

# Le sol et la production végétale

À partir d'une contribution de M. Dosso (CNEARC)  
et A. Ruellan (CNEARC)

## LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE

---

Couche de terre en général meuble et peu épaisse (quelques centimètres à quelques mètres), le sol recouvre une grande partie des continents : on parle de couverture pédologique.

### ● *Les fonctions du sol*

La couverture pédologique assume par rapport aux besoins et à la santé des hommes quatre groupes de fonctions essentielles :

#### **Des fonctions biologiques**

Le sol abrite partiellement ou complètement de nombreuses espèces animales et végétales ; de nombreux cycles biologiques incluent le sol. Par ailleurs, l'activité biologique du sol est essentielle à sa construction, à son fonctionnement, à sa fertilité : agrégation, porosité, disponibilité des éléments nutritifs... Le sol n'existe pas sans activités biologiques abondantes et diversifiées.

#### **Des fonctions alimentaires**

Le sol produit et contient tous les éléments nécessaires à la vie<sup>1</sup> ; il accumule puis met à la disposition des plantes et des animaux la majeure partie de ces éléments. Il joue le rôle d'un garde-manger, plus ou moins grand et plus ou moins rempli. Une grande partie de ce que les plantes mangent, boivent, respirent, vient du sol et les plantes utilisent, directement ou indirectement, la totalité de l'épaisseur du sol, jusqu'à plusieurs mètres de profondeur.

#### **Des fonctions d'échange et de filtre**

Le sol est un milieu poreux traversé en permanence par des flux hydriques et gazeux. L'eau des puits et des sources a préalablement traversé le sol ; la porosité du sol en influence l'alimentation. Par ailleurs, le sol est un filtre : l'eau, en le traversant, se transforme ; la qualité chimique et biologique des eaux dépend des propriétés des sols. Le sol est également en échange constant avec l'atmosphère.

---

<sup>1</sup> Calcium, potassium, fer, azote, gaz carbonique, eau, air...

## Des fonctions de matériau et de support

Le sol est souvent matériau de construction : sable, argile, cuirasse ferrugineuse, croûte calcaire. Il est à la fois support et matériau de bâtiments, de routes, de barrages, de canaux ou de poteries. Beaucoup de minerais viennent du sol et non des roches : bauxite (aluminium), fer, or ; ces minerais sont présents, en faible quantité, dans les roches ; l'altération les concentre dans les sols.

Au total, pour les sociétés humaines, le sol est source de vie. Par l'intermédiaire des plantes, des animaux, de l'eau, des minerais, le sol nourrit les hommes, leur santé et leurs activités en dépendent. Il est donc essentiel, pour tous, de savoir le connaître et de savoir l'utiliser.

## ● Sols, paysages, milieux

### ● Regarder le sol dans le contexte du paysage

Nul besoin d'être spécialiste pour remarquer que le sol change d'un paysage à l'autre et qu'il change d'un endroit à l'autre d'un même paysage : les couleurs, les morphologies superficielles, les épaisseurs, les morphologies internes visibles sur les coupes, les humidités, tout cela se modifie ; ces variations se font en fonction des autres composantes du milieu : le climat<sup>2</sup>, le relief<sup>3</sup>, la végétation<sup>4</sup>, la roche<sup>5</sup>, etc.

### ● Le sol, transition entre le monde inanimé (les roches) et le monde vivant

Le sol, ressource renouvelable, se fait à partir de la roche sous-jacente, la roche-mère, qui s'altère, se transforme sous l'effet des actions conjuguées de la vie, de l'eau, de l'air. Les sols sont donc différents selon les roches, les climats, les végétations, les reliefs, et les sociétés humaines qui en vivent. En particulier, la potentialité du sol par rapport à la vie résulte de la richesse des roches, de l'agressivité du climat qui appauvrit plus ou moins vite le sol, des érosions naturelles qui rajeunissent en permanence les sols appauvris par la vieillesse<sup>6</sup>, de l'histoire des activités humaines.

### ● Les bases d'une démarche pour étudier les sols

La couverture pédologique est un milieu naturel continu : ce milieu a trois dimensions spatiales et une dimension temporelle.

Les principales caractéristiques de la couverture pédologique sont de trois types.

- > *ses constituants* sont minéraux et organiques, solides, liquides, ou gazeux.
- > *comme tout corps naturel, le sol a une morphologie*. Au même titre qu'une plante ou qu'un animal ont des organes reconnaissables que chacun sait décrire et dont les fonctions sont connues de tous, le sol a des horizons, des couleurs, des agrégats, des vides, des nodules et chacun de ces traits peut être décrit, a une fonction, peut être interprété en terme de fertilité et en terme de comportement face aux utilisations du sol.

2 Les couvertures de sols ne sont pas les mêmes en régions tropicales sèches et humides.

3 Le sol n'est pas le même à l'amont et à l'aval d'une pente.

4 Le sol n'est pas le même sous forêt, sous prairie, sous culture.

5 Le sol n'est pas le même sur schiste et sur calcaire.

6 Il s'agit là de l'effet positif des érosions.

Les constituants du sol sont donc organisés entre eux, verticalement et latéralement, formant des structures qui sont spécifiques du milieu sol : c'est la morphologie de la couverture pédologique. Ces structures sont le résultat de l'histoire de la formation des sols, mais aussi de leurs propriétés et dynamiques actuelles : ainsi, l'étude des structures permet de découvrir les propriétés physiques, chimiques, biologiques des sols et leurs relations avec les autres éléments du milieu ; elle permet de comprendre le passé et le présent du sol et d'élaborer des prévisions concernant le futur du sol et du milieu qui lui est associé.

L'observation de la morphologie des sols devrait donc être un préalable à toute intervention humaine, la fertilité et les conditions d'utilisation d'un sol étant très largement fonction de ses caractères morphologiques : de même qu'un médecin examine l'aspect général d'un malade avant de lui prescrire éventuellement des analyses, l'agriculteur et l'agronome doivent savoir examiner la morphologie d'un sol avant de prescrire, si nécessaire, la réalisation d'analyses chimiques et avant d'agir en matière de techniques culturales.

- > *Le sol est un milieu dynamique, en perpétuelle évolution.* Ceci lui confère sa quatrième dimension, qui est temporelle. Il y a en permanence évolution, transformations, cycliques ou non, des constituants et des structures. Et il y a, au sein des sols, de manière permanente ou intermittente, des transferts verticaux et latéraux de matières, sur des distances qui peuvent être très grandes : transferts solides, liquides, gazeux, biologiques, à l'échelle du micro-vide comme à l'échelle du bassin versant. Ainsi, au gré des saisons, le sol change d'aspect et de fonctionnement et, d'année en année, les sols naissent, puis mûrissent, c'est-à-dire s'enrichissent, puis vieillissent, c'est-à-dire s'appauvrissent. De par leurs activités, les sociétés humaines influencent fortement ces dynamiques : interventions directes, par exemple, de l'agriculteur qui défriche et cultive ; mais aussi, interventions indirectes par le canal des modifications climatiques, des modifications de la composition de l'atmosphère et de leurs conséquences sur les activités biologiques.

### **Une démarche intégrée**

Au total, le sol s'étudie selon une démarche intégrée de description et de mesure de ses structures et de leur fonctionnement. Cette démarche comprend trois volets principaux :

- analyse structurale de la couverture pédologique : on y étudie les quatre principaux niveaux d'organisation de la couverture pédologique ;
- mesure des caractéristiques physiques et chimiques des constituants. Ces mesures n'ont de sens que si elles sont faites sur des échantillons prélevés en fonction de la réalité des organisations morphologiques ;
- suivi et mesure des fonctionnements, des transferts, des activités actuelles du milieu pédologique.

La réalisation intégrée de ces trois volets permet d'étudier comment les structures pédologiques évoluent dans l'espace et dans le temps, et ainsi de déterminer dans quelles conditions et avec quelles précautions le sol et l'ensemble du milieu peuvent être aménagés et utilisés.

## **● Les divers types de structures**

Les structures de la couverture pédologique existent depuis l'échelle de l'organisation des particules, jusqu'à celle de l'unité de paysage. Cependant, quatre types de

structures, correspondant à quatre niveaux différents d'organisation et d'observation, sont tout particulièrement importants à décrire, à mesurer et à comprendre.

## ● Les organisations élémentaires

Ce sont des volumes pédologiques qui rassemblent des constituants. Ces organisations sont partiellement visibles à l'œil nu, partiellement à l'aide de microscopes. Sous le microscope les organisations élémentaires se décrivent en terme de constituants et de relations entre les constituants. Sur le terrain, les principaux types d'organisations élémentaires que l'on peut reconnaître et décrire, sont des *agrégats*, des *vides*, des *concentrations* de constituants, des *couleurs*, des *traces d'activités biologiques*. Il peut y avoir, au sein par exemple d'un agrégat ou d'un nodule, plusieurs niveaux emboîtés d'organisations élémentaires. Des déterminations analytiques complètent la description et la caractérisation des organisations élémentaires.

## ● Les assemblages

Ce sont des volumes pédologiques que l'on caractérise, sur le terrain et sous les microscopes, par la présence associée d'un certain nombre d'organisations élémentaires. Un assemblage se décrit en terme de types de constituants, d'agrégats, de vides, de concentrations, de couleurs, de caractères biologiques : on décrit ces organisations élémentaires et les relations qui existent entre elles. Des déterminations analytiques complètent la caractérisation des assemblages. Voici quelques exemples d'assemblages : andique, vertique, calcique, hydromorphe.

## ● Les horizons

Ce sont des volumes pédologiques plus ou moins parallèles à la surface du terrain. Chaque horizon se décrit en terme d'un ou plusieurs types d'assemblages et de leurs relations. Son épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs mètres. Les limites supérieure et inférieure d'un horizon sont plus ou moins nettes, progressives ou brutales. Latéralement, l'extension d'un horizon est très variable : du mètre jusqu'à plusieurs kilomètres.

## ● Les systèmes pédologiques

Ce sont des volumes pédologiques, au sein desquels des horizons sont organisés entre eux, verticalement et latéralement, à l'échelle de l'unité de relief. Un système pédologique se décrit donc en termes d'horizons et de relations entre horizons : structures de ces horizons, superpositions verticales et successions latérales des horizons, nature des limites qui les séparent et des variations morphologiques qui marquent le passage d'un horizon à l'autre. Au terme d'une étude complète, un système pédologique est caractérisé par un type de dynamique évolutive, définie d'après des critères géochimiques, minéralogiques et structuraux.

Les études détaillées des constituants et des structures montrent qu'il y a entre les structures, aux différentes échelles, des relations spatiales et des relations temporelles. À toutes les échelles, des traits pédologiques, des types d'horizons, des types de sols, apparemment très différents les uns des autres, sont en fait génétiquement reliés entre eux :

- > ils le sont dans l'espace, verticalement et latéralement, souvent sur de grandes distances : l'existence, en particulier, de relations latérales, de transferts latéraux de matière à l'intérieur de certaines couvertures pédologiques, a été à maintes reprises démontrée ;
- > ils le sont dans le temps, c'est-à-dire qu'ils se succèdent dans le temps en un même lieu, par auto développement de la couverture pédologique ou par variation de facteurs externes.

Les variations temporelles sont de deux types :

- > *les variations saisonnières* ; la morphologie d'un sol varie en fonction des variations d'humidité, de température, d'activités biologiques ; ces variations influencent fortement la fertilité physique et chimique des sols, ainsi que leur comportement hydrologique et mécanique ;
- > *les modifications progressives, jour après jour, année après année* ; c'est l'évolution du sol qui, selon les caractères, se fait plus ou moins rapidement ; en particulier, l'utilisation des sols par l'homme modifie l'évolution de nombreux caractères morphologiques : transformation des structures, accélération ou ralentissement de certaines migrations internes de matière, érosion...

Relations spatiales et relations temporelles sont étroitement imbriquées. À roche-mère constante, dans un même paysage, tous les sols n'ont pas le même âge : la diversité spatiale des sols observée, c'est-à-dire la distribution spatiale des structures pédologiques, exprime les divers stades d'évolution d'une même couverture pédologique.

## ● La couverture pédologique et la fertilité

L'organisation morphologique des sols est un élément fondamental de leur fertilité : elle exprime de multiples aspects (physiques, chimiques, biologiques) des relations possibles entre la plante et le sol ; de surcroît, elle est par elle-même un facteur fondamental de la fertilité des sols : l'organisation morphologique influence grandement le développement des plantes, par elle-même et par son action sur les autres aspects de la fertilité.

L'organisation morphologique est également, d'une façon plus générale, un élément fondamental du comportement des sols ; elle exprime et elle influence les modes de circulation des eaux et les comportements mécaniques.

Les mesures physico-chimiques et mécaniques sont évidemment nécessaires pour vérifier et compléter les observations et interprétations structurales. Cependant, ces mesures n'ont de sens que si elles sont faites sur des matériaux déjà observés et interprétés morphologiquement.

## LES ORGANISATIONS ÉLÉMENTAIRES DU SOL

Pour découvrir le sol, il faut d'abord le regarder puis l'analyser. La découverte et l'étude de la couverture pédologique passent obligatoirement par l'ouverture de *fosses*. L'observation d'une fosse donne le profil vertical du sol à cet endroit. Chaque fosse est donc une unité d'observation, que l'on appelle le profil.

## ● Les fosses pédologiques

### ● Localisation

Avant de se poser la question de la localisation des fosses, la région d'étude doit avoir été analysée en termes de paysages : on ne choisira qu'ensuite une unité de modelé élémentaire<sup>7</sup> sur laquelle on décidera de faire l'étude de la couverture pédologique. Une fois l'organisation de la couverture pédologique comprise, on pourra extrapoler les résultats acquis.

On suppose ici que l'étude porte sur un bassin versant de quelques hectares<sup>8</sup>. La première étape consiste à choisir un premier axe, le long duquel seront faites les premières observations. Cet axe, pour recouper au mieux la diversité existante, sera perpendiculaire aux courbes de niveau. Le long de cet axe, on ouvre pour commencer au moins trois fosses<sup>9</sup>.

### ● Ouverture

Les dimensions d'une fosse doivent permettre à un observateur d'y travailler confortablement : un carré d'un mètre de côté est un minimum. Sa profondeur dépend de l'épaisseur du sol : une fosse est assez profonde lorsque la roche à partir de laquelle le sol s'est formé (roche-mère) est visible au fond. Quand les sols sont très épais, on ne peut creuser toutes les fosses jusqu'à la roche : on s'arrête alors vers deux mètres de profondeur.

L'utilisation de la *tarière* complète le travail fait à partir des fosses. On l'utilise lors d'une reconnaissance rapide, préalable à l'ouverture des fosses ; on l'utilise également après l'étude des fosses, pour rechercher les extensions latérales des observations faites dans les fosses. Cependant la tarière ne doit jamais être utilisée seule : les informations morphologiques que l'on peut en retirer sont toujours très incomplètes et modifiées par rapport à la réalité du sol en place.

### ● Description

L'étude d'une fosse commence par une reconnaissance rapide des principales variations morphologiques, structurales, en terme de couleurs, agrégats, textures, porosités, traits pédologiques, enracinements, humidités. Cette reconnaissance permet une première délimitation des *principaux horizons*. Chaque horizon est un volume de la couverture pédologique, plus ou moins parallèle à la surface du terrain. Il ne faut cependant pas oublier que la fosse ne représente qu'une fenêtre d'observation limitée, ouverte ponctuellement dans la couverture pédologique : l'horizon que l'on y voit est un volume dont les limites latérales, non visibles dans la fosse, sont à rechercher.

La deuxième étape du travail est alors d'entreprendre la description détaillée des *organisations élémentaires* et des *assemblages* de chaque horizon, ainsi que de décrire comment on passe, verticalement, d'un horizon à l'autre, par modification de ces organisations élémentaires et assemblages.

<sup>7</sup> Interfluve ou bassin versant.

<sup>8</sup> La démarche est la même quelle que soit l'unité de modelé que l'on doit étudier.

<sup>9</sup> Le principe est que les fosses soient équidistantes : leur nombre est fonction de la longueur de l'axe.

Les chapitres qui suivent explicitent comment on procède à la description détaillée des organisations élémentaires, puis à leur interprétation en terme de genèse, de fonctionnement, de propriétés physico-chimiques, de comportement, de fertilité. Cette interprétation est faite successivement au niveau des organisations élémentaires, puis des assemblages, puis des horizons, puis du profil vertical tout entier.

Les organisations élémentaires sont de quatre types : *les couleurs, les agrégats, les vides, les traits pédologiques*. La solidité de ces organisations constitue un critère de description important

## ● **L'interprétation des couleurs**

La couverture pédologique est un milieu très coloré : presque tous les sols présentent des variations verticales et latérales de couleur, progressives ou rapides. Au sein d'un horizon, la couleur peut être homogène ou hétérogène : présence de volumes de couleur différentes : nodules, pellicules, réseaux...

## ● **La description des couleurs**

La couleur d'un volume de sol est déterminée par référence à un code international de couleur : le code Munsell<sup>10</sup>. Chaque couleur est notée par trois valeurs : la teinte (hue), la clarté (value), la pureté (chroma). La couleur change en fonction de l'humidité du sol : il faut donc la mesurer aux états sec et humide. Chaque horizon du sol se définit par une ou plusieurs couleurs. S'il y a plusieurs couleurs, il faut décrire, pour chaque type de volume de couleur, son abondance, son extension, ses formes, ses limites, son contraste par rapport aux autres volumes de couleur, ses relations avec les autres caractères d'organisation élémentaire de l'horizon : agrégats, vides, nodules, revêtements...

## ● **La signification des couleurs**

Les couleurs du sol s'interprètent en termes de constituants et de mécanismes.

### ***Les principaux constituants qui colorent le sol***

- > *la matière organique* colore en sombre : noir, marron, gris foncé... ;
- > *le calcaire et les sels solubles*, tels les chlorures et les carbonates, colorent en blanc ;
- > *le fer* colore différemment selon son état ;
  - *le fer ferreux*, dont la présence est due à un excès d'eau, colore en gris et en bleu ;
  - *la goethite* (oxyhydroxyde,  $\text{FeO}(\text{OH})$ ), conséquence d'un régime hydrique assez peu contrasté<sup>11</sup> colore en brun et en jaune ;
  - *l'hématite* (oxyde,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), conséquence d'un régime hydrique très contrasté, avec alternance fréquente d'une humidité forte mais aérée et d'une sécheresse accentuée, colore en rouge.

<sup>10</sup> Munsell Soil Color Chart.

<sup>11</sup> Le sol est souvent humide, mais sans excès ; les phases de sécheresse ne sont ni fréquentes ni excessives.

**Attention !**

Il est dangereux de quantifier la présence d'un constituant à partir d'une observation de couleur. Les raisonnements peuvent être comparatifs, au sein d'un même profil, ou entre deux profils voisins mais ils ne doivent pas être traduits en chiffres.

### ● **Les mécanismes en jeu**

Les mécanismes qui colorient sont ceux qui agissent sur la présence et l'état des constituants :

- > *les activités biologiques, animales et végétales, accumulent de la matière organique* : les couleurs s'assombrissent ;
- > *les migrations et accumulations de l'argile<sup>12</sup>, du calcaire, des sels* : les horizons appauvris en argile et en fer s'éclaircissent ; ceux enrichis en argile et en fer jaunissent, brunissent ou rougissent ; ceux où le calcaire ou les sels s'accumulent, blanchissent ;
- > *les régimes hydriques* : les horizons très bien drainés, recevant beaucoup d'eau mais s'asséchant vite et souvent, sont facilement rouges ; les horizons drainant moyennement bien, sont bruns ou jaunes ; les horizons drainant mal, sont gris ou tachetés de gris, de rouille, de jaune ou de noir.

L'observation et la mesure des couleurs permettent donc de commencer à découvrir la constitution et le fonctionnement du sol. À partir de là, des déductions sont possibles quant à la fertilité du sol. Les données de fertilité que l'on peut déduire sont celles qui sont liées à la présence de certains constituants<sup>13</sup>, à l'état du complexe adsorbant<sup>14</sup> et à la dynamique de l'eau.

### ● **L'interprétation des agrégats**

Le deuxième caractère morphologique qui permet sur le terrain de poursuivre la description des horizons d'un sol concerne la façon dont les différents constituants du sol sont agrégés : lorsque l'on dégage à la pointe du couteau un volume du matériau sol observé, la plupart du temps ce volume se fragmente naturellement en *agrégats* de formes et de tailles diverses.

Les agrégats résultent de l'assemblage des particules entre elles et de la fissuration des ensembles agrégés. Comme pour les couleurs, la présence et la morphologie des agrégats varient verticalement et latéralement ; au sein d'un même horizon, des agrégats de morphologies différentes peuvent coexister, chaque type ayant sa signification propre en terme d'histoire, de fonctionnement et de fertilité du sol.

En fonction de la présence ou non d'agrégats au sein d'un horizon, on distingue, au niveau de chaque horizon, deux types principaux de structures<sup>15</sup> :

- > *les structures fragmentaires* : il y a des agrégats ;
- > *les structures continues* : il n'y a pas d'agrégats.

<sup>12</sup> Et du fer qui l'accompagne presque toujours.

<sup>13</sup> Texture, matière organique, calcaire, sels.

<sup>14</sup> Que l'on peut déduire de la reconnaissance de certains mécanismes, telles les migrations d'argile.



## ● Les structures fragmentaires

Trois mécanismes sont à l'origine de la formation des agrégats :

- > *la floculation* des constituants, principalement des argiles<sup>16</sup> : ce mécanisme est lié à la présence de matière organique et à la présence de cations bivalents ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ) ou trivalents ( $\text{Al}^{+++}$ ) sur le complexe adsorbant des minéraux argileux ;
- > *la cimentation* des constituants, due à la présence de matière organique, de minéraux argileux, de fer, de calcaire, de silice ; l'activité biologique joue également un rôle important de cimentation des constituants entre eux ;
- > *la fissuration* des domaines floculés ou cimentés ; cette fissuration se fait à chaque fois que le sol se dessèche un peu ; elle est d'autant plus développée que le sol est plus argileux et que les argiles du sol sont de type plus gonflant.

Les agrégats sont décrits par leurs formes<sup>17</sup>, leurs dimensions<sup>18</sup>, leur netteté, c'est-à-dire leur visibilité et la facilité avec laquelle on les sépare les uns des autres, leur consistance<sup>19</sup>.

*Il y a trois principaux types d'agrégats : arrondis, anguleux, feuilletés.* Chacun de ces trois types d'agrégats a des significations précises en terme de constituants, de genèse, de fonctionnement, de fertilité.

### Attention !

Au sein d'un horizon, il peut y avoir association de plusieurs types d'agrégats, différents par leurs formes et par leurs dimensions ; par ailleurs, il y a presque toujours plusieurs niveaux emboîtés de structuration en agrégats : un agrégat centimétrique se décompose en agrégats de plus en plus petits, qui peuvent être soit de la même forme, soit de forme différente : un agrégat anguleux centimétrique peut être composé d'agrégats arrondis plus petits.

## ● Les structures fragmentaires arrondies

Elles se forment par floculation et/ou cimentation. Elles peuvent être *grenues*<sup>20</sup>, *grumeleuses*<sup>21</sup>, ou *polyédriques sub-anguleuses*<sup>22</sup>.

La formation des structures fragmentaires arrondies est favorisée par la présence de matière organique, de cations  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Al}^{+++}$  sur le complexe adsorbant, par l'activité biologique, en particulier les vers de terre.

15 Le mot structure est employé ici dans son acception classique en pédologie. Lors de la première partie de ce texte, nous avons utilisé ce mot dans un sens plus large : celui de l'organisation à toutes les échelles, depuis celle du microscope jusqu'à celle du paysage.

16 Le mot argile a, en science du sol, deux significations différentes : une signification minéralogique : l'argile est un minéral siliceux, un silicate ; la taille de ces minéraux est toujours fine (inf.  $5\mu$ ), voire très fine (inf.  $2\mu$ ) ; une signification granulométrique : le terme argile désigne alors une taille de particule inférieure à  $2\mu$  ; avec cette signification, une particule d'argile n'est pas forcément constituée de minéral argileux ; parmi les particules très fines, dites argileuses, on peut ainsi trouver du quartz, des micas, du calcaire, ... ; cependant, en général, la plus grande partie des minéraux argileux d'un sol sont sous la forme de particules argileuses, c'est-à-dire de taille inférieure à  $2\mu$ .

17 Arrondies, anguleuses ou feuilletées, plus ou moins régulières.

18 Du millimètre au décimètre.

19 Plus ou moins friable : résistance à la pression des doigts.

20 Agrégats petits (inf. 1cm), très régulièrement arrondis.

21 Agrégats petits à moyens (inf. 2cm), à contours très irréguliers.

22 Agrégats en général assez gros, de formes polyédriques mais tous les angles sont arrondis.

Les structures fragmentaires arrondies constituent pour les racines un milieu accueillant : poreux, friable, stable<sup>23</sup>. Les liquides et les gaz y circulent facilement ; la vie animale et végétale s'y développe bien.

Du point de vue chimique, les structures fragmentaires arrondies signifient :

- > soit un milieu neutre ou légèrement basique ( $\text{pH} = 7 \text{ à } 8,2$ ), lié à la présence de  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  sur le complexe adsorbant des argiles et de la matière organique, voire de calcaire comme constituant : il s'agit alors d'un milieu fertile<sup>24</sup> ;
- > soit un milieu très acide ( $\text{pH} < 5,5$ ), le cation structurant étant  $\text{Al}^{+++}$  ; il s'agit alors d'un milieu chimiquement pauvre.

### De bonnes potentialités

Pour ce qui est de l'horizon de surface d'un sol, la présence d'une structure arrondie fine, grenue ou grumeleuse, signifie de bonnes teneurs en matière organique, donc des potentialités alimentaires fortes<sup>25</sup>.

### ● Les structures fragmentaires anguleuses

Elles se forment par floculation et/ou cimentation, puis fissuration. Elles peuvent être polyédriques, cubiques ou prismatiques. La taille des agrégats varie du plus fin millimétrique, au décimétrique et plus.

La formation des structures fragmentaires anguleuses est favorisée par :

- > la présence d'argile minéralogique en quantités significatives (plus de 10 à 20 %) : ce sont surtout les structures cubiques et prismatiques qui n'apparaissent que lorsqu'il y a beaucoup d'argile (plus de 30 %) ; la présence d'argile gonflante<sup>26</sup> favorise la genèse de structures anguleuses très nettes ;
- > l'absence d'activité biologique animale, en particulier de vers de terre ;
- > de faibles teneurs en matière organique.

Les agrégats anguleux sont plus compacts, moins friables, moins stables<sup>27</sup> que les agrégats arrondis. Les structures anguleuses constituent donc pour les racines un milieu beaucoup moins accueillant que les structures arrondies :

- > elles réduisent le volume de sol explorable par les racines, et ceci d'autant plus que les agrégats sont plus grossiers, plus consistants, plus fermés par la présence de pellicules argileuses sur leurs faces ;
- > les liquides et les gaz circulent plus facilement entre les agrégats que dans les agrégats ; pendant les périodes humides, la circulation de ces fluides est ralentie par la fermeture des fissures ;
- > la vie animale et végétale se développe plus facilement entre les agrégats que dans les agrégats ; ceci est particulièrement vrai pour les racines.

<sup>23</sup> Les agrégats résistent à leur destruction par l'eau.

<sup>24</sup> Légère gêne éventuelle s'il y a excès de calcaire fin.

<sup>25</sup> Complexe adsorbant important capable de retenir les éléments nutritifs.

<sup>26</sup> Smectite.

<sup>27</sup> Ils résistent moins bien à leur démolition par l'eau.

### Un milieu déséquilibré

Au total, les horizons à structure anguleuse constituent un milieu déséquilibré du point de vue de leur pénétrabilité. Du point de vue chimique, on ne peut rien déduire de très précis à partir de l'existence de ces structures anguleuses. On retiendra cependant que :

- leur présence est facilitée par l'absence de matière organique et d'activité biologique intense<sup>28</sup>, par la présence d'argiles, principalement d'argiles gonflantes<sup>29</sup>, par un complexe adsorbant désaturé<sup>30</sup> ou par un excès de  $\text{Na}^+$  sur le complexe adsorbant ;
- leur présence réduit l'accessibilité aux racines des richesses chimiques du sol.

### ● Les structures fragmentaires feuilletées

Les structures feuilletées sont caractérisées par l'existence d'une composante horizontale ou oblique de la fissuration. *Elles peuvent être en plaquettes obliques, lamellaires ou squameuses*. Chacune de ces structures est originale par ses caractères morphologiques et par ses origines.

#### Les structures en plaquettes obliques

On les appelle aussi *structures verticales*. Les agrégats sont de forme trapézoïdale, à faces lissées et striées, de taille décimétrique, très compacts.

Cette morphologie est le résultat de la présence en quantité importante d'argiles gonflantes<sup>31</sup> : à chaque fois que le sol s'humidifie, il augmente beaucoup de volume (jusqu'à plus de 40 %), d'où des mouvements internes très importants donnant naissance à des surfaces obliques et lissées, striées, dénommées *faces de glissement*. Quand le sol se dessèche, il se fissure fortement, en particulier le long des surfaces obliques : ainsi naissent les plaquettes obliques.

#### Des défauts importants, mais une richesse chimique

Ces structures présentent, en exagéré, les mêmes défauts que les structures anguleuses : forte réduction du volume de sol explorable par les racines, circulations déséquilibrées des eaux, des gaz, de la vie. À ceux-ci s'ajoutent :

- une circulation très ralentie des fluides quand le sol est humide : la porosité fissurale est complètement fermée et les autres types de porosités sont très réduites ;
- des mouvements internes très importants, rythmés par les alternances permanentes d'humidification et de dessiccation : les racines, qui se développent beaucoup le long des fissures, sont écrasées, cassées, après avoir été, au préalable, copieusement noyées par l'eau qui envahit les fissures ; les constructions faites sur et dans les sols affectés par ce type de structure, s'en ressentent fortement. En revanche, les horizons caractérisés par ce type de structure sont toujours chimiquement très riches : le complexe adsorbant, dû aux argiles gonflantes, est important ; de surcroît, il est toujours saturé, principalement en  $\text{Ca}^{++}$  et en  $\text{Mg}^{++}$ .

<sup>28</sup> Complexe adsorbant faible.

<sup>29</sup> Complexe adsorbant élevé.

<sup>30</sup> Teneurs faibles en  $\text{Ca}^{++}$ .

<sup>31</sup> Smectite, en particulier montmorillonite.

## Les structures lamellaires

Les structures lamellaires, dont l'épaisseur varie du millimètre à quelques centimètres, ont des origines variées. Il peut s'agir :

- > d'un héritage de la structure de la roche ;
- > du résultat de certaines accumulations mono-minérales qui se produisent dans de nombreux sols : ces accumulations de calcaire, de fer, de silice, donnent naissance à des croûtes et à des cuirasses dont la structure est fréquemment lamellaire ;
- > de la conséquence d'une alternance répétée de gel-dégel de certains horizons limono-sableux ; un horizon, durci et lamellaire, prend naissance à l'intérieur du sol : on l'appelle fragipan ;
- > du résultat de la destruction, par les pluies ou par des irrigations mal conduites, des agrégats arrondis ou anguleux de la surface du sol : il se forme une croûte de battance, de fine épaisseur, à structure lamellaire ;
- > de la conséquence d'un travail du sol qui compacte par les roues des tracteurs et des remorques, par le soc de charrues mal réglées : il y a formation soit d'une structure lamellaire à la surface du sol, soit d'une structure lamellaire à la base de l'horizon travaillé par les instruments culturaux : on parle alors de semelle de labour.

### Les croûtes de battance et les semelles de labour

Les structures lamellaires sont toujours un obstacle à la pénétration verticale de l'eau et au développement des systèmes radiculaires. Elles facilitent les circulations latérales des eaux, les porosités horizontales étant beaucoup plus développées que les porosités verticales. Quand elles se forment rapidement, à la surface<sup>32</sup> ou à l'intérieur<sup>33</sup> d'un sol cultivé, cela signifie soit que le sol est fragile du point de vue structural, soit que les travaux agricoles sont mal conduits, non adaptés. Croûtes de battance et semelles de labour facilitent le ruissellement des eaux, à la surface et à l'intérieur des sols : c'est ainsi que peuvent naître des érosions importantes.

## La structure squameuse

Cette structure, très particulière, n'existe qu'à la surface des sols. *Elle se présente sous la forme de plaquettes*, d'épaisseur millimétrique ou centimétrique, aux bords relevés. La face supérieure de chaque plaquette est argileuse, très lisse et luisante ; la face inférieure est sableuse, la taille des particules diminuant progressivement quand on va du bas vers le haut de la plaquette. Cette structure signifie qu'il y a eu, temporairement, à la surface du sol, une mare d'eau ; par exemple à la suite d'un orage violent ou d'une irrigation à débit trop fort. La présence de cette structure signifie toujours destruction, par excès d'eau, des agrégats de la surface des sols : c'est un signe négatif sur la stabilité structurale du sol (elle est faible), le fonctionnement hydrique du sol (il est peu perméable), la manière dont le sol est traité : travail du sol déstabilisant et compactant, irrigations à débit excessif et gouttes d'eau trop grosses.

<sup>32</sup> Croûte de battance.

<sup>33</sup> Semelle de labour.

### Les points importants de cette étude des structures fragmentaires

Un horizon est d'autant plus accueillant pour un système racinaire que sa structure en agrégats est plus arrondie, plus fine, moins consistante : cette structure facilite la circulation des gaz et des solutions, la pénétration des racines et des animaux.

Cette structure est favorisée par :

- la présence de matières organiques neutres ou légèrement basiques ;
- un complexe adsorbant saturé à 80 % par du calcium  $\text{Ca}^{++}$  ;
- une forte activité biologique ;
- globalement, un milieu neutre ou légèrement basique.

Les fertilités, physiques et chimiques, sont alors maximum. Cependant, la structure arrondie, fine, peu consistante, existe également en milieu très acide, à  $\text{pH} < 5,5$ . C'est alors la matière organique acide, et surtout l'aluminium  $\text{Al}^{+++}$ , qui jouent les rôles structurants. La fertilité physique reste bonne, mais la fertilité chimique est mauvaise : manque d'éléments nutritifs et excès d'aluminium toxique pour de nombreuses plantes. La tentation de l'agriculteur est alors d'essayer de remonter le pH de son sol, par exemple en apportant des quantités importantes de chaux : c'est en effet la solution, à condition de ne pas s'arrêter en route, c'est-à-dire d'apporter suffisamment de calcium pour compenser la disparition de l'aluminium structurant ; la gamme de pH comprise entre 5,5 et 6,5 est périlleuse pour la stabilité structurale du sol, car il n'y a plus d' $\text{Al}^{+++}$  et pas encore assez de  $\text{Ca}^{++}$  : le risque de déstructuration et de compaction est très fort.

Les structures anguleuses et feuilletées réduisent le volume de sol explorable par les racines, et ceci d'autant plus que les agrégats sont plus gros et plus consistants : les gaz, les solutions, les racines, les animaux, circulent alors plus facilement le long des fissures que dans les agrégats, fissures qui sont elles-mêmes instables puisqu'elles se referment à chaque fois que le sol s'humidifie.

Les principaux facteurs responsables de ces structures anguleuses et feuilletées, qui naissent par fissuration et pression, sont :

- des taux d'argile élevés, en particulier, beaucoup d'argile gonflante ;
- l'instabilité structurale, favorisée par de faibles taux en matière organique, de faibles taux en calcium sur le complexe adsorbant, des excès de sodium sur le même complexe ;
- des cimentations excessives.

## ● Les structures continues

On parle de structure continue quand il n'y a pas d'agrégats. Il y a deux types de structure continue : *particulaire et massive*.

### ● La structure particulaire

On parle de structure particulaire quand les particules constitutives du sol n'ont aucune adhérence entre elles : le meilleur exemple que l'on puisse en donner est celui d'un sable sec, de plage, de dune côtière ou désertique.

La structure particulaire n'existe que dans des horizons très sableux. On ne la trouvera donc que dans deux situations extrêmes :

- > *celle d'horizons non ou peu différenciés sur roche-mère sableuse*, par exemple sur dunes de formation très récente : l'altération et la pédogenèse n'ont pas encore eu le temps de produire des ciments organiques et minéraux capables d'agréger les particules sableuses ;
- > *celle, au contraire, d'horizons très différenciés*, complètement appauvris en éléments capables d'agréger : c'est le cas, en particulier, des horizons appauvris des podzols, qui peuvent être complètement particuliers à l'état sec, la pédogenèse podzolisante ayant éliminé les argiles et les matières organiques capables de former des agrégats.

### ● La structure massive

On parle de structure massive quand les particules d'un horizon sont cimentées entre elles sans que cela forme d'agrégats ; en particulier, il n'y a pas de fissuration. Quand on travaille au couteau ce type d'horizon, les mottes de terre que l'on arrache sont des éclats, créés artificiellement, et non des agrégats limités par des faces naturelles. La structure massive se décrit principalement en termes de morphologie et de dureté des éclats<sup>34</sup>. Il est évident que ces deux caractères varient beaucoup en fonction de l'humidité : morphologie et dureté doivent être évaluées sur des horizons secs.

La structure massive caractérise les situations suivantes :

- > *des horizons humides qui, à l'état sec, sont particuliers* : quand un enfant joue à faire des pâtes de sable, il fabrique une structure massive à partir d'une structure particulaire ;
- > *des horizons, non organiques, développés sur des roches-mères trop sableuses* pour qu'une structuration en agrégats puisse prendre naissance ;
- > *des horizons non ou peu différenciés par la pédogenèse* : c'est le cas, par exemple, des sols jeunes sur roches-mères sableuses ou limoneuses et des horizons de base de sols différenciés sur ces mêmes roches-mères ;
- > *des horizons, au contraire, très différenciés, fortement appauvris par la pédogenèse* : les horizons lessivés ont souvent des structures massives, voire particulières ;
- > *des horizons dont les structures fragmentaires ont été détruites par les pratiques culturales*.

Fréquemment, une structure massive à l'état humide se fissure à l'état sec, donnant naissance à une structure fragmentaire anguleuse, en général grossière et faiblement développée : ce phénomène témoigne d'une structuration naissante ou finissante, de toute façon fragile et instable.

<sup>34</sup> Ils peuvent être anguleux ou émoussés.

Au total, les structures continues caractérisent une absence d'argile. Il s'agit :

- > soit d'un milieu pédologique peu différencié, sur une roche-mère sableuse ou limoneuse ; la structure continue révèle une faible potentialité chimique étant donnée l'absence d'argile donc de capacité d'échange forte ; cette capacité d'échange peut cependant être saturée, assurant ainsi un minimum de fertilité ;
- > soit d'un milieu pédologique très différencié et appauvri en argile : l'appauvrissement peut être naturel. Cet appauvrissement est toujours accompagné d'une forte désaturation du complexe adsorbant, donc d'une acidification, de l'horizon concerné ; dans ce cas, la structure continue est synonyme de fertilité, actuelle et potentielle, faible, et ceci d'autant plus que cette structure a une tendance particulière. L'appauvrissement peut aussi être d'origine anthropique, conséquence du travail du sol par l'homme : les baisses des taux de matières organiques, les diminutions des activités biologiques, les apports d'engrais destructurants, les tassements par des instruments aratoires et autres tracteurs et remorques, les dessiccations excessives suite aux défrichements, les irrigations mal faites, tout ceci conduit à la destruction progressive, souvent très rapide, en quelques années, des structures fragmentaires au profit de la structure continue.

Au terme de cette étude de l'agrégation des sols, une observation importante, déjà perçue lors de l'étude des couleurs, s'impose : les caractères morphologiques des sols varient en fonction de l'humidité. Ceci est vrai pour les couleurs et pour l'agrégation ; nous verrons que ceci est également vrai pour les porosités, pour les traits pédologiques, pour les stabilités structurales.

Ceci signifie que le comportement du sol face aux plantes, la façon dont il réagit aux actions anthropiques, varient en fonction des états hydriques, donc en fonction des saisons. Il nous faut donc connaître ces variations et une seule observation, isolée dans le temps et isolée de son contexte d'utilisation du sol, n'est pas significative.

## ● **L'interprétation des vides**

Le troisième caractère morphologique qui permet, sur le terrain, de poursuivre la description des horizons d'un sol, concerne les volumes occupés par l'air, par l'eau, par la matière vivante : ce sont les vides, autrement dit la porosité de l'horizon. *On appelle porosité d'un matériau pédologique le volume non occupé par les constituants solides.* C'est le volume occupé par les constituants liquides et gazeux ; ce sont aussi les voies des transferts solides, liquides et gazeux, ainsi que de l'activité biologique. La porosité totale d'un volume de sol varie, selon les horizons, de 20 % (horizon très peu poreux, très compact) à 80 % (horizon très poreux, très léger).

Une grande partie de la porosité est invisible à l'œil nu, voire à la loupe : les microscopes optiques et électroniques sont nécessaires pour tout voir et comprendre. On peut cependant, à l'aide de l'œil, de la loupe et de quelques mesures, voir, déduire, mesurer et comprendre l'essentiel.

## ● **Les types de vide**

Les vides se reconnaissent, se décrivent et se nomment d'après leur morphologie, leur origine, leur taille.

## ● La morphologie et l'origine des vides

D'après leur morphologie et leur origine, on distingue trois types de porosités : *les porosités d'altération, les porosités texturales, les porosités structurales.*

### Les porosités d'altération

Les porosités d'altération sont celles qui se développent à l'intérieur et à la surface des minéraux des roches, par dissolution et transformation de ces minéraux. Ces porosités ne sont pas visibles à l'œil nu ni à la loupe, sauf celles qui affectent les surfaces des graviers et des sables. Elles représentent cependant une grande partie de la porosité totale des matériaux pédologiques ; ce sont les premières à naître lors du processus de formation des sols à partir des roches.

### Les porosités texturales

Les porosités texturales sont celles qui subsistent entre les particules une fois que celles-ci sont en contact entre elles : on peut dire qu'il s'agit des vides qui résultent de l'entassement des particules.

La morphologie et le volume des vides de cette porosité sont fonction :

- > d'une part, de la taille et de la morphologie des particules constitutives du matériau sol : les vides qui séparent les particules argileuses sont, évidemment, très fins, visibles au microscope électronique ; ceux d'un matériau sableux sont beaucoup plus grossiers, partiellement visibles à l'œil nu ;
- > d'autre part, de ce que l'on peut appeler l'histoire énergétique du matériau sol ; en effet, la porosité texturale n'est pas indépendante des diverses pressions qui s'exercent sur les matériaux ; parmi ces pressions, deux sont importantes : *le dessèchement* qui provoque le rapprochement des particules, souvent d'une manière irréversible – on parle de tassement hydrique – ; *l'activité biologique* : une racine qui pousse, un animal qui se déplace à l'intérieur du sol, provoquent autour d'eux des contraintes qui rapprochent les particules entre elles – on parle de tassement biologique.

Ces variations, dans le temps, de la porosité texturale d'un matériau sont liées à deux causes principales : la quantité d'eau qui entoure chaque particule (la porosité diminue quand le matériau se dessèche) et l'élasticité des particules.

### Les porosités structurales

Les porosités structurales sont celles qui résultent de l'organisation des particules entre elles : il n'y a plus simplement entassement, avec ou sans contrainte, mais aussi structuration, mise en relation, déplacement des particules, donnant naissance à de nouvelles porosités.

Les porosités structurales sont de trois types :

- > *les porosités tubulaires et de cavités* : elles sont d'origine biologique, animale ou végétale ;
- > *les porosités fissurales* : elles résultent des variations de volume des argiles ; ces porosités sont celles qui délimitent les agrégats anguleux et les agrégats feuilletés ; on les trouve aussi à l'intérieur des agrégats ;
- > *les porosités d'entassement des agrégats arrondis* : ce sont les vides qui séparent les agrégats arrondis les uns des autres.



La description de la porosité doit tenir compte, non seulement de la forme des vides<sup>35</sup> mais aussi de la morphologie et de la constitution des parois. Il faut, en particulier, bien noter si les constituants qui sont le long des vides sont les mêmes que ceux qui en sont éloignés : y-a-t-il ou non, par exemple, revêtements argileux sur les parois des vides ? Ce type d'observation permet de mieux comprendre les relations qui peuvent exister entre les constituants du sol, la composition des eaux et le comportement des racines qui sont au contact des parois.

### ● **La taille des vides**

D'après la taille des vides, on distingue deux types de porosités :

- > *la macroporosité* : l'eau peut y circuler par gravité<sup>36</sup> ; c'est dans la macroporosité que l'eau circule rapidement après chaque pluie ; mais, dans un sol sain, cette macroporosité doit, après un drainage rapide, rester disponible pour la circulation de l'atmosphère ; la macroporosité est, principalement, d'origine structurale ; la porosité texturale d'un matériau sableux est également de l'ordre de la macroporosité ;
- > *la microporosité* : l'eau y circule par capillarité ; c'est dans la microporosité qu'est retenue l'essentiel de l'eau que les plantes consomment au fur et à mesure de leurs besoins ; quand la microporosité est trop faible, par exemple dans les sols sableux, les sols s'assèchent très vite et les plantes flétrissent ; la microporosité peut avoir toutes les origines possibles.

### ● **La mesure de la porosité**

La porosité s'observe d'abord sur le terrain. À l'œil nu et à la loupe, on peut observer :

- > *la porosité structurale inter-agrégats*, c'est-à-dire les porosités fissurales et les porosités d'entassement des agrégats arrondis ;
- > *une partie de la porosité intra-agrégats*, c'est-à-dire une partie des porosités tubulaires et de cavités, des porosités fissurales, des porosités texturales concernant l'entassement des sables et des graviers.

Il est important que ces observations et descriptions des porosités se fassent en fonction des autres caractères morphologiques : couleurs, agrégats, traits pédologiques.

L'observation des porosités se poursuit sous les microscopes, optiques et électroniques : tous les types de porosité y sont observables, quant à leur localisation, quant à leur morphologie, quant à leur relation avec les constituants, quant à leur relation avec les agrégats, les couleurs, les traits pédologiques. Au laboratoire, par mesures directes et indirectes, on peut quantifier tous les types de porosité.

L'observation et la mesure des porosités, notamment des porosités structurales, doivent être répétées au cours de l'année : en effet, elles se modifient en fonction des saisons.

35 Ce que l'on voit sur le terrain en tridimensionnel, à l'œil nu et avec la loupe, et ce que l'on voit au microscope en bidimensionnel sur lame mince.

36 Le diamètre des vides dépasse, selon les cas, c'est-à-dire selon la morphologie et selon les constituants, 3 à 8  $\mu$ .

## ● La porosité et la fertilité des sols

La porosité de la couverture pédologique détermine ses relations avec l'air, l'eau, la vie. C'est, en effet, de la porosité de la couverture pédologique que dépendent :

- > *la dynamique des échanges gazeux (eau,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $NO_x$  ...)* entre le sol et l'atmosphère : les sols influencent la composition de l'atmosphère mondiale, donc les climats ;
- > *le fonctionnement, quantitatif et qualitatif, des rivières et des nappes phréatiques* : les eaux de pluie et d'irrigation traversent plus ou moins facilement et plus ou moins rapidement les divers horizons de la couverture pédologique ; la porosité des sols conditionne les importances relatives des circulations verticales et latérales et c'est donc d'elle que dépendent la recharge des nappes phréatiques et le régime des crues des rivières ; c'est également d'elle que dépend la composition chimique des eaux de ces nappes et rivières, puisque c'est au cours de leur passage dans la porosité des sols que les eaux acquièrent au contact des parois des vides une partie de leur composition chimique ;
- > *le déclenchement des érosions, superficielles et internes* : l'érosion hydrique est toujours provoquée par une eau, qui n'ayant pas trouvé la porosité dont elle a besoin pour s'infiltrer verticalement dans le sol, ruisselle, donc érode.

### **La fertilité d'un sol est d'autant meilleure :**

- > que la macroporosité est suffisante pour éviter les excès d'eau, les engorgements qui noient les racines ;
- > que la microporosité est suffisante pour que de l'eau soit retenue et puisse être mise à disposition des racines au fur et mesure des besoins ;
- > qu'il n'y a pas, dans le volume de sol exploré par les racines, de variation brutale de porosités : entre deux horizons, entre les porosités inter et intra-agrégats ;
- > qu'il n'y a pas, dans le temps, de variation trop importante de porosité en fonction de l'humidité : les horizons argileux gonflants et les agrégations fragiles sont défavorables au développement des systèmes racinaires.

Enfin, dans la mesure où l'on veut faire jouer aux sols un rôle de filtre (épuration des eaux usées), la porosité doit être suffisante pour faciliter l'accès aux sites d'échanges.

### **Une bonne porosité permet la continuité des flux hydriques et gazeux**

C'est le cas d'un horizon à structure grumeleuse et grenue fine, riche en matière organique, à forte activité biologique, quelle que soit sa texture : dans ce type d'horizon, il y a continuité entre les diverses porosités, inter et intra-agrégats ; de surcroît, les porosités y sont stables, peu sensibles aux variations d'humidité ; les flux peuvent donc y être continus, dans l'espace et dans le temps : pour les racines, c'est l'habitat de rêve, sans obstacle.

Ce n'est pas le cas d'un horizon argileux, à structure prismatique grossière, au sein duquel il y a de nombreuses ruptures entre les divers types de porosités, en particulier entre les porosités grossièrement fissurales qui séparent les agrégats anguleux et les porosités très fines de l'intérieur des agrégats ; de surcroît, les porosités y sont instables, diminuant fortement dès que le sol s'humidifie ; la continuité des flux n'est pas assurée, ni dans l'espace, ni dans le temps : pour les racines c'est en permanence la course d'obstacles.

## ● L'interprétation des traits pédologiques

Le quatrième caractère morphologique qui permet, sur le terrain, de poursuivre la description des horizons d'un sol et d'en interpréter la genèse et le fonctionnement, concerne des organisations qui résultent de mouvements et de transferts au sein des sols : mouvements et dépôts de particules, argileuses, limoneuses, sableuses ; mouvements et précipitations d'éléments en solution : calcaire, sels, matières organiques ; mouvements des animaux et des racines ; gonflement des argiles.

Ces mouvements et transferts aboutissent à la création de *traits pédologiques* : *revêtements, nodules, bandes, pédotubules*. Ce sont, pour la plupart, des figures d'accumulation de matière (argiles, carbonates, sables...), accumulation absolue après migration, ou accumulation résiduelle après départ des autres éléments. L'ensemble de ces organisations se décrit successivement sur le terrain, à l'œil nu et à la loupe, puis au laboratoire à l'aide de microscopes.

### ● Les revêtements

Il s'agit de fines pellicules, recouvrant les parois de vides. Les revêtements les plus connus sont argileux ; mais il existe aussi, très fréquemment, des revêtements calcaires, ferriques, alumineux, siliceux, organiques, gypseux, salés ; et il y a aussi des revêtements limoneux ou sableux.

Les revêtements témoignent presque toujours d'une migration d'éléments dans les eaux qui parcourent les vides du sol : ces éléments ont été arrachés ou dissous, puis transportés par les eaux, verticalement et latéralement, sur des distances variables, puis déposés par sédimentation ou par précipitation-cristallisation. La présence des revêtements signifie donc qu'il y a accumulation de matière, par exemple d'argile : beaucoup d'horizons d'accumulation d'argile, existant dans les sols, se reconnaissent par la présence de revêtements argileux.

Dans certains cas, des pellicules argileuses résultent d'une réorganisation locale, sans déplacement de particules, sous l'effet des pressions exercées par le gonflement des argiles ou par le passage des racines ou des animaux : ces pellicules sont fréquentes à la surface des agrégats anguleux ou feuilletés de sols à argiles gonflantes.

Enfin, certains revêtements sont résiduels : c'est le cas, par exemple, de certaines pellicules sableuses qui constituent, sur des surfaces horizontales, des dépôts suite au départ sélectif des particules plus fines, argileuses et limoneuses. Dans ce cas, les revêtements témoignent d'un départ de matière, les éléments concentrés sous la forme de revêtements étant les moins mobiles.

Les revêtements sont décrits par leur couleur, leur épaisseur, leur localisation vis-à-vis des vides, des agrégats, des racines, des particules grossières (graviers, sables), leurs constituants<sup>37</sup>.

<sup>37</sup> Si on est capable de les reconnaître avant analyse, ce qui est fréquemment le cas.

## ● Les nodules

Les nodules sont des concentrations plus ou moins sphériques, soit d'éléments ayant migré en solution, soit d'éléments résiduels de ces migrations : dans les deux cas, ils correspondent à une accumulation de matière, absolue ou résiduelle. Les nodules les plus fréquents sont les nodules calcaires et les nodules d'hydroxyde de fer.

Les nodules d'accumulation absolue résultent de la précipitation localisée, au sein d'un volume qui s'enrichit et grossit progressivement, d'un minéral. Ce phénomène d'accumulation absolue est très fréquent avec les éléments relativement solubles, tels les carbonates, les sulfates, les chlorures : le moteur principal de l'accumulation est alors l'évaporation, par exemple, autour des systèmes racinaires. Il concerne également les hydroxydes de fer ou d'aluminium : ceci signifie alors qu'il y a eu, avant migration, changement d'état : par exemple, réduction du fer permettant sa solubilisation, donc sa migration ; ou encore complexation du fer ou de l'aluminium par des produits organiques, permettant également leur solubilisation et leur migration. L'accumulation nodulaire se fait alors à la suite d'un nouveau changement d'état : oxydation, destruction des complexes organiques, avec cristallisation dans les vides et, éventuellement, épigénie<sup>38</sup>.

Les nodules d'accumulation relative correspondent à la concentration nodulaire des éléments les moins solubles en conséquence du départ des éléments les plus solubles. Ces concentrations relatives sont fréquentes, par exemple, pour le fer et pour l'aluminium.

Les nodules se décrivent d'après leur taille, leur forme, leur couleur, leur dureté, leur structure interne, leur localisation par rapport aux autres caractères morphologiques : agrégats, vides, revêtements.

Les nodules sont souvent la première étape de phénomènes d'accumulation beaucoup plus importants que sont, par exemple, *les encroûtements et croûtes calcaires*, très développés dans les régions semi-arides et arides méditerranéennes, ou *les carapaces et cuirasses ferrugineuses* des régions tropicales.

## ● Les bandes

Les bandes constituent, au sein d'horizons à texture grossière sablo-limoneuse, des feuillets, d'épaisseur millimétrique ou centimétrique, plus riches en argile, ou en fer, ou en matière organique. Ces feuillets, globalement horizontaux, sont toujours ondulés, les ondulations pouvant être très accentuées. Longtemps considérées comme des figures sédimentaires, les bandes peuvent en fait avoir deux types d'origine :

- > l'accumulation au sein d'un horizon poreux, après migration verticale ou latérale au sein de la couverture pédologique ;
- > la dégradation et le lessivage des particules argileuses : dans ce cas, les bandes ne sont pas d'accumulation, mais elles sont résiduelles de l'appauvrissement en argile d'un horizon argileux.

Les bandes contiennent toujours des revêtements d'argile, de fer ou de matière organique.

<sup>38</sup> Épigénie : cristallisation avec dissolution concomitante des minéraux pré-existants.

## ● Les pédotubules

On appelle pédotubules des volumes pédologiques que l'on peut interpréter comme étant le résultat de l'activité biologique animale : boulettes fécales, agrégats finement grenus résultant de l'activité des vers de terre, constructions, au sein des sols, par les fourmis ou les termites, volumes centimétriques résultant des transports de terre, à l'intérieur du sol, par des taupes, des chiens de prairie, des rats, etc.

## ● L'interprétation de la solidité des agrégats

Les associations entre elles des particules constitutives des sols sont plus ou moins fragiles, plus ou moins stables. En particulier, la solidité des structures en agrégats et, corrélativement, la stabilité des vides liés à l'aggrégation et aux activités biologiques, sont très variables. Or la solidité des agrégats et la stabilité de certains types de porosité sont des critères importants de la fertilité des sols.

Afin de définir la solidité d'un agrégat, on utilise deux notions importantes : *la consistance et la stabilité structurale*, la plus importante étant la stabilité structurale.

## ● La consistance

C'est la résistance d'un agrégat, ou d'un éclat, à sa destruction par pression. Sur le terrain, en décrivant un sol, on estime cette consistance par la résistance, de l'agrégat ou de l'éclat, à sa destruction par pression entre les doigts.

La consistance varie beaucoup en fonction de l'humidité : mis à part les horizons consolidés, cimentés, telles les croûtes calcaires, les cuirasses ferrugineuses etc., les agrégats qui sont durs à l'état sec ne le sont pas à l'état humide.

Une consistance trop forte, souvent liée à une forte compacité, est toujours négative du point de vue de la fertilité : elle complique le développement des systèmes racinaires ; elle rend également beaucoup plus difficile le travail du sol par l'agriculteur.

Par ailleurs, consistant, compact, dur, ne signifient pas stable, c'est-à-dire qu'un agrégat très dur peut s'effondrer dès qu'il est mis dans de l'eau, et, inversement, un agrégat friable, qui s'écrase facilement sous la pression des doigts, peut être complètement stable, insensible, quand on le plonge dans de l'eau.

## ● La stabilité structurale

La stabilité structurale est une estimation ou une mesure de la résistance des agrégats, donc des porosités structurales, face aux agents qui peuvent les détruire, et en particulier face à l'eau.

On estime la stabilité structurale d'un agrégat en le plaçant dans un verre d'eau : on observe s'il reste stable ou s'il se détruit et, dans ce cas, la vitesse à laquelle l'effondrement de l'agrégat se fait. Cette observation se fait facilement sur le terrain. Dans toute la mesure du possible, il est préférable de le faire avec de l'eau distillée (ou de l'eau de pluie), une eau chargée en sels, même légèrement, allant dans le sens d'une stabilisation des agrégats. Au laboratoire, différents tests permettent également de mesurer la stabilité des agrégats.

Au niveau des sols et des paysages, la stabilité structurale s'observe et s'estime en fonction des comportements des agrégats face aux agents naturels et anthropiques qui les

agressent, en fonction de la genèse de mottes et d'horizons compacts, en fonction du développement de phénomènes graves d'érosion. En effet, les principales expressions d'une mauvaise stabilité structurale sont les suivantes :

- > la destruction par la pluie de la structure superficielle : le travail fait par l'agriculteur pour préparer un lit de semence à structure arrondie peut être détruit par les gouttes de la pluie ou de l'irrigation frappant les agrégats : si les agrégats sont stables, ils résisteront aux impacts des gouttes ; si les agrégats sont instables, ils se détruiront et formeront une croûte de battance ;
- > la formation dans les sols cultivés, au sein de la partie supérieure du sol, entre 0 et 50 cm de profondeur, dans ce que l'on appelle le profil cultural, de mottes compactes, peu poreuses, consistantes à l'état sec ou d'horizons compacts, à structure massive ou feuilletée : semelles de labour ou d'irrigation. Ces mottes et horizons compacts sont les conséquences des travaux agricoles et/ou de l'irrigation, sur des sols à structure fragile ou fragilisée ;
- > le développement d'érosions qui peuvent, très vite, prendre des allures catastrophiques : érosion en nappe, puis en rigoles qui peuvent, en quelques années, devenir de véritables ravins. Ces érosions sont la conséquence des ruissellements, superficiels ou sub-superficiels, qui se développent sur les croûtes de battance et sur les semelles de labour ou d'irrigation.

### **Les principaux responsables de stabilité structurale**

Les matières organiques, les hydroxydes, les cations bi ou trivalents sur le complexe adsorbant ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Al}^{+++}$ ) consolident les agrégats. Les particules limoneuses, quand elles sont prédominantes par rapport aux particules argileuses et sableuses, les cations monovalents sur le complexe adsorbant ( $\text{H}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$ , etc.), les excès d'eau fragilisent les agrégats.

Des mécanismes pédologiques, naturels ou provoqués par l'homme, fragilisent les structures :

- > le retrait, du complexe adsorbant, des cations bi ou trivalents : acidification d'un sol neutre, par départ des cations alcalino-terreux remplacés par l'hydrogène ; ou remontée du pH d'un sol très acide dans lequel la stabilité structurale est assurée par l'aluminium : l'aluminium disparaît, laissant la place principale à l'hydrogène ; on sait que la stabilité structurale est maximum au-dessous de pH 5,5 (elle est alors assurée par  $\text{Al}^{+++}$ ) et au-dessus de pH 6,5 (elle est alors assurée par  $\text{Ca}^{++}$ ) ; entre 5,5 et 6,5, les dangers d'instabilité structurale sont maximum (pH mesurés dans de l'eau distillée) ;
- > le lessivage des argiles : il y a appauvrissement, dans les horizons de surface du sol, en complexe adsorbant capable de retenir des cations structurants, et il y a augmentation relative des particules limoneuses ;
- > la destruction des matières organiques et la diminution des activités biologiques ;
- > les variations d'excès d'eau : hydromorphie temporaire ;

- > l'alcalinisation par le sodium : dès qu'il y a plus de 10 à 15 % de  $\text{Na}^+$  sur le complexe adsorbant, la stabilité structurale devient très faible ; cela correspond à un pH supérieur à 9 ;
- > la destruction des agrégats par le travail du sol : tassement d'un sol humide ou pulvérisation d'un sol sec.

Au total, l'instabilité structurale est un danger : elle gêne l'enracinement des plantes, l'activité biologique animale, la circulation des fluides, en particulier la pénétration verticale de l'eau dans les sols<sup>39</sup> : d'une façon générale, les richesses alimentaires d'un sol, y compris l'eau, ne sont régulièrement accessibles aux plantes que si la structure est stable.

### Conseils pratiques

#### Il faut éviter :

- les systèmes de culture appauvrissant en matière organique ;
- les systèmes de culture obligeant à travailler dans les champs en conditions trop sèches (risque de pulvérisation) ou trop humides (risques de tassement) ;
- de laisser les sols à nu ;
- les irrigations excessives suivies de dessèchements excessifs ;
- le pâturage sur sols humides (risque de tassement).

#### Il faut favoriser :

- les apports de matières organiques : fumiers, composts, résidus de récoltes, engrais verts ; la matière organique, par elle-même, par son complexe adsorbant, par l'activité biologique qu'elle favorise, est de loin le meilleur artisan d'une bonne stabilité structurale ;
- les alternances de cultures permettant des alternances de types d'enracinement ;
- un travail du sol qui aère sans tasser ;
- la saturation du complexe adsorbant en  $\text{Ca}^{++}$  (idéal = 80 % du complexe en Ca ; le reste en  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}^+$ ).

39 D'où érosion, alimentation réduite des nappes phréatique, crues des rivières plus fortes.

## LES PRINCIPAUX TYPES DE SOL

Les couvertures pédologiques sont faites d'horizons qui se superposent verticalement et se relaient latéralement. Pour décrire une couverture pédologique, il faut en reconnaître les horizons<sup>40</sup> ainsi que leurs relations verticales<sup>41</sup> et latérales<sup>42</sup>.

### ● La formation des horizons

Les dynamiques qui conduisent à la formation des horizons pédologiques sont le résultat de quatre types de mécanismes, que nous décrirons dans ce chapitre :

- > des mécanismes d'altération des roches et de leurs constituants ;
- > des mécanismes biologiques et d'accumulation de matières organiques ;
- > des mécanismes de libération, de migration puis d'accumulation des constituants résultant des mécanismes d'altération et d'évolution des matières organiques ;
- > des mécanismes d'arrangement et d'agrégation des constituants issus de l'altération puis mis en place par les migrations.

### ● L'altération des roches et des minéraux

Les sols se forment à partir des roches par altération de celles-ci et de leurs minéraux. L'altération correspond à :

- > *la désagrégation des roches* : il s'agit de phénomènes de fissuration, de séparation les uns des autres des minéraux constitutifs des roches ; une porosité nouvelle prend naissance ;
- > *la dissolution et l'entraînement par les eaux des constituants des roches* : tous les constituants sont plus ou moins solubles. Parmi les constituants les plus fréquents dans les roches, les plus rapidement solubles sont les calcaires, les moins rapidement solubles étant les hydroxydes de fer et les hydroxydes d'aluminium. Les silicates (argiles, quartz) se dissolvent plus vite qu'on ne le pense en général, surtout dans les régions chaudes et humides : au cours de la transformation d'une roche en sol, il y a toujours perte importante de silice. Au total le matériau sol, qui naît de ces phénomènes de dissolution et d'entraînement vers les nappes phréatiques et les rivières des éléments dissous, est beaucoup plus poreux et beaucoup moins dense que la roche d'origine : on passe d'une densité voisine de 2,65 (roche) à une densité de l'ordre de 1,5 (sol) ;
- > *la genèse de minéraux nouveaux* : les minéraux appauvris par l'hydrolyse se transforment. Une partie des éléments dissous par l'hydrolyse se recombine et cristallise au lieu d'être entraînée vers les nappes et les rivières. Le tout donne naissance à des minéraux nouveaux dits minéraux secondaires<sup>43</sup>. Les principaux minéraux secondaires des sols sont des argiles<sup>44</sup>, des oxydes et hydroxydes de fer ou d'aluminium, de la calcite, du gypse, la taille de ces minéraux étant toujours très fine<sup>45</sup>.

40 Couleurs, agrégats, porosités, traits, solidités.

41 Superpositions.

42 Séquences.

43 Par opposition aux minéraux des roches dits primaires.

44 Illites, vermiculites, montmorillonites, kaolinites, ...

45 Inférieure à 5 µ, très souvent inférieure à 2 µ.



L'orientation et la vitesse des dynamiques d'altération sont fonction des conditions hydriques, des conditions de température à l'intérieur des sols, des activités biologiques animales et végétales sur et dans les sols, des matières organiques se formant dans les sols. Les altérations varient donc beaucoup selon les situations climatiques et topographiques, selon les roches, selon les activités humaines. Ainsi s'explique une partie de la diversité pédologique, aux échelles locales et continentales.

### Les principaux effets de l'altération

- elle ameublir les matériaux des roches, facilitant ainsi le développement de la vie ;
- elle affine et façonne les particules issues des roches : il y a ainsi genèse de galets, de graviers, de sables et surtout de particules limoneuses et argileuses qui vont constituer le complexe adsorbant du sol ;
- elle libère les constituants contenus dans les roches : cations et anions, hydroxydes, carbonates, sels, argiles ; une partie de ces constituants<sup>46</sup>, stockée par le complexe adsorbant, est réutilisée par les plantes au fur et à mesure de leurs besoins nutritifs.

## ● Les êtres vivants et les matières organiques

La vie est moteur de la formation des horizons pédologiques.

### ● Les êtres vivants, végétaux et animaux

Ils creusent des galeries<sup>47</sup>, donc fabriquent les porosités. Ils lient des particules entre elles, donc fabriquent des agrégats et des traits pédologiques. Ils dissolvent des minéraux et provoquent la formation de nouveaux minéraux : calcite, hydroxydes, argiles.

### ● Les matières organiques

Elles se décomposent plus ou moins vite au sein du sol sous l'effet de mécanismes chimiques et biologiques. Avant de disparaître, les matières organiques s'accumulent, principalement dans les couches superficielles. Elles peuvent cependant migrer profondément dans les sols : il en existe toujours un peu sur toute l'épaisseur du sol, jusqu'au contact avec la roche-mère.

L'expression *matière organique* désigne différents types de composés carbonés et azotés. On les distingue selon leur facilité à se minéraliser ou à former des complexes stables avec la fraction argileuse, selon leur caractère plus ou moins acide, etc. Dans toutes les couvertures pédologiques, les matières organiques jouent des fonctions importantes :

- > elles participent de l'altération des roches et des minéraux ;
- > elles facilitent ou retardent, selon les cas, la migration des constituants ;
- > elles facilitent l'agrégation des constituants et la porosité des assemblages ;
- > elles sont sources d'aliments pour les plantes, elles retiennent, puis redonnent aux plantes, l'eau et les éléments fertilisants.

<sup>46</sup> Calcium, magnésium, potassium, sodium, phosphore, fer.

<sup>47</sup> Racines, nématodes, vers de terre, fourmis, termites, taupes, renards.

## ● La libération, la migration et l'accumulation des constituants

Les produits de l'altération des roches et des activités biologiques sont l'objet, dès leur naissance, de phénomènes migratoires, au sein de la couverture pédologique, puis, pour certains d'entre eux, hors de la couverture pédologique :

- > mouvements de particules solides : par activités biologiques, par gravité au sein des porosités, par entraînements hydriques interne et externe (érosion), par mouvements de masse liés à des changements de volume<sup>48</sup> ;
- > mouvements sous forme soluble, faisant suite à l'hydrolyse et à la solubilisation ou à la complexation par des matières organiques.

La plupart de ces mouvements se font verticalement<sup>49</sup> ou latéralement<sup>50</sup>, sur des distances qui varient du micron à la centaine de mètres. Les migrations sont facilitées par :

- > la finesse des particules : les argiles migrent beaucoup plus facilement que les limons et les sables ;
- > la dispersabilité des particules : pour les particules argileuses, la présence, sur leur complexe adsorbant, d'ions monovalents ( $H^+$ ,  $Na^+$ ) facilite leur dispersion donc leur migration (cas des milieux acides ou très basiques) ; au contraire, la présence d'ions bivalents ( $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$  : cas des milieux neutres ou légèrement basiques) ou trivalents ( $Al^{+++}$  : cas des milieux très acides) gêne leur dispersion donc leur migration ;
- > la solubilité des constituants : les carbonates migrent plus facilement que les silicates, lesquels migrent plus facilement que les hydroxydes<sup>51</sup> ;
- > la taille et la morphologie des vides.

### Les principaux effets des migrations

Au total, les migrations ont pour effet de redistribuer, au sein des couvertures pédologiques, les constituants créés par l'altération. Il en résulte la genèse de volumes appauvris en un ou plusieurs constituants, ainsi que la genèse de volumes enrichis : enrichissement relatif, du fait du départ d'autres éléments, ou enrichissement absolu par accumulation d'un ou plusieurs constituants.

## ● Les étapes de la différenciation des horizons

Au cours de l'histoire de la formation et du développement d'une couverture pédologique, les horizons prennent naissance, les uns après les autres ou conjointement, selon un ordre chronologique qui n'est pas quelconque.

48 Conséquences de la présence d'argiles gonflantes.

49 Du haut vers le bas sous l'effet de la gravité ou des actions biologiques ou du bas vers le haut sous l'effet de la capillarité ou des actions biologiques.

50 Du haut vers le bas des versants, sous l'effet de la gravité, de la capillarité et des actions biologiques.

51 Sauf si ces derniers sont réduits par excès d'eau dans la porosité, ou complexés par des matières organiques.

## ● La première étape

Les mécanismes d'altération et les dynamiques biologiques et d'accumulation de matières organiques fonctionnent ensemble. Deux types d'horizons prennent progressivement naissance :

- > en surface, *des horizons organiques O<sup>52</sup>, et/ou des horizons organo-minéraux A à structure pédologique<sup>53</sup>* ;
- > en profondeur, *des horizons d'altération C, au sein desquels la structure lithologique de la roche-mère est encore en place<sup>54</sup>.*

*Au terme de cette première étape, l'évolution de la couverture pédologique est encore relativement peu marquée : on dira que la couverture pédologique formée est peu différenciée.*

## ● La deuxième étape

Les mécanismes d'altération s'accroissant, un nouvel horizon, ou groupe d'horizons, prend naissance entre les horizons A et C : il s'agit d'horizons d'altération au sein desquels l'isovolume et l'essentiel des structures lithologiques ont disparu ; les structures dominantes sont pédologiques. Ce sont *des horizons d'altération S à structures pédologiques*.

Au sein de ces horizons S, les mécanismes d'accumulation de constituants peuvent donner naissance à des volumes ou à des horizons illuviaux, concernant des minéraux se déplaçant relativement facilement.

Au cours de cette deuxième étape, les horizons O, A et C continuent à se former et à évoluer.

*Au terme de cette deuxième étape, l'évolution de la couverture pédologique est réelle, significative ; l'horizon S témoigne d'un fort développement de l'altération, ainsi que des structures proprement pédologiques, bien distinctes de celles de la roche-mère : on dira que le sol formé est moyennement différencié.*

Parmi les horizons S, l'horizon Sk des sols dits ferrallitiques occupe une place particulière. En effet, en milieu tropical humide, l'hydrolyse des minéraux et la lixiviation des éléments libérés par cette hydrolyse sont telles que les produits résiduels de l'altération sont du quartz<sup>55</sup>, des oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium<sup>56</sup>, des minéraux argileux pauvres en silice<sup>57</sup>.

Les horizons Sk sont souvent très épais (plusieurs mètres). Morphologiquement, ils se reconnaissent par leur microstructure grumeleuse qui témoigne, à la fois, de l'association fer-kaolinite et d'un pH très acide (d'où présence d'Al<sup>+++</sup> sur le complexe adsorbant).

Fréquemment on voit se différencier, au sein des horizons Sk, des horizons d'accumulation de fer et d'aluminium (nodules, carapaces, cuirasses) (Bo).

52 Accumulation superficielle de matières organiques = litères.

53 Altération + activité biologique + accumulation de matières organiques + départ de constituants + agrégation.

54 L'horizon C est isovolume par rapport à la roche dont il provient par altération.

55 Il s'agit d'une partie du quartz de la roche-mère, ayant résisté à la dissolution.

56 Peu solubles, ils résistent à l'altération.

57 Principalement de la kaolinite, seule argile qui puisse se néoformer après la lixiviation de toutes les bases et d'une grande partie de la silice qui étaient présentes dans les roches-mères ; pratiquement toute l'argile des horizons Sk est de la kaolinite néoformée.

### ● La troisième étape

Les mécanismes d'hydrolyse, de lixiviation, d'entraînement particulière, de genèse de minéraux secondaires, s'accroissent au sein des horizons *A*, *S* et *C*. Il en résulte la naissance et le développement de deux types d'horizons :

- > *des horizons éluviaux E* : ce sont des horizons appauvris en particules de taille  $< 2\mu$  et en minéraux argileux ; ces appauvrissements argileux sont toujours précédés d'appauvrissements en éléments plus solubles (chlorures, sulfates, carbonates) ; ils sont souvent accompagnés d'appauvrissements en hydroxydes (Fe, Al) ;
- > *des horizons illuviaux B* : ce sont des horizons enrichis en particules argileuses et en minéraux argileux ; mais il peut aussi s'agir, selon les cas, d'accumulations d'hydroxydes (Fe, Al), et/ou de matières organiques, et/ou de silice, et/ou de calcaire, et/ou de gypse, et/ou de sels solubles. Au sein de ces horizons illuviaux, l'accumulation d'un constituant peut avoir trois origines : accumulation absolue par migration de constituants à partir d'un autre horizon, accumulation absolue par altération des constituants, accumulation relative par départ des constituants plus solubles.

Au cours de cette troisième étape, les horizons *O*, *A*, *S* et *C* continuent à se former et à évoluer.

*Au terme de cette troisième étape, l'évolution de la couverture pédologique est très marquée : on dira que le sol formé est très différencié<sup>58</sup>.*

#### Les modifications de la différenciation de la couverture pédologique

À n'importe quel moment de l'évolution d'une couverture pédologique, trois groupes de mécanismes peuvent venir compliquer sa différenciation :

- l'excès d'eau, temporaire ou permanent, transforme n'importe quel horizon préexistant en horizon hydromorphe, qualifié de *g* s'il s'agit d'excès d'eau temporaire, de *G* quand l'excès d'eau est permanent ;
- l'intervention humaine, en particulier l'intervention agricole, modifie les horizons pré-existants, principalement les horizons superficiels, donnant naissance à des horizons anthropiques *Ap* ;
- l'érosion arrache ou enterre les horizons superficiels.

### ● Les types d'horizons et leurs superpositions

Nous présentons ici, depuis la surface jusqu'à la roche-mère, la morphologie des neuf grands types d'horizons que l'on pourra être amené à reconnaître sur le terrain. Les combinaisons évolutives, verticales et latérales, de ces neuf horizons sont à la base de toute la diversité existante.

<sup>58</sup> Une couverture pédologique très différenciée est plus évoluée qu'une couverture peu différenciée ; mais ceci ne signifie pas qu'elle est plus vieille. La vitesse d'évolution d'une couverture pédologique et la différenciation maximale qu'elle peut atteindre sont fonction de tous les facteurs : climat, végétation, pente, roche, homme. Humidité, chaleur, acidité et perméabilité des roches, facilitent une différenciation rapide ; aridité, faible porosité des roches, richesse en calcaire du milieu, pente forte, ralentissent la différenciation.

## ● La morphologie des types d'horizons

### ● Les horizons organiques : *O*

Les horizons organiques (ou litière), que l'on ne trouve en général que sous végétation arborée, résultent du dépôt à la surface du sol de matières végétales aériennes mortes : feuilles, brindilles, etc., auxquelles peuvent s'ajouter des débris d'origine animale. Ces apports sont plus ou moins rapidement transformés en matière organique, par diverses actions biologiques végétales et animales (bactéries, champignons, insectes), puis incorporées dans l'horizon *A* sous-jacent.

Les horizons *O* sont posés sur le sol ; on mesure leur épaisseur du bas de l'horizon vers le haut.

Sur les sols saturés en eau pendant de longues périodes annuelles, les horizons *O* peuvent devenir très épais : plusieurs dizaines de centimètres, voire plus, avec des compositions végétales originales, liées à l'excès d'eau ; des tourbes dénommées horizons *H*, prennent ainsi naissance.

### ● Les horizons organo-minéraux : *A*

Leurs principales caractéristiques sont les suivantes :

- > ce sont des horizons de surface (éventuellement sous un horizon *O*) ; ils sont éventuellement modifiés par l'action de l'homme (dans ce cas on les nomme *Ap* : voir plus loin) ; leur épaisseur est en général de l'ordre de quelques dizaines de centimètres ;
- > ils sont plus riches en matière organique que les horizons sous-jacents ; leur teneur en matière organique est très variable : de 1 à 20 %, selon les régions climatiques, les couverts végétaux, les roches, les situations topographiques, les influences anthropiques ;
- > ils sont de couleur plus sombre que les horizons sous-jacents ;
- > ils ont une structure fragmentaire arrondie, largement influencée par la matière organique et par l'activité biologique ; en surface, la structure peut être lamellaire sur quelques millimètres d'épaisseur ;
- > on note la présence abondante de pédotubules, dus à l'activité biologique ;
- > ils sont généralement appauvris en constituants minéraux : argiles, carbonates, hydroxydes ;
- > ils sont souvent enrichis en sels solubles et, sur le complexe adsorbant, en cations et en anions.

### ● Les horizons éluviaux : *E*

Les horizons éluviaux *E* sont des horizons nettement appauvris en particules de dimension argileuse ( $< 2 \mu$ ) et en minéraux argileux : cet appauvrissement est suffisant pour qu'il soit morphologiquement visible sur le terrain. Leurs principales caractéristiques sont les suivantes :

- > ils sont, en général, proches de la surface du sol, sous un horizon *A*. On peut aussi les trouver en profondeur, juste au-dessus, voire même à l'intérieur, de l'horizon *C*. Leur épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres ;

- > ils sont appauvris, non seulement en particules et en minéraux argileux, mais aussi en sels, en carbonates, en hydroxydes ; en général, l'appauvrissement en sels et en carbonates a précédé l'appauvrissement en éléments argileux, l'appauvrissement en hydroxydes étant le plus souvent conjoint à celui en éléments argileux. En conséquence des appauvrissements, ils connaissent une concentration corrélative en constituants migrant moins facilement : limons, sables, minéraux peu altérables ;
- > leur couleur est toujours plus claire que celle de l'horizon sous-jacent (qui est, le plus souvent, un horizon *B*) ;
- > la structure est soit continue (massive ou particulaire), soit fragmentaire peu développée et fragile ;
- > il y a présence éventuelle de revêtements sableux résiduels du départ des particules argileuses : l'argile étant partie, le sable résiduel se dépose sur les surfaces horizontales, en particulier sur les parties supérieures des graviers et cailloux, formant comme des coiffes.

Le complexe adsorbant des horizons *E* est, normalement, partiellement ou totalement désaturé en cations basiques ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) ; leur pH est donc acide.

### ● Les horizons anthropiques : *Ap*

Les horizons *Ap* sont des horizons superficiels dont la morphologie est partiellement le résultat du travail des agriculteurs : travail du sol, fertilisation, irrigation, successions culturales. Ils proviennent de la modification d'horizons *A*, *E*, parfois aussi *B* ou *S*. Ces modifications portent principalement sur les couleurs, les agrégations, les porosités, les traits pédologiques, les solidités des agrégats, mais aussi sur les constituants, organiques et minéraux, les propriétés et les comportements physico-chimiques et biologiques.

Souvent, la différenciation morphologique, conséquence de l'action de l'agriculteur, est telle que ce sont plusieurs horizons *Ap* qui prennent naissance : *Ap<sub>1</sub>*, *Ap<sub>2</sub>*, ... que l'on distingue facilement par les couleurs, agrégats, porosités.

À signaler enfin les sols complètement construits par les hommes ; c'est le cas, par exemple, des terrasses, des sols reconstitués après exploitation d'une carrière, etc.

### ● Les horizons illuviaux : *B*

Les horizons *B* sont des horizons enrichis en constituants, minéraux ou organiques, une partie ou la totalité de l'enrichissement étant la conséquence d'une migration verticale ou latérale de matière. On ne parle d'horizon *B* que si l'on a des preuves morphologiques qu'une partie de l'accumulation est le résultat d'une migration, la preuve la plus sûre étant la présence de traits pédologiques d'accumulation : revêtements, nodules, bandes.

Les horizons *B* sont en général situés dans la partie moyenne du sol. Leur couleur est fonction de l'élément accumulé ; il y a souvent des taches de couleur. L'agrégation y est généralement fragmentaire.

## Les principaux types d'horizons B

Ils sont les suivants : Bt = argile ; Bo = hydroxydes (Fe, Al, Mn) ; Bh = matière organique ; Bp = produits amorphes (matières organiques + Al + Fe) ; Bsi = silice ; Bca = calcaire ; Bcs = gypse ; Bsa = sels solubles.

### ● Les horizons d'altération à structures pédologiques : S

Il s'agit d'horizons :

- > à structure pédologique fragmentaire ;
- > appauvris, par rapport à la roche-mère, en constituants solubles : sels, carbonates... ;
- > enrichis, par rapport à la roche-mère, en constituants issus de l'altération : sables, limons, argiles, hydroxydes ;
- > sans traits pédologiques d'accumulation ;
- > éventuellement très riches en argiles d'altération<sup>59</sup>.

Ils sont en contact direct soit avec la roche-mère, soit plus souvent avec un horizon d'altération C.

Les horizons Sk des sols ferrallitiques sont fortement appauvris en silice, avec néoformation de kaolinite ; ils peuvent être très épais.

### ● Les horizons d'altération à structures lithologiques : C

L'horizon C se situe à la base du sol, en continuité avec la roche-mère qui lui donne naissance. L'altération, par rapport à la roche-mère, se reconnaît principalement par une porosité plus forte, donc par une densité plus faible, et par les transformations minéralogiques. Cependant, ces transformations ne modifient pas l'essentiel de la structure lithologique qui reste bien visible et dominante.

À l'intérieur des horizons C, il peut y avoir présence :

- > soit de traits pédologiques d'accumulation : d'argile, d'hydroxydes, de matière organique, de silice, de calcaire, de gypse, de sels solubles ; on parle alors de Ct, Co, Ch, Csi, Cca, Ccs, Csa ;
- > soit de traits pédologiques d'éluviation de particules argileuses : cela peut aller jusqu'à la formation d'un horizon E au sein de l'horizon C.

### ● Les horizons hydromorphes : G et g

On distingue deux types principaux d'horizons hydromorphes :

- > ceux dont la morphologie résulte d'un excès d'eau presque permanent : on les appelle des *gley* et on les dénomme G ; leur couleur est dominée par le gris, le vert, le bleu ;
- > ceux dont la morphologie résulte d'un excès d'eau temporaire : on parle de *pseudogley* et on attribue la lettre g à l'horizon concerné.

<sup>59</sup> Horizons vertiques, par exemple.

L'hydromorphie est un processus secondaire qui peut se surimposer sur n'importe quelle morphologie pédologique pré-existante. Si cette hydromorphie est forte et permanente, elle efface la morphologie pré-existante : d'où l'horizon *G* ; si elle n'est pas dominante, la morphologie est simplement marquée par des traits d'hydromorphie tout en conservant tout ou partie des traits pré-existants : on parle alors de *Ag*, *Eg*, *Btg*, *Sg*, *Cg*, etc.

### ● Les roches-mères : *R* et *M*

Du point de vue du pédologue, les roches se décrivent en fonction de leur pénétrabilité par les racines avant altération et en fonction de leurs produits d'altération. On distingue ainsi les roches en terme de :

- > *dureté* : il y a les roches dures *R* (granites, grès, calcaires...) et les roches meubles *M* (sables, loess, marnes...) ;
- > *fissuration* : elle facilite la pénétration des systèmes radiculaires ; le long des fissures, on peut trouver, profondément, des figures d'altération de la roche et des figures d'accumulation.
- > *altérabilité* : facilité et vitesse d'altération ;
- > *texture des matériaux résultant de l'altération* : il y a, par exemple, des roches qui s'altèrent en donnant des matériaux plutôt sableux et filtrants (les grès par exemple) et des roches qui s'altèrent en donnant des matériaux plutôt argileux et peu perméables (certaines roches éruptives, par exemple) ;
- > *acidité, alcalinité, teneur en carbonates des matériaux résultant de l'altération* : cela dépend, à la fois, de la composition minéralogique de la roche et des conditions de son altération.

Il est évident que le produit d'altération d'une roche dépend non seulement de la roche elle-même mais aussi des conditions bio-climatiques, passées et actuelles.

### ● Les superpositions d'horizons

#### Cinq types de superpositions des horizons

Les sols peu différenciés : la succession des horizons est de type : *A - R* ou *A - C - R*

Les sols moyennement différenciés : la succession des horizons est de type : *A - S - R* ou *A - S - C - R*

Les sols moyennement différenciés ferrallitiques : la succession des horizons est de type : *A - Sk - C - R* ou *A - Sk - Bo - C - R*

*Sk* étant un horizon d'altération à structure pédologique au sein duquel le minéral argileux pratiquement unique est la kaolinite. *Sk* peut atteindre plusieurs mètres d'épaisseur.

Les sols très différenciés lessivés : la succession des horizons est de type : *A - E - Bt - C - R* ou *A - E - Bt - S - C - R* ou *A - E - Bt - Sk - C - R* ou *A - E - Bt - Sk - Bo - C - R*

Les horizons *Bt* ou/et *C* peuvent être absents.

Les sols très différenciés podzoliques : la succession des horizons est de type : *A - E - Bh - Bp - C - R*

Entre *Bp* et *C* on peut trouver un *E*, et/ou un *Bt*, et/ou un *S*, et/ou un *Sk*, et/ou un *Bo*.

Dans tous les cas : *R* peut être *M*.



La superposition peut être compliquée par la présence :

- > d'un horizon *O* en surface ;
- > d'un horizon *E* en profondeur, juste au-dessus ou au sein de l'horizon *C* ;
- > d'accumulations d'argile au sein de l'horizon *C* (*Ct*) ;
- > d'accumulations de calcaire, et/ou de gypse, et/ou de sels, dans les horizons *C*, *S*, *Bt* (voire dans les horizons *A* pour les sels solubles) ;
- > de phénomènes d'hydromorphie (*G* ou *g*) ;
- > d'un ou plusieurs horizons *Ap*.

Au cours de l'histoire d'une couverture pédologique, l'ordre et la vitesse d'apparition des superpositions d'horizons sont variables selon les conditions de climat et de roche. On peut dire, succinctement, que l'ordre logique de succession historique des superpositions d'horizons est le suivant : peu différencié, puis moyennement différencié, puis très différencié lessivé, puis très différencié podzolique.

La vitesse de l'évolution des sols, donc la vitesse à laquelle les horizons apparaissent et s'épaississent, est d'autant plus grande que le climat est plus humide et plus chaud, que les roches et leurs altérations sont plus perméables et plus acides, que les pentes, et donc les érosions, sont moins fortes. Par ailleurs, les climats tropicaux humides favorisent, sur toutes les roches, le développement d'horizons *Sk* au détriment des horizons *S*. Il en résulte les grandes distributions pédogéographiques suivantes :

- > *les régions arides et semi-arides*, de climat tropical ou méditerranéen, privilégient les sols peu et moyennement différenciés, et ceci d'autant plus que les roches sont plus calcaires et moins perméables et que les reliefs sont plus accentués (ce qui est fréquent dans les régions méditerranéennes) ;
- > *les régions tropicales humides* privilégient les sols moyennement différenciés ferrallitiques, sols qui peuvent atteindre de très grandes épaisseurs (plusieurs dizaines de mètres). Au sommet des horizons *Sk*, la suite de l'évolution est le développement de la différenciation lessivée et/ou de la différenciation podzolique ;
- > *dans les régions tempérées et continentales froides*, la vitesse de passage vers les sols très différenciés (lessivés puis/ou podzoliques) dépend des roches : elle est rapide sur les roches acides et/ou perméables ; elle est ralentie, voire impossible, sur les roches calcaires et calcaires.

Du point de vue de la fertilité, actuelle et potentielle, des sols :

- > les sols moyennement différenciés, surtout quand ils se développent à partir de roches basiques ou calcaires, sont les meilleurs, tant sur le plan des structures que du point de vue chimique : ces sols expriment le maximum de la potentialité de la rencontre d'une roche et de la vie. Avant<sup>60</sup>, l'altération peut rester insuffisante pour libérer toutes les potentialités de la roche ; après, c'est le lessivage ou la podzolisation qui s'installent : la fertilité chute brutalement. Bien entendu, la fertilité d'un sol moyennement différencié dépend beaucoup de la roche : on n'aura jamais sur un grès acide un sol aussi riche que sur un basalte basique ;
- > les sols très différenciés podzoliques, qu'ils soient des régions tempérées et froides ou des régions tropicales humides, sont de loin les sols les plus pauvres du monde ;

60 Au stade sol peu différencié.

- > les sols moyennement différenciés ferrallitiques, tant qu'ils ne sont pas atteints à leur sommet par le lessivage et/ou la podzolisation, sont des sols potentiellement fertiles : ils sont très bien structurés ; la présence de la kaolinite comme unique argile réduit de beaucoup la capacité d'échange, mais une politique organique et minérale bien calculée donne, on le sait, d'excellents résultats tant que la structure en agrégats et la porosité sont respectées ;
- > la fertilité des sols très différenciés lessivés est moyenne à mauvaise. Selon l'importance de l'horizon E<sup>61</sup>, cette fertilité peut être plus ou moins facilement améliorée.

### Les potentialités des diverses régions du monde

Les régions arides et semi-arides, tropicales et méditerranéennes, ainsi que les régions continentales froides, où dominent les sols moyennement différenciés, possèdent les plus grandes richesses en sols. Le problème majeur y est souvent celui de l'eau. Mais avec de l'eau, tout est possible.

Les régions tempérées froides sont doublement gênées d'une part par le fort développement des sols très différenciés lessivés et podzoliques, d'autre part par le froid. La fertilité de l'ensemble est faible.

Les régions tempérées, où se côtoient des sols très différenciés lessivés et des sols moyennement différenciés, sont de fertilité moyenne.

Enfin, les régions tropicales humides et sub-humides, domaine des sols moyennement différenciés ferrallitiques, sont de fertilité potentielle variable en fonction du développement ou non des phénomènes de lessivage et de podzolisation. Par ailleurs, dans les zones les moins humides de ces régions, les sols moyennement différenciés calciques peuvent être fréquents : la fertilité y est alors très bonne.

## ● Les systèmes pédologiques

Un système pédologique est une portion de couverture pédologique qui, par ses structures et par ses dynamiques, constitue une unité. C'est un volume de sol au sein duquel des horizons sont organisés entre eux, verticalement et latéralement, à l'échelle de l'unité de relief élémentaire : le versant, le plateau, le petit bassin versant, la colline, etc., échelle qui est celle de la plupart des systèmes pédologiques. Les structures qui constituent ces systèmes se modifient principalement en fonction de quatre facteurs : la roche ; le relief ; l'âge des surfaces ; l'occupation, passée et actuelle, du sol : forêt, steppe, faune, agriculture, urbanisation.

En ne faisant varier, à la fois, qu'un seul de ces quatre facteurs<sup>62</sup>, on peut distinguer, à l'échelle de l'unité de relief élémentaire, quatre types principaux de distributions latérales des structures pédologiques<sup>63</sup> :

- > *les lithoséquences* : les variations latérales des structures sont liées à des variations des roches ;
- > *les toposéquences* : les variations latérales des structures sont liées à la topographie : forme des pentes, position sur la pente ;

61 Épaisseur, degré d'appauvrissement en argile, brutalité de sa transition avec l'horizon Bt ou S sous-jacent.

62 Les trois autres étant supposés rester constants.

63 Organisations élémentaires, assemblages, horizons.

- > *les chronoséquences* : les variations latérales des structures sont liées à l'âge des surfaces topographiques ou à l'âge des roches<sup>64</sup>, donc à l'âge du début de l'évolution pédologique observable aujourd'hui ;
- > *les bioséquences* : les variations latérales des structures sont liées aux activités humaines. En effet, dans les milieux non anthropisés, l'activité biologique ne joue jamais seule : elle n'est pas un facteur principal, explicatif, des variations latérales des structures de la couverture pédologique ; elle joue en même temps que les roches, le relief, le temps, en relation de dépendance avec ces trois facteurs. En revanche, quand l'homme intervient en supprimant une forêt pour la remplacer par une prairie, en remplaçant une forêt naturelle par une forêt d'eucalyptus, en intensifiant les systèmes de production agricole, en apportant des quantités importantes de matière organique, etc., il crée des variations latérales nouvelles, directement en conséquence des variations biologiques qu'il provoque.

---

64 Cas particulier des roches de formation récente : alluvions, dunes, coulées volcaniques.