

Synthèses

Les sols et leurs structures

Observations à différentes échelles

D. Baize, O. Duval, G. Richard, coordinateurs



éditions
Quæ

Les sols et leurs structures

Observations à différentes
échelles

Les sols et leurs structures

Observations à différentes échelles

Denis Baize, Odile Duval, Guy Richard,
coordinateurs

Éditions Quæ
RD 10, 78026 Versailles Cedex

Collection Synthèses

S'adapter au changement climatique
Agriculture, écosystèmes et territoires
J.F. Soussana, coord.
2013, 296 p.

Le virus du Nil occidental
D.J. Bicout, coord.
2013, 242 p.

Les milieux rupicoles
Les enjeux de la conservation des sols rocheux
P. Pech
2013, 168 p.

Flores protectrices pour la conservation des aliments
M. Zagorec, S. Christeians
2013, 160 p.

Agricultures à l'épreuve de la modernisation
E. Deléage
2013, 104 p.

Cultiver la biodiversité pour transformer l'agriculture
É. Hainzelin
2013, 264 p.

Table des matières

AVANT-PROPOS.....	9
PARTIE I – DÉFINITION, IMPORTANCE ET ORIGINES	
Chapitre 1. Des volumes emboîtés à toutes échelles d'espace	13
<i>Denis Baize</i>	
Définitions.....	13
Les couvertures pédologiques.....	14
L'horizon, concept de base de la pédologie descriptive et fonctionnelle.....	16
L'hétérogénéité interne des couvertures pédologiques et des horizons.....	17
Variation de la structure macroscopique avec la profondeur.....	19
Chapitre 2. Structures et porosités	21
<i>Denis Baize, Folkert van Oort</i>	
Structures et porosités.....	21
Partition de la porosité.....	22
Importance de la structure des différents horizons.....	24
Importance de la structure des horizons profonds.....	25
Importance de la structure pour l'évolution pédogénétique.....	27
Comment naissent les agrégats ?	28
Modification de la structure	33
Chapitre 3. Structures des sols et êtres vivants.....	39
<i>Jean-Michel Gobat, Claire Le Bayon</i>	
La bioturbation, un processus multiscalair	40
Les agrégats du sol : une formation multidimensionnelle.....	43
Porosité, régime hydrique et êtres vivants.....	46
Décomposition de la matière organique.....	51
Rhizosphère et nutrition des plantes.....	54
Structuration biologique et pédogenèse.....	59

PARTIE II – SUR LE TERRAIN

Chapitre 4. Description des divers types d'agrégats et de la structuration des horizons non labourés.....	65
<i>Denis Baize</i>	
Précautions pour décrire la structure macroscopique.....	66
Les grands types d'organisation structurale.....	68
Comment décrire la structure ?	69
Le fonctionnement structural.....	72
Difficulté de représentation graphique de la structure et de sa quantification	74
Chapitre 5. La structure des sols forestiers : spécificités, états, conséquences et enjeux.....	79
<i>Bernard Jabiol</i>	
Conditions générales de fonctionnement des sols forestiers.....	79
Les structures naturelles des horizons de surface des sols forestiers	81
Spécificité de la dégradation physique d'origine anthropique dans les horizons supérieurs : conséquences et résilience	83
Racines d'arbres et structures des horizons profonds.....	90
Conclusion : le diagnostic structural en forêt	91
Chapitre 6. Maîtrise de la structure des sols cultivés : tassement et travail du sol, avec et sans labour.....	93
<i>Jean Roger-Estrade, Hubert Boizard, Guy Richard</i>	
Évolution de la structure.....	94
Le raisonnement du travail (et du non-travail) du sol	99
Chapitre 7. Le profil cultural : une méthode d'étude <i>in situ</i> de la structure des sols cultivés	103
<i>Joséphine Peigné, Jean-François Vian, Olivier Chrétien, Yvan Gautronneau</i>	
Origine et objet du concept de profil cultural.....	103
Réalisation du profil cultural et mise en évidence de la double partition.....	105
Observation fine des compartiments	107
Intérêt agronomique du profil cultural.....	115
Chapitre 8. Caractérisation au champ de la structure des horizons de surface des sols cultivés.....	119
<i>Hubert Boizard, Bruce C. Ball, Graham Shepherd, Jean Roger-Estrade</i>	
Les principales approches développées dans le monde.....	119
Évaluation de la structure des horizons L par la « méthode bêche »	121
Évaluation de la structure des horizons L par la méthode du « <i>drop test</i> ».....	125
Chapitre 9. Applications de méthodes électriques pour l'identification sur le terrain des états structuraux.....	131
<i>Arlène Besson, Isabelle Cousin</i>	
Quel est le lien entre la structure et la conductivité électrique ?.....	134
Applications de la méthode électrique DC pour analyser la structure	136
De la conductivité électrique à la structure : une interprétation limitée	138

Chapitre 10. Croûtes de battance, ruissellement, érosion hydrique	141
<i>Frédéric Darboux, Baptiste Algayer</i>	
L'érosion hydrique : cas des sols limoneux de grande culture du nord de la France	141
Zoom sur l'effet splash et la battance.....	148
Étudier l'érosion, moyens de lutte	150

PARTIE III – AU LABORATOIRE

Chapitre 11. Organisations pédologiques à l'échelle des minéraux argileux	157
<i>Daniel Tessier, Folkert van Oort</i>	
Les différents niveaux d'organisation des argiles	158
Évolution de l'organisation des argiles.....	163
Relations entre la nature des argiles et les propriétés des sols : exemples de sols en Guadeloupe	167
Conclusions et enseignements.....	173
Chapitre 12. Associations matières organiques/matières minérales	175
<i>Remy Albrecht, Éric P. Verrecchia</i>	
Les complexes organo-minéraux.....	176
Niveau d'organisation : agrégats et micro-agrégats.....	178
Biominéraux, redistributions biologiques et structure	181
Conclusions	185
Chapitre 13. Les structures des sols analysées en microscopie optique et par des techniques submicroscopiques	187
<i>Folkert van Oort, Toine Jongmans, Eddy Foy</i>	
Microstructures et microscopie optique.....	187
Nature et préparation d'échantillons.....	191
Description : nomenclature et typologie	192
Représentativité des objets étudiés.....	200

PARTIE IV – APPROCHES DE QUANTIFICATION

Chapitre 14. Quantification et reconstruction 3D de la structure au laboratoire	205
<i>Isabelle Cousin</i>	
Imager les structures des sols	206
Quantifier la structure d'un échantillon de sol au laboratoire en caractérisant la morphologie et la topologie du réseau poral	207
Conclusion générale	214
Chapitre 15. Tests de stabilité structurale, de percolation et d'évaluation de la sensibilité à la battance	215
<i>Denis Baize, Frédéric Darboux</i>	
Méthodes historiques	215
Autres méthodes anciennes de la stabilité structurale	220
Nouvelle méthode – Sensibilité à la battance et à l'érosion	221

Chapitre 16. Relations entre structure, porosité et minéralogie dans les sols	227
<i>Folkert van Oort</i>	
La région tropicale insulaire volcanique, un milieu naturel modèle	228
Un peu de physique du sol.....	229
Propriétés hydriques d’horizons de sols argileux de la Guadeloupe	233
Conclusions et enseignements.....	240
GLOSSAIRE.....	243
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	253
LISTE DES AUTEURS.....	263

Avant-propos

Fruit d'un travail collectif de chercheurs et d'enseignants-chercheurs de diverses origines (pédologues, agronomes, physiciens, biologistes...), cet ouvrage illustre un aspect essentiel à la compréhension du fonctionnement des sols, à savoir la caractérisation de **leurs structures**. Le sol est un objet complexe, constitué de particules minérales et organiques, et d'organismes vivants, qui est à appréhender à plusieurs échelles spatiales, depuis le feuillet du minéral argileux (échelle du micromètre) jusqu'à la couverture pédologique d'une petite région (échelle du kilomètre).

L'ouvrage vient à point nommé compte tenu de l'importance que prend aujourd'hui le sol dans les débats publics et dans la sphère scientifique. Cette ressource rare et fragile est indispensable à l'humanité, tant par ses fonctions de production que par ses fonctions environnementales (*cf.* la stratégie thématique sur la protection des sols de l'Union européenne). Il est au cœur des enjeux de sécurité alimentaire mondiale et de services rendus par les écosystèmes, qu'ils soient naturels ou cultivés. Extension des terres cultivables, développement de l'urbanisation, dégradations et pollutions, atténuation du changement climatique, qualité et rétention des eaux continentales, maintien de la biodiversité sont autant de questions qui concernent directement les sols.

Pour répondre à ces questions, il nous faut mieux les connaître, dans toute la diversité de leur constitution, de leur organisation et des communautés d'organismes qui y vivent. Les outils de l'imagerie et de la biologie modernes nous donnent désormais accès à des descriptions de plus en plus précises.

Cet ouvrage met l'accent sur les structures des sols, qui jouent sur un grand nombre de processus : mécanismes d'échanges entre les phases solides, liquides et gazeuses, flux de masse et d'énergie à sa surface et en son sein, conditions de vie des organismes vivants... C'est l'**observation** à différentes échelles qui est le fil directeur de l'ouvrage. Si la modélisation du fonctionnement du sol s'est beaucoup développée ces dernières années (*cf.* le récent lancement de la plateforme de modélisation Inra « Sol virtuel »), l'observation est essentielle pour être en capacité de tester l'état actuel de nos connaissances et de renouveler nos questions de recherches. C'est aussi le moyen de prendre conscience de la grande variabilité des sols et de leur beauté.

Le sol reste un objet difficile à observer qui nécessite la mise en œuvre de multiples méthodes. Cet ouvrage revient sur la définition du concept de structure du sol et

sur les difficultés de sa quantification. Il fait la synthèse entre des méthodes de laboratoire qui nous permettent d'accéder aux organisations microscopiques et des méthodes de terrain qui nous permettent de caractériser la dynamique d'évolution des sols, notamment en fonction des systèmes agricoles. C'est donc un ouvrage qui offre un éclairage pédagogique sur une des facettes de cet objet passionnant que constitue le sol. Composé de quatre parties, il est organisé de la façon suivante.

Dans la première partie, le chapitre 1 propose une définition à la notion très générale de « structure » appliquée aux sols. Puis est présentée la place qu'occupent les structures dites macroscopiques (*i.e.* à échelle des agrégats et des mottes) et microscopiques dans l'emboîtement général de toutes les organisations pédologiques, à toutes les échelles spatiales. Est évoquée ensuite l'importance des assemblages relatifs des particules solides et des vides existant dans chaque couche de sol (ou horizon) sur les fonctionnements hydrique, thermique et biologique. Sont traitées aussi les causes naturelles comme anthropiques de l'agrégation et de la désagrégation. Enfin, le chapitre 3 montre le rôle que jouent les organismes qui vivent dans le sol sur la structure et donc sur la porosité et, en retour, l'influence de ces propriétés sur les possibilités et conditions de vie dans les sols.

Dans la deuxième partie sont passées en revue successivement les techniques d'observation et d'évaluation **sur le terrain** des structures macroscopiques, qu'il s'agisse de celles des horizons profonds non perturbés par les outils agricoles (chapitres 4 et 5) ou de celles des couches de surface des sols cultivés (chapitres 6, 7 et 8). Le chapitre 9 est consacré à la présentation de méthodes géophysiques électriques permettant une approche non destructive d'évaluation des états structuraux à l'échelle d'une parcelle agricole. Enfin, le chapitre 10 montre comment une faible stabilité des agrégats des couches les plus superficielles peut générer des croûtes de battance, puis du ruissellement, donc des phénomènes d'érosion importants, voire des coulées boueuses, même sur des pentes faibles et sous des climats pourtant peu érosifs.

En troisième partie, les chapitres 11, 12 et 13 présentent les organisations qui existent à des échelles microscopiques et ultramicroscopiques et qui ne peuvent donc être étudiées qu'**au laboratoire**, sur des échantillons sortis de leur contexte, à l'aide d'appareillages sophistiqués. Ces organisations, invisibles sur le terrain, ont pourtant une grande importance pratique en ce qui concerne les fonctionnements hydrique, structural, biologique...

La dernière partie décrit de manière détaillée des **approches de quantification** de certaines propriétés liées aux organisations pédologiques : reconstructions tridimensionnelles de la phase porale au laboratoire (chapitre 14) ; estimation de la stabilité structurale, en particulier pour évaluer les risques de formation de croûtes de battance (chapitre 15) ; quantification des relations entre porosité, réserves en eau et minéralogie des argiles, à partir de l'exemple de sols aux propriétés contrastées étudiés en Guadeloupe (chapitre 16).

In fine, un glossaire général fournit la définition d'une centaine de termes techniques.

Guy Richard
Chef du Département Environnement et Agronomie
à l'Institut national de la recherche agronomique

Partie 1

Définition, importance
et origines

Chapitre 1

Des volumes emboîtés à toutes échelles d'espace

Denis BAIZE

►► 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 et 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 des sols), 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 (figure 1.1). Des plus fines aux plus grandes :

- les réseaux cristallins des minéraux (notamment des minéraux argileux, voir chapitre 11) ;
- les « domaines » argileux (voir chapitre 11) ;
- les agrégats (appelés aussi « assemblages élémentaires », voir chapitre 13) dont les éléments sont des particules, des ciments, des vides intra-agrégats ;
- les horizons (voir chapitre 4) dont les composants sont des **agrégats** et des vides interagrégats ;
- les 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** », voir chapitre 4). 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 (solons, toposéquences, bassins-versants, systèmes pédologiques) sont plutôt des mégastructures (Jamagne *et al.*, 1993 ; Legros, 1996 ; Jamagne, 2011).

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

► Les couvertures pédologiques

Ce que l'on appelle habituellement les sols en pédologie sont des objets naturels¹, continus et tridimensionnels, qu'il vaut mieux 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'organisation) ;
- des données relatives aux dynamiques (fonctionnement, évolution).

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.

On peut distinguer plusieurs niveaux d'organisation dans une couverture pédologique (figure 1.1). 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, qui résultent de la subdivision d'une couverture pédologique en volumes considérés comme homogènes (voir ci-dessous) ;
- les systèmes pédologiques, constitués de plusieurs horizons associés et ordonnés dans l'espace, dans les trois dimensions verticale et latérales. La dimension habituelle de cette organisation est hectométrique ou kilométrique. Elle n'est donc pas

1. C'est-à-dire dont l'existence initiale ne dépend pas de l'homme.

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.

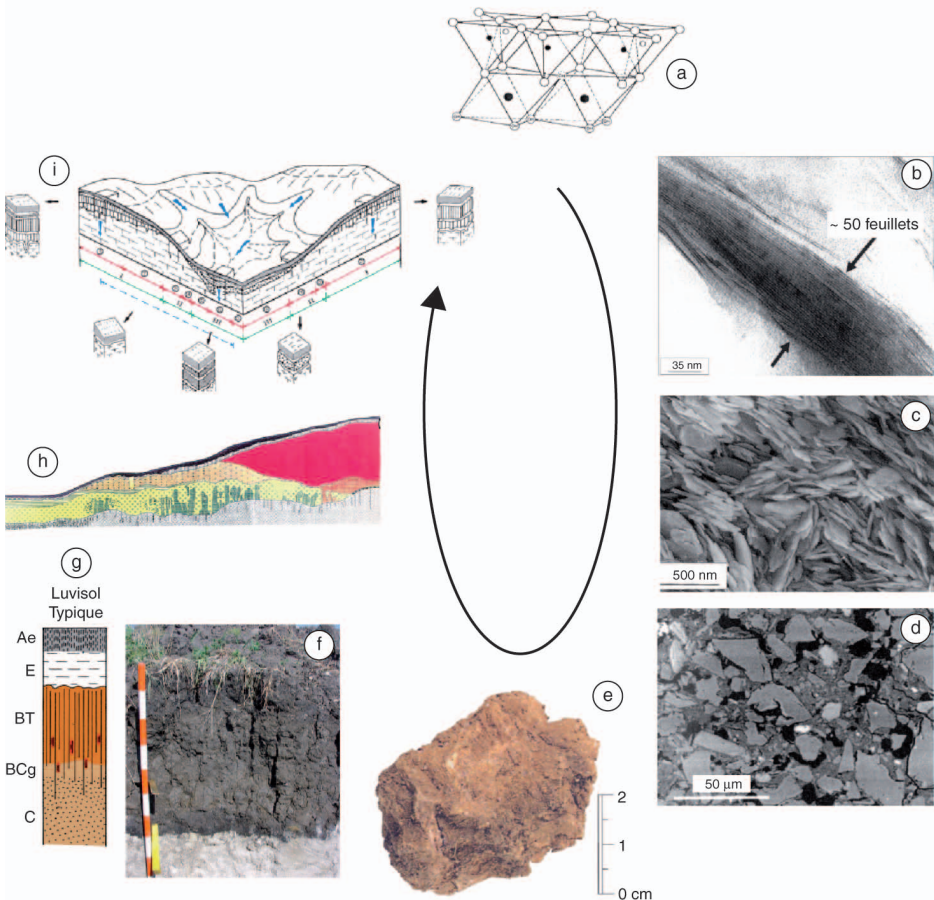


Figure 1.1. Les structures emboîtées des couvertures pédologiques.

- a. Représentation modélisée de la structure atomique théorique des feuillets des phyllosilicates (ici de la kaolinite) – Échelle nanométrique.
- b. Feuillettes de phyllosilicates vus en coupe en ultramicroscopie (image en microscopie électronique à transmission).
- c. Aspect d'un échantillon de sol vu au microscope électronique à balayage.
- d. Assemblage plasma/grains de squelette dans un horizon limono-argileux de Beauce vu sur une lame mince au microscope électronique à balayage (électrons rétrodiffusés ; Chenu et Bruand, 1998).
- e. Un agrégat vu à l'œil nu – Échelle centimétrique.
- f. Un solum vu dans une fosse – Échelle décimétrique.
- g. Modélisation d'un solum sous la forme conceptuelle d'une séquence verticale d'horizons de référence.
- h. Représentation modélisée bidimensionnelle d'une « séquence de sols » en Bretagne (forêt de Fougères ; Curmi, 1993) - Échelle hectométrique.
- i. Représentation tridimensionnelle de l'organisation d'une couverture pédologique en région loessique après modélisation en horizons (Picardie ; Jamagne, 2011). Échelle kilométrique.

Pour étudier les couvertures pédologiques, il est indispensable de réaliser des sondages, de creuser des tranchées ou des fosses (figure 1.2), de les décrire, puis de prélever des échantillons pour analyses et examens complémentaires.

Enfin, les couvertures pédologiques connaissent au cours du temps des transformations pseudocycliques², 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.

►► L'horizon, concept de base de la pédologie descriptive et fonctionnelle

Les couvertures pédologiques montrent très généralement des différenciations selon un axe vertical. De là est née, très anciennement, la notion d'horizon (figure 1.2).

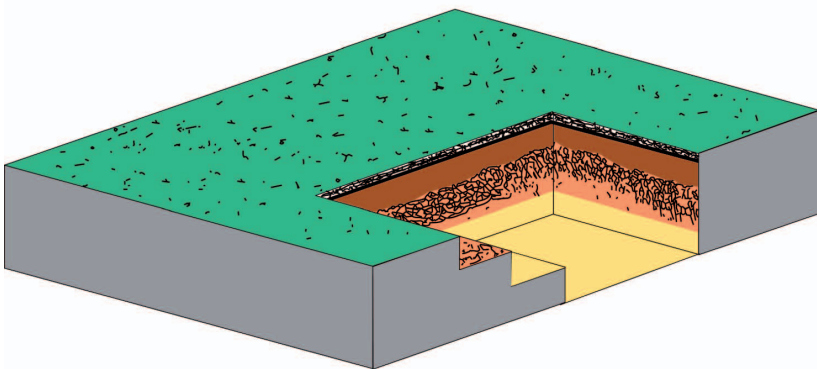


Figure 1.2. Fosse creusée dans une couverture pédologique. Généralement, on distingue plusieurs couches superposées d'aspect et de propriétés différents. Ces couches sont nommées « horizons ».

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 pédologie comme dans les autres sciences, lorsque le cerveau humain est 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 (voir encadré 1.1).

2. À la fin du cycle, la couverture pédologique n'est pas identique à ce qu'elle était au départ : elle évolue.

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 – et son **contenant** : description de ses limites, de son enveloppe. Sa dimension verticale est au moins centimétrique, 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 (voir encadré 1.2 et figure 1.1h et i).

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, 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, pédogénétiques (évolutions longues) et 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). Cette hétérogénéité rend 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 sont le résultat du découpage raisonné d'une couverture pédologique en volumes considérés comme suffisamment homogènes (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

Encadré 1.1. 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, opèrent 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.

À 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 (figure 1.E1) : en volumes homogènes (les horizons) ; en volumes hétérogènes (des territoires présentant une même superposition d'horizons).

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

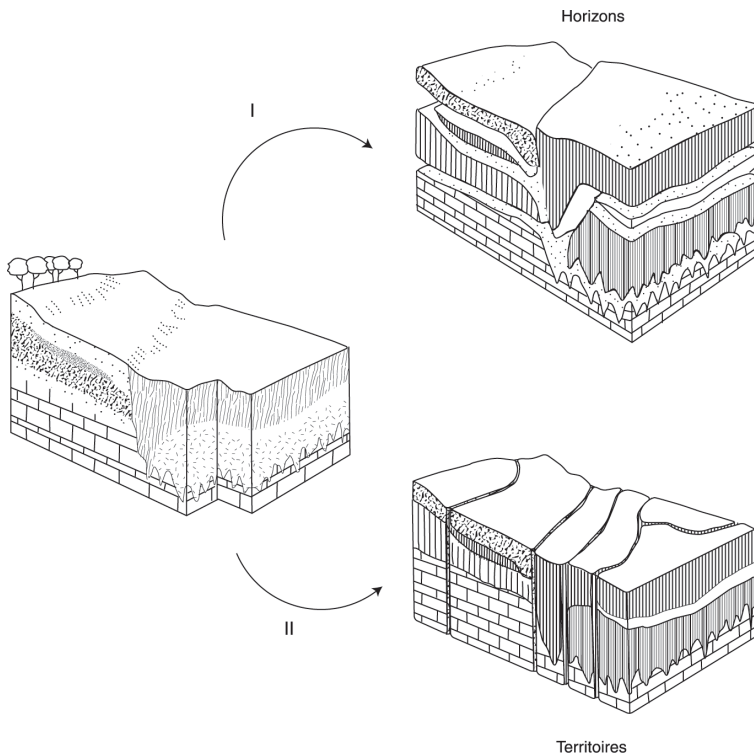


Figure 1.E1. Subdivisions des couvertures pédologiques : I. en volumes homogènes (les horizons) ; II. en volumes hétérogènes (des territoires présentent une même superposition d'horizons) (d'après Girard, 1983).