

# Partie I – Introduction, les structures dans les sols

## CHAPITRE 1

### Des volumes emboîtés à toutes échelles d'espace

#### Définitions

Dans son sens le plus général, le mot "structures" désigne "tous arrangements relatifs de composants, à n'importe quelle échelle spatiale et dans un espace à une, deux ou trois dimensions (Foucault & Raoult (2001))".

Pour ce qui concerne la géologie, ces deux mêmes auteurs distinguent selon les composants dont on considère les relations :

- les structures cristallines (les composants sont des atomes) ;
- les structures minérales ;
- les structures des roches (dites aussi structures pétrographiques ou fabriques ou pétrofabriques) dont les éléments sont les minéraux constitutifs ;
- les structures tectoniques (dont les éléments sont des ensembles de roches) ;
- la structure du Globe (dont les éléments sont les plaques, la croûte, le manteau).

En **pédologie (ou science du sol)**, les **structures** ce sont les arrangements, à toutes échelles d'espace et tous niveaux d'investigation des constituants solides des couvertures pédologiques entre lesquels subsistent des vides (Synonymes : organisations, arrangements, assemblages, agencements).

En pédologie comme en géologie, on doit considérer toute une série de structures emboîtées (fig. **DMABV**). Des plus fines aux plus grandes :

- des structures à l'échelle des réseaux cristallins des minéraux (notamment celles des minéraux argileux – voir **chap. 8**) ;
- des structures à l'échelle des « domaines » argileux (voir **chap. 8**) ;
- des organisations internes aux agrégats (dites aussi « assemblages élémentaires » voir **chap. 10**) dont les éléments sont des particules, des ciments, des vides intra-agrégats ;
- des structures à l'échelle des horizons (voir **chap. 3**) dont les composants sont des **agrégats** et des vides inter-agrégats ;
- des structures à l'échelle des paysages, du décimètre à la centaine de kilomètres (structures des couvertures pédologiques) que nous modélisons sous la forme d'**horizons** qui se superposent et/ou se succèdent dans l'espace.

Classiquement, quand on parle de "**la structure**" d'un horizon de sol, il s'agit de celle observée à l'œil nu dans une fosse ("structure macroscopique"- Cf. **chap. 3**). Toutes les **organisations plus fines**, qu'on ne peut étudier qu'avec des techniques microscopiques, peuvent être qualifiées de "microstructures" voire de "nanostructures" tandis que toutes les **structures** que l'on peut représenter par des successions verticales ou latérales d'horizons (solums, toposéquences, bassins versants, systèmes pédologiques) seraient plutôt des "mégastructures" (Jamagne et al., 1993).

Il est donc recommandé, lorsqu'on parle de structures, de toujours préciser à quelle échelle d'espace on se place et quels sont les composants considérés.

## **Les couvertures pédologiques (selon le Référentiel Pédologique)**

Ce qu'on appelle habituellement "les sols" en pédologie sont des objets naturels<sup>1</sup>, continus et tridimensionnels, qu'il vaut mieux désormais dénommer "couvertures pédologiques" tant le mot "sols" est ambigu.

Les couvertures pédologiques sont formées de constituants minéraux et organiques, présents à l'état solide, liquide ou gazeux. Ces constituants sont organisés entre eux, formant ainsi des "structures" spécifiques du milieu pédologique. Les couvertures pédologiques sont en perpétuelles évolutions, ce qui leur confère une dimension supplémentaire : la durée.

C'est pourquoi leur étude doit se fonder sur trois séries de données :

- des données de constitution ;
- des données structurales (i.e. d'organisations) ;
- des données relatives aux dynamiques (fonctionnements, évolutions).

Les couvertures pédologiques sont le plus souvent continues, mais il arrive qu'elles soient très réduites, voire absentes. En outre, elles sont fréquemment modifiées par des activités humaines, sur des profondeurs variables et de façon plus ou moins apparente.

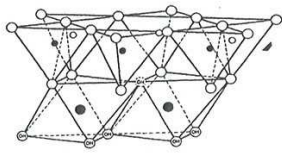
Ce sont des continuums hétérogènes, mais les variations que l'on y observe d'un point à un autre ne sont pas aléatoires car les couvertures pédologiques sont elles-mêmes structurées.

On peut distinguer plusieurs niveaux d'organisation dans une couverture pédologique (fig. **DMABV**). Les niveaux les plus fins ("organisations élémentaires", "assemblages") sont observables à l'aide de divers outils d'appréhension, depuis le microscope électronique jusqu'à l'œil nu. Aux niveaux plus élevés, on distingue :

- les horizons : ils résultent de la subdivision d'une couverture pédologique en volumes considérés comme homogènes (voir ci-dessous) ;
- les systèmes pédologiques : plusieurs horizons sont associés et ordonnés dans l'espace, dans les trois dimensions verticale et latérales. La dimension habituelle de cette organisation est hectométrique ou kilométrique, ou plus. Elle n'est donc pas perceptible sur le terrain en un seul site. D'où l'intérêt des prospections itinérantes, des photographies aériennes et des images satellitaires nécessaires à la compréhension et à la description de ces systèmes).

---

<sup>1</sup> C'est-à-dire dont l'existence initiale ne dépend pas de l'Homme.



a

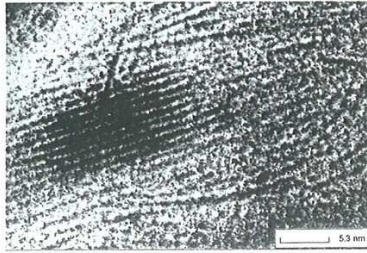
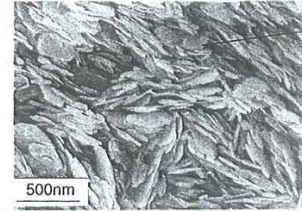


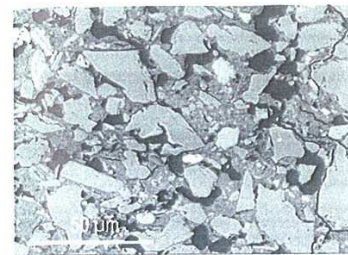
Fig. 10 - Succession des feuillets constituant un fuseau (horizon 11, aperture 1). Distance réticulaire moyenne  $d=0.754$  nm

thèse F. ATTOU p. 39  
MSTR

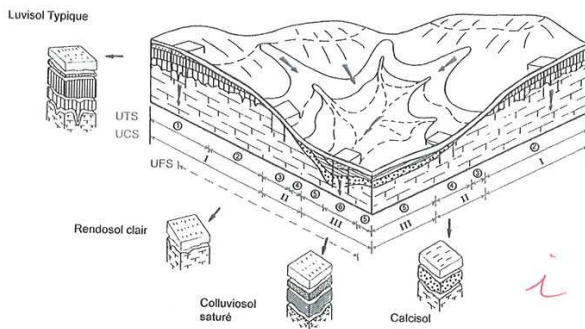


c

4 domaines paysage  
profil de sol  
macro  
micro



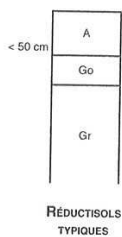
d



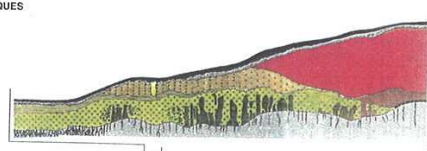
e



e



h



f



f

Figure DMABV

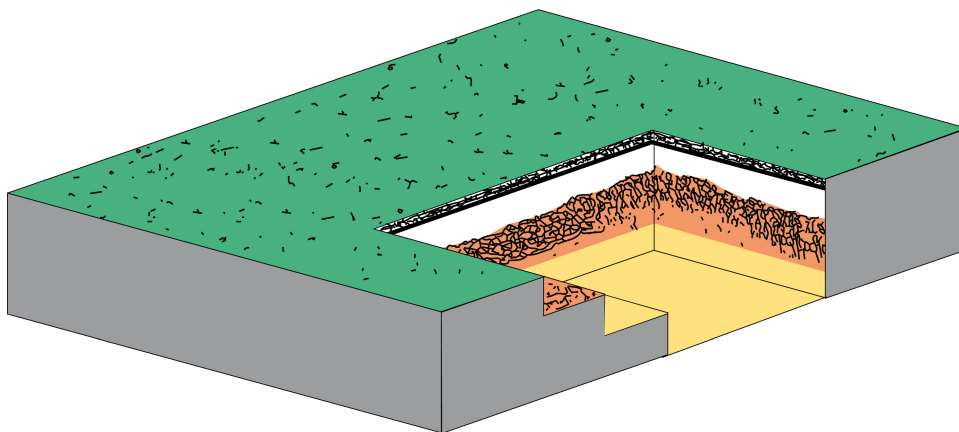
**Figure DMABV:** Les structures emboîtées des couvertures pédologiques. Tentative de présentation semi-réaliste multiscalaire.

- a) La structure atomique théorique des feuillets des phyllosilicates (ici de la chlorite) – Échelle : le nanomètre.

- b) *Feuillets de phyllosilicates vus en coupe en ultramicroscopie – Échelle : quelques nanomètres (image en microscopie électronique à transmission).*
- c) *Aspect d'un échantillon de sol vu au microscope électronique à balayage - Échelle : quelques micromètres.*
- d) *Assemblage plasma/grains de squelette dans un horizon limono-argileux de Beauce vu en coupe au microscope électronique à balayage (électrons rétro-diffusés – [Chenu et Bruand, 1998](#) - Échelle : quelques dizaines de micromètres).*
- e) *Un agrégat vu à l'œil nu – Échelle : quelques centimètres.*
- f) *Un solum vu dans une fosse – Échelle : quelques décimètres.*
- g) *Modélisation d'une "séquence de sols" en Bretagne (Forêt de Fougères – [Curmi, 1993](#)) - Échelle : l'hectomètre.*
- h) *Modélisation abstraite d'un solum sous la forme d'une séquence verticale d'horizons de référence ([Référentiel Pédologique 2008](#)).*
- i) *Représentation tridimensionnelle de l'organisation d'une couverture pédologique en région loessique après modélisation en horizons (Picardie – [Bégon et Jamagne, 1994](#)). Échelle : le kilomètre.*

Pour étudier les couvertures pédologiques, il est indispensable de réaliser des sondages, de creuser des tranchées ou des fosses (fig. PRAIRIE), de les décrire, puis de prélever des échantillons pour analyses et examens complémentaires.

Enfin, les couvertures pédologiques connaissent au cours du temps des transformations pseudo-cycliques<sup>2</sup>, réversibles ou irréversibles. Les différentes organisations et certains caractères évoluent avec des durées et selon des périodicités diverses : journalières, saisonnières, annuelles... Les dates d'observation et d'échantillonnage sont donc des informations nécessaires à tout enregistrement, qu'il soit sur papier ou informatisé.



**Figure PRAIRIE :** *Quand on creuse une fosse dans une couverture pédologique, on voit généralement plusieurs couches superposées dont l'aspect et les propriétés sont différents.*

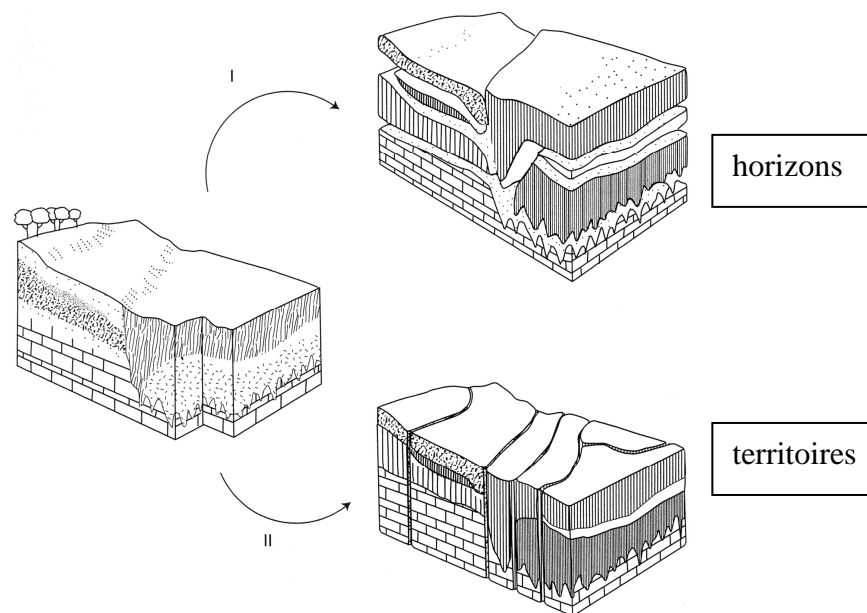
## **L'horizon, concept de base de la pédologie descriptive et fonctionnelle (selon le Référentiel Pédologique)**

<sup>2</sup> Car, à la fin du cycle, la couverture pédologique n'est pas identique à ce qu'elle était au départ : elle évolue.

Les couvertures pédologiques montrent très généralement des différenciations selon un axe vertical. De là est née, très anciennement, la notion d'horizon (fig. PRAIRIE).

Les horizons sont des couches superposées d'une couverture pédologique qui résultent d'un découpage de celle-ci par la pensée parce que ces couches ont des aspects et des propriétés différentes les unes des autres. Elles sont cependant interdépendantes, échangent des flux de matières et/ou d'énergie et forment bien un continuum.

En science du sol comme dans les autres sciences, lorsque le cerveau humain se trouve confronté à des continums, il s'efforce de les découper en unités élémentaires : horizons et unités cartographiques dans le domaine spatial, unités typologiques ou "types" dans le domaine typologique (cf. encadré DDC).



**Figure GIRARD** : Il y a deux façons de subdiviser les couvertures pédologiques : I. en volumes homogènes (les horizons) ; II. en volumes hétérogènes (des territoires présentant une même superposition d'horizons). D'après Girard, 1983.

Par leur dimension verticale centimétrique à métrique, les horizons sont directement perceptibles à l'œil nu sur le terrain. Le prélèvement d'échantillons est possible, à la main. C'est pourquoi l'horizon est le niveau d'appréhension le plus pratique pour observer et échantillonner une couverture pédologique. Les pédologues considèrent les horizons comme les entités de base permettant d'identifier, de caractériser, de définir et de modéliser une couverture pédologique.

Chaque horizon est un volume. Il est nécessaire de définir son **contenu** : description de ses constituants, organisations, caractères, propriétés et caractéristiques analytiques, mais aussi son **contenant** : description de ses limites, de son enveloppe. Sa dimension verticale la plus petite est au moins centimétrique et souvent décimétrique voire métrique. Ses dimensions latérales sont au moins décimétriques et le plus souvent hectométriques ou kilométriques. Un horizon n'est pas infini : il disparaît latéralement ou se transforme en un autre horizon. Son extension spatiale est délimitable (cf. encadré ASCP – figure DMABV g).

Les limites supérieures et inférieures d'un horizon sont généralement conformes à la surface du terrain. Mais un horizon peut aussi se présenter sous la forme de lentilles ou de langues

(trouver une photo si possible), il peut même être entièrement inclus dans un autre horizon. Les transitions entre horizons peuvent être nettes ou plus ou moins progressives. Chaque horizon est presque toujours associé géométriquement à d'autres horizons et lié à eux par des relations étroites, relations pédogénétiques (évolutions longues) et relations fonctionnelles (dynamique journalière ou saisonnière). Ces dernières revêtent une grande importance pratique.

La position d'un horizon par rapport à l'interface sol/atmosphère est une caractéristique essentielle. Elle conditionne en effet l'apport de matières organiques, l'importance des flux thermiques ou hydriques qui l'atteignent ou le traversent, la masse des horizons sus-jacents qui pèsent sur lui, la pénétration par les racines et les animaux, etc. c'est-à-dire la grande majorité des conditions qui règlent son évolution et son fonctionnement.

## L'hétérogénéité interne des couvertures pédologiques et des horizons

Les couvertures pédologiques sont très hétérogènes dans les trois dimensions de l'espace et cette hétérogénéité est observable à toutes les échelles d'investigation (du micromètre au kilomètre). C'est cette hétérogénéité qui rend si difficile leur échantillonnage, leur modélisation et leur spatialisation. La "**variabilité spatiale**", autre façon d'exprimer cette hétérogénéité, est un terme plutôt employé aux échelles métriques, hectométriques et kilométriques.

Les horizons, nous l'avons vu, sont le résultat du découpage raisonné d'une couverture pédologique en volumes considérés comme suffisamment homogènes (suffisamment pour les besoins de l'étude qui va suivre). Mais cette notion d'homogénéité est relative, elle correspond à une certaine échelle d'investigation, celle du pédologue sur le terrain avec ses mains et ses yeux. Elle admet explicitement une hétérogénéité dans le détail. Le premier niveau d'hétérogénéité au sein d'un horizon est l'existence de volumes naturels individualisés : les **agrégats** ou **peds**. Au sein de chaque agrégat, on peut distinguer encore plusieurs niveaux d'hétérogénéité : différents constituants formant le **fond matriciel** mais aussi les divers **traits pédologiques** (Brewer, 1964).

Le fond matriciel, c'est le "motif" général de l'horizon, résultant de l'organisation des différentes particules et de la porosité d'entassement, de fissuration, d'activité biologique, etc. C'est lui qui forme la grande masse de l'horizon. Sur le terrain, il est possible d'en apprécier la couleur et la structure macroscopique (chap. 3). Au microscope, sur lames minces, on pourra visualiser nombre de constituants (sables, limons, séparations et petits "domaines" argileux) et décrire une (ou plusieurs) **organisation(s)**.

Les traits pédologiques sont tous les éléments (d'origine pédologique) qui ne font pas partie du fond matriciel : revêtements, accumulations localisées, nodules, taches, langues et lentilles, éléments secondaires, tubules, cavités, etc. Les traits pédologiques peuvent nous fournir des renseignements très utiles sur le fonctionnement actuel (ou passé) du solum étudié (illuviation d'argile, gonflement, migrations verticales, accumulations, signes d'hydromorphie, activité biologique).

## Niveaux d'organisation ou niveaux d'investigation ?

Classiquement, les niveaux d'organisation des couvertures pédologiques sont les particules primaires, les assemblages élémentaires, les agrégats, les horizons, les systèmes pédologiques, etc. Il est souvent fait mention de ces volumes emboîtés que les pédologues étudient à différentes échelles spatiales et avec différents outils d'investigation adaptés. Mais, sont ils de véritables niveaux d'organisation<sup>3</sup> ou s'agit-il plutôt d'une façon pédagogique et simplifiée de présenter une réalité complexe en fonction des outils d'observation employés (microscope électronique, microscope optique, loupe, œil, bassins versants, imagerie satellitaire) ?

### Encadré DDC

## Le DÉCOUPAGE de CONTINUUMS

Beaucoup d'objets réels de grande étendue spatiale sont des continuums à une, deux ou trois dimensions. C'est le cas, notamment, des couvertures pédologiques qui sont des réalités tridimensionnelles

Depuis toujours les hommes, par nécessité pratique, sont confrontés au problème d'opérer des "découpages" plus ou moins artificiels (mais si possible judicieux afin d'être opérationnels) dans ces continuums pour prendre en compte des classes ou des ensembles discontinus.

A partir du moment où l'on subdivise un phénomène continu en sous-ensembles, le nombre de sous-ensembles et la localisation de leurs limites doivent être raisonnés, fondés sur des critères pertinents, mais ils demeurent cependant subjectifs, arbitraires ou conventionnels.

Il y a deux façons de subdiviser les couvertures pédologiques (fig. GIRARD) : i) en volumes homogènes (les horizons) ; ii) en volumes hétérogènes (des territoires présentant une même superposition d'horizons)

Les volumes élémentaires que sont les horizons ou les surfaces élémentaires que sont les plages cartographiques ne nous sont pas donnés : c'est à nous de les définir et de les délimiter au mieux, par le découpage des sols en horizons et par le dessin de cartes de sols.

### Encadré SSSS

cet encadré a-t-il sa place dans cet ouvrage ?

## SCIENCES du SOL, SCIENCE des SOLS ou SCIENCE DU SOL ?

Doit on parler de "**sciences du sol**" (c'est-à-dire différentes sciences comme la physique, la chimie, la biologie, appliquées à l'étude "du sol") ou de "**science des sols**" (une science unique avec ses propres concepts appliquée à l'étude "des sols" dans leur variété) ? En français, il y a beaucoup plus qu'une nuance. Cette distinction n'est pas possible en anglais !

Pour beaucoup de pédologues modernes, "science des sols" est synonyme de pédologie. Pour les anglo-saxons, il semblerait qu'il y ait des connotations différentes, mais lesquelles ?

La formule "**science du sol**" prend une position intermédiaire : une seule science, appliquée au sol, objet unique abstrait. La grande variabilité des couvertures pédologiques dans l'espace n'est alors pas suffisamment évoquée<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> Les milieux naturels sont-ils capables de s'organiser ?

<sup>4</sup> La pétrographie est définie par tous les dictionnaires comme l'étude des roches et non "de la roche" !

### **L'analyse structurale (des couvertures pédologiques)**

On ne peut pas, dans un ouvrage traitant des structures des couvertures pédologiques, ne pas évoquer la méthode cartographique dite "analyse structurale".

Basée sur la notion de couverture pédologique considérée comme un "continuum structuré variant latéralement", la philosophie de l'analyse structurale s'oppose au concept américain de pedon et à une approche trop verticaliste qui se limiterait à l'étude de "profils" dans des fosses pédologiques. Elle met en valeur la description et la compréhension des organisations, selon une approche pédologique ascendante, sans a priori conceptuel. C'est un aller et retour continu entre analyse et synthèse.

Appliquée sur des unités de modelé de faibles superficies (quelques hectares) elle constitue une analyse très fine grâce à de nombreux sondages à la tarière localisés de manière très serrée en fonction des besoins : il est toujours possible de faire un sondage supplémentaire entre deux sondages jugés trop différents, afin d'affiner les limites.

Dans la pratique, elle s'organise en quatre phases. 1°) Réalisation de transects orientés selon les lignes de plus grandes pentes ; description fine des sondages et comparaison immédiate de ceux-ci par l'utilisation de "comparateurs" – relevé de la topographie, permettant la reconstitution de toposéquences précises. 2°) A partir de cette première analyse, on détermine les variations latérales susceptibles d'être repérées de façon fiable sur le terrain : l'apparition ou la disparition de tels ou tels volumes pédologiques, voire de certains caractères seulement. 3°) On repère ces variations latérales le long de transects complets ou partiels, ce qui permet de tracer des courbes d'iso-différenciation repérées sur un plan. 4°) C'est seulement à ce stade de fin d'analyse que l'on choisit l'emplacement de fosses qui permettront des études morphologiques plus fines et des prélèvements pour analyses chimiques ou examen micro-morphologiques.

Originalité de cette démarche : certains caractères ou types d'organisation sont souvent considérés de façon indépendante les uns des autres, en toute liberté, sans a priori conceptuel. Cette approche féconde et très novatrice à l'époque (années 1980), privilégie les transformations et processus orientés latéralement le long des versants. C'est pourquoi elle a permis de mettre en évidence des "systèmes de transformation" totalement méconnus auparavant, tels, par exemple, que des systèmes sols ferrallitiques/podzols ([Turenne, 1975](#) ; [Boulet et al., 1982](#)).

Méthode d'étude plus particulièrement adaptée aux milieux avec versants où les roches sont relativement homogènes (boucliers africain et amazonien) et où les facteurs de différenciation pédogénétiques sont liés à la dynamique de l'eau (en climats inter-tropicaux). Sa mise au point et son utilisation ont fait grandement progresser les conceptions de l'école française.