

1.3.7. FACIÈS

Le faciès est une expression restée faible d'un système-sol pour des causes diverses : jeunesse, « dégradation » (cf. 1.4.4.1.), activité réduite des processus. Les caractères morphologiques, minéralogiques, chimiques du système ne se matérialisent que partiellement soit dans le matériau soit dans un sol plus ancien. La notion de faciès peut être étendue aux manifestations ténues de dynamiques d'ordre hiérarchique supérieur au système, zonales par exemple. Citons le faciès ferrugineux (type d'épipédon) sur sol ferrugineux, le faciès subaride (type de matière organique et degré de saturation) sur sol ferrugineux (Gavaud, 1968). Le faciès peut être utilisé comme unité taxonomique de base ou à un rang inférieur.

1.3.8. HORIZONS ANTHROPIQUES, MÉTAPÉDOGENÈSE

Ils sont produits par une modification anthropique du système-sol, intervention théorisée par Yaalon (1960) sous le nom de métapédogenèse. Ils sont répertoriés par la Classification USDA (1960, 1974) et peuvent être placés immédiatement au-dessous ou au niveau des taxons naturels qu'ils modifient ou miment.

1.3.9. APEXSOL, COMPARTIMENT APICAL

L'apexsol (Chatelin, 1972), partie supérieure des sols la plus utile en agronomie, a parfois été utilisé comme taxon de base avec ce résultat de confondre matériau et horizon, horizon et sol : horizon ferrallitique ou ferrugineux profonds pris pour « matériau rubéfié », horizon lessivé épais pris pour sol peu évolué. Un tel usage est à proscrire et l'apexsol ne doit servir qu'à présenter au rang taxonomique ultime le catalogue des caractéristiques pratiques convenant à tel ou tel emploi.

Le compartiment apical est le domaine d'existence des variables d'activité (cf. 2.5.), le volume ou peuvent être définis, à l'échelle de la pédode (cf. 1.4.), le régime de l'eau, des solutions du sol, des températures et autres variables saisonnières. Il existe toujours, mais a été imaginé et nommé en vue de caractériser les sols obsolètes où la dynamique utile paraît se circonscrire aux horizons supérieurs.

Ce concept peut être généralisé par ceux de compartiments actifs ou inertes, apicaux ou profonds. Le compartiment apical est utilisable à un rang taxonomique inférieur à celui du système-sol ; il est défini par les variables d'activité ou à défaut par ses sous-systèmes.

L'épipédon (USDA, 1960), partie du pédon surmontant et/ou empiétant sur les horizons B, coïncide très variablement avec l'apexsol ou le compartiment apical. Il est le compartiment de surface affecté par l'accumulation organique, à défaut par l'éluviation, à défaut par l'altération. Il n'est utilisé que pour la classification des sous-systèmes.

1.4. Etats synchroniques du sol

1.4.1. TERMINOLOGIE DE BOULAIN (1969)

Cet auteur prend le temps comme dimension du système-sol et le divise en périodes génétiques dont nous retenons :

— la pédode, durée nécessaire et suffisante pour définir la pédogenèse du sol ; le pédome est l'ensemble des états correspondants de ce dernier. La pédode est formée de un ou plusieurs cycles annuels.

— l'antépédode, durée d'évolution du sol dont l'ensemble correspondant des états est l'antépédome (métapédode et métapédome pour le seul solum).

— la prépédode, durée correspondant aux états minéraux bruts et peu évolués.

1.4.2. VALEUR TAXONOMIQUE DE LA PÉDODE

La définition de la pédode est en pratique celle de la période pendant laquelle seules les variables d'activité (cf. 2.5.) fluctuent de façon appréciable, les variables de structure étant à peu près stables. Les premières, essentiellement les régimes hydriques et thermiques, sont utilisées en taxonomie faute de pouvoir faire une bonne synthèse des secondes ou à cause d'expressions faibles des processus. Elles conviennent aussi à la définition du compartiment apical.

1.4.3. SOLS MONOPÉDOMORPHES, PHYLOGÉNÈSE

Les systèmes-sols se transforment au cours du temps suffisamment pour que l'antépédome soit divisible en plusieurs états synchroniques distincts du point de vue de la taxonomie, chacun étant de droit ou par

convention considéré comme un système. Si le classificateur juge que ces transformations sont le fait de la même pédogenèse, les états synchroniques forment un phylum « monopédomorphe » (Bos *et al.*, 1975). Les éléments externes, climatiques notamment, sont alors à peu près stables et la pédogenèse ne subit pas de « catastrophes ». Toutefois les transformations, au niveau des sous-systèmes surtout, peuvent être qualitativement importantes : formation d'horizons d'accumulation ferrugineuse (Maignien, 1958), dégradation des argiles après illimérisation (Pedro *et al.*, 1974). Les classifications explicitent médiocrement ou pas du tout ces phylogénies, la tendance actuelle étant même à leur abandon, tel celui des niveaux d'évolution des sols ferrallitiques (Aubert, 1965) par le CPCS (1967). Cette négligence entraîne que les états plus ou moins finaux, mûrs, souvent obsolètes dans quelques-uns de leurs compartiments, évoluant en régime permanent, sont seuls bien répertoriés, les autres se perdant dans la masse anonyme des sols peu évolués et autres cambisols en dépit d'une dynamique plus active.

1.4.4. SOLS POLYPÉDOMORPHES

Les sauts taxonomiques sont tels que le classificateur a l'impression de changements de type de pédogenèse qu'il explicitera par exemple par des déplacements de taxon d'une classe ou sous-classe à une autre. Les états synchroniques appartiennent alors, toujours du point de vue taxonomique, à plusieurs métapédomes et à un ou plusieurs antépédomes, soit plusieurs sols pour une ou plusieurs altérations. Le déterminisme de ces transformations peut être externe, cas des sols polygénétiques s.s., les plus connus des sols polypédomorphes. D'autres ont un « autodéterminisme propre » (Bocquier, 1973) ; ils se transforment profondément bien que les éléments relationnels externes soient à peu près stables. Pour la définition des sols polypédomorphes les concepts de saut taxonomique, de stabilité des facteurs externes, également de degré d'expression de la pédogenèse la plus récente se combinent de façon assez compliquée de sorte qu'un tableau récapitulatif n'est pas inutile (voir page suivante).

1.4.4.1. Agradation et dégradation

Les sols tronqués (dégradation de Bos *et al.*, 1975), fossilisés, enterrés (agradation), remaniés (dégradation partielle, agradation par un patériel inerte autochtone), rajeunis (exhumation par dégradation d'un matériel actif), pénévulés (agradation par un matériel

<i>Saut taxonomique génétique</i>	<i>Stabilité des facteurs externes</i>	<i>Expression</i>	<i>Exemples, nomenclature</i>
Faible Faible	Stables Stables	Forte Faible	Monopédomorphe : ferrugineux induré-ferrugineux à nodules. Faciès monopédomorphe
Fort Fort	Instables Instables	Forte Faible	Polygénétique : ferrugineux-ferrallitique Faciès polygénétique
Fort Fort	Stables Stables	Forte Faible	Polypédomorphe autodéterminé : solonetz-sol lessivé. Faciès du précédent : (planosol)-ferrugineux
Faible Faible	Instables Instables	Forte Faible	Cas des sols tronqués Cas des sols remaniés (cf. 1.4.4.1.).

actif, Ségalen, 1969) sont des cas particuliers de sols polypédomorphes ou monopédomorphes dus à ce que les bouleversements mécaniques ne suffisent pas à eux seuls à modifier le cours de la pédogenèse. Les variétés monopédomorphes sont situées à un rang inférieur à celui du système-sol (ex. : sol tronqué) ou « remontent » la suite des états du métapédome (ex. : sol rajeuni). Une cause supplémentaire d'hétérogénéité de classification tient à ce que souvent on préfère pour ces sols une subordination pratique (cf. 3.2.4.) à la subordination génétique ; un sol ferrugineux induré tronqué sera par exemple rangé parmi les sols lithiques. La notion de « phase » conviendrait mieux à l'expression de cet ordre de faits.

1.4.4.2. Paléosols

Les paléosols sont des sols polypédomorphes, probablement polygénétiques, dont un état ancien reste remarquablement évident. Les cas les plus simples sont ceux de sols situés en grande partie hors du domaine d'action du système-sol actuel soit par fossilisation (agradation) soit du fait de vicissitudes climatiques (Ruellan, 1971). Plus complexes sont ceux de sols ne répondant pas à ces conditions mais dont l'organisation, la constitution paraissent ne plus correspondre aux éléments relationnels internes et externes du moment. Il existe ainsi toutes sortes de nuances entre le paléosol fossile, sol polygénétique actuellement inerte et enterré, et le sol obsolète, sol monopédomorphe dont quelques compartiments sont devenus inertes. L'usage est de classer les paléosols en fonction de leur dynamique actuelle.

1.4.4.3. Séquons polypédomorphes

Il existe en Afrique tropicale, sur de très grandes surfaces, des séquons polypédomorphes formés en

amont d'un paléo-génon ferrugineux ou ferrallitique, inactuel ou obsolète, et en aval d'un caténon à habitus lessivé, planique, solonetzique, vertique, plus généralement d'un paléogénon amont à profils U ou G (cf. 2.2.1.) et d'un caténon aval à profils D (Boulet, 1974). Ces deux parties peuvent être classées à leur rang taxonomique génétique respectif avec indication d'origine pour le caténon.

1.4.4.4. Séqua

Les alternances d'horizons E et B ne sont pas par mêmes significatifs de sols polygénétiques car ils ont été observés dans des caténons polypédomorphes autodéterminés (Bocquier, 1971), où ils sont plutôt caractéristiques de certaines modalités de translocations latérales.

1.4.5. CLASSIFICATION DES ÉTATS SYNCHRONIQUES ; RÈGLES D'ÉCRITURE

Elle suppose que l'état puisse être situé sur une lignée génétique. On y parvient par des approximations circulaires, habituelles dans les sciences de la nature, qui déduisent les filiations des ressemblances et expliquent celles-ci par celles-là. L'état actuel est de ce point de vue connu avec le plus de précision puisque, en théorie du moins, la mesure des variables d'activité dans le compartiment apical (ou actif) s'y ajoute à l'évaluation des variables de structure. Le nombre des taxons de base peut se réduire à celui des états monopédomorphes ou auto-déterminés grâce à l'heureuse propriété qu'ont les états polygénétiques d'en être des combinaisons. Ce comportement convergent est analogue à l'équi-finalité des systèmes ouverts dont certains états stationnaires identiques peuvent procéder de conditions initiales et de cheminements

différents. Il est illustré sur un arbre taxonomique théorique par des fermetures de branches ayant préalablement divergé.

En pratique les classificateurs évitent d'explicitier en tant que tels ces nœuds particuliers, ou intergrades naturels (cf. 1.6.3.), parce qu'ils n'existent pas dans les classifications traditionnelles des sciences naturelles, qu'ils sont en nombre indéterminables a priori, qu'ils ne se prêtent pas à une nomenclature stratifiée ou à une présentation graphique simples. L'habitude est de rattacher au taxon monopédomorpe ou auto-déterminé correspondant l'état le mieux exprimé ou le plus récent avec une nette préférence pour ce dernier sauf s'il se réduit à un faciès trop subtil. Les attributs d'âge différent ou appartenant à d'autres systèmes taxonomiquement distincts sont rangés ensuite à un niveau inférieur. Cet escamotage n'est anodin que lorsque les états ou systèmes en jeu sont répertoriés, sinon il entraîne à subordonner l'inconnu au connu, de sorte que des systèmes-sols importants n'ont pas reçu de statut taxonomique indépendant pendant longtemps parce qu'ils étaient toujours plus ou moins mêlés à des systèmes découverts plus tôt (cf. 4.2.2., n° 13).

S'il est difficile et probablement inutile de prévoir toutes les combinaisons, il est toutefois indispensable de les noter convenablement en utilisant les règles suivantes. L'état choisi comme taxon de base, génon, caténon, faciès est souligné. Les états successeurs, c'est-à-dire les plus récents, sont notés à gauche des états prédécesseurs, les plus anciens, un tiret les séparant. Les expressions spécialement faibles sont mises entre parenthèses. Les éléments hors du domaine d'action d'un système sont notés par un indice préfixe, la suite des chiffres romains par exemple. Voici quelques exemples observés :

(1) *faciès subaride* - génon ferrugineux peu lessivé.

(2) phase tronquée - (habitus planique) - *caténon lessivé tropical* - (génon ferrugineux lessivé) - : sol lessivé, contenant des restes de sol ferrugineux, en voie de planosolisation et d'érosion.

(3) *ferrugineux* - II phase tronquée - II paléo-ferrugineux : sol ferrugineux se développant au-dessus des restes d'un sol de même nature plus ancien actuellement hors d'atteinte des infiltrations pluviales.

1.5. Objets naturels d'ordre taxonomiques supérieurs au sol

Les sols se juxtaposent en ensembles de terrain qui conservent tout ou partie des attributs de leurs éléments et peuvent être définis de façon analogue.

Ce sont des unités naturelles identifiables par une partie variable des caractéristiques de constitution, d'organisation, de relations internes et externes : minéralogie, type d'altération, type de manière organique, organisation générale ou particulière en horizons, relations internes entre parties éluviales et illuviales, entre parties catamorphiques et néogénétiques, régime hydrique et thermique, bio-masse, évolution diachronique, etc. Quelques-unes de ces unités sont des sur-systèmes, d'autres ne sont plus que les lieux d'élection de tel ou tel processus et se réduisent à une sorte d'image grossie et simplifiée de sols. Elles ont été décrites de divers points de vue : séquen, paysages biogéochimiques, paysages géochimiques, domaines d'altération, zones, surfaces pédomorphiques, couvertures de sols (Fridland, 1974). Les systèmes-sols sont des être sociaux ; ils ont la propriété remarquable de former des ensembles naturels d'essence pédologique que Schlichting (1970) propose de hiérarchiser par le moyen de facteurs dominants. Bien qu'il soit techniquement difficile de tenir compte à la fois des relations logiques (hiérarchisation d'attributs) et spatiales (relations d'inclusion, d'échelle), la propriété de pédosociologie (Bohdensociologie du même auteur), qui a eu la zonalité comme application la plus connue, devrait former l'armature des classifications naturelles avec la propriété de phylogénie. Alors que les phylums créent des enchaînements taxonomiques bien liés mais courts, représentables par un arbre non connexe à rameaux séparés (Benzecri, 1973, I, 122), les organisations, constitutions, relations communes mises à jour par la pédosociologie, plus générale, peuvent rétablir la connexité de l'arbre taxonomique en regroupant les lignées distinctes. On voit qu'il doit être possible de concevoir ainsi une classification dont la plupart des nœuds auraient un contenu concret : états synchroniques, sur-systèmes naturels, autres ensembles paysagiques. Les classifications actuellement en usage s'appuient, explicitement ou non, sur ces deux principes (Russe, CPCS, USDA) mais, pour des raisons de technique taxonomique (cf. 3.2.5.), sans doute aussi parce que l'appréhension des ensembles intermédiaires est difficile, n'en poussent pas très loin l'application, alors qu'un dépassement dans ce domaine est proposé par des auteurs importants (cf. Bocquier, 1973, 290-291).

1.6. Objets intermédiaires

Dans la pratique les objets pédologiques les plus concrets, systèmes-sols, paysages, zones, sont situés aux deux bouts des arbres taxonomiques, les nœuds

intermédiaires étant le plus souvent des embranchements de clef, parfois des états synchroniques (ex. : groupes). Quelques définitions méritent cependant d'être rappelées.

1.6.1. SÉRIE

C'est l'image taxonomique (cf. 3.2.5.) de genres semblables à des différences secondaires plutôt quantitatives *près*, sans effets en principe sur l'écologie des plantes cultivées (USDA).

1.6.2. FAMILLE

Elle rassemble des séries semblables, c'est-à-dire ayant le même prédécesseur immédiat sur l'arbre taxonomique, formées sur la même roche-mère. Série et Famille sont le domaine taxonomique à l'intérieur duquel les variations quantitatives ne sont pas suffisantes pour produire des variations qualitatives d'importance, notamment en ce qui concerne le nombre et la nature des sous-systèmes. De ce fait il est probablement avantageux de les définir par les méthodes de la taxonomie numérique (Girard, 1968).

1.6.3. INTERGRADES

Il existe des intergrades naturels, de nature polygénétique (cf. 1.4.5.), et des intergrades techniques créés par les discontinuités dues aux définitions (cf. 3.3.1.). Sur l'arbre taxonomique ils sont situés 'entre' deux ou plusieurs nœuds, situés sur le même phylum ou non. Ils sont classés par rapport à l'état pédologique le plus récent ou le mieux exprimé en utilisant des astuces de notation (cf. 1.4.5.) ou lexicales (USDA, 1960).

2. ATTRIBUTS UTILISÉS EN CLASSIFICATION DES SOLS

Les classifications en usage ordonnent leur partition de l'ensemble des sols par une hiérarchie d'attributs, propriétés essentielles regroupant toutes les caractéristiques de constitution, d'organisation, de relations internes et externes. Leurs taxons devraient contenir le maximum d'information parce qu'elles ont pour objectif l'expression des affinités pédologiques. Elles procèdent en fait à une sérieuse réduction des données en privilégiant certains attributs en

fonction de leur signification ou de leur accessibilité, selon qu'elles sont de nature plutôt génétique ou plutôt empirique, les premières incluant davantage de relations, les secondes se limitant aux propriétés concrètes. Il conviendrait dans tous les cas de conserver l'information en distinguant entre la définition des taxons, aussi généreuse que possible, et la partie discriminante de cette dernière, sujette davantage à révision (cf. 3.2.5.).

2.1. Constitution

2.1.1. CONSTITUTION DES MATIÈRES ORGANIQUES

Elle est mieux connue et utilisée en milieu tempéré (Duchaufour, 1970), où les autres attributs de constitution sont plus faibles, qu'en milieu intertropical (Perraud, 1971) où elle connaît une certaine désaffection de la part des classificateurs empiristes. Son emploi à divers niveaux taxonomiques devrait au contraire être généralisé parce qu'elle est un révélateur sensible des conditions actuelles d'évolution. Ce niveau serait assez subordonné dans les suites à métapédode longue, comme dans la plupart des sols ferrallitiques (Muller, 1974), et inversement. Selon le cas, il a une valeur paysagique (sol de savane, de forêt...) ou simplement d'utilisation.

2.1.2. CONSTITUTION MINÉRALOGIQUE

Fieldes (1968) a conçu une classification dont les niveaux supérieurs sont définis par la minéralogie des argiles : les micosols, illosols, vermosols, kaosols A et B, silicosols, montosols, allosols, halosols, sont respectivement caractérisés par des micas, de l'illite, de la vermiculite, de la kaolinite lamellaire ou, en 'paquets', de la silice, de la montmorillonite, des allophanes, de l'halloysite, une dernière classe, les organosols, étant définis par la matière organique. L'auteur remarque qu'une constitution différente implique un comportement différent, qu'une constitution semblable implique un comportement semblable ou diversifié par l'environnement, ce qui lui permet d'individualiser et de subdiviser des classes. Comme les combinaisons d'espèces minéralogiques sont prévues et qu'il est facile de compléter cette liste (chlorites, sesquioxides, etc.), on peut construire de la sorte une clef probablement assez bonne. La justification et la réfutation de la méthode de Fieldes tiennent dans cette courte phrase, réversible : « la constitution est plus importante que les propriétés de masse ou

l'observation de la forme (*i.e.* organisation) du sol ». On peut retenir toutefois beaucoup de son classement judicieux (*cf.* 2.3.1.2.).

2.2. Organisation

2.2.1. ORGANISATION GÉNÉRALE EN HORIZONS, LE PROFIL

La constitution organique, minérale et les relations générales des horizons (altération, éluviation, illuviation) sont commodément notées par la suite O, A, E, B, C, R, que tous les glossaires et catalogues explicitent. En employant des spécifications et des règles d'écriture convenables (Gavaud, 1975) il est possible de résumer avec précision le profil, ou séquence verticale des horizons. Northcote (1962) symbolise quelques aspects généraux importants des profils que l'on peut aussi nommer *habitus* (*cf.* 1.3.5.): *habitus* U sans différenciation texturale, *habitus* G à différenciation texturale et limites entre horizons diffuses, *habitus* D à différenciation texturales et limite A.B distincte. Ces notations doivent être conservées et augmentées parce que l'organisation générale est un attribut constant sinon spécifique des taxons.

2.2.2. ORGANISATION DES HORIZONS ; CLASSIFICATIONS PAR HORIZONS CARACTÉRISTIQUES

Un effort récent de réduction des données pédologiques repose sur l'hypothèse que les sols ne sont formés que par les combinaisons d'un nombre défini d'horizons. Pour cela on sélectionne les sous-systèmes réels qui sont le siège de « manifestations d'ensemble de processus dominant le mode et le degré de développement du sol » (USDA, 1974), on ne retient que les variables d'organisation et de constitution correspondantes, on élimine une partie des horizons obligatoirement associés à d'autres. Il suffit de ne définir de façon vague qu'un seul horizon éluvial pour tous les horizons d'accumulation parce que les caractéristiques manquantes seront implicites dans les combinaisons telles que : *spodic/albic*, *argillic/albic*. Pour bâtir une classification avec ces « horizons caractéristiques » il est nécessaire d'user de procédés et d'hypothèses complémentaires qui dans Soil Taxonomy seraient que :

— les intervalles de variation des paramètres des « horizons » coïncident avec ceux des systèmes naturels préalablement reconnus ;

— il faille introduire une hiérarchie à base génétique entre les « horizons caractéristiques ». Les « horizons majeurs » (*mollic*, *spodic*, *oxic*, etc.) définissent des ordres, les autres (*calcic*, *salic*, etc.) des unités inférieures ;

— il existe un ordre partiel implicite, également génétique, entre les « horizons majeurs » : *mollic* est plus fort qu'*argillic* ;

— certains nœuds taxonomiques doivent être définis par des variables climatiques et pédo-climatiques, de manière à retrouver quelques-uns des ensembles paysagiques naturels.

Finalement, les taxons de Soil Taxonomy ne diffèrent de ceux de la Classification CPCS qu'à cause d'hypothèses génétiques différentes : plus de poids pour le lessivage, pour la métapédogenèse, moins pour l'hydromorphie, l'halomorphie. Ils n'impliquent pas de théorie spéciale des horizons, mais une application, une réduction de la théorie des sols à celle-ci. Les avantages du procédé viennent de dispositions matérielles annexes : précision des définitions, souplesse lexicographique. Les inconvénients sont ceux de n'importe quelle clef : disparates de nombreux nœuds (*cf.* humults), synthèses géographiques difficiles, tendance à forger des taxons gratuits. De plus, comme les variables d'organisation sont privilégiées, l'utilisateur est poussé à confondre les définitions s.s. des systèmes réels avec leur image taxonomique (*cf.* 3.2.5.) en oubliant les variables de relations implicites. Ainsi on retrouvera un *Argiudoll*, *Typic* de surcroît, des plaines boréales Euraméricaines en Afrique Centrale par le fait de fallacieuses ressemblances des images taxonomiques.

Pour conserver les avantages de cette méthode et en éliminer les inconvénients, on a pu penser à multiplier le nombre des horizons caractéristiques (Fitzpatrick, 1967), préciser leur définition, éliminer les hypothèses génétiques, faisant de la classification un jeu de construction dont les cubes sont ces « horizons ». L'aspect positif de l'entreprise est dans l'effort de caractérisation des sous-systèmes. Son succès est problématique parce que l'hypothèse de base, l'indépendance des sous-systèmes et sa conséquence, la possibilité de classer les systèmes par leurs combinaisons, sont douteuses. Il est possible qu'il faille définir autant d'horizons caractéristiques d'un certain type qu'il y a de taxons où ils sont utilisés ; par exemple il est vraisemblable que l'horizon *umbric* d'un *umbraqualf* a peu de choses en commun avec l'horizon *umbric* d'un *umbrax*, sauf l'effet drastique de réduction des données opéré dans l'image taxonomique de « l'horizon caractéristique ». Comme les

hypothèses génétiques sont de toute façon nécessaires pour hiérarchiser les « horizons » entr'eux, sauf à ne vouloir délibérément faire qu'une clef, la classification directe des sols paraît finalement plus claire et sûre.

Enfin si les sols ne sont que des combinaisons d'horizons indépendants, on peut également imaginer que les horizons ne sont que des assemblages de traits pédologiques et qu'il est possible de classer les sols par une hiérarchie de traits. De proche en proche on retomberait dans la Classification Minéralogique de Fieldes, en abandonnant à chaque réduction les caractéristiques propres aux systèmes et que n'ont pas leurs éléments.

2.2.3. ORGANISATION DU MATÉRIAU DE SOL À UNE ÉCHELLE INFÉRIEURE À CELLE DE L'HORIZON

Les classifications n'utilisent pas pleinement les données acquises par des travaux récents en ce domaine, même la classification USDA qui en fait l'usage le moins restreint. Aux côtés d'un catalogue des sous-systèmes, des altérations, un recueil des traits, des assemblages microscopiques (Brewer, 1964) et ultra-microscopiques « caractéristiques » est un outil indispensable pour une bonne taxonomie. Cet apport paraît plus décisif pour certains sols, tels les sols ferrallitiques dont les horizons paraissent ne pouvoir être bien définis que par des caractères microscopiques (Beaudou, 1972).

2.3. Transformations, relations internes

2.3.1. TRANSFORMATIONS GÉOCHIMIQUES, ALTÉRATIONS

Les substances minérales interviennent en taxonomie du triple point de vue de leur nature (cf. 2.1.2.), de leur origine et de leur activité. Pour chaque système-sol, pour chaque sous-système, dans un état synchronique donné l'idéal serait d'identifier le reliquat de minéraux primaires, l'ensemble des minéraux secondaires, le bilan géochimique, alors qu'habituellement on se contente de définir une « altération » sans trop en préciser le site. Les altérations ont comme les sols une histoire qui produit des générations successives de produits secondaires qui peuvent se mélanger dans le matériau de sol, lequel peut réunir :

— les produits actuels de l'altération, en équilibre avec les conditions de milieu de la pédode ;

— les produits plus anciens de l'antépédode (antégénétiques) ;

— les produits hérités de pédogenèses antérieures (prégénétiques) ;

— les produits hérités s.s., présents dans la roche-mère.

A la notion de stock de produits secondaires il faut ajouter celle, plus complète, de fraction minérale active formée par la *réunion* des produits actuels de l'altération, des minéraux secondaires et éventuellement primaires participant aux translocations (plasma) et aux échanges avec les solutions du sol.

Une génétique nuancée des altérations fondée sur toutes les évolutions minérales dans tous les volumes pédologiques serait dans sa plus grande partie homologue de celle des sols et contribuerait puissamment à l'établir. Les altérations au sens large dépendent en effet des mêmes facteurs de milieu, suivent les règles phylogéniques et sociologiques, conditionnent par leurs produits les autres transformations. Les grandes lignes de cette génétique ont été données par les travaux expérimentaux de Pedro (1964), organisant et théorisant de nombreux travaux de terrain (Leneuf 1959, Tardy 1969) et prolongeant les idées de base des géochimistes (Millot, 1964). Pourtant on ne peut guère actuellement dépasser le catalogue raisonné, faute d'études complètes des systèmes-sols.

2.3.1.1. Catalogue des altérations

Il est fondé sur le mode de production, la nature, le comportement pédologique du complexe d'altération et reproduit dans ses grandes lignes les classifications de Pedro et de Fieldes (cf. 2.1.2.).

a - allitisation (Pedro, 1964)

ordre décroissant des dépôts :	SiO ₂ - bases - Al ₂ O ₃
produits actuels	: sesquioxydes d'aluminium
produits antégénétiques	: sesquioxydes de fer et produits de la siallisation.
altération homologue des roches non alumineuses :	ferrugination.
fractions minérales actives	: - sesquioxydes d'alumine - sesquioxydes d'alumine et de fer, avec quantités variables de produits de la siallisation.

b - monosiallisation (Pedro, 1964)

ordre décroissant des dépôts :	bases - silice - alumine
produits actuels	: kaolinite, sesquioxydes de fer

produits antégénétiques : halloysite, métahalloysite, faibles quantités d'argiles de transformation, de silicates amorphes, de gibbsite.

fractions minérales actives :

= sesquioxydes de fer non séparés du plasma abondants (fermosiallisation, Ségalen 1976) ; ordre croissant de stabilité probable :

quartz - kaolinite - sesquioxydes.

+surtout de la kaolinite

+surtout de l'halloysite

= sesquioxydes de fer séparés du plasma ou peu abondants ; ordre de stabilité des minéraux inverse ; kaolinite plus nettement néogénétique, altération homologue des roches magnésiennes : serpentinisation (Pedro, 1966).

c - états amorphes de la siallisation (Sieffermann, 1973) et de l'allitisation.

produits actuels : silicates amorphes, imogolite,

produits antégénétiques : argiles 2:I de transformation

fractions actives : dosages variables d'amorphes avec les produits de la siallisation.

d - dégradation bisiallitique par acidolyse modérée et endo-aluminisation (Pedro, 1974).

produits actuels : chlorites secondaires (chloritisation), kaolinite de dépolymérisation,

produits antégénétiques : vermiculites - Al, smectites - Al

fractions minérales actives : dosages variables de ces produits, généralement déferriés (cf. ferrolyse de Brinkman, 1969).

e - dégradation bisiallitique par soustraction hydrolytique.

produits actuels : vermiculites (vermiculitisation, Pedro, 1969) interstratifiés, sesquioxydes de fer,

produits antégénétiques : interstratifiés

fractions actives :

= à sesquioxydes de fer abondants non séparés du plasma (fersiallitique, Lamouroux, 1972),

+vermiculite, interstratifiés

+présence de kaolinite héritée ou produite par accentuation de la désilication en milieu intertropical (?).

= à sesquioxydes de fer peu abondants ou séparés.

f - illitisation

On ne veut ici que regrouper les fractions minérales actives très riches en illite, minéral généralement hérité ou pré-génétique (premiers stades d'altération) souvent associé aux produits des dégradations et transformations bisiallitiques (d, e) mais ayant un comportement différent à cause de ses propriétés d'absorption relativement faibles.

g - bisiallisation s.s. par néogenèse, silication,

produits actuels : montmorillonites, smectites ferrifères, attapulгите, sesquioxydes de fer séparés, silicates Na, silice, sels,

produits antégénétiques : interstratifiés, vermiculite,

fractions minérales actives : - montmorillonite, smectites - smectites et attapulгите - silicates Na, sels, silice,

altération homologue des roches magnésiennes (Pedro, 1966) : stéatitisation.

h - podzolisation, acidocomplexolyse (Pedro, 1964),

ordre de départ croissant : $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ - bases
produits actuels dans le milieu de départ : reliquat siliceux,
produits actuels dans le milieu illuvial : argiles 2:I-Al (exoaluminisation), sesquioxydes de fer, chélates organiques FeIII,

produits antégénétiques du milieu de départ : argiles 2:I-H⁺,
fractions actives : dosages variables de matière organique, chélates, sesquioxydes de fer.

i - cryptopodzolisation, acidocomplexolyse partielle (Pedro, 1974)

ordre de départ : $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ - bases,

produits actuels : argiles 2:I-Al, intergrades Al, sesquioxydes Fe.

fractions minérales actives : intergrades Al d'agradation avec ou sans sesquioxydes de fer.

2.3.1.2. Fractions minérales actives de quelques grandes unités de sols

La fraction active ferrallitique passerait, le temps et le lessivage croissant, par les états halloysitiques, kaoliniques, sesquioxydiques, gibbsitiques avec des raccourcis vers le pôle sesquioxydique dus à une déficience en silice (Tercinier, 1972) et à l'accentuation du drainage et avec des blocages au stade kaolinique pour des causes opposées. Couplée avec l'évolution parallèle des microstructures et la contribution éventuelle des phénomènes de dissolution sélective du quartz par rapport à la kaolinite (Fauck, 1973) cette succession devrait définir pour l'essentiel les sous-systèmes ferrallitiques.

Les horizons Box des sols ferrugineux anciens sont de nature fermosiallitique mais diffèrent par leur organisation d'un horizon ferrallitique. Les fractions actives à kaolinite et oxydes de fer séparés en nodules, cuirasses, sont communs dans les avals des séquons à amont ferrugineux ou ferrallitiques (cf. 4.2.2., unité 14).

Les sols à silicates amorphes sont mis à part à cause de leurs particularités d'origine (pédoclimat perhumide et drainé, roches vitreuses) et de comportement bien qu'ils puissent être sur un phylum défini (ferrallitique).

Les transformations bisiallitiques chloritisantes (dégradation de Pedro) sont propres aux sous-systèmes lessivés à hydromorphie secondaire (ferrolyse), avec habitus brun, lessivé, planique de climats tempérés. Elles ont probablement un homologue tropical, localement fort étendu : sols hydromorphes lessivés de Martin (1968), sols brunifiés tropicaux de Brabant (1972).

Les transformations bisiallitiques vermiculisantes sont probablement caractéristiques des sols fersiallitiques à habitus rouge et brun. Elles affectent également certains sous-systèmes de catenons ou genons ferrugineux mais sont alors accompagnées de translocations importantes du plasma, absentes des séquons fersiallitiques. Au moins en milieu tropical, de la kaolinite pourrait être formée par désilication (Tobias, 1974).

Les sols à fraction illitique ressemblent davantage, en milieu tropical (Gavaud, 1968) à des sols à fraction kaolinique qu'à des sols à fraction bisiallitique, étant facilement désaturés et lessivés.

Les fractions à argiles gonflantes néogénétiques des milieux confinés à pH élevé caractérisent des profils foncés et uniformes, les « argiles noires » au sens large. Elles forment l'aval, à diverses échelles, de nombreux paysages pédologiques dans des altérites, des B d'argilisation, des alluvions et passent par degrés aux produits de transformations bisiallitiques dans des sols variés (ex. : unités 11, 15, 13 in 4.2.2). Les solods, sols halomorphes dégradés, sont un exemple où les transformations et néogénèses bisiallitiques diffèrent d'un sous-système à l'autre et au cours de l'antépédode.

La connaissance des altérations des podzols et sols podzoliques, connues pour plusieurs sous-systèmes et dans le temps, approche du niveau requis pour une bonne classification plus que les autres taxons.

2.3.2. TRANSLOCATIONS

Ce sont tous les déplacements de matières solides ou dissoutes, à l'intérieur des sols, à toutes les échelles tels que la lixiviation, le lessivage, l'illimérisation, les concentrations au sens de Brewer, aussi bien dans leur aspect départ qu'accumulation. Elles participent plus ou moins à la formation des fractions minérales actives dans les cas courants et parfois les constituent entièrement dans des horizons tout à fait specta-

culaires : B argiliques, dont la totalité du plasma peut être d'origine illuviale, cuirasses, carapaces, croûtes « pans » à oxydes, sesquioxides, silice, carbonates, sulfates, sels. Symétriquement il existe des horizons éluviaux, parfois extrêmement épais et formant la quasi-totalité du sol, pouvant être réduits à leur squelette de quartz primaire. Généralement les attributs dûs aux translocations, bien qu'ayant une très forte expression, sont subordonnés à ceux de l'altération, avec des exceptions variables selon les classifications. Le CPCS n'en fait que pour les sols halomorphes. Il ne permet pas de classification satisfaisante, au moins en milieu tropical, des sols très lessivés ou très illimérisés. Inversement l'USDA met au premier rang les horizons argiliques mais, comme elle n'en précise pas clairement la minéralogie, Alfisols et Ultisols ont une réalité génétique assez incertaine. Non seulement la subordination réciproque de ces deux groupes d'attributs paraît ne pas devoir être identique dans toute l'étendue de la classification mais il arrive qu'aucun ne suffise à lui seul à séparer deux taxons. Ainsi l'unité des sols ferrugineux est faite à la fois d'organisations dominées par des translocations en phases solide et soluble et d'altérations par transformations bisiallitiques fortement diversifiées autour d'un pôle ferromonosiallitique. L'unité des sols fersiallitiques est faite de fractions minérales actives bisiallitiques dégradées ou néogénétiques, accessoirement kaoliniques, et par l'absence de translocations en phase solide à l'échelle du genon ou du séquen. Comme on le verra à la fin du paragraphe 3.2.3. ce cas particulier de conflit entre les hiérarchisations causales et d'expression ne peut être résolu par une règle universelle mais uniquement en fonction de la nature, génétique ou empirique, de chaque classification.

2.3.3. FLUX INTERNES

Les drainages internes devraient entrer dans les définitions des systèmes-sols et des sous-systèmes. Les classer sommairement (Pallmann) ou de façon plus détaillée (USDA) est une première garantie, point suffisante toutefois, contre les généralisations géographiques abusives des images taxonomiques. Les cycles internes de substances dissoutes des auteurs russes sont un autre élément important, pouvant aussi bien caractériser de vastes paysages qu'un simple géon. Le recours aux flux internes a également des retombées pratiques importantes. Pour réserver l'avenir il conviendrait de caractériser les systèmes-sols dans le domaine des facteurs conditionnant les flux en attendant de les avoir mesurés.

2.4. Relations externes

2.4.1. FLUX EXTERNES

Le « drainage du sol » devrait entrer dans cette catégorie bien qu'il ne soit évalué que pour une sorte de compartiment apical (*cf.* 1.3.9) standard. Il ne figure qu'en filigrane dans le Classification CPCPS qui ne le mentionne pas dans ses images taxonomiques. Les entrées et sorties de substances dissoutes et d'eau dans le système ne sont encore qu'un élément descriptif rarement employé pour le moment. Les flux thermodynamiques promettent beaucoup et sont un perfectionnement très remarquable de la classification russe. Il est superflu d'insister sur le caractère essentiel de ces données.

2.4.2. FACTEURS DE FORMATION

Leur connaissance supplée à celle des flux. Le climat, la roche-mère, la bio-masse, la topographie entrent en taxonomie à des niveaux divers. Le climat peut être caractérisé à l'échelle de la pédode avec des transformations paramétriques visant à en faire un pédoclimat (USDA), solution plus valable que la production de données brutes. La roche-mère fonde le concept passablement délicat de famille (*cf.* 1.6.2). La physiologie des peuplements végétaux est encore un élément essentiel pratique, sinon avoué, de grands paysages pédologiques (*cf.* 2.1.1). L'édaune ne donne que des taxons inférieurs quoique localement utiles (sols à vers, USDA). Il est peu fréquent que des facteurs géomorphologiques soient directement introduits, comme pour les sols de montagne de la carte Russe des sols d'Asie (Kovda, 1974). Généralement un facteur n'est explicité que lorsque ses effets ne sont pas autrement exprimables, qu'ils sont tenus ou difficilement synthétisables.

2.5. Variables d'activité et variables de structure

Les variables d'activité sont les flux, ainsi que toutes variables de constitution et d'organisation, variant à l'échelle de la pédode, comme les régimes hydriques et thermiques, le pH, les propriétés mécaniques, etc. Elles devraient définir la pédogenèse actuelle. Les variables de structure fluctuent ou évoluent plus régulièrement à l'échelle de l'antépédode, certaines pouvant paraître figées dans les états stationnaires. Elles sont le produit de l'ensemble de l'évolution pédologique.

Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XV, n° 1, 1977: 63-87

3. TECHNIQUE TAXINOMIQUE

3.1. Classifications par hiérarchies d'attributs

Les classifications en usage ont de vastes objectifs. Elles se proposent idéalement une expression résumée des degrés de ressemblance, d'organisation et de constitution par le moyen de regroupements hiérarchisés dont le contenu doit également conserver quelque consistance spatiale et temporelle. Elles se veulent universelles en extension et en compréhension. Elles embrassent tous les sols par tous leurs attributs, internes et externes. Elles sont à la fois morphologiques, phylogéniques, écologiques et même, dans leur usage sinon dans leur conception, chorologiques (Richard, 1974).

Or elles déforment passablement la réalité pédologique, faite d'objets continus, multidépendants et sociaux parce qu'elles sont copiées sur les classifications des sciences naturelles dont les taxons n'ont généralement aucune de ces propriétés. Non seulement elles abandonnent difficilement des régularités déjà inusitées dans leurs modèles, comme l'homogénéité du degré de diversité au sein des taxons, l'égalité des différences entre taxons du même niveau hiérarchique, mais elles en conservent jalousement d'autres, surprenantes dans un matériel aussi compliqué : taxons disjoints, partition représentable par un arbre connexe à partir des Classes, stratification en un petit nombre de niveaux (Classes ou Ordres, Sous-Classes, Groupes, Sous-Groupes, Familles et/ou Série, Types) visiblement calqués sur les strates linnéennes (Embranchements, Classes, Sous-Classes, Ordres, Familles, Genres, Espèces). On retrouve cette attitude très conservatrice dans le fait que l'art subtil des subdivisions, qui permet par exemple à un zoologue de diviser en vingt niveaux la Classe des Mammifères (Simpson, cité par Benzecri, I, 91-99), n'est guère pratiqué.

Les propriétés spécifiques, phylogéniques et sociales, ne sont guère utilisées de sorte que, en général, l'ordre hiérarchique dans les classifications n'est pas un ordre de succession dans le temps ni un ordre d'inclusion dans l'espace. Seuls les taxons extrêmes ont un support spatial concret : génons, polypédons ou leurs éléments minimaux d'échantillonnage pour les taxons inférieurs (Séries, Types), grandes régions géographiques pour certains taxons supérieurs (Classes, Sous-Classes) influencés par le concept zonal dans leurs définitions (Sols Isohumiques).

Les nœuds intermédiaires sont, dans ce sens, « vides ». Ils sont ordonnés par une hiérarchie d'attributs choisis pour leur valeur fonctionnelle ou leur pouvoir discriminant, exprimant les lois générales ou particulières de la pédologie, tout comme dans les classifications linnéennes où prime la valeur physiologique des caractères. Ainsi la Classification du CPCS ordonne successivement, au niveau supérieur le mode d'altération ou le profil organique ou le degré de développement, ensuite le pédoclimat, ensuite les processus d'évolution, ensuite les processus secondaires, ensuite la roche-mère, finalement l'écologie des plantes cultivées. La Classification USDA suit une hiérarchie très voisine.

Les classifications en usage sont en fait des hiérarchies descendantes d'attributs, dont seuls les taxons extrêmes ont une réalité concrète, les nœuds intermédiaires n'étant que des embranchements de clefs en nombre limité. Elles sont essentiellement fondées sur des ressemblances matérielles, très partiellement et parfois nullement sur les propriétés phylogéniques et sociologiques.

3.2. Modes de hiérarchisation des attributs

3.2.1. HIÉRARCHISATION CAUSALE

Elle descend des causes générales aux causes particulières tel le cadre CPCS précité. En dépit de ses défauts il est difficilement remplaçable sans un très grand effort de renouvellement parce qu'il est le produit d'une solide expérience de la corrélation et de la synthèse pédologiques. Les ressemblances cachées mais profondes que présentent avec lui les classifications plus récentes et de projet novateur (USDA, FAO) le démontrent assez. Il faut que les défauts qu'on peut théoriquement lui supposer, fondés sur l'enchaînement variable des causes, la multidépendance causale des systèmes ouverts ainsi que sur les parti-pris taxonomiques sont habilement masqués et difficilement surmontables.

3.2.2. HIÉRARCHISATION TEMPORELLE

Elle suit l'ordre d'apparition des caractères. Elle n'est pas utilisée explicitement mais l'est implicitement avec la précédente ou la suivante. L'indication claire des états synchronique paraît cependant une nécessité pour asseoir une bonne classification.

3.2.3. HIÉRARCHISATION D'EXPRESSION

Le « degré de développement » est présent partout, au niveau le plus élevé, celui des Sols Peu Evolués du CPCS, comme au niveau des horizons caractéristiques de l'USDA. Comme l'expression d'un attribut n'est pas toujours appropriée à son rang causal, des choix sont nécessaires entre les deux hiérarchisations. La diversité des options démarque les classifications entre elles et en démontre finalement l'empirisme. On s'accorde pour créer des sols peu évolués où les éléments relationnels d'un système peuvent exister sans que les variables de constitution et d'organisation soient suffisamment exprimées. Cependant la classification USDA, plus sensible à l'expression, range des sols variés et diversifiés, les groupes en font foi, dans les Psamments, parce que les sables limitent la différenciation. Inversement elle fait des Vertisols un Ordre à cause d'une expression mécanique remarquable alors que leurs éléments relationnels peuvent être ceux d'un sol peu évolué. Elle isole les Alfisols et Ultisols par l'illimérisation que la classification CPCS subordonne. Pour les Sols Halomorphes et Hydromorphes la situation est inverse. Bref la hiérarchisation des expressions entre elles et relativement aux causes est insoluble par elle-même et ne peut l'être que par des règles particulières appropriées au but spécifique de la classification. Pour la genèse et la géographie des sols ces règles sont celle de phylogénie et de pédosociologie. En les appliquant plus strictement, en faisant apparaître phylums et paysages, on peut penser que ces choix se feront d'eux-mêmes.

3.2.4. HIÉRARCHISATIONS PRATIQUES

Les critères d'utilisation des sols interviennent explicitement au niveau de la Famille ou de la Série et implicitement au niveau de l'Ordre (USDA) par le biais de limites quantitatives imposées à certains sous-systèmes pour être considérés comme « horizons majeurs ». Ce dosage prudent ne doit pas être dépassé car une définition appropriée à un usage particulier est nécessairement plus restreinte et, en principe, incluse dans la définition génétique pour autant que cette dernière soit bien faite.

3.2.5. RÉDUCTION TAXONOMIQUE, IMAGE ET CLEF

Quelle que soit la direction de construction d'une classification, ascendante ou descendante, elle s'achève toujours par la sélection d'un certain nombre d'at-

tributs que l'on hiérarchise par voie descendante de sorte que le nombre de choix successifs nécessaires pour atteindre les taxons en parcourant l'arbre taxonomique soit minimum (Benzecri, I, 65-66). La classification est alors transformée en clef avec les conséquences suivantes :

— les systèmes-sols ou tout autre taxon ne sont plus représentés par l'ensemble de leurs attributs, leur définition s.s., mais par une réduction de cette dernière appropriée à la clef, « l'image taxonomique ». En prenant l'une pour l'autre on s'expose à des abus d'identification (cf. 2.2.2.) ;

— les images taxonomiques dépendent davantage de l'ensemble des taxons recensés que les définitions (cf. 3.4.3.) ;

— quelques variables sont sélectionnées et d'autres omises parce que les premières sont associées, covariantes, avec les secondes. Lorsque ces liaisons sont trop faibles le choix comme variable principale d'un seul membre de ces associations fausse la clef ; tel est le pH lorsqu'il doit représenter l'ensemble des variables d'évolution ferrallitique ;

— les attributs facilement mesurables ou évaluables sont privilégiés parce qu'ils se prêtent mieux à des énoncés brefs ;

— la clef étant construite par voie descendante on est entraîné par souci d'esthétique à créer des nœuds vides et des taxons symétriques (cf. 3.1.). Ainsi plusieurs groupes peuvent renfermer les mêmes sous-groupes, occurrence peu vraisemblable lorsqu'elle est trop fréquente (voir Vertisols du CPCS). On crée des régularités artificielles, on fabrique des dichotomies, déjà combattues par Aristote, travers d'autant plus accentués que la classification elle-même a été bâtie par voie descendante.

3.3. Utilisation taxonomique des variables

3.3.1. UTILISATION DANS LES HIÉRARCHIES D'ATTRIBUTS

Les variables, paramètres quantitatifs ou estimations qualitatives des attributs, sont classées, divisées en intervalles rapportés à tel ou tel taxon. Les sols étant continus et l'association des variables n'étant pas rigide, les classes définissant les taxons devraient être empiétantes. Or elles sont exclusives avec des limites formées de valeurs précises ou de fonctions linéaires des variables. De ce fait on crée des unités

artificielles, les « intergrades techniques » (cf. 1.6.3.) dont les paramètres appartiennent à plusieurs taxons à la fois.

On constate d'autre part que les classes relatives à un attribut en divisent entièrement le domaine de variation possible. L'espace des variables pédologiques, qui devrait être irrégulièrement découpé par les enveloppes des points correspondant aux individus groupés dans un taxon, est en fait régulièrement et totalement cloisonné de sorte que n'importe quel individu-sol se loge obligatoirement dans l'une de ces cases. On construit ainsi plutôt un repérage par rapport à des valeurs de variables qu'un repérage par rapport à des essais d'individus ayant des affinités naturelles. Les horizons « bouche-trou » tels que « cambic, ochric » sont des exemples évidents du procédé qui permet à Soil Taxonomy de prendre dans son filet tous les sols connus et même quelques autres.

3.3.2. UTILISATION EN TAXONOMIE NUMÉRIQUE (Benzecri, 1973)

Tous les caractères sont normalisés et numérisés. Des indices de similarité, de distance sont calculés entre tous les individus pris deux à deux sur l'ensemble de ces variables. Ils mesurent le plus ou moins grand degré de ressemblance entre individus et permettent de les regrouper en essais, constellations (Van Den Driessche, 1975) à l'intérieur desquels ils sont mutuellement plus proches que de tout autre point n'appartenant pas à l'essai. Ces groupements de premier ordre sont à leur tour agrégés par le même procédé et ainsi de suite. On construit ainsi par voie ascendante une « hiérarchie de parties » identifiables aux taxons successifs dont les éléments sont de moins en moins ressemblants ou « proches » au fur et à mesure que la partition est d'ordre de plus en plus élevé, ces niveaux, ou « strates », correspondant à des valeurs ou à des classes des indices de similarité. L'avantage est de former de façon objective, uniforme et automatique des groupements exhaustifs en utilisant simultanément de nombreuses variables. Il serait décisif si l'on ne butait pas sur la pondération de ces dernières. Il n'existe pas en effet de règle ou méthode pratiques pour fixer les intervalles des variables équivalents pour le calcul des indices, encore moins pour compenser les caractères absents. L'expérience montre qu'on obtient certains résultats en adoptant des règles arbitraires mais simples : poids égal des variables (principe d'Adanson), équipartition des intervalles de variations (même mesure des variations relatives), intervalles

équivalents pris égaux à l'erreur de mesure (indices de rang), variation de l'indice pour un caractère absent égalée au maximum théorique correspondant de la variable en jeu. Leur énoncé reste toutefois inquiétant et il paraît prudent de restreindre l'emploi systématique de la taxonomie numérique, de toutes façons souhaitable, au départ aux taxons inférieurs où le quantitatif ne se transforme pas en qualitatif (cf. 1.6.2), (Bidwell *et al.*, 1964).

Une autre application excessivement utile est l'analyse des correspondances où la similarité est mesurée non seulement entre individus mais aussi entre variables. Elle permettrait de mieux définir les ensembles d'attributs covariants définissant les taxons.

3.4. Quelques critères de présentation

3.4.1. ACCESSIBILITÉ DES VARIABLES

La facilité de mesure, d'observation n'entre pas en jeu lorsqu'on construit la classification mais seulement lorsqu'on fabrique les images taxonomiques et la clef, sans même que cela soit obligatoire. En effet un praticien averti peut toujours, dans des conditions normales de travail, mettre au point des images et une clef valables pour le lot limité de sols dont il a affaire (Willaime, 1963).

3.4.2. NORMALISATION, ÉCRITURE

La normalisation devrait être réalisée pour l'expression des données qualitatives (glossaires), quantitatives (barèmes), des subordinations, juxtapositions et autres localisations (règles d'écriture, Gavaud, 1975).

3.4.3. FLEXIBILITÉ

Cette notion empruntée à Soil Taxonomy s'applique à un choix de termes tel qu'il permette des regroupements de taxons autres que ceux de l'arbre hiérarchique. Soil Taxonomy résout le problème par l'emploi de racines brèves rappelant les horizons caractéristiques et les régimes pédo-climatiques. Il faut une grande habitude pour être sensible à cette facilité, la racine « utile » étant noyée dans des mots d'une grande barbarie. C'est une précaution louable qui ne compense pas toutefois l'absence de réalité génétique ou géographique de trop nombreux nœuds taxonomiques pour le pédologue-cartographe qui doit aller pêcher sur toute l'étendue de la classification des sols habituellement groupés sur le terrain ou associés dans le temps.

3.4.4. INDÉPENDANCE DES NŒUDS TAXONOMIQUES

Cette propriété, proposée pour les classifications USDA, est celle d'un arbre taxonomique où des modifications locales par ajouts, fusions, dissociations de taxons n'entraînent pas de changement des parties voisines. Elle appartient davantage aux classifications d'ensembles naturels qu'aux clefs à nœuds vides. Il est cependant inévitable que les progrès en pédologie modifieront à la longue toutes les classifications. Il serait possible de limiter cet inconvénient en faisant enregistrer sous forme géographique et vernaculaire les noms des unités de base (systèmes-sols) par une commission de taxonomie ad hoc qui établirait également la suite des antériorités.

4. MÉTHODES AMÉLIORÉES DE CLASSIFICATION

4.1. Méthode mixte, ascendante, à ensembles naturels et à hiérarchie d'attributs

4.1.1. OBJETS CLASSÉS

Le taxon de base est l'état synchronique du système-sol, sans exclusion de propriétés, concrètes ou relationnelles, sans artifice de définition des limites physiques qui restent naturelles. L'individu-sol est matérialisé par un genon ou un caténon ou un faciès. Par commodité il peut être réduit à un volume minimum d'échantillonnage possédant les mêmes directions d'organisation. Le profil, l'habitus, en sont des descriptions condensées. Les sous-systèmes ne sont isolables que comme éléments descriptifs. Les ensembles à signification phylogénétique ou pédosociologique doivent fournir des taxons d'ordre supérieur dans la mesure où ils peuvent être définis de façon analogue à celle d'un système-sol ou à une image réduite de ce dernier par un ensemble de relations et de propriétés pédologiques. Lorsqu'ils ont une signification chorologique leur définition implique celle des frontières concrètes. Les regroupements par affinités, ressemblances, qui ne possèdent pas de support spatial ou temporel sont considérés comme des nœuds vides. Les attributs de la métapédogenèse, de la polygenèse, du compartiment apical se situent à un rang égal ou le plus souvent immédiatement inférieur à celui du taxon de base et, selon leur importance, donnent lieu ou non à des fermetures de branches de l'arbre taxonomique.

4.1.2. DONNÉES DE BASE

Il est nécessaire de disposer d'un corpus des sous-systèmes, des systèmes, des phylums, des unités sociales fautes desquels la seconde méthode par hiérarchie descendante d'attributs s'impose.

4.1.3. AGRÉGATION, CONSTRUCTION DE L'ARBRE TAXONOMIQUE

Par les méthodes de la taxonomie numérique on procède à une première réduction en formant les agrégats correspondant aux individus que l'on croit empiriquement appartenir aux mêmes systèmes et qui possèdent au moins les mêmes ensembles de sous-systèmes. Cette vérification de l'échantillonnage doit permettre de mieux répartir les individus entre les taxons de base, peut-être d'en découvrir de nouveaux, enfin de « soustraire » la part de variabilité attribuée aux « accidents » que l'on situe à un rang inférieur au taxon de base. Pour poursuivre l'agrégation il est ensuite nécessaire, au moins au début, de se donner une hiérarchie a priori d'attributs parce qu'on ne sait pas pondérer entre des éléments qualitativement différents. On prendra pour guide la connaissance intuitive des ensembles sociaux ou diachroniques. Par exemple pour les sols ferrallitiques on peut proposer la suite ascendante :

compartiment apical - agradation/dégradation - unité de base - drainage local - drainage régional - (sols jaunes et rouges régionaux) - stade d'évolution micromorphologique - stade d'évolution minéralogique

qui correspond aux ensembles naturels suivants :

forêt/savane et utilisation - domaine d'érosion - unité de base - séquence locale - séquence générale (grands bassins) - âge micro-structural - âge minéralogique

avec des variantes pour les sols les plus jeunes :

compartiment apical - agradation/dégradation - unité de base - drainage local - type de matière organique

et les sols les plus anciens :

unité de base - type d'oxydes - mode d'accumulation.

L'analyse factorielle ou des correspondances contrôlera la définition des taxons. L'arbre sera optimisé par tâtonnements en modifiant les hiérarchisations, en minimisant les distances internes et en maximalisant les distances externes aux taxons. Les fermetures de branches seront plutôt notées que systématiquement prévues (cf. 1.4.5.).

4.1.4. CONSTRUCTION DE LA CLEF ET DÉFINITION DES IMAGES TAXINOMIQUES

L'arbre étant construit on procédera à la sélection des caractères suffisant à cheminer sur ses branches.

Eventuellement on en rétablira la « connexité » qui peut ne pas être complète par des nœuds « vides », qu'on ne demandera pas ensuite aux cartographes de retrouver sur le terrain ! L'image d'un taxon sera l'ensemble des caractères nécessaires pour atteindre par voie descendante le nœud correspondant.

4.1.5. STRATIFICATION ET NOMENCLATURE

Les nœuds et les éléments terminaux de l'arbre taxonomique pourraient être suffisamment repérés par deux indices, l'un donnant le rang dans l'ordre habituel « vertical » de hiérarchisation, l'autre dans l'ordre séquentiel « latéral » (Benzecri, I, 123-124) qui existe aussi, au moins partiellement, dans les dendrogrammes pédologiques (cf. fig. 1). En fait, construire une nomen-

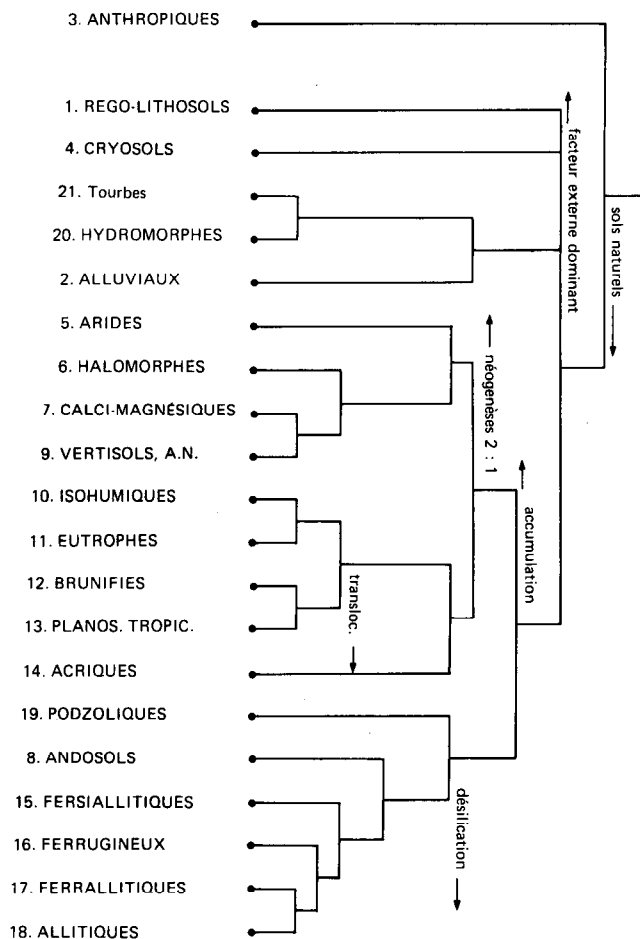


FIG. 1. — Arbre de parenté des grandes unités

clature des divers niveaux de regroupement reste une habitude impérieuse. On reportera donc sur l'arbre des « strates » horizontales qui seront nommées « Classes », « Sous-Classe », etc. (cf. 4.2.4.4.). Leur nombre est limité pour ne pas avoir de noms interminables ce qui a pour conséquence que chacune d'elles contiendra un nombre de nœuds variable de l'une à l'autre et d'une branche à l'autre parce que le nombre de nœuds séparant la base du sommet de l'arbre est plus grand que celui des strates et qu'il diffère d'un rameau à l'autre. Il faudra plus de souplesse dans les définitions des strates et le calcul du nombre de leurs subdivisions que dans les classifications par hiérarchie d'attributs où il n'y a jamais qu'un nœud par strate et par branche. La nomenclature pourra s'inspirer de systèmes lexicographiques récents (Chatelin 1972, USDA 1960), être formée de composés de brefs radicaux, un radical par strate, chaque radical nommant le caractère de clef essentiel, des suffixes discriminant les subdivisions. Elle sera exhaustive mais probablement impénétrable pour les non-spécialistes et sujette aux modifications de la clef et à celles, plus rares, de l'arbre. Aussi conviendrait-il que les taxons de base reçoivent aussi un nom plus populaire (habitus, origine...) intangible, reçu et protégé par une Commission de Taxinomie.

4.2. Méthode par hiérarchie descendante d'attributs

4.2.1. ACTUALITÉ, RÉFORME POSSIBLE

Faute de corpus de données la méthode précédente n'est pas applicable. Seule la hiérarchisation d'attributs l'est. Cette dernière n'est pas améliorable simultanément pour tous les utilisateurs mais seulement en fonction d'intérêts particuliers (cf. 3.2.3.). Les Classifications en usage, toutes de ce type, sont des compromis qu'il ne serait pas prudent de modifier radicalement si l'on voulait en même temps conserver leur clientèle non spécialisée.

On peut tenter de les améliorer à des fins génétiques et cartographiques en les rapprochant de l'arbre taxonomique bâti par la méthode précédente de la façon suivante :

— prendre la même définition pour les taxons de base, systèmes-sols définis par tous leurs attributs et diversement matérialisés ;

— établir de la même façon les unités inférieures aux taxons de base ;

— dresser la liste des unités supérieures sur lesquelles un consensus des pédologues est fait ou près de l'être ; la plupart approchent beaucoup d'unités naturelles ;

— relier taxons de base et unités supérieures par une clef copiée sur l'un des modèles existant mais modifiée de façon à faire apparaître quelques taxons à signification phylogénique ou sociologique de plus ;

— éventuellement améliorer la connexité de l'arbre en formant une hiérarchie partielle des unités supérieures (cf. fig. 1) ;

— stratifier avec plus de souplesse qu'il n'est habituel.

Ci-dessous nous avons tenté de dresser la liste des unités supérieures et essayé de hiérarchiser l'une d'elles.

4.2.2. LES UNITÉS SUPÉRIEURES

Sources ou Références : a = CPCS, b = FAO, c = USDA, d = Russe.

Unité n° 1

- a : sols d'érosion, Regosols, Lithosols, sols Regosoliques, sols lithiques
- b : Lithosols
- c : Entisols p.p.
- d : sols sur roches compactes

système : genon

profil : C ou (A)-C ou A-C

habitus : ranker p.p.

sous-système : néant

matière organique : variable

fraction minérale active : surtout minéraux primaires ou héritée

translocations : surtout mécaniques

facteur externe : dégradation extrême.

Unité n° 2

a : sols d'apport

b : Arenosols, Fluvisols, Rhegosols

c : Entisols p.p.

d : sols alluviaux

système : genon

profil : C ou (A)-C ou A-C

habitus : stratifié

sous-système : néant

matière organique : variable

fraction minérale : héritée

translocations : mécaniques

facteur externe : extrême agration

Unité n° 3

c : Arents, Plaggepts
 d : sols modifiés par la culture
 système : genon
 profil : Ap-C, Ap-(BC)-C
 habitus : brun
 sous-système : plaggen pp., agric p.p.
 matière organique : anthropique
 fraction minérale : variable anté-génétique
 translocations : anthropiques
 facteur externe : métapédogenèse extrême

Unité n° 4

a : Cryosols, peu évolués à Permagel
 c : Cryents,
 d : sols cryogéniques
 système : genon
 profil : C ou (A)-C
 habitus : polygonal, etc.
 sous-système : néant
 matière organique : nulle ou moder, hydromor
 fraction minérale : héritée
 translocations : mécaniques par gel/dégel
 facteur externe : froid extrême

Unité n° 5

a : sols xériques, sols subarides
 b : Ermosols, Xerosols
 c : Aridisols p.p.
 d : sols des déserts, sirozems
 système : genon, faciès
 profil : C, A-C, A-(B)-C
 habitus : gris, brun, de reg
 matière organique : mull, moder calcique ou saturé
 fraction minérale : produits de la bisiallisation (cf. 2.3.1.1., g)
 translocations : mécaniques (regs...); substances solubles recyclées dans un compartiment apical très mince, éventuellement argile très fine
 facteur externe : sécheresse extrême

Unité n° 6

a : sols halomorphes
 b : Halosols
 c : groupes salic et natric p.p.
 d : sols salins
 système : genon
 profil : A-C, A-(B)-C
 habitus : solonetz, solontchak, sol marin
 matière organique : dispersée
 fraction minérale : produits de la bisiallisation (g); sels continentaux ou marins
 translocations : sels, matière organique
 facteur externe : excès de sels

Cas particuliers

solods : genon ou catenon, profil A-B-C ou A-E B-C, habitus caractéristique, sous-systèmes « natric » et E dégradé, fraction minérale dégradée en E (probablement e puis d)

illimérisation après désalinisation. Prévoir une fermeture entre 6 et 12
 sols marins acides à sulfates : doivent peut-être former une unité à part du fait de leur chimisme très particulier (Vieillefon, 1974).

Unité n° 7

a : sols calcimagnésiques p.p.
 b : Rendzinas
 c : groupes calcic, gypsic p.p.
 système : genon
 profil : A-C, A-(B)-C
 habitus : rendzine, ranker, sol brun
 matière organique : mull calcaire, mull calcique
 fraction minérale : carbonates Ca, Mg, sulfate Ca, produits de la bisiallisation
 translocations : carbonates et sulfates partiellement
 facteur externe : excès de carbonates Ca, Mg et sulfates Ca.

Note : les sous-systèmes à accumulation de carbonates et sulfates (croûtes...) présents dans cette unité n'en sont pas spécifiques (cf. 9, 10, 11).

Unité n° 8

a : Andosols
 b : Andosols
 c : Andepts
 d : Andosols
 système : genon
 profil : A-C, A-(B)-C
 habitus : spécifique ou brun
 matière organique : variable
 fraction minérale : silicates amorphes (cf. 2.3.1.1., c)
 translocations : produits dissouts
 facteurs externes : humidité, drainage excessifs, verre.

Unité n° 9

a : Vertisols s.l.
 b : Vertisols
 c : Vertisols
 d : sols noirs tropicaux
 système : genon
 profil : A-(B)-C
 habitus : argile noire et vertisol
 sous-systèmes : (B) vertique et (B) tirsifié, mélanisé
 matière organique : mull particulier très lié à l'argile
 fraction minérale : argiles gonflantes produites ou héritées de la bisiallisation s.s. (g)
 translocations : par pédoturbation si la texture s'y prête ; sels divers ; éventuellement un peu d'illimérisation
 facteur externe : confinement.

Unité n° 10

a : sols isohumiques p.p.
 b : Castanozems, Chernozems, Phaeozems, p.p.
 c : Mollisols p.p.
 d : sols châtaîns, chernozems, sols de prairie neutres

système : genon, faciès
 profil : A-(B)-C
 habitus : sol brun, sol châtain, terre noire
 matière organique : mull calcique
 sous-systèmes : horizons A spéciaux, mollic...
 fraction minérale : conservation ou produits de la vermiculitisation, illitisation (e, f)
 translocations : carbonates Ca, pédoturbation biologique
 facteur externe : steppes froides

Unité n° 11

a : sols bruns tropicaux
 b : Eutric Cambisols (?)
 c : parmi les Ochrepts, Tropepts
 système : genon (cf. 1.3.6)
 profil : A-(B)-C
 habitus : sol brun eutrophe
 matière organique : mull calcique (?)
 sous-système : (B) à définir
 fraction minérale : produits de la vermiculitisation, probablement (2.3.1.1., e) sans sesquioxydes de fer non séparés et colorant le plasma
 translocations : produits dissous, éventuellement reçus de 15
 facteurs externes : sites intermédiaires entre 9 et 15.

Unité n° 12

a : sols brunifiés
 b : Luvisols p.p., Planosols, Luvic Phaeozems
 c : Alfisols p.p.
 d : sols bruns acides, sols gris de forêt
 système : genon, catenon
 profil : A-B-C, A-E-(B)-C
 habitus : sol brun lessivé, sol lessivé, planosol
 sous-systèmes : B argilique, E ou (E) dégradé et lessivé
 matière organique : mull acide, moder
 fraction minérale : produits de la chloritisation (d) en E, éventuellement vermiculitisation, illitisation en B ou C
 translocations : illimérisation, déferritisation secondaire
 facteur externe : climat tempéré humide.

Unité n° 13

a : sols brunifiés tropicaux (Brabant, 1972)
 b : Luvisols p.p.
 c : Alfisols p.p.
 système : genon, catenon
 profil : A-B-C, A-E-B-C
 habitus : sol hydromorphe lessivé, planosol
 matière organique : mull acide (?)
 sous-systèmes : (B) d'argilitisation, B argilique, B argilique planique, E lessivé et dégradé
 fraction minérale : produits de la chloritisation, de la ferrolyse en surface, de la vermiculitisation et de la bisiallitisation par confinement en profondeur
 translocations : intenses et très diversifiées, illimérisation
 facteurs externes : avals de bassins tropicaux

Unité n° 14

a : certains sols ferrugineux lessivés, certains hydromorphes lessivés
 b : Acrisols p.p.
 c : Ultisols p.p.
 système : genon
 profil : A-B-C, A-E-B-C
 habitus : sol lessivé, souvent à nodules, taches ferrugineuses
 matière organique : mull acide (?), moder (?)
 fraction minérale : produits de la siallitisation ; pas de sesquioxydes de fer non séparés.
 sous-systèmes : à définir : B argilique, Bfe, E
 translocations : argiles et sesquioxydes de fer
 facteurs externes : évolution de couverture kaolinique ; aval de 16 et 17 ; ensemble actuellement non clairement délimité.

Unité n° 15

a : sols fersiallitiques p.p.
 b : certains Cambisols (?)
 c : Ustochrepts, Xerochrepts, Ustropepts (?)
 d : sols cinnamoniens ? krasnozems pp.. ?
 système : genon
 profil : A-(B)-C
 habitus : sol rouge « eutrophe », « méditerranéen », terra rossa p.p.
 sous-système : (B) particulier à définir
 matière organique : mull
 fraction minérale : vermiculitisation en surface et sesquioxydes de fer non séparés dans le (B) ; un peu de kaolinite héritée (méditerranéen) ou secondaire (tropical, cf. 2.3.1.1. e et 2.3.1.2.) ; en profondeur comme n° 11 (C).
 translocations : pratiquement nulles sous forme solide.
 facteurs externes : roches basiques en milieu drainé tropical et subtropical.

Unité n° 16

a : sols ferrugineux tropicaux s.s.
 b : groupes chromic, rhodic ?
 c : Udults, Ustults p.p., Xerults (?)
 d : sols ferrugineux tropicaux.
 système : genon, catenon, faciès
 profil : A-B-C, A-E-B-C, A-E-B-E-C,...
 habitus : spécifique, sol lessivé à Box coloré
 sous-systèmes : Box et E
 matière organique : mull acide (?)
 fraction minérale : variable selon l'âge et le sous-système ; pôle fermono-siallitique dans les vieux Box ; dégradations bisiallitiques variablement dosées ailleurs
 translocations : intenses et variées ; illimérisation, lessivage du fer.
 facteurs externes : sites bien drainés en milieu tropical (subtropical ?) sur roches acides à neutres ou sur couverture fermonosiallitique ancienne (grès continentaux) ; forment des séquons polypédomorphes compliqués avec les canetons n° 13 et 14.

Unité n° 17

- a : sols ferrallitiques s.s.
- b : Ferralsols, « nitosols »
- c : Oxisols
- d : Ferralsols, latosols

système : genon (même problème que n° 15, 2.3.1.3.)

profil : A-B-C

habitus : spécifique

matière organique : mull acide (?) et moder

fraction minérale : produits de la ferromoniallisation.

sous-systèmes : B à définir (cf. 2.3.1.2.) de type « nitique », « aliatique »... ; compartiments très variés

translocations : sous forme soluble dans les Box ; lessivage et illuviation d'argile, d'argile et sesquioxydes de fer dans le compartiment apical ou à la base du solum

facteurs externes : climats équatoriaux et longue antépédode ; bon drainage

Unité n° 18

- a : sols ferrallitiques
- b : plinthic ferralsols (?)
- c : groupes gibbsic des Oxisols
- d : « cuirasse » p.p.

système : genon

profil : A-B-C

habitus : sols ferrallitiques ; cuirasses d'accumulation relative.

sous-système : Box purement sesquioxidyde

matière organique : comme 17 (?)

fraction minérale : produit de l'allitisation et de la ferrugination (2.3.1.1. a)

translocations : sous forme soluble pour le gros de l'accumulation relative ; accumulations absolues secondaires possibles

facteurs externes : climats équatoriaux, très longue antépédode ou roches à déficit de silice ; sites les mieux drainés.

Unité n° 19

- a : sols podzolisés
- b : Podzols
- c : Spodosols
- d : Podzols

système : genon, catenon, faciès

profil : A-B-C, A-E-B-C

habitus : podzol, ocre podzologique

sous-systèmes : horizons Bh, Bh₁fe (spodic, placic), horizons E spécifiques

matière organique : moder, mor

fraction minérale : produits de l'« acidocomplexolyse » (2.3.1.1. h et i)

translocations : intenses sous forme soluble ou solide

facteurs externes : évolution en présence d'acides organiques ; surtout climats froids et humides mais aussi milieux désaturés équatoriaux (Turenne, 1975)

fermetures : entre 19 et 12 (podzoluvisols, FAO), entre 19 et 18.

Unité n° 20

- a : sols hydromorphes
- b : Gleysols
- c : sous ordres aquic
- d : sols hydromorphes

systèmes : genon, catenon

profils : A-G, A-(BG), etc.

habitus : gley, pseudogley

matière organique : hydromull, hydromoder, hydromor, anmoor

fraction minérale : héritages variables ; débuts de dégradation bisiallitiques (néoéluviation) ou conservation ou début de confinement (orthogley).

sous-systèmes : à définir dans l'optique orthogley/néo-éluviation de Kovda (1973)

translocations : spécifiquement séparation des oxydes et hydroxydes Fe, Mn par oxydo-réduction ; formes spéciales de lessivage et d'illuviation, de l'argile jusqu'au sable très fin ; translocations de sels divers.

facteur externe : excès d'eau.

Unité n° 21

- a : sols hydromorphes organiques
- b : Histosols
- c : Histosols
- d : tourbes

système : genon

profils : O-A

habitus : tourbes

matière organique : tourbe

fraction minérale : cendres

translocations : matière organique soluble

facteur externe : engorgement permanent.

Sols à translocations très intenses

Sols à forte accumulation : les sols à cuirasses, croûtes, etc., sont répartis selon la nature des sous-systèmes associés entre les unités : 5, 6, 7, 9, 10, 14, 16, 17, 18, 19.

Sols à forte éluviation : les sols très fortement lessivés, à raies, etc., font problème à cause de leur morphologie et de fractions minérales actives parfois bizarres, riches en minéraux primaires dans leur plasma (quartz, micas). On ne sait s'il vaut mieux en faire une unité d'ordre supérieur (éluviation excessive) ou les inclure dans les autres unités à sols lessivés (13, 14, 16, 19, peut être 12, 20) soit comme génon, soit comme compartiment de catenon, à la faveur de ressemblances minéralogiques ou de restes de sous-systèmes caractéristiques.

4.2.3. HIÉRARCHISATION DES UNITÉS SUPÉRIEURES

Par fusion ou subdivision de ces 21 unités on obtient toutes les Classes (Ordres), Sous-Classes en usage.

La légende FAO qui ne hiérarchise pas ses unités en obtient également 21 dont 9 sont communes avec les nôtres et 4 autres à peu près concordantes. Les réductions du CPCS ou USDA les ramènent respectivement à 12 et 10 Classes (Orders). Il y aurait donc de par le monde environ une vingtaine d'unités supérieures de sol dont les parentés sont trop faibles pour être réunies en moins de dix troncs à la naissance de l'arbre taxonomique pédologique. Il est possible que cette situation tienne aux nécessités de la stratification (cf. 4.1.5.) car l'essai présenté dans la figure 1 d'un arbre de parentés approximatives montre qu'une unification plus poussée n'est peut-être pas possible au prix de l'abandon d'une définition homogène des strates.

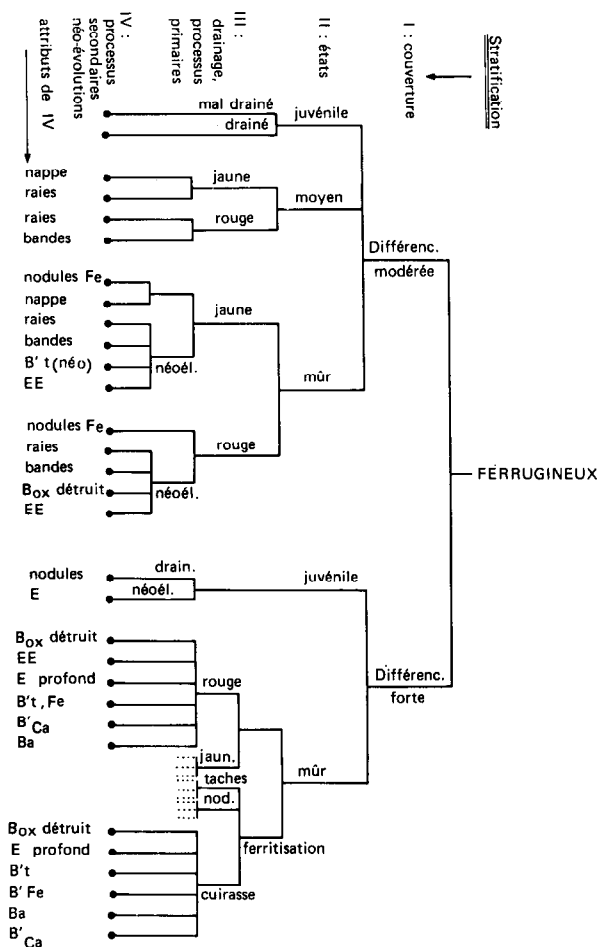


FIG. 2. — Hiérarchisation descendante d'attributs dans les sols ferrugineux.

4.2.4. ESSAI DE HIÉRARCHISATION D'UNE UNITÉ SUPÉRIEURE, LES SOLS FERRUGINEUX

4.2.4.1. Définitions

Les Sols Ferrugineux possèdent toujours dans leur antépédome au moins un sous-système à sesquioxides de fer non séparés du plasma et le colorant en rouge ou jaune. La fraction minérale active est à pôle ferromonosiallitique dans ces horizons Box les plus évolués et à proportions variables de produits de dégradation bisiallitiques dans les autres sous-systèmes. Très tôt des translocations d'argile et de sesquioxides de fer différencient un épipédon pauvre en plasma, en matière organique, compact (« ochric »). Ultérieurement la très grande mobilité du plasma, formé d'argile, de sesquioxides de fer migrant ensemble puis séparément, d'oxydes de manganèse et de quartz très fin, produit des horizons d'accumulation ferrugineuse puis une transformation interne du genon primitif en caténons lessivés des types 13 et 14. Par convention on ne classe pas en Sol Ferrugineux un sol dont le Box a disparu, sauf si cela est dû à une surcharge ferrugineuse. Les Sols Ferrugineux sont les termes les mieux drainés, des génons le plus souvent, des séquons sur roches acides ou neutres des régions tropicales à saison sèche accentuée. Par leur fraction minéralogique active ils se situent entre les Sols Ferrallitiques et Fersiallitiques mais s'en distinguent par leurs organisations dominées par les translocations en phases solubles et solides.

On les trouve dans deux grands types de couverture pédologique correspondant respectivement aux Sols Ferrugineux Peu Lessivés et aux Sols Ferrugineux Lessivés classiques (Aubert, 1965), dont la définition doit être élargie au niveau de la différenciation des antépédomes.

4.2.4.2. Sols Ferrugineux Peu ou Modérément Différenciés

Les antépédomes ne dépassent guère les états de profils G, parfois U, à Box jaunes ou rouges homogènes, sans structures fragmentaires différenciées. L'épaisseur, variable, peut être très grande. Les gradients du plasma sont progressifs, quelquefois nuls à l'intérieur des Box. Les accumulations de sesquioxides de fer séparés sont limitées, parfois absentes. Les auto-transformations secondaires lessivantes se situent dans le compartiment apical et à la base des Box. Elles prennent souvent un habitus lamellaire et ne produisent pas de caténons 13 et 14 très nets, les Box restant toujours plus ou moins reconnaissables

et tendant souvent à se reformer (niveau faciès) dans les horizons E néoéluviaux. Ces sols se forment sur les matériaux à squelette quartzeux abondant, très perméables, de la couverture sédimentaire, surtout s'ils sont issus, plus ou moins directement, de diluviums rhexistatiques d'écorces d'altération évoluées (grès continentaux et sables en dérivant). Une dernière singularité est que dans les géons les plus sableux l'organisation tend à être indépendante de la minéralogie de la fraction minérale active qui peut alors être variable.

On y définit trois états moyens de différenciation qui sur de vastes surfaces, sinon toujours, correspondent à trois états synchroniques, pour le second niveau de hiérarchisation :

- a - état très juvénile et/ou à profils U, à Box jaunâtres ou même brunâtres en sites bien drainés, peu épais, sans gradient textural ni organisation structurale.
- b - état juvénile et/ou à profils U, à Box rougeâtres en sites bien drainés nettement plus riche en plasma que le C et l'épipédon.
- c - état mûr et/ou à profils G, à Box rouges en sites bien drainés, à transformations lessivantes secondaires pouvant être importantes dans les limites précitées, parfois très profonds, à fraction minérale souvent ferromosiallitique.

Les définitions complètes de ces états sont riches de nombreuses variables (Gavaud, 1968).

Le troisième niveau de hiérarchisation correspond aux manifestations du drainage moyen, local ou régional, pour les états juvéniles et mûrs (b et c) :

- profils bien drainés, rouges
- profils moins drainés, jaunes

qui sont associés à de nombreuses variables (pH, matière organique) et aux attributs du niveau suivant.

Le quatrième regroupe, pour faire plus court, à la fois les attributs secondaires dans le géon primitif et ceux des transformations lessivantes :

- nodules ferrugineux
- horizons enrichis ou au contraire lavé en sesquioxides par une nappe
- autres manifestations d'hydromorphie ou d'accumulation par hydromorphie puis :
 - compartiment apical secondairement éluvié (raies...)
 - compartiments profonds secondairement éluviés (bandes)
- Box en voie de destruction interne
- Box secondaire
- horizons illuviaux secondaires (caténon)
- habitus hyperlessivé.

Le cinquième niveau est celui de familles fondées surtout sur les héritages minéralogiques. Le sixième niveau est celui des systèmes-sols dont les images sont regroupées en Séries au-dessous desquelles on situera les effets de l'agradation/dégradation (hydrique et éolienne) puis de la métapedogenèse.

Le Faciès Subaride, celui de l'unité n° 5, qui affecte les sols ferrugineux inactuels ou obsolètes, situés dans des climats plus secs que lors de leur antépédode, se situe causalement entre les niveaux 5 et 6.

4.2.4.3. Sols Ferrugineux Différenciés

Ils réunissent des profils D, à Box jaunes ou rouges, à structures fragmentaires plus apparentes ou à séparations ferrugineuses. Leur épaisseur est faible à moyenne, jamais très grande. Les gradients de plasma sont contrastés. Les accumulations de sesquioxides de fer sont communes, parfois très spectaculaires. Les transformations secondaires lessivantes attaquent le géon primitif surtout par sa base et créent des profils très complexes, du genre A-E-Box-E-Ba-C. Elles aboutissent à des caténons 13 et 14. La fraction minérale active tend à être ferromosiallitique dans les Box évolués du géon primitif puis s'enrichit de produits bisiallitiques et siliceux dans les caténons secondaires. Ces Sols Ferrugineux se forment sur des roches moins perméables et plus riches en minéraux altérables que les Sols Peu Différenciés.

Bien qu'on en connaisse des étagement topochronologiques nombreux il n'est pas actuellement possible de définir clairement de nombreux états synchroniques. Un seul, juvénile, et l'ensemble des autres formeront donc le second niveau de hiérarchisation.

L'état juvénile est celui de sol qui, sur le socle cristallin, sont arénacés, minces, dépourvus de concentrations ferrugineuses importantes, néanmoins à profils déjà compliqués (A-E-Box E-C). Les états mûrs ne peuvent être guère explicitement séparés à ce niveau ; ils le sont implicitement aux niveaux suivants par les degrés de développement des sous-systèmes primaires et secondaires.

Le troisième niveau n'est pas homogène parce qu'il réunit plusieurs groupes d'attributs qu'on ne sait pas toujours discriminer : les attributs du drainage exprimés par les structures et les couleurs des Box, les attributs du drainage et de l'âge exprimés par l'intensité des accumulations ferrugineuses. Il est formé de sols sans taches ni concrétions, les uns bien drainés (rouges), les autres moins (jaunes), de sols à taches ferrugineuses, à concrétions ferrugineuses

(i.e. nodules et concrétions durcies). à carapaces et cuirasses ferrugineuses. La trame de ces accumulations ferrugineuses est celle des horizons Box et C.

Le quatrième niveau prend en considération les effets multiples des translocations secondaires :

- horizon Box (ou son successeur nodulaire ou cuirassé) en voie de destruction.
- horizon E secondaire de surface épais.
- habitus hyperlessivé.
- horizon E en profondeur.
- horizons illuviaux secondaires : Bt, Bfe, Bca caténons)
- horizons d'argilisation bisiallitique.

Remarquons que les horizons d'accumulation ferrugineuse (ou manganésifère) secondaire doivent être séparés de ceux du troisième niveau, ce qui est rendu possible parce que leur trame peut être celle d'un horizon E ou Bt.

Le cinquième niveau est formé de familles, certaines évidentes sur le terrain, dont le contenu est difficile

à expliciter autrement que par la mention de la roche-mère.

Le sixième niveau est celui des systèmes-sols regroupés en Séries au-dessous duquel prennent place les effets de l'agradation-dégradation (surtout hydrique et biologique) et de la métapédogenèse.

Le Faciès Subaride existe également mais est plus difficile à mettre en évidence.

4.2.4.4. Stratification

Pour garder la terminologie CPCS, les Groupes sont représentés par les niveaux 1 et 2 pour les sols les moins différenciés, 1, 2 et 3 pour les autres et pour les Sous-Groupes respectivement par les niveaux 3, 4 et 4. Les Familles sont au niveau 5 et les unités de bases (Séries) au niveau 6.

Manuscrit reçu au Service des Publications le 24 mars 1977

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.), DUCHAUFOR (Ph.), 1956. — Projet de classification des sols. *Int. Congr. Soil Sci.*, 6, 1956. Paris, v.E, 597-604.
- AUBERT (G.), 1965. — Classification des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. III, n° 3 : 269-288.
- BEAUDOU (H.G.), 1972. — Expression morphologique de la micro-agrégation et de l'illuviation dans certains horizons de sols ferrallitiques Centrafricains et dans les sols hydromorphes associés. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 4 : 357-371.
- BENZECRI (J.P.) et col., 1973. — L'analyse des données ; I : Taxonomie. Dunod ed., Paris.
- BERTALANFFY (L.), 1973. — Théorie générale des systèmes. Dunod, Paris.
- BIDWELL (O.W.), HOLE (F.D.), 1964. — Taxonomie numérique et classification des sols. *Soil Science*, 97 (1) : 58-62.
- BOCQUIER (G.), 1973. — Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. *Mém. ORSTOM*, n° 62, Paris.
- BOULET (R.), 1974. — Toposéquences de sols tropicaux en Haute Volta. Equilibres dynamiques et bio-climatiques. Thèse, Strasbourg, résumé in *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XIII, n° 1 : 3-6.
- BOS (R.H.G.), SEVINK (J.), 1975. — Introduction of gradational and pedomorphic features in description of soils. *Journ. of Soil Sci.*, XXVI, 3 : 223-233.
- BOULAIN (J.), 1969. — Sol, Pédon, Génon. Concepts et définitions. Bull. AFES (Versailles), mars-avril 1969, 2 : 31-40.
- BRABANT (P.), 1972. — Carte pédologique du Cameroun à 1/200 000. Feuille Rey-Bouba. ORSTOM, Yaoundé.
- BREWER (R.), 1964. — Fabric and Mineral analysis of soils. J. Wiley & Sons. New York.
- BRINKMAN (R.), 1969. — Ferrollysis, a hydromorphic soil forming process. *Geoderma*, 3 : 199-206.
- CHATELIN (Y.), MARTIN (D.), 1972. — Recherche d'une terminologie typologique applicable aux sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 1 : 25-44.
- C.P.C.S., 1963-1967. — Classification des sols, 96 p.
- DE CONINCK (F.), JAMAGNE (M.), 1974. — Evolution of the fine fraction in a chronoséquence on loess materials in northern France. C.R. X Cong. Int. Sc. Sol. Moscou, VII : 83-89.
- DUTIL (P.), 1964. — La pédogenèse dans le désert saharien. VIII Cong. Int. Sc. Sol, Bucarest.
- DUCHAUFOR (Ph.), 1970. — Précis de Pédologie. Masson & Cie, Paris.
- FAUCK (R.), 1973. — Contribution à l'étude des sols des régions tropicales. Les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique Occidentale. Thèse. *Mém. ORSTOM*, n° 61, Paris.
- F.A.O., 1968. — Definition of soil units for the soil of the world. World Soil Resources reports, n° 33, Rome.
- FIELDER (M.), 1968. — Constitutional classification of soils. IX Cong. Int. Sc. Sol, Adelaïde, IV : 177-185.
- FITZPATRICK (E.A.), 1967. — Soil nomenclature and classification. *Geoderma*, I : 91-105.

- FRIDLAND (V.M.), 1974. — Principales caractéristiques des structures de la couverture de sol de la partie européenne de l'URSS. X Cong. Int. Sc. Sol, VI (II) : 552-558.
- GAVAUD (M.), 1968. — Les sols bien drainés sur matériaux sableux du Niger. Essai de systématique régionale. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 3-4 : 277-307.
- GAVAUD (M.), 1976. — Les sols de la vallée de la Bénoué. Tome C. ORSTOM, Yaoundé, Cameroun.
- GERASIMOV (I.P.), 1974. — World soil maps and relevant scientific problems of Science. - X Int. Cong. Soil Sc., Moscow, VIII : 13-28.
- GERASIMOV (I.P.), 1974. — Utilization of the concepts of elementary soil processes for a genetic diagnosis of soils. X Int. Cong. Soil Sc., Moscow, VI (II) : 482-489.
- GIRARD (M.C.), 1968. — Approche statistique de la notion de série. Thèse. Paris.
- JAMAGNE (M.), 1972. — Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du Nord de la France. Thèse. Gembloux, Belgique.
- KALOGA (B.), THOMANN (C.), 1971. — La physico-chimie du complexe absorbant dans les sols bruns eutrophes. Les relations avec leur différenciation morphologique et leur classification. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IX, n° 4 : 461-507.
- KOVDA (V.A.), 1973. — Hydromorphic Soils of Mediterranean and Tropical areas. Pseudogley & Gley, Verlag Chemie : 379-382.
- LAMOUREUX (M.), 1972. — Etude de sols formés sur roches carbonatées. Pédogenèse fersiallitique au Liban. Thèse. *Mém. ORSTOM*, n° 56, Paris.
- LAMOUREUX (M.), 1972. — Essai de structuration pour une classification des sols et des milieux de pédogenèse. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 3 : 243-250.
- LATHAM (M.), 1975. — Les sols d'un massif de la côte Ouest de la Nouvelle Calédonie : le Boulinda. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XIII, n° 1 : 27-40 et vol. XIII, n° 2 : 159-172.
- LENEUF (N.), 1959. — L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. Thèse. ORSTOM, Paris.
- MAIGNIEN (R.), 1958. — Le cuirassement des sols en Guinée, Afrique Occidentale. *Mém. Serv. Carte géol. Als-Lorr.* n° 16, Strasbourg.
- MARTIN (D.), 1968. — Les sols hydromorphes à pseudogley lithomorphes du Nord-Cameroun, ORSTOM, Yaoundé, Cameroun, *multigr.*, p. 169.
- MARTIN (D.), 1975. — Comparaisons de profils du Congo par des distances. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 2 : 175-190.
- MATTSON (S.), 1930. — *Soil Sci.*, 30, 459-495 et 31, 57-77. In Duchaufour, 1970.
- MILLOT (G.) 1964. — Géologie des argiles. Altération, sédimentologie, géochimie. Masson et Cie éd., Paris (VI).
- MULLER (J.P.), 1974. — Morphologie des horizons supérieurs des sols fersiallitiques du Gabon. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XII, n° 3/4 : 277-287.
- NORTHCOTE (K.H.), 1962. — A fracture key for the recognition of Australian Sorbs. 2 net. ed., C.S.I.R.D., Restr. Div. of Sorb, rep. 2/65.
- PEDRO (G.), 1964. — Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. *Ann. Agron.*, XV (2), 85-191 et XV (3).
- PEDRO (G.), BITAR (K.E.), 1966. — Contribution à l'étude des sols hypermagnésiens. Recherches expérimentales sur l'altération chimique des roches ultrabasiques (serpentinites). *Ann. Agron.*, 1966, XVII (6) : 611-651.
- PEDRO (G.), JAMAGNE (M.), BEGON (J.C.), 1969. — Mineral interactions and transformations in relation to pedogenesis during the Quaternary. *Soil Sci.*, 107 (6) : 462-469.
- PEDRO (G.), JAMAGNE (M.), BEGON (J.C.), 1974. — Les deux grandes voies de l'évolution pédologique à caractère acide en milieu tempéré froid et humide. *Pochvodnié*, IX : 3-13.
- PERRAUD (A.), 1971. — La matière organique des sols forestiers de la Côte d'Ivoire (relations : sol, végétation, climat). Thèse. Fac. Sc. Nancy I.
- RICHARD (J.F.), 1974. — Paysage, écosystème, environnement. ORSTOM, Adiopodoumé, Côte d'Ivoire, *mult.*, 26 p.
- RUELLAN (A.), 1971. — The history of soils : some problems of definition and interpretation. Paleopedology, Origin, nature and dating of paleosols. Yaalon ed., Intl. Soc. Soil Sci. and Israel Univ. Press. Jerusalem.
- SCHLICHTING (E.), 1970. — Soil classification and 'Bodensoziologie'. Z. Pfl. Ernähr. Bodenk. 127, 1-9 (G.e), Univ. Hohenheim, Germ. Fed. Rep.
- SEGALEN (P.), 1969. — Le remaniement des sols et la stone-line en Afrique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VII, n° 1 : 113-127.
- SEGALEN (P.) et al., 1976. — Pour une nouvelle classification des sols. ORSTOM, inédit, Paris.
- SIEFFERMANN (G.), 1973. — Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. *Mém. ORSTOM*, n° 66, Paris.
- TARDY (Y.), 1969. — Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse. Fac. Sci. Strasbourg.
- TERCINIER (G.), 1972. — Les sols bauxitiques de karst des atolls surélevés du Pacifique. Contribution à l'étude des phénomènes de bauxitisation et d'allitisation. *Science du sol*, n° 1, 1972 : 103-122.
- TURENNE (J.F.), 1977. — Modes d'humidification et différenciation podzolique dans deux toposéquences guyanaises. *Mém. ORSTOM*, n° 84, Paris, 173 p., 1 pl. coul.
- USDA, 1960-1969. — Soil classification. A comprehensive system. 7 th Approximation. Soil surv. staff, soil cons. serv.
- USDA, 1974. — Soil Taxonomy.
- VIELLEFON (J.), 1971. — Contribution à l'étude du cycle du soufre dans les sols de mangrove. Ses rapports sur l'acidification naturelle ou provoquée. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. IX, n° 3 : 241-269.
- VIELLEFON (J.) et CHEVERRY (C.), 1974. — Pédogenèse et transformations des composés du soufre dans deux sols tropicaux en voie de différenciation (milieu fluvio-marin, milieu continental). X Cong. Int. Sc. Sol, Moscou, II : 158-167.
- VAN DEN DRIESSCHE (R.), GARCIA GOMEZ (A.M.), AUBRY (A.M.), 1975. — A multi-level dissimilarity index between soil profiles. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XIII, n° 2 : 173-174.
- WILLAIME (P.), 1963. — Carte des sols du Dahomey au 1/1 000 000°. Notice explicative. ORSTOM, Dahomey.
- YAALON (D.H.), YARON (B.), 1966. — Framework for man-made soil changes. An outline of metapedogenesis. *Soil Sci.*, 102 (4) : 272-277.