

CHAPITRE IV :
PROPRIETES PHYSIQUES
DU SOL

CHAPITRE IV : PROPRIETES PHYSIQUES DU SOL

Ière PARTIE : LA TEXTURE

I. DEFINITION :

La texture est définie par les proportions relatives (%) de particules argileuses, limoneuses et sableuses qui constituent la terre fine de l'horizon.

Les classes de dimensions les plus couramment utilisées pour classer granulométriquement ces particules sont les suivantes :

CLASSE GRANULOMETRIQUE	DIMENSIONS (en μm)
Argile	< 2
Limon fin	2-20
Limon grossier	20-50
Sable fin	50-200
Sable grossier	200-2000

Argile, limon et sable constituent la **terre fine**, par opposition aux **éléments grossiers** qui comportent les fractions suivantes :

DENOMINATION	DIMENSIONS (en cm)
Graviers	0,2 à 2 cm
Cailloux	2 à 7,5 cm
Pierres	7,5 à 20 cm
Blocs	plus de 20 cm

II. CLASSES TEXTURALES :

La texture peut s'apprécier sur le terrain ou être déduite d'une analyse granulométrique (laboratoire).

La détermination de la texture permet d'attribuer au matériau observé le nom d'une **classe texturale** (exemple : limon fin, argile sableuse,...). Ces classes texturales sont définies et représentées sur des « triangles de texture ».

A ce titre, il faut savoir qu'en France, deux diagrammes sont couramment utilisés. Celui de Jamagne et al (1967) a été mis sur pied dans le cadre de la cartographie des sols de l'Aisne (figure 1 ci dessous).

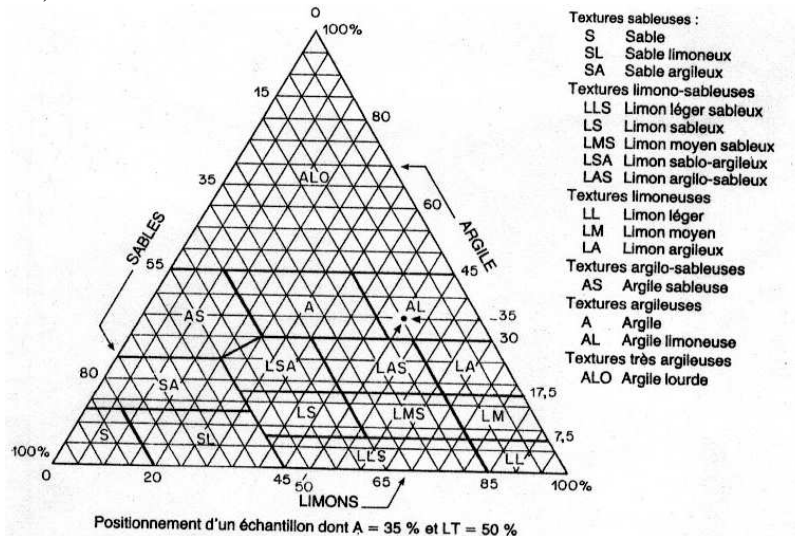


Figure 1 : Service de la Carte des sols de l'Aisne : triangle des textures.

Celui du GEPPA (Groupe d'étude des problèmes de pédologie appliquée) a été publié en 1963 et comporte 17 classes : c'est ce triangle (figure 2) qu'il est souhaitable de prendre comme référence.

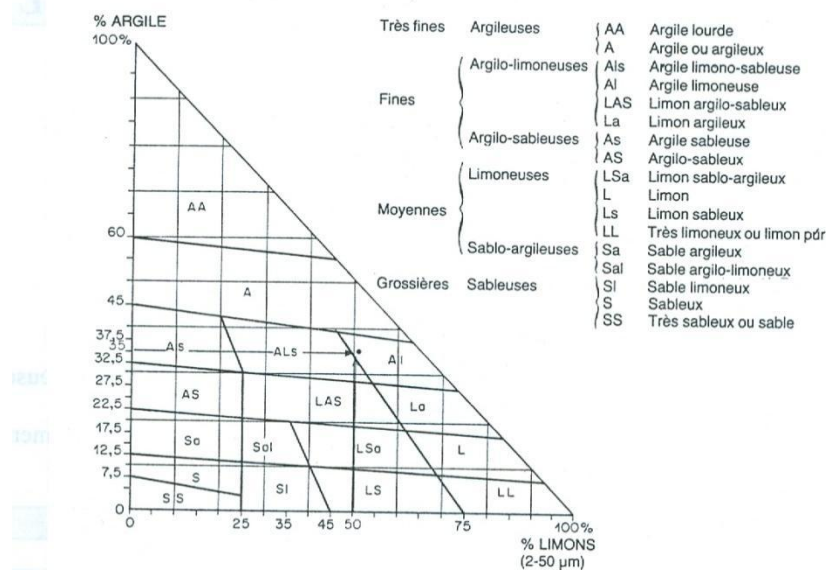


Figure 2 : diagramme des textures du GEPPA (1963) : triangle des textures.

III. APPRECIATION DE LA TEXTURE :

1. Sur le terrain :

L'appréciation tactile de la texture sur le terrain peut se faire en malaxant entre le pouce, l'index et le majeur quelques cm³ de terre fine (il faut écarter au préalable tous les éléments grossiers de l'échantillon prélevé) empruntée à l'horizon à tester, en sachant que :

- Les argiles peuvent se pétrir en pâtons qui ne s'effritent pas dans la main. Le pâton colle un peu aux doigts, devient même très collant s'il est gorgé d'eau ; il est possible alors d'en faire un boudin assez fin (quelques mm de diamètre). A l'état sec, l'argile forme des blocs très durs et fortement cohérents, ne tachant pas les doigts, qu'il devient très difficile d'humecter au-delà de 40 % d'argile.
- Les sables grattent sous les doigts à partir de 0,1 mm. Si les sables sont dominants, il se peut que l'on n'arrive pas à confectionner une boulette ou un boudin. Les sables fins inférieurs à 0,1 mm ne grattent pas mais restent perceptibles par crissement à l'oreille (un limon humide sans sable ne crisse pas).
- Les sols riches en limons donnent, entre les doigts, des sensations d'onctuosité, le pâton est facilement malléable, s'écrasant par une pression faible. Les boudins se cassent vite à un fort diamètre. A l'état sec, le limon est poussiéreux, dessèche et tache les doigts ; des petits agrégats éclatent et se pulvérisent sous la pression des doigts.

Afin de déterminer le % d'argile, on peut effectuer le « **test du boudin** » : il s'agit d'essayer de rouler l'échantillon de terre fine prélevé en un boudin de 5 à 10 mm de diamètre.

Boudin impossible à fabriquer	moins de 10-12 % d'argile
Roulé sur la paume de la main, le boudin se fragmente	moins de 18 % d'argile
Le boudin ne se fragmente pas mais ne peut être enroulé en anneau	entre 18 et 25 % d'argile
L'anneau peut être réalisé et ne se brise pas	plus de 25-30 % d'argile

Afin de réaliser ce test, il faut veiller à avoir une humidité suffisante mais non excessive pour permettre le pétrissage : si trop sec, rajouter de l'eau ; si l'horizon est gorgé d'eau, le malaxage entre les doigts provoque un rapide et relatif assèchement.

L'appréciation tactile de la texture est une opération subjective et les impressions ressenties sont dépendantes de facteurs tels que : l'état d'humidité, la teneur en matière organique,...

Ainsi, des différences notables peuvent apparaître entre la dénomination texturale donnée sur le terrain et le résultat de l'analyse granulométrique. Voici quelques cas où il y a nette divergence :

- un matériau riche en matières organiques humifiées donne une impression limoneuse ;
- certaines textures limono-sableuses (à sable très fin) sont ressenties différemment selon l'état d'humidité (plutôt comme sableuses à sec, plutôt comme limoneuses quand très humides).

La forme et l'aspect de la **carotte remontée à la tarière** permettent également d'apprécier la texture :

- argile : pointe de la carotte lisse et brillante, carotte compactée et très moulée, le matériel colle à la tarière ;
- limon : pointe mate, le matériel tient bien dans la tarière si matériel riche en limon ;
- sable : pointe grenue, le matériel tient mal dans la tarière même à l'état humide.

2. En laboratoire :

La texture est déterminée suite à une analyse granulométrique d'un échantillon de terre fine.

Il est à noter que différents traitements préalables (chimiques et/ou aux ultrasons) sont appliqués à l'échantillon de manière à obtenir une bonne dispersion des particules. Ces traitements servent donc à désagréger complètement les agrégats, ce qui implique de détruire les « ponts » qui constituent le « complexe argilo-humique » : un premier traitement assure la destruction de la matière organique par l'eau oxygénée, un deuxième traitement utilisant un sel dispersant sera ensuite effectué.

IV INTERET DE L'APPRECIATION DE LA TEXTURE :

La connaissance de la texture permet d'indiquer les tendances du sol quant à ses qualités physiques.

C'est ainsi que la texture a une influence primordiale sur le régime hydrique des sols :

- sur la réserve utile maximale de chaque horizon, c'est-à-dire la quantité d'eau maximale dont la végétation peut disposer. Il est bien connu par exemple que les sols sableux ont de faibles réserves en eau.
- sur la circulation de l'eau dans le sol : un sol riche en sable est perméable et filtrant, un horizon argileux peut former un obstacle à l'infiltration verticale de l'eau,...

En outre, la texture joue un rôle dans l'aération du sol et sa porosité (figure 3) : une texture sableuse est le signe d'un sol bien aéré tandis qu'une texture trop argileuse sera le signe d'un milieu imperméable et mal aéré, formant alors un obstacle à la pénétration des racines.

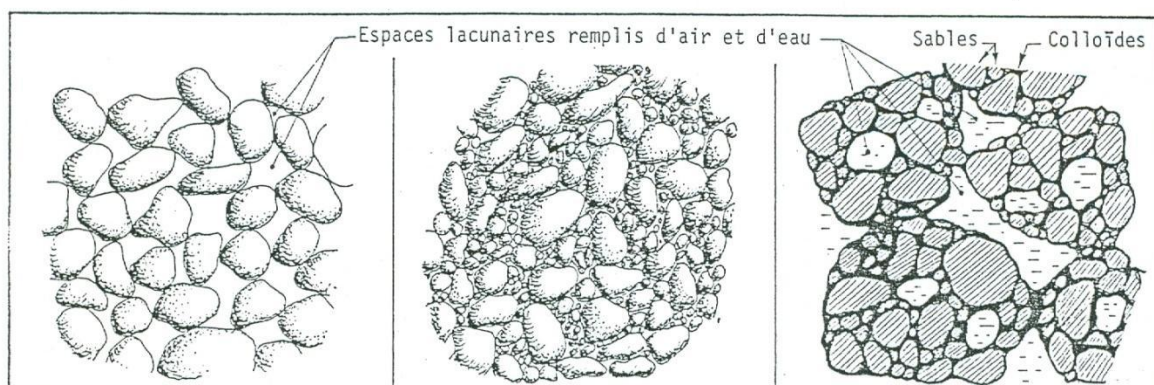


Figure 3 : Texture et aération du sol

La texture joue également un rôle majeur vis-à-vis :

- de la richesse du sol : un sol sableux est pauvre en éléments nutritifs et possède une faible C.E.C.(capacité d'échange cationique : voir chapitre 5). L'argile permet d'augmenter cette C.E.C.
- de la stabilité structurale, de la résistance à l'érosion.

Les sols riches en limons sont sensibles à la battance (tendance du sol à se tasser en surface sous l'effet de la pluie et à former une croûte imperméable à l'air et à l'eau). La battance se développe surtout dans les horizons de surface renfermant moins de 3 % de matière organique. La battance est le signe de risque d'érosion et d'une structure fragile, sensible au tassement. Le calcul de l'indice de battance (I.B.) permet de mieux apprécier les risques :

$$I.B. = \frac{(1,5 \times \% \text{ Limon fin}) + (0,75 \times \% \text{ Limon grossier})}{(\% \text{ Argile}) + (10 \times \% \text{ Matière organique})}$$

INDICE DE BATTANCE	APPRECIATION
>2,0	Sol très battant
2,0>IB>1,8	Sol battant
1,8>IB>1,6	Sol assez battant
1,6>IB>1,4	Sol peu battant
IB<1,4	Sol non battant

Lorsque les risques sont importants, il convient d'éviter le passage d'engins lourds sur ces sols, surtout en période humide. La tendance à la battance peut être corrigée par une teneur suffisante en humus et en calcium, éléments favorables à la stabilisation des agrégats.

V. LA CHARGE EN ELEMENTS GROSSIERS :

La présence d'éléments grossiers en quantité plus ou moins abondante peut induire des effets négatifs ou positifs :

- gêne pour les semis et les plantations ;
- diminution du volume prospectable par les racines et donc de la réserve en eau (dans le cas particulier de la craie, l'abondance des éléments grossiers augmente, au contraire, la réserve en eau) ;
- une forte pierrosité n'intervient pas en tant que telle comme un obstacle à l'enracinement des arbres (nombre de belles forêts sont installées sur des sols fort caillouteux). Par contre, la forme (aplatie ou arrondie,...) et la disposition (horizontale,...) des éléments grossiers influent de façon primordiale sur la capacité d'enracinement ;
- rupture des remontées capillaires (bancs de graviers en situations alluviales,...) ;
- obstacle ou gêne pour le travail du sol.

La charge en éléments grossiers ou pierrosité est souvent exprimée **en % du poids** de l'échantillon :

$$\% \text{E.G.} = \frac{\text{Poids du refus sur passoire de } 2\text{mm de } \varnothing}{\text{Poids de la terre brute séché à l'air}} \times 100$$

Il est toutefois souvent intéressant de passer à une **expression en volume**, pour estimer la réserve en eau des sols caillouteux, par exemple (voir 3ème partie du chapitre).

Pour la cartographie des sols de l'Aisne, Jamagne a fait évaluer la charge en volume des 40 premiers centimètres des sols, exprimée selon l'échelle suivante :

NIVEAU DE L'ECHELLE	SIGNIFICATION
0	charge légère ou absente
1	charge faible
2	charge moyenne
3	charge importante
4	mécanisation rendue très difficile pour les machines agricoles courantes

2ème PARTIE : LA STRUCTURE

I. GENERALITES :

La structure d'un horizon se définit comme le mode d'arrangement des différentes particules solides (sables, limons, argiles, matières organiques) du sol et la conséquence de cet assemblage (formation d'agrégats).

Un agrégat est un agglomérat de particules dont la cohésion interne est assurée par les argiles, le fer, les matières organiques et l'eau. Un agrégat est le résultat de **l'organisation naturelle** des constituants solides du sol.

Les agrégats qui correspondent au niveau de structuration le plus apparent (figure 4) peuvent être assemblés en ensemble plus grands constituant ainsi **une sur-structure**. Inversement, les mêmes agrégats se subdivisent souvent en agrégats plus petits délimités par des micro-fissures et qui ne se dégagent pas spontanément mais sous l'action des doigts ou d'un instrument (couteau) : il s'agit alors d'une **sous-structure**.

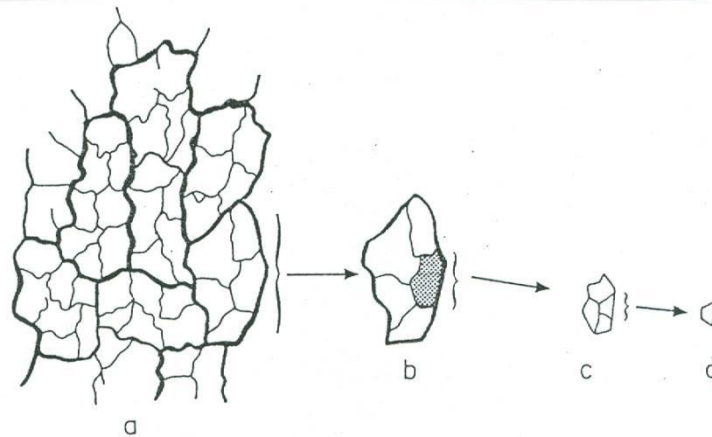
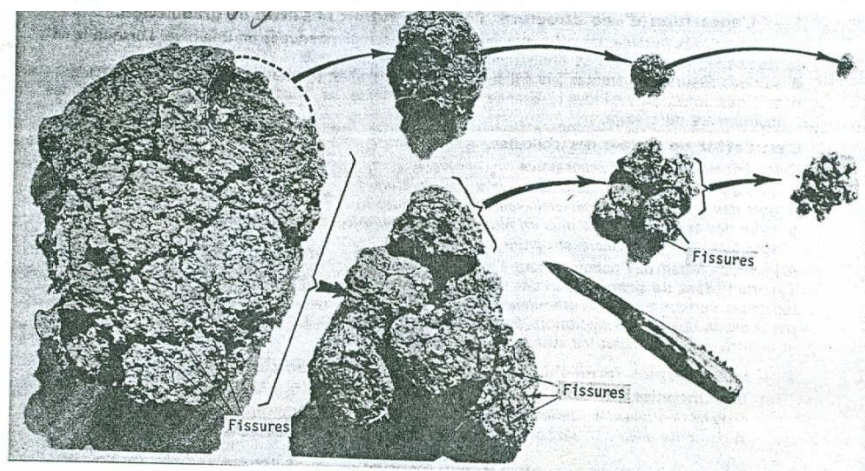


Figure 4 Structure, sur-structure et sous-structure (d'après Gaucher [90]).
(a) aspect général (c) élément de la structure
(b) élément de la sur-structure (d) élément de la sous-structure



■ 33 – Les divers niveaux emboîtés de structuration en agrégats d'une motte (extrait de Soltner, 1982).

La structure est donc en quelque sorte l'architecture intime de l'horizon, un état particulier qui lui confère une certaine porosité, d'où une certaine **capacité** et une certaine **conductivité** pour l'eau et pour l'air.

C'est de la structure que dépend la **compacité** de l'horizon et donc la facilité avec laquelle il sera pénétré par les racines.

La structure est plus ou moins solide et stable. Une bonne **stabilité structurale** permet au sol de résister à toutes les agressions physiques, à l'érosion, à la compaction.

Bref, grâce à sa structure, le sol est un substrat poreux favorable aux échanges avec l'atmosphère, indispensable à la vie.

II. ORIGINE ET GENESE DE LA STRUCTURE :

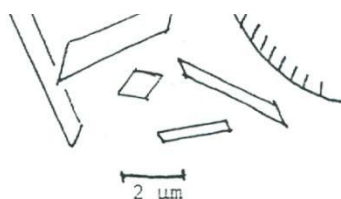
1. Mécanismes à l'origine de la formation des agrégats :

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

- la **floculation des colloïdes électronégatifs** (argiles et composés humiques) : elle se fait en présence de cations floculants (Ca^{++} , Al^{+++} , $Al(OH)_n$, Mg^{++}).
- la **cimentation des constituants** (particules floculées et éléments squelettiques) , due à la présence de matière organique, de minéraux argileux, de fer, de calcaire, de silice. L'activité biologique (faune et flore du sol) joue également un rôle important de cimentation des constituants entre eux et dans la formation de complexes organo-minéraux.
- la **fissuration** : la formation de fentes de retrait lors de l'alternance des périodes sèches et humides, isole les unités structurales qui vont former des faces à arêtes vives (structure anguleuse). La fissuration est d'autant plus développée que le sol est plus argileux (et pauvre en humus) et que les argiles du sol sont du type gonflant. La dimension des unités est en rapport avec la teneur en argile : si elle est élevée, il se forme des prismes de grande dimension, isolés par des fentes de retrait.

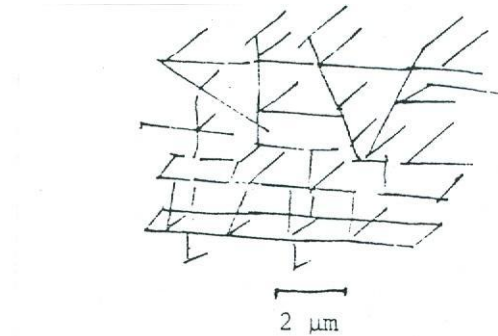
2. Genèse de la structure :

Prenons l'exemple d'un sol agricole à la sortie de l'hiver. L'horizon de surface, sans couverture végétale, a subi l'action dispersante de l'eau de pluie. Dans un tel horizon peptisé, les éléments squelettiques (sable et limon) sont noyés dans une masse de particules argileuses dispersées et en suspension dans l'eau du sol.

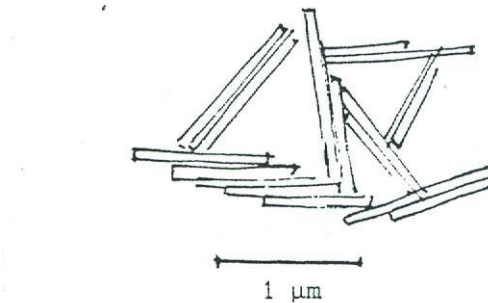


Voyons à présent comment la structure en agrégats peut se reformer :

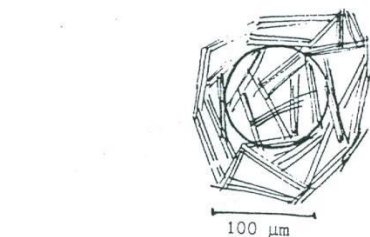
Par floculation, les cristaux argileux se soudent par les liens bords (charges +) - surfaces (charges -) formant un château de cartes laissant des micropores de 1 à 2 μm . Les éléments du squelette sont piégés dans ce réseau gorgé d'eau qui se disperse aisément mais momentanément par agitation.



Une déshydratation de cette masse floculée provoque sa rupture et son tassement. Les micelles argileuses s'orientent et se lient fortement face à face par petits groupes adhérant par leurs extrémités, formant des **microagrégats primaires** de 5 à 50 μm , à forte cohésion et non dispersable dans l'eau distillée, à moins d'y appliquer des ultrasons. Les microagrégats primaires laissent entre eux des micropores de l'ordre du micron.

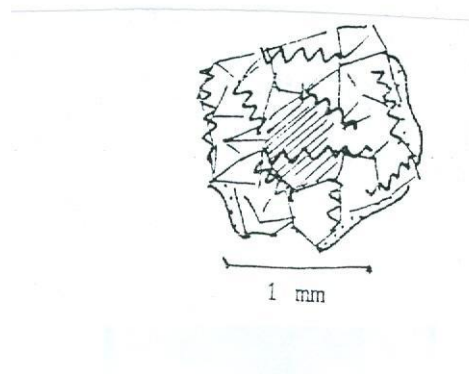


La juxtaposition de plusieurs agrégats primaires liés par un recouvrement argileux floculé continu constitue des **agrégats secondaires ou granules** dont la dimension est de l'ordre de 200 à 500 μm . Les granules sont parcourus par de nombreux micropores. Même sous eau, ils ne s'écrasent pas en éléments plus fins. Les granules contiennent des éléments squelettiques piégés.

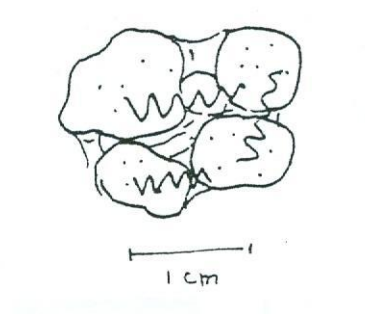


Les agrégats secondaires s'empilent et adhèrent les uns aux autres par des joints colloïdaux discontinus, souvent organiques pour former avec les éléments grossiers des **agrégats tertiaires ou grumeaux** de quelques mm de diamètre.

Les grumeaux se délitent par pression des doigts sous l'eau en granules. Ils représentent la limite extrême de l'effritement mécanique. Ce sont les éléments visibles de la structure du sol. Ils sont parcourus de macropores de l'ordre du mm et laissent entre eux des méats plus larges.



Les **macro-agrégats ou mottes** de plus de 1 cm se brisent à sec, par pression mécanique en grumeaux. Ils sont composés de grumeaux adhérant les uns aux autres par de la matière organique et s'empilent lâchement en laissant entre-eux des méats (porosité d'aération). Ce sont les mottes qui constituent les éléments essentiels de description et de classement de la structure des sols.



III : MORPHOLOGIE DE LA STRUCTURE :

Nous nous intéresserons ici uniquement à la **macrostructure**, c'est-à-dire l'agencement **visible** des mottes et des grumeaux. La **microstructure**, dont l'étude repose sur l'examen microscopique de lames minces ou de coupes microscopiques de fragments de sols stabilisés à l'aide d'une résine, ne sera pas développée dans ce cours.

Nous avons vu précédemment que les agrégats pouvaient s'associer entre-eux pour former plusieurs niveaux de structuration (sur-structure, structure, sous-structure). Pour chacun de ces niveaux d'organisation, on peut distinguer la **forme**, la **taille** et la **netteté** des agrégats.

1) Principaux types de macrostructures :

Il s'agit d'observer la forme générale des agrégats structurés. On s'intéressera donc ici à la macrostructure, structure appréciable à l'oeil nu, par opposition à la microstructure. Les principaux types sont schématisés ci-dessous (figure 5).

1. Absence de macrostructure : **structures NON FRAGMENTAIRES**
 - 1.1. Grains isolés : **structure particulière ou élémentaire** (ex : sable)
 - 1.2. Masses amorphes : **structures massives**
2. Présence de macrostructure : **structures FRAGMENTAIRES**
 - 2.1. Formes « plates » (dimensions horizontales dominantes) horizontales à obliques :
 - A. structure feuilletée horizontale : **structure lamellaire**
 - B. structure en plaquettes obliques : **structure en plaquettes obliques**
 - 2.2. Formes « prismatiques » (dimensions verticales dominantes) :
 - A. Arêtes nettes : **structure prismatique**
 - B. Arêtes émoussées : **structure en colonnes**
 - 2.3. Formes « cubiques » (pas de dimension nettement dominante) :
 - A. Faces planes et bombées en mélange :
 - a. Arêtes nettes : **structure polyédrique anguleuse**
 - b. Arêtes émoussées : **structure polyédrique subanguleuse**
 - B. Faces planes subégales : **structure cubique**
 - 2.4. Formes « sphériques » :
 - A. Agrégats petits (moins de 1 cm) très régulièrement arrondis, non poreux : **structure grenue**
 - B. Agrégats petits à moyens (moins de 2 cm), à contours très irréguliers, poreux : **structure grumeleuse**

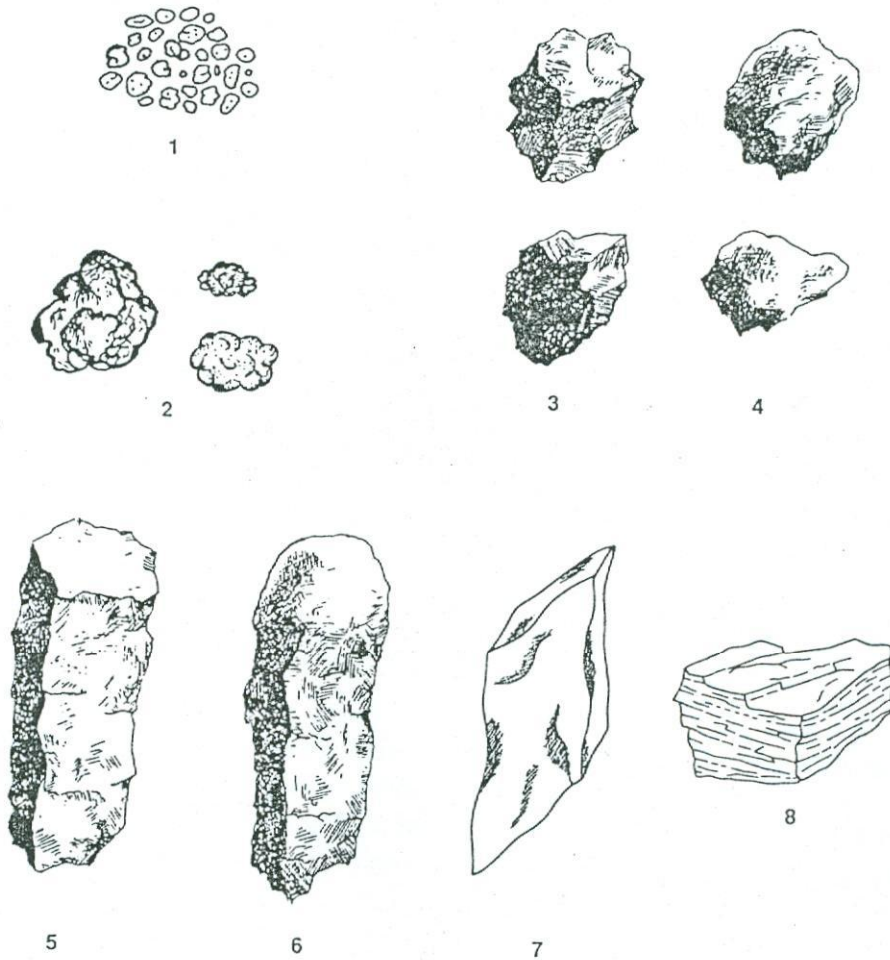


Figure 5 Forme des agrégats des principales structures pédiques (partiellement d'après le *Soil Survey Manual* [211]).

- | | |
|---|---|
| 1. structure grenue | 5. structure prismatique |
| 2. structure grumelleuse | 6. structure colonnaire |
| 3. structure polyédrique | 7. structure en plaquettes obliques
(ou rhomboédrique) |
| 4. structure polyédrique sub-anguleuse
(ou polyédrique émoussée) | 8. structure lamellaire |

2. Taille des agrégats :

Elle se caractérise généralement selon des classes, de « très fine » à « très grossière », dont les limites varient suivant les types de structure.

Tableau – Dimensions des agrégats et désignation conventionnelle de la taille de la structure (Glossaire [206]).
Les structures particulières et massives n'ont pas de dimensions.

I	Dimensions pour les structures (mm)		
	grenues grumeleuses et lamellaires ⁽¹⁾	cubiques et polyédriques	prismatiques et colonnaires ⁽²⁾
Très fine	< 1	< 5	< 10
Fine	1 à 2	5 à 10	10 à 20
Moyenne	2 à 5	10 à 20	20 à 50
Grossière	5 à 10	20 à 50	50 à 100
Très grossière	> 10	> 50	> 100

(1) épaisseur des lamelles; (2) largeur des prismes et des colonnes.

3. La netteté de la structure :

La netteté de la structure s'apprécie par la proportion d'agrégats structurés, plus ou moins facilement décelables dans la masse. Elle se caractérise en trois classes, de « peu nette » à « très nette » :

- Structure très nette : éléments structuraux bien formés, stables, aisément visibles in situ, adhérant peu les uns aux autres et se séparant facilement lorsque l'horizon est dérangé. Dans la main, un prélèvement se décompose presque uniquement en agrégats entiers avec quelques agrégats brisés et très peu ou pas de « poudre » (particules élémentaires ou fin débris d'agrégats).
- Structure nette : éléments structuraux bien formés, moyennement stables et apparents, moyennant un examen attentif in situ. Dans la main, un prélèvement se décompose en de nombreux agrégats entiers, peu d'agrégats brisés et peu de « poudre ».
- Structure peu nette : éléments structuraux mal formés, pratiquement invisibles in situ. Dans la main, un prélèvement se décompose en quelques agrégats entiers, mélangés à de plus nombreux agrégats brisés et à une masse importante de « poudre ».

Pour les horizons massifs ou particuliers, on emploie souvent les termes « d'absence de structure » ou « d'horizon non structuré ».

Pour finir, nous attirons l'attention sur les remarques suivantes :

Au sein d'un horizon, il peut y avoir association de plusieurs types d'agrégats, différents par leurs formes et par leurs dimensions (il y a association d'agrégats plus ou moins arrondis et de tailles très différentes).

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.

4. Le profil structural :

Si l'on regarde attentivement une fosse pédologique, on s'aperçoit de la présence d'une succession d'horizons structuraux.

Par exemple, sous une chênaie sur limon, on peut observer :

- un niveau supérieur qui subit au maximum les influences climatiques et les activités biologiques. Il s'y développe une biostructure grumeleuse fort poreuse.
- un niveau moyen supérieur où les activités biologiques sont encore intense mais qui subit une certaine pression des couches supérieures. La structure y est polyédrique subangulaire.
- un niveau moyen inférieur où les influences climatiques et biologiques s'atténuent et où une structure prismatique ou en colonne s'établit.
- un niveau inférieur, non soumis aux influences précédentes, ne possédant plus de macrostructure mais une microstructure excellente. C'est une structure amorphe.

Les structures grenues ou grumeleuses apparaissent en général à la surface ou à proximité de la surface du sol. Les agrégats n'ont pas à supporter le poids d'horizons sus-jacents : leur forme et leurs dimensions sont liées essentiellement à des actions biologiques et à des ciments organiques.

Les structures polyédriques, cubiques et prismatiques sont généralement observées dans les horizons de profondeur moyenne ou profonds.

IV. CARACTERISTIQUES DES PRINCIPAUX TYPES DE STRUCTURE ET CONSEQUENCES SUR LES PROPRIETES DES HORIZONS ET DU SOL :

La fertilité d'un sol est la résultante :

- des bonnes propriétés physiques de ce sol (aération, réserve en eau,..) ;
- de ses bonnes propriétés chimiques (bon fonctionnement des mécanismes de fixation et d'échange des substances nutritives entre le sol et la plante) ;
- de ses bonnes propriétés biologiques (vie microbienne intense participant activement à la nutrition des plantes,...).

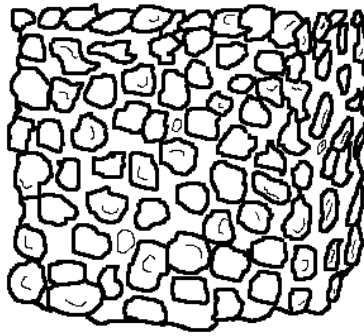
L'état structural du sol influe directement sur ces trois groupes de propriétés.

1) Les structures fragmentaires arrondies :

Elles se forment par floculation et/ ou cimentation, elles peuvent être grenues, grumeleuses ou polyédriques sub-anguleuses.

Leur formation est favorisée par la présence :

- de **matière organique** ;
- de **cations Ca⁺⁺ et Al⁺⁺⁺** sur le complexe adsorbant (voir chapitre V) ;
- de **l'activité biologique**, en particulier des vers de terre.



Elles constituent, pour les racines, un milieu accueillant :

- poreux ,
- friable,
- stable (les agrégats résistent à leur destruction par l'eau).

Les liquides et les gaz (air) y circulent facilement (bonne porosité) ; la vie animale et microbienne s'y développe bien.

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 matières organiques donc des potentialités alimentaires fortes (complexe adsorbant important, capable de retenir les éléments nutritifs).

D'un point de vue chimique, ce type de structure, est favorisé par un complexe adsorbant **saturé à près de 80 % par Ca^{++} et un milieu dont le PH est neutre à légèrement basique (7-8)**.

Les fertilités, physiques et chimiques, sont alors maximum.

Cependant, **on peut également observer une structure arrondie, fine en milieu acide à PH inférieur à 5,5**. C'est alors la matière organique acide, et surtout l' Al^{+++} , qui jouent les rôles structurants. La **fertilité physique reste bonne, mais la fertilité chimique est nettement moins bonne** : moins d'éléments nutritifs et parfois excès d'aluminium (Al^{+++}) qui est toxique à PH très bas.

Attention, 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 assez d' Al^{+++} et pas encore assez de Ca^{++} : le risque de déstructuration et de compaction est élevé.

2) 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 mm au décimètre et plus.



Leur formation 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 favorise la genèse de structures anguleuses très nettes.
- l'**absence d'activité biologique animale**, en particulier des vers de terre.
- de **faibles teneurs en matière organique**.

Les agrégats anguleux sont plus **compacts, moins friables, moins stables** (ils résistent moins bien à leur démolition par l'eau), que les agrégats arrondis : les structures anguleuses constituent donc pour les racines, un milieu beaucoup **moins accueillant** que les structures arrondies ; c'est-à-dire :

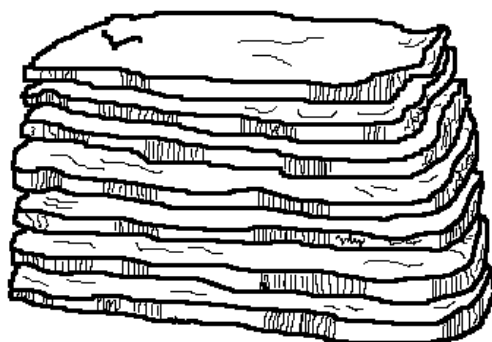
- les structures anguleuses **réduisent le volume de sol** explorable par les racines, et ceci d'autant plus que les agrégats sont plus grossiers, plus consistants, plus fermés par la présence de pellicules argileuses sur leurs faces (revêtements argileux) ;
- les liquides et les gaz circulent plus facilement entre les agrégats que dans les agrégats ; pendant la période humide, la **circulation des fluides est ralentie** par la fermeture des fissures ;
- la vie animale, végétale et microbienne, se développe plus facilement entre les agrégats que dans les agrégats ; ceci est particulièrement vrai pour les racines, qui peuvent avoir des

difficultés pour rentrer au sein de certains agrégats trop compacts et trop fermés par des pellicules extérieures.

Au total, les horizons à structure anguleuse constituent un milieu qui, du point de vue de leur pénétrabilité, est déséquilibré. La présence des structures anguleuses réduit l'accessibilité aux racines des richesses chimiques du sol.

3) Les structures fragmentaires feuilletées : cas des structures lamellaires

Les structures lamellaires, dont les lamelles sont d'épaisseur variable (du mm à quelques cm), sont d'origines variées.



Il peut s'agir :

- **d'un héritage de la structure de la roche** : beaucoup de roches tels que les **schistes**, ont une structure en feuillets (litée) ; dans la partie inférieure des sols développés à partir de ces roches, on peut retrouver cette structure, plus ou moins bien conservée.
- du résultat de certaines des fortes accumulations monominérales 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, résultat d'une fissuration horizontale des masses accumulées, mais aussi résultat, dans certains cas, de phénomènes d'accumulation en couches horizontales successives.
- 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 : soit par passage d'engins lourds (compactage en surface), soit par formation d'une **semelle de labour** par exemple.

Les structures lamellaires sont toujours un obstacle à la pénétration verticale de l'eau et au développement des systèmes racinaires. Elles facilitent les circulations latérales des eaux. Quand elles se forment à la surface (croûte de battance), cela signifie que le sol est fragile du point de vue structural (ses agrégats, arrondis ou anguleux, se démolissent facilement) ou que l'on a utilisé des engins trop lourds. La formation d'une croûte de battance facilite le ruissellement des eaux et augmente ainsi l'érosion des sols.

4) Les structures non fragmentaires particulières :

On parle de structure particulière quand les particules constitutives du sol n'ont aucune adhérence entre-elles : le meilleur exemple que l'on puisse donner est celui d'un sable dunaire.

La structure particulière n'existe que dans les horizons très sableux.

Les structures particulières sont défavorables par leur manque en colloïdes (argiles et humus) : les sols seront alors chimiquement pauvres.

Si les éléments sableux sont grossiers, le sol ne retient ni l'eau, ni les minéraux solubles : il est filtrant.

Si les éléments fins dominent, ils ont tendance à s'engrener les uns dans les autres, rendant le sol battant et imperméable.

Dans les deux cas, le sol est sensible à l'érosion.

5) Les structures non fragmentaires massives :

On parle de structure massive (ou compacte) 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.

Les structures massives sont nuisibles :

- par leur manque de perméabilité à l'air et à l'eau : le sol est asphyxiant, et défavorable à l'activité biologique des animaux, des microbes et des végétaux ;
- par leur grande résistance à la pénétration des racines ;

L'existence d'une nappe perchée d'origine pluviale est très liée à ce type de structure.

V. LA POROSITE :

Pour mesurer l'état structural d'un sol, la première idée qui vient à l'esprit est de classer les agrégats selon leurs dimensions et de calculer un pourcentage pondéral pour chaque classe comme on le fait lors d'une analyse granulométrique. Mais le tamisage est une action mécanique qui détruirait certains agrégats. Il est préférable alors de recourir à la mesure d'une propriété directement conséquence de l'état structural d'un sol : **la porosité**.

La **porosité d'un horizon**, qui est en étroite relation avec les notions de réserve en eau, de circulation de l'eau et de l'air ou encore d'enracinement, peut être définie **par l'ensemble des vides que comportent cet horizon**. En d'autres termes, 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.

1) Les divers types de vides :

Les vides se reconnaissent, se décrivent et se nomment, d'après leurs morphologies, leurs origines et leurs tailles.

A. Morphologie et origine des divers types de vides :

D'après leurs morphologies et leurs origines, on distingue trois types de porosités :

- les porosités d'altération ;
- les porosités texturales ;
- les porosités structurales.

a) Les porosités d'altération (figure 6) :

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, ni à l'oeil nu ni à la loupe, sauf celles qui affectent les surfaces des graviers et des sables. Toutefois, elles sont observables au microscope. Ces porosités représentent 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 de l'altération des roches.



Figure 6: *Vue, au microscope optique, d'un feldspath en cours d'altération : des canalicules très fins se développent au sein du minéral (1 cm = 0,2 mm).*

b) Les porosités texturales :

Les porosités texturales sont celles qui subsistent entre les particules une fois que celles-ci sont au 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 fonctions :

- 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 seulement au microscope électronique. Les vides d'un matériau sableux sont beaucoup plus grossiers, partiellement visibles à l'oeil nu.
- D'autre part, des pressions et contraintes qui s'exercent sur les matériaux. Parmi ces contraintes, deux sont importantes :
 1. le **déssèchement** : il provoque le rapprochement des particules, souvent d'une manière irréversible ; on parle de **tassement hydrique** ;
 2. **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 principalement à la quantité d'eau qui entoure chaque particule (la porosité diminue quand le matériau se déssèche).

c) 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 (formation d'agrégats) et déplacement de particules.

Les porosités structurales sont de trois types :

- **les porosités tubulaires et de cavités** : elles sont d'origine biologique, animale (tubules creusés par les vers de terres), ou végétale (canalicules creusés par les racinelles,...).
- **les porosités fissurales** : elles résultent des variations de volume des argiles : ces porosités sont celles qui délimitent les agrégats anguleux et les agrégats feuilletés.
- **les porosités d'entassement des agrégats arrondis** : ce sont les vides qui séparent les agrégats arrondis les uns des autres.

La figure 7 ci-dessous représente les différents types de porosité.

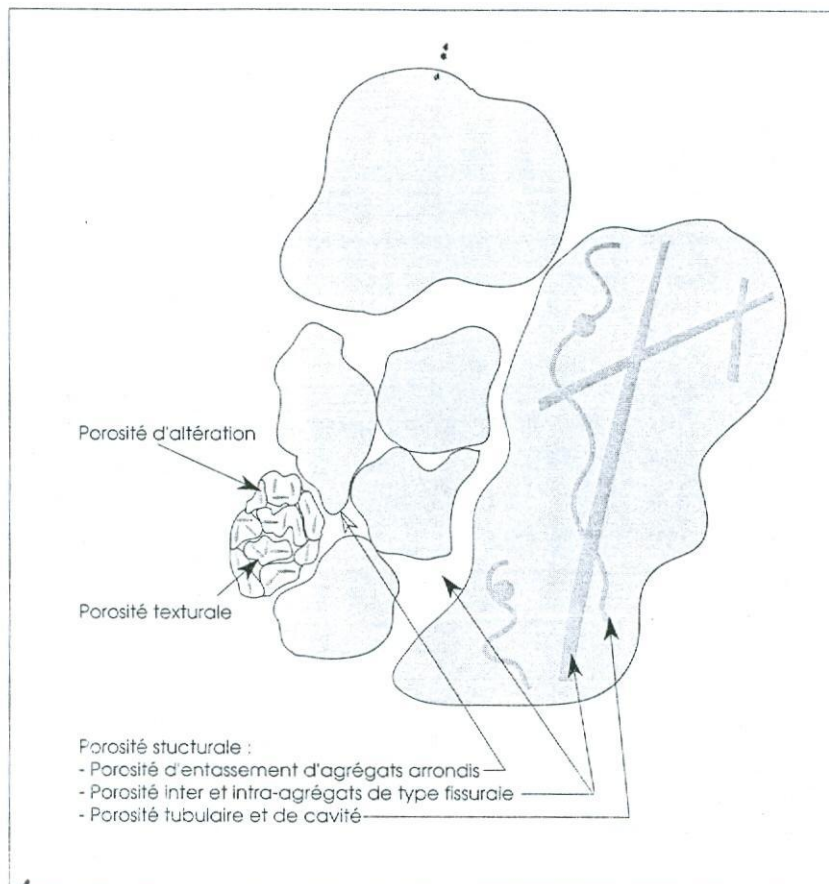


Figure 7 : - Origines des différents types de porosité.

B. Taille des vides :

D'après la taille des vides, on distingue deux types de porosités (figure 8) :

- **la macroporosité** : l'eau y peut circuler par gravité (le diamètre des vides dépasse généralement les 6 à 10 μm). C'est dans la macroporosité que **l'eau de gravité** circule après une pluie, mais, dans un sol sain, cette macroporosité doit, après un drainage rapide, rester disponible pour la circulation de l'air. La macroporosité est aussi appelée **porosité d'aération**, elle 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 ou **capacité pour l'eau**, peut avoir toutes les origines possibles (d'altération, texturale, structurale).

Figure 8 : - Propriétés liées aux dimensions de la porosité
(u apres Callot *et al.* [58] et Bruand, comm. pers.).

Dimension des vides	Visibilité	Dynamique de l'eau	Accessibilité
2 mm	œil nu	circulation de l'eau libre	vers de terre
0,2 mm (200 μm)			mésafaune
6 à 10 μm	macro- photographie		coiffes racinaires
			poils racinaires
0,2 μm	microscope	rétention d'eau disponible pour les végétaux	hyphes mycéliens
			bactéries
		rétention d'eau non disponible	

2) Observation et mesure de la porosité :

A. Sur le terrain :

La porosité s'observe à l'oeil nu et à la loupe. On peut alors distinguer trois catégories de vides selon leur origine et leur fonctionnement :

- **les vides inter-agrégats** : ce sont les fentes et les fissures qui séparent les agrégats. Ces vides sont liés au type de structure : il s'agit d'une porosité structurale.
- **les vides intra-agrégats** : ils sont situés à l'intérieur des agrégats. Ils sont généralement de petite dimension et ont pour origine des cavités et canalicules laissées par des radicelles (figure 9) par exemple ou des fissures entre micro-agrégats.

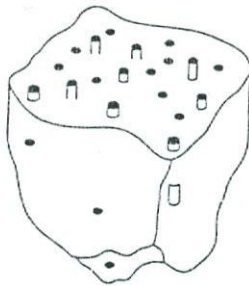


Figure 9 :

- Horizon argilo-limoneux situé en profondeur dans un solum tourbeux du Gâtinais. De nombreuses racines mortes et des tiges de roseaux ont créé une macro-porosité tubulaire verticale, encore parfaitement conservée.

Ce type de porosité comprend également les porosités texturales concernant l'entassement des sables et des graviers.

- **les vides trans-agrégats** : ces vides sont généralement assez gros (plus de 2 mm de diamètre). Ce sont par exemple des trous ou des galeries creusés par des animaux, des chenaux creusés par des racines plus ou moins grosses,...

Afin de quantifier la porosité d'un horizon, on peut se baser sur l'estimation de l'importance des vides de toutes tailles sur la surface du profil (voir fiche de description des sols lors des T.P.).

B. Au microscope électronique (ou optique) : tous les types de porosités y sont observables, quant à leurs localisations (au sein des minéraux, entre les minéraux, au sein des agrégats,...), quant à leurs morphologies et leurs relations entre eux.

C. Mesure Au laboratoire :

Pour mesurer la porosité totale, on prélève, sans la tasser, un volume connu de terre (figure 10), que l'on pèse après dessiccation à 105°C. On en déduit la densité apparente du sol sec : D' . La densité réelle D , des constituants solides étant à peu près constante, environ 2,6, la porosité totale, en % s'exprime par l'expression suivante :

$$\text{Porosité} = \frac{(D - D')}{D} \times 100$$

La mesure de la microporosité ou porosité capillaire est simple : c'est le poids d'eau retenue par un volume donné de sol lorsqu'il a atteint son point de ressuyage. On en déduit par différence la macroporosité.

Exemples :

Sable peu compact : 46 % de porosité totale (50 % en macroporosité).

Argile humide : 55 % de porosité totale (10 % en macroporosité)

Figure 10 :

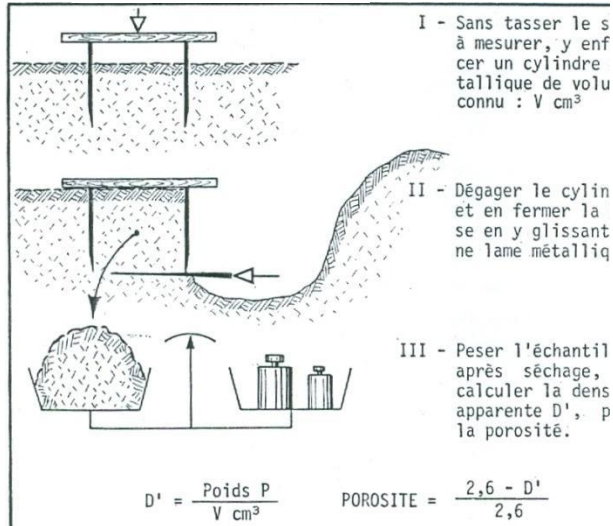


TABLEAU 2
RELATION ENTRE LA DENSITÉ APPARENTE D'UN SOL ET SA POROSITÉ EN %
(D'après DE LEENHEER - 1958 - pour les limons des polders belges)

Densité apparente	Porosité
1 à 1,2	55 à 62 %
1,2 à 1,4	46 à 54 %
1,4 à 1,6	40 à 46 %
1,6 à 1,8	moins de 40 %

TABLEAU 2
DENSITÉ RÉELLE DE DIVERS SOLS EN FONCTION DE LEURS CONSTITUANTS
(D'après DEMOLON)

Quartz et feldspaths alcalins	2,6 à 2,7
Mica	2,8 à 3,2
Craie blanche	2,25 à 2,35
Sables	2,6 à 3
Argile	2,52
Matière organique du sol	1,5 à 1,6
Sols de constitution moyenne	2,6
Sols calcaires	2,45
Sols humifères	1,8 à 2,45

3) Intérêt de l'observation de la porosité :

Comme nous l'avons déjà signalé précédemment, la porosité est une notion essentielle pour tout ce qui concerne la réserve en eau, la circulation des liquides et des gaz, et l'enracinement.

A. La circulation des liquides :

La porosité de la couverture pédologique (couverture des sols dans le paysage) influence :

- **les fonctionnements, quantitatifs et qualitatifs, des rivières et des nappes phréatiques** : les eaux de pluies, traversant plus ou moins facilement et rapidement¹, les divers horizons de la couverture pédologique ; la porosité des sols conditionne les importances relatives des circulations verticales et latérales ; c'est donc de la porosité des sols que dépendent la recharge des nappes phréatiques et le régime des crues des rivières ; c'est également de la porosité que dépendent la composition chimique de ces nappes et rivières, puisque c'est au cours de leur passage dans les sols, 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.

Aussi, dans la mesure où l'on veut faire jouer aux sols un **rôle de filtre** (épuration des eaux usées), la porosité doit être suffisante :

- d'abord pour permettre l'accès aux eaux de tous les sites d'échanges du matériau pédologique ; ces sites sont principalement ceux offerts par les argiles et par les matières organiques. C'est sur ces sites que sera retenue une partie des éléments minéraux et organiques contenus dans les eaux que l'on veut épurer.
- puis pour permettre aux racines de venir puiser leur alimentation sur ces sites d'échanges, le rôle de filtre ne revenant pas au sol uniquement, mais au sol qui retient puis à la plante qui élimine.

B. L'enracinement :

Pour une plante, la porosité d'un sol, donc sa fertilité physique, 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 l'eau soit retenue pour être mise à la disposition des racines au fur et à mesure des besoins ;
- qu'il n'y a pas, dans le volume de sol exploré par les racines, de variations brutales de porosités (entre deux horizons, entre les porosités inter et intra-agrégats) qui auraient pour effet de rompre la cohésion films d'eau (voir eau du sol : circulation par capillarité) ;
- qu'il n'y a pas, dans le temps, des variations trop importantes de porosité en fonction de l'humidité : les horizons argileux gonflant et les agrégations fragiles sont défavorables au développement des systèmes racinaires.

¹En ce qui concerne les sols agricoles limoneux profonds de l'Aisne, des études ont montré que les nitrates (engrais) mettent environ six ans pour traverser les sols et se retrouver dans les sources et captages. D'où la patience nécessaire afin de pouvoir bénéficier des effets positifs sur la qualité de l'eau captée, suite aux efforts consentis depuis peu par les agriculteurs pour réduire l'émission de nitrates.

Au total, une bonne porosité est celle qui 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, qu'elles soient d'altération, texturales, ou structurales. De surcroît, les **porosités y sont stables**, peu sensibles aux variations d'humidités ; les **flux peuvent donc y être continus**, dans l'espace et dans le temps : pour les racines, c'est **l'habitat de rêve**, sans obstacles.
- 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**.

Le tableau ci-dessous résume les principales propriétés des types de structure quant à la porosité et la pénétration racinaire.

PRINCIPALES STRUCTURES FRAGMENTAIRES				
	POLYEDRIQUE	de 5 mm à 2 cm	Porosité moyenne	Pénétration racinaire : variable
	GRENUE	de 5 mm à 2 cm	Porosité élevée	Pénétration racinaire : bonne
	GRUMELEUSE	de 0,5 mm à 2 cm	Porosité élevée	Pénétration racinaire : très bonne
	MICRO-GRUMELEUSE	inférieure à 0,5mm	Porosité très élevée	Pénétration racinaire : très bonne
	LAMELLAIRE	5 mm	Porosité faible	Pénétration racinaire : mauvaise, racines déviées
	PRISMATIQUE	de 1 cm à 50 cm	Porosité faible	Racines localisées sur la face des prismes

VI. LA STABILITE 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.

C'est ainsi que sur le terrain, on peut se rendre compte de la stabilité structurale des agrégats en en plaçant un dans un verre rempli d'eau distillée. On observe s'il reste stable ou s'il se détruit et, dans ce cas, la vitesse à laquelle la destruction, c'est-à-dire l'effondrement de l'agrégat, se fait.

En laboratoire, des tests (Hénin et Monnier, 1956) permettent de mesurer la stabilité des agrégats : La terre séchée à l'air est forcée à la main à travers un tamis de 2 mm à mailles carrées. On prélève ensuite trois échantillons de terre tamisée :

- un échantillon sera soumis à un pré-traitement à l'alcool ;
- un deuxième échantillon sera soumis à un pré-traitement au benzène ;
- le troisième échantillon ne subit pas de pré-traitement.

Les trois échantillons subissent pour finir un traitement consistant en un tamisage sous l'eau, sur un tamis de 0,2 mm. On détermine alors pour chaque échantillon :

- le % d'agrégats qui ont résisté ;
- la fraction inférieure à 0,2 mm qui reste en suspension.

On calcule alors un indice de stabilité I_s de la façon suivante :

$$I_s = \frac{(\% \text{ particules inférieures à } 20 \mu\text{m, maximum})}{\frac{A_{ga} + A_{gb} + A_{ge}}{3} - 0,9 \text{ SG}}$$

avec :

A_{ga} : taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool ;

A_{gb} : taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène ;

A_{ge} : taux d'agrégats stables sans prétraitement ;

Les particules de moins de 0,2 mm sont, exprimées en %, celles mesurées à l'issue du pré-traitement le plus dispersant (en général celui au benzène).

Afin de pouvoir comparer les indices obtenus pour différents sols ou horizons, on a convenu de déterminer des classes de stabilité (tableau ci-dessous) basées sur le logarithme décimal de $I_s \times 10$, soit $\log_{10} I_s$ qui s'échelonne, en général, de 1 à 3 (les valeurs de I_s pouvant quant à elles s'échelonner de 0,1 à plus de 100 !).

— Classes de stabilité structurale d'après log 10 Is

Stabilité	log 10 Is	Evolution structurale probable
Très stables	< 1	— Aucune manifestation de désagrégation. — Effet durable des sous solages et labours profonds réalisés en conditions sèches.
Stables	1,0-1,3	— Battance peu probable et peu intense. — Prise en masse hivernale rare. — Sensibilité à l'érosion faible, même sur pentes fortes.
Stabilité médiocre	1,3-1,7	— Battance fréquente et accentuée en conditions pluvieuses. — Prise en masse lors d'excédents hydriques prolongés. — Erosion en rigole sur pentes fortes (> 3 %).
Instables	1,7-2,0	— Battance et prise en masse fréquentes en conditions climatiques normales. — Erosion fréquente sur pentes moyennes.
Très instables	> 2	— Battance et prise en masse généralisées. — Imperméabilité totale en fin d'hiver. — Erosion sur pentes très faibles.

Importance de la stabilité structurale :

L'instabilité structurale est un danger :

- elle gêne l'activité biologique animale ;
- elle gêne l'enracinement des plantes et la bonne alimentation de celles-ci (minéraux et eau) ;
- elle gêne la circulation des fluides, en particulier la pénétration verticale de l'eau dans les sols d'où érosion (augmentation du ruissellement) ; d'où également alimentation en eau des nappes phréatiques et crues des rivières plus fortes ;

VI. LES FACTEURS DE LA STRUCTURE : RESUME

Les facteurs influençant la structure du sol et sa stabilité sont de natures diverses : pédologiques, climatiques, biologiques ou anthropiques (humains).

1. Les facteurs pédologiques :

Effets des ions sur le ciment colloïdal :

Na^+ : l'ion Na^+ a un effet dispersant sur les micelles d'argile (voir chapitre III). Cet ion peptise également la matière organique et a donc un effet néfaste sur la structure.

Ca^{++} : a un grand pouvoir flocculant sur les colloïdes minéraux et organiques. Il possède également un grand pouvoir agrégeant en établissant des liens entre colloïdes organiques et minéraux. Il favorise l'activité microbiologique et le développement racinaire.

Mg^{++} : cet ion a également un grand pouvoir flocculant et agrégeant.

Al^{+++} : cet ions participe de façon primordiale à la structure dans les sols acides (PH inférieur à 5,5).

H^+ : il n'est pas peptisant par lui-même, mais lorsque l'acidification s'accompagne de la formation d'humus acide et en particulier d'acide fulvique facilement peptisable (dispersable), il y a alors dégradation de la structure.

Les hydroxydes d'Al et de Fe jouent également un rôle important dans la formation de complexes argilo-humiques et donc au niveau de la structure (voir chapitre III).

Effets de la matière organique :

La matière organique est composée :

- des acides humiques et humines à noyaux polyphénoliques (chapitre III) formant des complexes à liaisons très «énergiques avec les colloïdes minéraux par l'intermédiaire des ions Ca^{++} , Fe^{+++} , et Al^{+++} .
- des résidus organiques tels que la lignine, la cellulose, les hémicellulose, les sucres et les polyuronides.

Ces derniers (polyuronides) sont de très actifs agents de structure par leurs nombreux groupements OH. Ils proviennent de déchets du métabolisme, de gommes et de mucilages bactériens, d'excrétas racinaires. Ces matières cimentantes forment des agrégats organo-minéraux de grandes dimensions : granules et grumeaux. Elles sont rapidement biodégradables et doivent être continuellement renouvelées par des apports de matière organique.

Un taux suffisant de matière organique et une bonne activité biologique du sol sont indispensables pour la bonne stabilité de la structure.

Effets de la texture :

Il n'y a pas de relation rigoureuse entre la teneur en argile granulométrique et la structure. L'établissement d'une bonne structure est néanmoins difficile en deça et au delà d'un certain pourcentage d'argile.

La battance est le phénomène de colmatage des pores de la surface d'un sol par destruction de la structure superficielle lors des fortes pluies, puis formation d'une croûte par dessiccation. La prédisposition d'un sol à la battance, nous l'avons déjà vu, provient d'une composition granulométrique riche en limons et sables fins, qui favorise un empilement des particules. Le glaçage du sol en surface est également favorisé par une trop faible teneur en matière organique et un émiettement trop poussé du sol.

2. Facteur climat :

Effets de l'alternance de sécheresse et d'humidité :

La dessiccation d'un sol s'accompagne de phénomènes de retrait amenant un fendillement de la masse et un renforcement des liens au sein des agrégats.

L'humidification provoque des gonflements accompagnés de compressions et de ruptures :

l'éclatement des agrégats tend à se produire lorsque l'eau les imbibes : sous l'effet d'une humectation rapide, l'eau comprime l'air dans les pores des agrégats, les faisant éclater. Ce mécanisme est d'autant plus efficace :

- que le ciment argilo-humique est moins flocculé, donc moins solide ;
- que l'humectation est plus brutale ;
- que le sol est plus mouillable : l'humus, par ses propriétés anti-mouillantes, ralentit donc cet effet dégradant de l'eau.

Effets du gel :

L'action du gel sur la structure varie selon l'humidité du sol et son état de division. En se cristallisant d'abord en surface, la glace fait remonter l'eau des couches profondes.

- En sol humide, la formation des cristaux de glace est importante et soulève d'autant plus le sol que celui-ci est meuble, pouvant déchausser les jeunes plantules.
- En sol bien drainé au contraire, cette formation de cristaux est réduite et provoque la formation de nombreuses petites fissures. Si le temps froid et sec persiste, la glace finit par s'évaporer (sublimation) et la terre se désagrège finement en surface.

C'est au dégel qu'apparaît l'action bénéfique ou nuisible sur la structure :

- si le dégel est pluvieux, et si le sol draine mal, l'eau accumulée en surface ressoude les agrégats que le gel avait divisés : c'est le dégel boueux que l'on observe sur les sols agricoles trop finement préparés avant l'hiver et mal drainés.
- si au contraire l'eau peut s'évacuer rapidement, un dégel, même par temps pluvieux ne pourra annuler les bons effets du gel .

En bref, le gel n'améliore la structure des sols compacts que si un bon drainage, et surtout une structure en grosses mottes, limite la remontée de l'eau lors du gel et assure son écoulement rapide au dégel.

L'impact des gouttes d'eau :

Les gouttes de pluie ont pour effet de détruire les agrégats à la surface du sol. Cette destruction des agrégats en surface peut être responsable de l'érosion des sols, celle-ci comporte alors plusieurs phases se succédant rapidement :

- l'impact de la goutte de pluie sur l'agrégat ;
- le bris de l'agrégat ;
- l'éclaboussement ou rejaillissement des particules (splash) ;
- le transport des débris par l'eau de ruissellement.

En forêt, le couvert végétal et la litière protège le sol de cet effet nuisible, qui en sols nus agricoles est source de formation de croûtes de battance.

3. Facteurs biologiques :

Effets microbiologiques :

L'apport de matière organique décomposable est suivi d'une amélioration rapide de la structure due à la formation de gommages bactériennes (sucres) ainsi qu'au développement d'hyphes d'actinomycètes qui agglomèrent les particules d'argiles, les grains de sable et les microagrégats. Cette activité biologique est encouragée par une certaine teneur du sol en azote et en calcium.

Effets des racines :

Les racines, principalement celles des graminées, ont une action agrégante par compression lors de la croissance des racines et par dessiccation locale par les poils racinaires. Elles stabilisent la structure des capillaires qu'elles tracent dans le sol par leurs propres exsudats et par les gommages des populations microbiennes qui se développent autour d'elles.

Effets de la faune :

Les vers de terre sont des agents actifs de la structure par le fouissement qu'ils opèrent, le mucus qu'ils excrètent et qui stabilise les galeries, et par le ciment limono-argileux enrichi en calcium qui se forme dans leur tube digestif, les agrégats coprogènes ; granules mêlés de débris végétaux et de colonies bactériennes enrobées de gommages. L'action agrégante des vers se manifeste jusqu'à 2 - 3 m de profondeur. Sous les tropiques, les fourmis, les termites, les larves de coléoptères ont aussi une action agrégante.

4. Facteurs humains :

Intervention mécanique :

L'homme agit sur la macrostructure du sol par des façons culturales. Les modes d'actions des instruments aratoires sont : la rupture, le cisaillement, le retournement, la compression, l'éclatement et l'émiettement.

Les types d'intervention sont les suivants :

- les labours : cisaillement, rupture et retournement.
Charrues à socs et à disques, cultivateurs à disques, cover-crop.
- les travaux superficiels : sans retournement mais rupture.
Cultivateurs à dents, scarificateurs, herse, bineuses.
- les travaux en profondeurs : cisaillement et rupture.
Sous-soleuses, chisels.
- les travaux brise-mottes : compression, éclatement.
Rouleaux, crosskill, herse mobiles.
- les travaux avec outils mobiles : rupture, retournement, éclatement, émiettement.
Fraises, rotavateurs, herse rotatives.

Ces différents travaux du sol seront vus dans le cadre du cours de reboisement. Signalons toutefois le risque de dégradation de la structure du sol dans les cas suivants :

- **tassement du sol en période humide** par passage d'engins lourds (surtout sur les sols hydromorphes et les sols sensibles à la battance).
- **effet des instruments à rotation trop rapide** : en sol sec, les agrégats pulvérisés finement par le travail excessif d'une fraise trop rapide, se reprendront en masse quand le sol deviendra humide.

Intervention chimique :

L'apport d'amendements calciques (chaux) a un très net effet améliorant sur la structure des sols.

Intervention biologique : principalement en agriculture.

L'apport régulier de fumier de ferme ou de compost accroît la stabilité des agrégats, l'activité biologique est le nombre de vers de terre, la porosité et le drainage. Les cultures couvrant bien le sol et laissant un large résidu racinaire, sont améliorantes pour la structure du sol.

VII. INTERET DE L'OBSERVATION DE LA STRUCTURE :

Pour conclure cette partie de chapitre consacrée à la structure, nous insistons sur l'importance considérable de la structure du sol et des horizons, pour la croissance des plantes et ce, par l'intermédiaire de quatre propriétés fortement liées entre-elles :

- le ressuyage naturel (drainage de l'eau de pluie dans le sol) ;
- la rétention (réserve) en eau du sol ;
- la porosité et l'aération du sol ;
- la distribution de l'enracinement.

3ème PARTIE : L'EAU DU SOL

I. GENERALITES :

La satisfaction des besoins en eau de la plante est certainement le facteur le plus important de la croissance végétale et de la productivité forestière. La fertilité d'un sol ne se manifeste que dans la mesure où il existe dans le sol une réserve d'eau suffisante pour compenser les pertes par évapotranspiration et ainsi assurer une bonne hydratation de la plante.

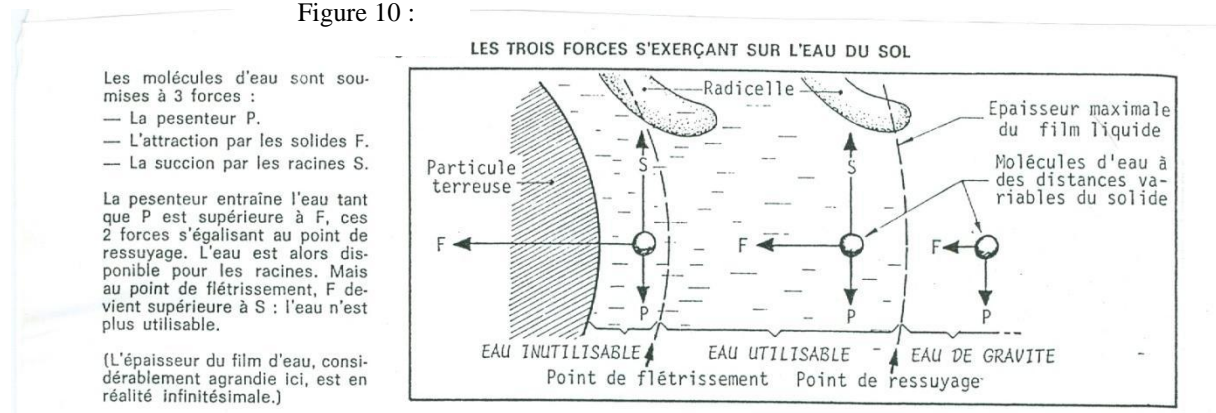
II. ETATS DE L'EAU DANS LE SOL :

L'eau dans le sol peut se trouver sous 3 états :

Si l'on sature d'eau un sol (la totalité de la porosité est occupée par l'eau) que l'on peut assimiler à une éponge par exemple, on peut observer que :

- **L'eau de gravité** ou de saturation s'écoule d'abord rapidement puis de plus en plus lentement, quittant les espaces vides les plus grands qui se remplissent d'air. Cette eau occupait la « macroporosité » du sol. Lorsque l'eau cesse de s'écouler, la terre, ressuyée, atteint son **taux d'humidité à la capacité au champ**, valeur qui traduit sa capacité de rétention de l'eau.
- **L'eau utilisable par la plante** est celle que retient ainsi le sol, soit à l'intérieur de fins capillaires soit sous forme de films assez épais autour des éléments solides. La plante s'en nourrit tandis que s'abaisse le taux d'humidité de la terre. Mais bientôt la plante semble souffrir de la sécheresse et se fane : le **point de flétrissement** est atteint². Pourtant une mesure de l'humidité montre que la terre contient encore de l'eau.
- **L'eau inutilisable par la plante** représente le troisième état. Formant autour des éléments solides des films très minces, cette eau est retenue par le sol avec tant d'énergie que la force de succion des racines, pourtant considérable ne peut l'en extraire.

Figure 10 :



²Il s'agit du « point de flétrissement permanent ». Le « point de flétrissement temporaire » s'observe lorsque la plante se flétrit dans la journée par suite d'une transpiration dépassant momentanément la vitesse d'absorption de l'eau par les racines.

III. FORCES AGISSANT SUR L'EAU DU SOL :

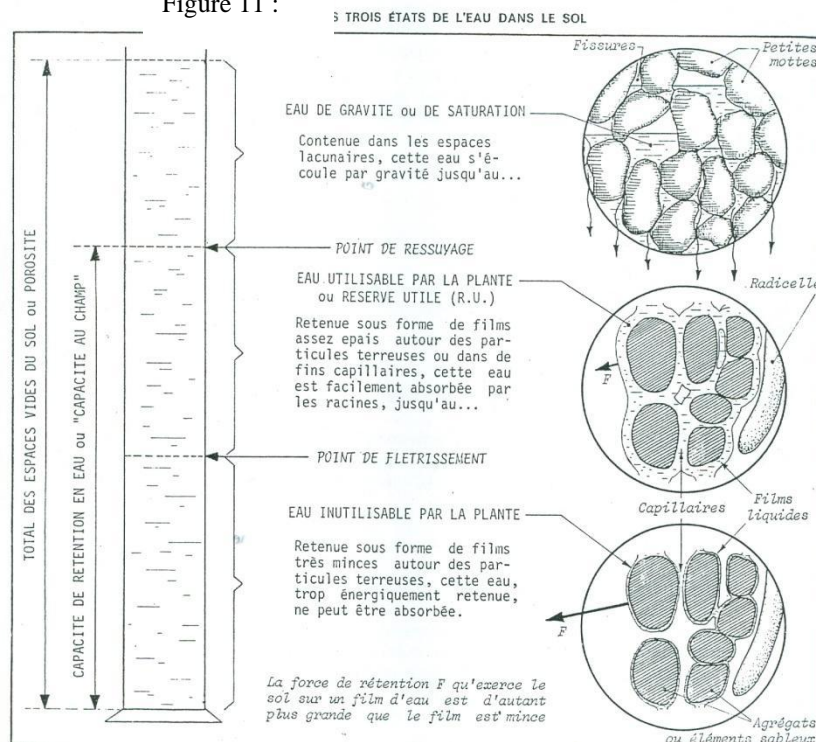
Trois forces agissent sur l'eau du sol : la **GRAVITE** - la **SUCCION DES RACINES** - la **SUCCION DE LA TERRE**.

Si l'eau du sol peut se trouver sous ces 3 états, c'est que s'exercent sur elle des forces d'intensité variable.

L'eau formant autour des éléments solides des films d'épaisseur variable, la force qu'exerce le solide sur une molécule d'eau est d'autant plus intense que cette molécule est plus proche de lui (figure 11).

- Au-delà d'une certaine distance, la force d'attraction est plus faible que la pesanteur : l'eau s'écoule par gravité ;
- Quand ces deux forces s'égalisent, le **point de ressuyage**, ou **humidité à la capacité au champ** est atteint. L'utilisation de l'eau par la plante est possible tant que la force de succion des racines est supérieure à celle qu'exerce le sol sur l'eau.
- Quand cette dernière force devient supérieure à la force de succion des racines, par suite de l'extrême amincissement des films, le **point de flétrissement** est atteint.

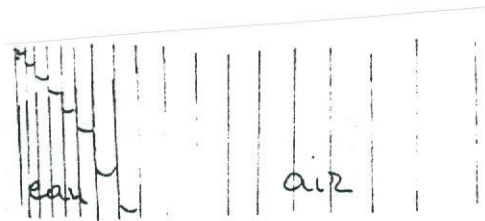
Figure 11 :



IV. LE POTENTIEL MATRICIEL (OU APPROXIMATIVEMENT LE POTENTIEL CAPILLAIRE) :

La simple teneur en eau du sol ne suffit pas pour caractériser la relation existant entre ce sol et sa teneur en eau. Il faut savoir avec quelle énergie cette quantité d'eau est retenue.

L'espace poreux du sol peut schématiquement se représenter par un ensemble de capillaires de diamètres décroissants comme un alignement de tuyaux d'orgues :



Dans un sol bien humecté, seuls les plus larges pores sont vides d'eau et contiennent de l'air. Sous l'effet de la gravité, les capillaires de plus en plus fins se vident et se remplissent d'air. Le processus se poursuit par évaporation lorsque la tension capillaire est supérieure à la gravité, et progressivement l'eau du sol en quantité de plus en plus faible, retenue avec une force croissante³, se confine dans des capillaires de plus en plus fins.

Le **POTENTIEL CAPILLAIRE** ou **P.F.** mesure la force avec laquelle l'eau est retenue par le sol.

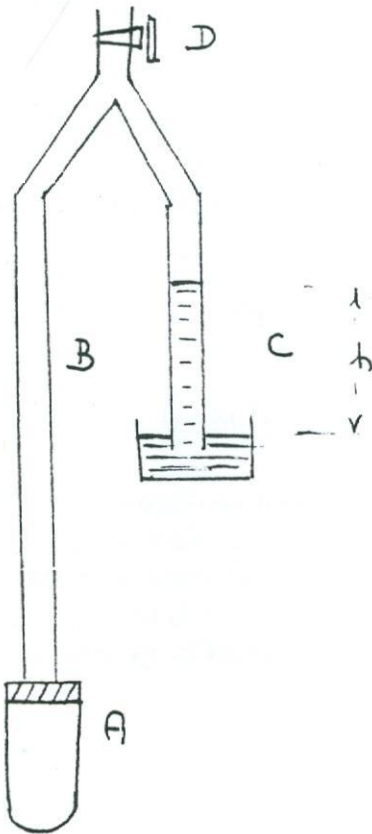
1. Mise en évidence et mesure du potentiel matriciel par le tensiomètre :

Le tensiomètre (figure 12), instrument très simple, met visuellement en évidence la force de succion du sol et permet de mesurer ce potentiel matriciel. Comme le montre la figure ci-contre, cet appareil se compose d'une bougie poreuse (A) en porcelaine reliée par un tube (B) à un manomètre (C) à mercure.

Un robinet (D) permet de maintenir le système rempli d'eau exempte de bulle d'air. La bougie est enfouie dans le sol dont on veut mesurer le potentiel matriciel. Un flux d'eau (eau libre) s'établit de la bougie vers le sol relativement sec, ce qui se traduit par une montée du mercure en C. Le flux cesse dès que la hauteur du mercure équilibre la succion du sol. Cette tension (pression) exprime le potentiel matriciel correspondant à la teneur instantanée en eau du sol.

³Loi de Jurin : l'eau est d'autant plus fortement retenue par le sol qu'elle s'y trouve dans des capillaires de fins diamètres.

Figure 12 :



Le potentiel matriciel s'exprime :

- en hauteur de mercure en mm, ou son équivalent en cm d'eau ;
- en bar ou en Pa.
- en atmosphère.

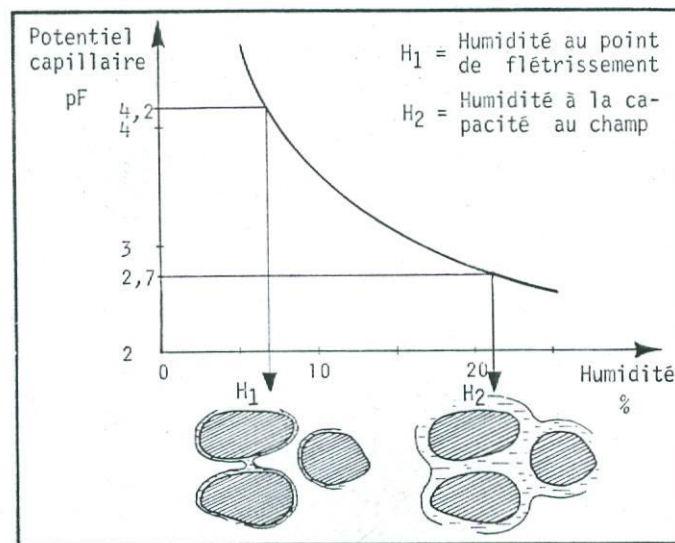
On l'exprime plus couramment par le logarithme décimal de cette pression, que l'on nomme P.F.

A noter que

$$1 \text{ atm} = 1033 \text{ mb} = 760 \text{ mm Hg} = 1033 \text{ cm d'eau} = \text{PF } 3,0$$

La mesure du potentiel matriciel peut être répétée pour différentes teneurs en eau du sol et les résultats peuvent être reportés sur un graphique P.F. / teneur en eau du sol : on obtient alors la courbe de rétention en eau du sol (figure 13).

Figure 13 :



**VARIATION DU POTENTIEL CAPILLAIRE (pF)
EN FONCTION DE L'HUMIDITÉ DU SOL**

Plus le sol est humide, moins le potentiel capillaire, ou force d'attraction de l'eau par le sol est élevé.
Plus le sol s'assèche, plus le potentiel capillaire s'élève.

2. Les points remarquables de la courbe de rétention en eau du sol :

La courbe de rétention d'eau du sol présente un certain nombre de points remarquables ayant une signification écologique particulière.

Un sol saturé d'eau se draine d'abord rapidement par gravité lorsque nul obstacle (couche imperméable) empêche l'écoulement en profondeur. Cet écoulement rapide se ralentit fortement dès que la macroporosité est dégagée, ce qui arrive généralement après deux ou trois jours de drainage. Le sol a alors atteint sa « **capacité de rétention au champ** » (field capacity).

Cette capacité au champ se situe environ à un P.F. voisin de 2. Ce pourcentage d'eau qui reste dans un sol en place après drainage n'est ni une valeur constante, car le sol continue à se drainer très lentement pendant longtemps (il reste encore des macropores remplis d'eau à PF 2), mais finalement d'une manière imperceptible, ni une valeur physique universelle (c-à-d à une valeur précise) car ne correspondant pas à une tension (PF) précise identique pour tous les sols.

Après ressuyage complet, on atteint alors un PF voisin de 2,5 - 2,7, correspondant à la « **capacité de rétention du sol (C.R.)**⁴ ». A ce moment, seuls les micropores sont saturés en eau, la plante peut encore s'alimenter facilement.

Cette C.R. varie selon la nature des sols. C'est pourquoi on détermine, au laboratoire, l'« **humidité équivalente** », qui est la teneur en eau du sol correspondante à un PF de 3. L'humidité équivalente permet d'estimer la valeur de la teneur en eau correspondante à la capacité de rétention (C.R.).

⁴Dans le langage courant, C.R. est souvent également appelé « capacité de rétention au champ ».

Le pourcentage d'eau à PF 4,2 correspond au point de fanaison permanent (permanent wilting point) et représente la limite de disponibilité de l'eau pour la plante, cela pour deux raisons :

- au-delà de ce point, la courbe des PF se redresse rapidement et l'énergie nécessaire pour extraire d'infimes quantités supplémentaires d'eau du sol dépasse la force de succion de la plante ;
- les mouvements de l'eau très lents dans les micro-capillaires (intra-agrégats) deviennent quasi nuls et ne compensent plus les prélèvements par la plante.

3. Réservoir total, réservoir utilisable, réserve en eau utilisable (figure 14):

Le réservoir total ou capacité de stockage pour l'eau (C.S.E) correspond au volume total d'eau que l'horizon ou le sol contient.

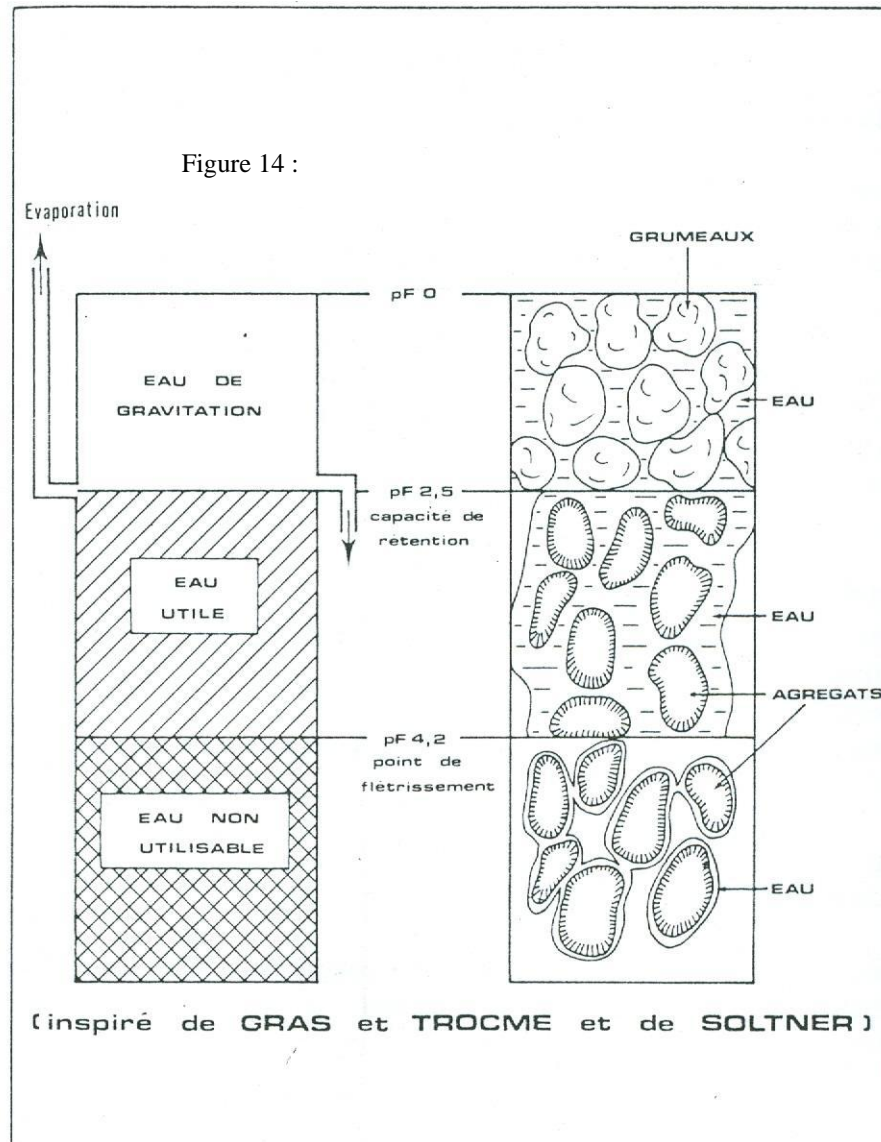
Cependant, pour la plante, une partie de ce réservoir total n'est pas utilisable car trop fortement retenue dans les micropores : c'est **le réservoir en eau non utilisable**. On admet donc l'existence d'un **réservoir utilisable** (anciennement appelé eau utile) de contenance inférieure à celle du réservoir total.

$$\text{C.S.E} = \text{réservoir en eau utilisable} + \text{réservoir en eau non utilisable}$$

D'autre part, au cours de l'année, ce réservoir utilisable sera plus ou moins rempli d'eau. Ainsi, on peut distinguer :

- le **réservoir (ou réserve) utilisable maximal (R.U.M.)** qui représente la part du réservoir total accessible aux plantes ;
- la **réserve en eau utilisable** qui est la quantité d'eau utilisable se trouvant effectivement dans le réservoir à un moment donné.

La R.U.M peut également être définie comme étant la différence entre les pourcentages d'eau volumétriques à la capacité de rétention et au point de fanaison.



4. Etude de l'influence de la texture sur les courbes de PF :

On peut remarquer sur la figure 15 ci-dessous, qu'un même PF correspond à une humidité variable suivant la texture du sol.

A ce titre, on retiendra que la texture limono-argileuse est la plus favorable quant à l'importance de la R.U.M.

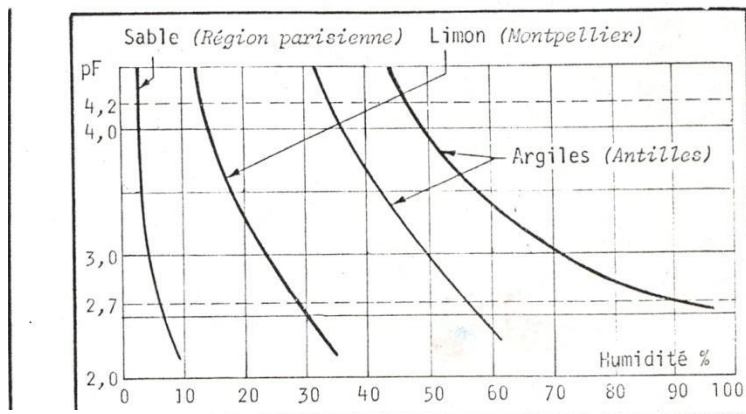


Figure 15 : COURBES DE VARIATION DU pF EN FONCTION DE L'HUMIDITÉ POUR DES SOLS DE TEXTURES DIFFÉRENTES (d'après M. HALLAIRE dans « Techniques Agricoles » - 1970).

Plus le taux d'éléments fins augmente, plus l'humidité s'élève pour un même pF, donc plus le sol retient l'eau avec force.

Les figures 16 et 17 ci-dessous illustrent également ces différences existantes entre des sols de textures différentes.

Figure 16 :

LA CAPACITÉ EN EAU D'UN SOL (en %) ET SON HUMIDITÉ AU POINT DE FLÉTRISSEMENT DÉPENDENT DE SA TENEUR EN ÉLÉMENTS FINS ET EN HUMUS.

Plus le pourcentage d'éléments fins d'un sol augmente,

- plus sa capacité de rétention en eau augmente,
- plus son point de flétrissement s'élève.

L'augmentation du taux d'humus d'un sol a l'avantage

- d'augmenter sa capacité de rétention en eau,
- mais sans élever son point de flétrissement.

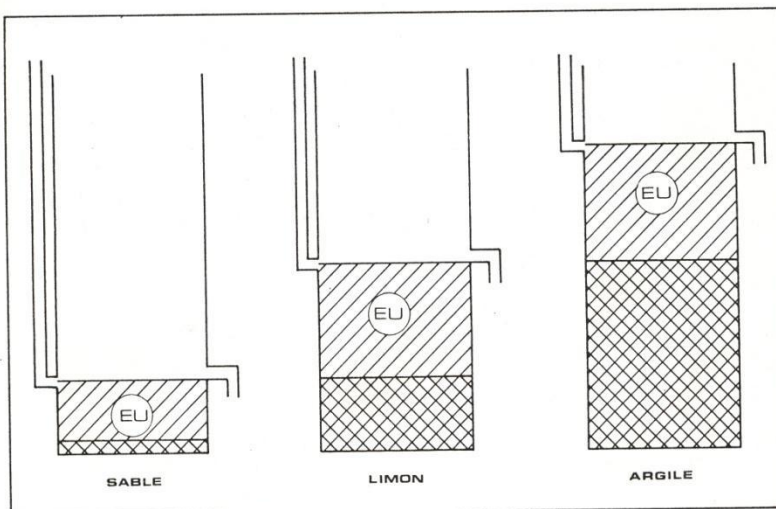
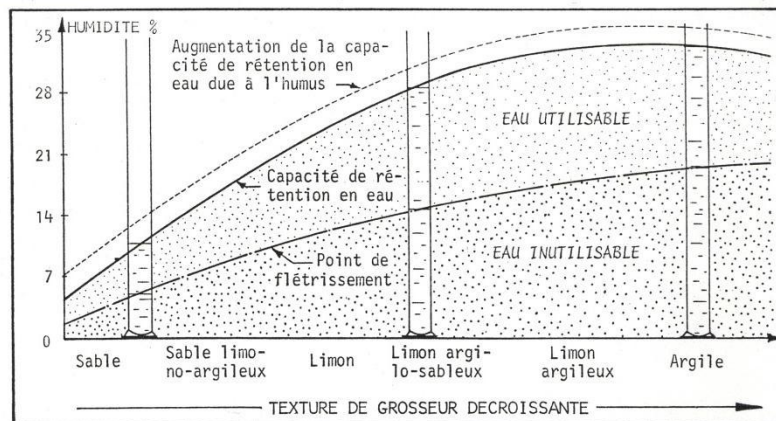


Figure 17 :

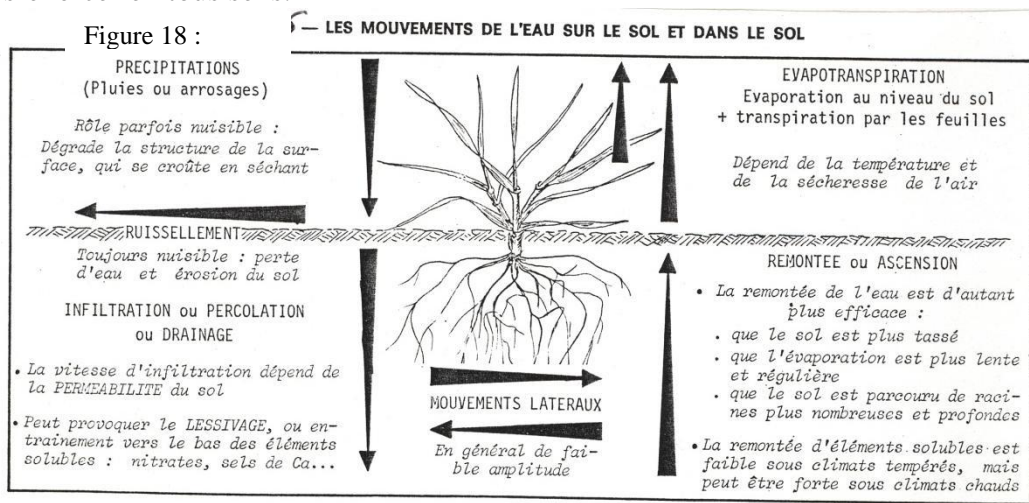
L'eau utile, en fonction de la texture

V. LES MOUVEMENTS DE L'EAU DANS LE SOL :

L'eau qui arrive au sol, par pluie ou irrigation, ou par remontée à partir d'une nappe, est l'objet des mouvements que résume la figure 18 ci-dessous.

Si on laisse de côté les phénomènes de ruissellement et de drainage latéral, les mouvements de l'eau dans le sol relèvent de deux processus opposés :

- des **mouvements d'infiltration** sous l'effet de la pesanteur : il s'agit des mouvements descendants de l'eau de gravité, qui s'infiltre après les pluies, et qui sont liés à la perméabilité du sol ou des horizons.
- des **mouvements de diffusion capillaire**, non liés à la pesanteur mais plutôt à des différences d'humidité, donc de P.F. entre des points du sol. Ces mouvements peuvent s'exercer en tous sens.



1. La percolation, ou descente de l'eau de gravité :

a) La perméabilité (K) d'un sol est définie par la vitesse d'infiltration de l'eau de gravité en cm par heure .

Perméabilité de quelques sols en cm / heure :

Types de sol	Perméabilité
Sols sableux	5 à 10 cm / heure
Sols limoneux, argileux en profondeur	Horizon A, mull grumeleux : 50 cm / heure Horizon A, moder massif : 2 cm / heure Horizon B colmaté par l'argile : 0,5 à 1 cm / h
Alluvion perméable	3 à 12 cm / heure

b) La perméabilité, ou vitesse de percolation, dépend de la texture mais surtout de la structure.

La perméabilité d'un sol est d'autant plus élevée que sa macroporosité est plus forte : plus le sol est formé d'éléments arrondis et de même taille, plus il est perméable, que ces éléments soient des grains de sables ou des agrégats. Plus il est formé d'éléments de taille différente imbriqués les uns dans les autres, plus il est imperméable. C'est pourquoi :

Les sols perméables sont :

- **soit des sols à texture grossière** où dominant les sables et graviers peu enrobés de colloïdes. Il s'agit de sols **filtrants**.
- **soit des sols à texture fine, mais à structure fragmentaire, surtout grumelleuse**. Cette structure, rendue possible par un taux suffisant d'argile, doit être stabilisée par un taux suffisant d'humus et de calcium, faute de quoi, après une infiltration rapide des premières pluies, les colloïdes subissent une dispersion qui freine de plus en plus la percolation.
- **soit des sols humifères** après une période sèche : la réhumectation très lente de l'humus, substance peu « mouillable » explique leur excellente perméabilité. Mais à l'état humide, ils se gonflent et retiennent beaucoup d'eau.

Les sols imperméables sont au contraire :

- **soit des sols à texture fine, très riches en limons mais pauvres en argile et en humus**. Faute de colloïdes, les éléments fins se tassent et le sol devient battant, surtout en surface sous l'effet des pluies. Le même phénomène se produit lorsque des sables de différentes grosseurs sont associés : les éléments les plus fins obstruent les espaces entre les plus gros.
- **soit les sols où domine l'argile**, surtout en l'absence de calcaire et d'humus. L'imperméabilité de ces sols, souvent à structure massive, peut cependant être améliorée par des amendements calcaires et humifères et par des techniques appropriées de travail du sol.
- **soit des sols reposant sur un horizon imperméable**, sans lequel la perméabilité serait bonne.

2. La diffusion capillaire, ou déplacement de l'eau de rétention :

a) Le principe : l'eau se déplace d'un point plus humide vers un point moins humide (figure 19).

Soumise à l'évaporation, la surface du sol s'assèche : son PF augmente, créant un appel de l'eau située dans les couches inférieures : un courant ascendant est créé. Par le même principe, l'eau peut se déplacer latéralement au fur et à mesure de l'absorption de l'eau par les racines.

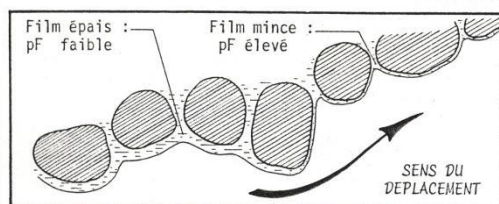


Figure 19 :

L'eau se déplace des zones les plus humides vers les zones moins humides, comme si elle avait tendance à s'étaler en film d'épaisseur égale. Ce mouvement s'explique par la différence de potentiel capillaire (pF) entre 2 zones d'humidité différente.

Mais ce principe ne suffit pas à expliquer les déplacements de l'eau dans le sol.

b) Quand le sol s'alimente à partir d'une nappe d'eau plus ou moins profonde, ce principe demeure valable :

L'eau se déplace de la nappe d'eau vers la surface, et est capable de réhumecter constamment les niveaux asséchés par les racines ou par l'évaporation.

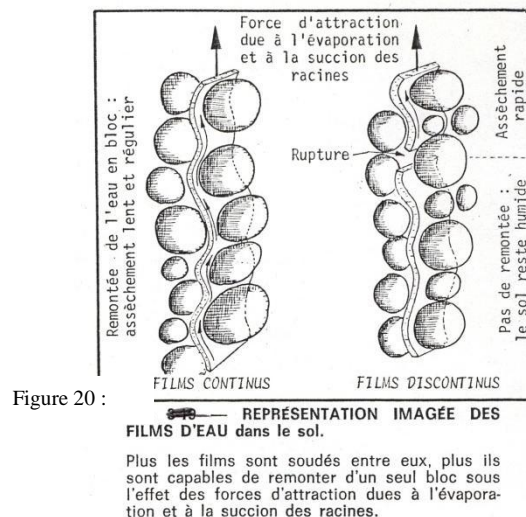
Le phénomène de remontée capillaire constitue un appoint essentiel de l'alimentation en eau des plantes en saison sèche. L'efficacité de cette ascension capillaire dépend de deux facteurs :

- la **hauteur de remontée** au-dessus de la nappe ou **frange capillaire** (en sol nu, la hauteur d'ascension est limitée, et dépend de la texture : 40 cm environ dans un sable, jusqu'à un mètre dans un limon argileux).
- le **débit**, c'est-à-dire la vitesse de remplacement de l'eau absorbée par les racines (1,5 à 2 mm d'eau par jour pour une texture limono-argileuse).

Texture	Hauteur	Débit
Sable	40 cm	rapide
Limon	1 m	moyen
Argile	2 m	lent

c) L'eau se déplace dans tout le profil à l'état de films.

Tout se passe donc comme si l'eau du sol se trouvait sous forme de films, d'épaisseur variable selon les niveaux, mais capables de remonter **en film continu** grâce à la cohésion des molécules d'eau entre elles (figure 20).



d) La remontée de l'eau dépend de la longueur des films :

Il ne suffit pas qu'il y ait évaporation à la surface du sol pour que soit déclenché dans tout le profil un mouvement général de remontée de l'eau : celle-ci n'est possible que si les molécules d'eau sont réunies dans tout le profil en un film continu. Si les films sont longs, le dessèchement de la surface sera lent, l'eau remontant des couches profondes vers la surface. S'ils sont au contraire très courts, le dessèchement de la surface est rapide et intense : l'eau reste dans les couches profondes.

Pour favoriser, ou au contraire limiter la remontée de l'eau, il suffit alors de savoir par quels moyens augmenter, ou au contraire diminuer la longueur des films liquides.

e) Les techniques culturales et l'économie de l'eau (figure 21) :

La remontée de l'eau est favorisée par tout ce qui accroît la cohésion, donc la longueur des films liquides :

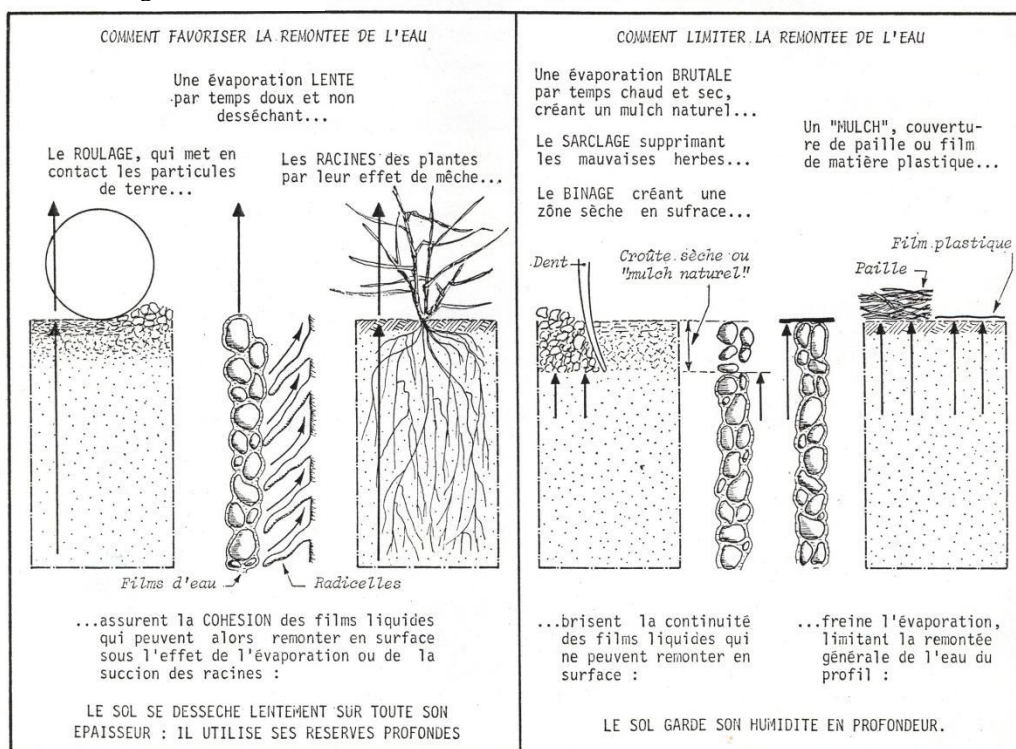
- le **tassement**, par exemple le roulage des sols qui augmente le contact des particules terreuses ;
- la **présence des racines** dans le profil, dont l'**effet de mèche** permet un assèchement continu de toute la zone prospectée ;
- une **évaporation lente** de la surface, par temps couvert, évitant la rupture des films que causerait un dessèchement intense par temps très chaud et sec ;
- un **léger arrosage**, maintenant humides les premiers centimètres du sol et raccordant les films rompus.

La remontée de l'eau est limitée au contraire par tout ce qui tend à rompre la cohésion, donc la longueur des films :

- le **sarclage**, supprimant les mauvaises herbes, donc l'effet de mèche de leurs racines ;
- le **binage**, accélérant le dessèchement de la surface, et causant de ce fait la rupture des films liquides (d'où le proverbe : « un binage vaut deux arrosages ») ;
- une **couverture du sol** (litière par exemple) ;
- une **évaporation brutale de la surface**, par temps chaud et sec, créant parfois une couche de terre sèche.

Figure 20 :

LES TECHNIQUES CULTURALES ET LA REMONTÉE DE L'EAU



f) Les profils hydriques illustrent les modes de dessèchement du sol (figure 21) :

Lorsqu'un sol à la capacité au champ (H_o) perd de l'eau au cours d'une période de dessèchement, l'humidité de son profil évolue différemment selon qu'il est nu ou sous couvert :

En sol nu, l'humidité baisse rapidement dans la couche superficielle, pouvant tomber, dans les premiers centimètres, au-dessous du point de flétrissement. Mais les couches profondes restent humides.

En sol couvert, au contraire, la présence de racines assèche une profondeur plus importante, mais leur présence empêche le sol de descendre au-dessous du point de flétrissement : elles provoquent une remontée continue de l'eau profonde.

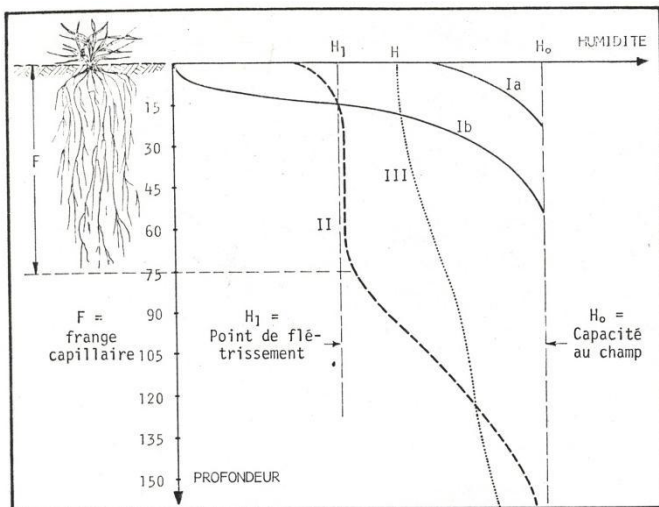


Figure 21 :

LES PROFILS HYDRIQUES DES SOLS EN COURS DE DESSECHEMENT varient selon la couverture :

I - Profil hydrique d'un sol nu :

a) en cours de dessèchement

b) après quelques semaines :

- de 0 à 15 cm : zone très sèche, d'humidité inférieure au point de flétrissement
- plus bas, réserve d'eau importante.

II - Profil hydrique d'un sol sous culture :

Jusqu'à la profondeur h (enracinement de la culture), l'humidité reste supérieure au point de flétrissement : les racines font mèche, permettant la remontée des films : les réserves profondes sont fortement entamées.

III - Profil hydrique d'un sol sous forêt :

La remontée intense entretient humide tout le profil, mais la baisse du taux d'humidité se fait sentir sur une grande profondeur.

VI. EVALUATION DE LA RESERVE EN EAU DES SOLS

Il est important pour le forestier d'estimer la quantité maximale d'eau que le sol peut stocker. En effet, la réserve en eau constitue un facteur limitant de la productivité et de l'implantation de certaines essences forestières.

1. EVALUATION DU RESERVOIR UTILISABLE MAXIMAL (R.U.M) D'UN HORIZON

A. En laboratoire :

En ce qui concerne la **terre fine**, le R.U.M d'un horizon est estimé sur échantillons grâce à la mesure de deux niveaux d'humidités :

- le premier correspond à l'**humidité à la capacité au champ** qui prend classiquement le nom de **capacité de rétention (C.R.)** lorsqu'on la détermine au laboratoire (cette mesure peut être approchée en déterminant la teneur en eau correspondant à un PF de 3, c'est-à-dire en déterminant l'humidité équivalente).
- le deuxième est l'**humidité au point de flétrissement (HPF)**. Elle est mesurée sur un échantillon soumis à une contrainte correspondant à un PF de 4,2.

Le R.U.M. de l'horizon se calcule alors de la façon suivante :

$$R.U.M. (mm) = (C.R. - HPF) \times E (mm) \times da$$

avec E = épaisseur de l'horizon (en mm).

$C.R.$ et HPF étant exprimés en pourcentages pondéraux (g d'eau / 100g de terre fine exprimé en %), cette méthode de calcul nécessite également la mesure ou l'estimation de la densité apparente da (rapport entre le poids de l'échantillon sec et le poids d'un volume d'eau occupant le même volume apparent) de la terre fine de l'horizon.

Exemple : soit un horizon où :

épaisseur = 30 cm, $da = 1,49$, $C.R. = 26,3 \%$ et $HPF = 14,8 \%$.

On sait que :

$$\begin{aligned} \frac{R.U.M}{E} &= \frac{\text{Volume d'eau contenu dans l'horizon}}{\text{Volume total apparent de l'horizon}} \\ &= \frac{\text{poids de l'eau contenue réellement dans l'horizon}}{\text{poids de l'eau contenue dans l'horizon si celui-ci ne contenait que de l'eau}} = (CR - HPF) \times da \end{aligned}$$

$$R.U.M = 300 \times 1,49 \times (11,5 / 100) = 51,4 \text{ mm d'eau}$$

Un horizon comporte souvent, à côté de la terre fine, des éléments grossiers qui diminue la R.U.M. de l'horizon. Afin de tenir compte de la teneur en éléments grossiers, dans le calcul de la R.U.M, on appliquera la formule suivante :

$$R.U.M. (mm) = (C.R. - H.P.F) \times E (mm) \times da \times K$$

avec $K = \% \text{ de terre fine de l'horizon ou encore } (100 \% - \text{teneur } (\%) \text{ en éléments grossiers })$.

Tableau 37 - Réservoir utilisable maximal d'un horizon selon sa classe de texture, exprimé en mm d'eau par cm d'épaisseur. Service de cartographie des sols de l'Aisne.

Classe de texture	Humidité % à la capacité au champ	Humidité % au point de flétrissement	Eau utile	Densité apparente	Réservoir utilisable maximal
	HCC	HPF	%	da	U
S	8	3	5	1,35	0,70
SL	12	5	7	1,40	1,00
SA	19	10	9	1,50	1,35
LIS	15	7	8	1,50	1,20
LS	19	9	10	1,45	1,45
LmS	20	9	11	1,45	1,60
LSA	22	11	11	1,50	1,65
LAS	24	12	12	1,45	1,75
LI	17	8	9	1,45	1,30
Lm	23	10	13	1,35	1,75
LA	27	13	14	1,40	1,95
AS	33	22	11	1,55	1,70
A	37	25	12	1,45	1,75
AL	32	19	13	1,40	1,80
Alo Sédimentaire	29	18	11	1,50	1,65
Altération	38	25	13	1,30	1,70

B. Sur le terrain :

Des estimations rapides de la réserve en eau maximale (R.U.M.) peuvent être effectuées à partir de la seule appréciation de la texture.

En effet, cette méthode d'évaluation dite méthode des textures nécessite seulement :

- des données que l'observateur peut apprécier sur le terrain : l'**épaisseur de l'horizon**, la **teneur volumétrique en éléments grossiers** et la **texture de la terre fine** (estimée par appréciation tactile ou par analyse granulométrique) ;
- des tables comme celles élaborées par le Service de Cartographie des Sols de l'Aisne (voir livret de TP) donnant pour chaque classe texturale une valeur de réservoir utilisable exprimée en mm d'eau pour 1 cm d'épaisseur.

2. EVALUATION DU R.U.M. D'UN SOL :

Il suffira en fait :

- de déterminer la profondeur d'enracinement maximale ;
- de calculer le R.U.M. de chacun des horizons prospectables par les racines.

A ce titre, nous reproduisons l'exemple suivant :

Tableau 20. – Exemple d'estimation du RUM par la méthode des textures.
Sol profond acide à chailles à horizons supérieurs limoneux épais (Baize [14]).
PEM fixée à 120 cm.

	E _h (cm)	EG (%)	A (%)	Texture Aisne	Texture Rothamsted
Horizon A	10	30	18-25	LA	<i>Silty clay loam</i>
Horizon E	35	30	18-25	LA	<i>Silty clay loam</i>
Horizon EB	20	20	30-38	AL	<i>Silty clay loam</i>
Horizon BT	55	15	45-80	ALO (altér.)	<i>Silty clay</i>

avec les valeurs du tableau 18 :

$$\begin{aligned} RUM_{A+E} &= 1,95 \times (100 - 30/100) \times 45 \text{ cm} = 61 \text{ mm} \\ RUM_{EB} &= 1,80 \times (100 - 20/100) \times 20 \text{ cm} = 29 \text{ mm} \\ RUM_{BT} &= 1,70 \times (100 - 15/100) \times 55 \text{ cm} = 79 \text{ mm} \\ RUM_{\text{solum}} &= 170 \text{ mm environ} \end{aligned}$$

avec les valeurs du tableau 19 :

$$\begin{aligned} RUM_A &= 24,0 \times (100 - 30/100) \times 1 \text{ dm} = 17 \text{ mm} \\ RUM_E &= 17,2 \times (100 - 30/100) \times 3,5 \text{ dm} = 42 \text{ mm} \\ RUM_{EB} &= 17,2 \times (100 - 20/100) \times 2 \text{ dm} = 28 \text{ mm} \\ RUM_{BT} &= 14,9 \times (100 - 15/100) \times 5,5 \text{ dm} = 70 \text{ mm} \\ RUM_{\text{solum}} &= 160 \text{ mm environ} \end{aligned}$$

Le R.U.M. du sol sera à comparer avec les exigences hydriques des essences et le contexte climatique régional (voir cours d'écologie forestière).

Dans les sols profonds, la prospection à la tarière donne des informations souvent jusqu'à 1m-1m 50 en fonction de la longueur de la tarière. Ceci peut amener à sous estimer la RUM ou l'estimer de façon imprécise.

L'intérêt de prospecter au delà de cette profondeur est toutefois peu utile : Drénou (2006) a montré que la concentration des activités racinaires de prélèvements en eau se situe dans le premier mètre du sol, les racines charpentières profondes n'initiant que peu de racines fines spécialisées dans le prélèvement de l'eau.

4ème PARTIE : L'AERATION DU SOL

I. INTRODUCTION : IMPORTANCE DE L'AERATION DU SOL

On appelle « aération du sol » le phénomène par lequel l'air du sol qui emplit les macropores se renouvelle à partir de l'atmosphère par apport d'O₂ et départ de CO₂.

L'aération du sol est un échange gazeux fort important car :

- elle assure la respiration des microorganismes aérobies du sol et des racines ;
- elle conditionne de nombreux phénomènes chimiques d'oxydo-réduction qui ont une incidence directe soit sur la pédogenèse (formation du sol : voir chap VI), soit sur la chimie du sol et la disponibilité des éléments nutritifs.

II. L'AIR DU SOL : SON VOLUME ET SA COMPOSITION

1. L'air du sol occupe tous les vides que n'occupe pas l'eau :

Lorsque se ressuie un sol gorgé d'eau, l'air envahit les pores laissés par l'eau de gravité. Au point de ressuyage, il occupe la macroporosité du sol. Par la suite, lorsque s'abaissera l'humidité du sol, il envahira une partie croissante de la microporosité .

La quantité d'air contenu dans le sol dépend donc :

- de la texture, qui influe surtout sur la microporosité ;
- de la structure, dont dépend surtout la macroporosité ;
- de l'humidité du sol, celle-ci dépendant à la fois de la texture et de la structure du sol.

2. Composition de l'air du sol :

L'air du sol a une composition moins stable que l'air atmosphérique : leur composition comparée, qu'illustre le tableau ci-contre, révèle une teneur semblable en azote, mais d'assez grandes variations, pour l'air du sol, des teneurs en oxygène et en gaz carbonique.

TABLEAU 3-23 — COMPOSITIONS COMPARÉES DE L'AIR ATMOSPHERIQUE ET DE L'AIR DU SOL (chiffres cités par G. GAUCHER, Le Sol, Dunod - 1967).

	Air atmosphérique	Air du sol
Oxygène	21,0 %	de 10 à 20 %
Azote	78,0 %	de 78,5 à 80,0 %
Gaz carbonique	0,03 %	de 0,2 à 3,5 %
Vapeur d'eau	variable	à saturation
Autres gaz	environ 1 %	?

TABLEAU 3-24 — TENEURS EN CO₂ ET EN O₂ (%) DE L'ATMOSPHERE DU SOL A DIFFERENTES PROFONDEURS DANS UN SOL DE LIMON (D'après BOYNTON et REUTHER, cités par HENIN, Le Profil Cultural)

Date	30 cm		90 cm		150 cm	
	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂
14 nov. 1937	1,2	19,4	6,6	3,5	10,4	2,4
21 avril 1938	1,9	18,65	7,85	0,25	—	—
21 juin 1938	1,7	19,25	5,35	16,4	10,95	2,1
19 août 1938	2,4	19,0	5,0	16,7	11,85	12,95

Quelles sont les causes de ces variations ? . Si l'on s'intéresse à l'O₂, on remarque :

1. que les apports d'oxygène se font par :

- diffusion d'O₂ à partir de l'atmosphère extérieure pour la plus grande part ;
- apport d'O₂ dissous dans les eaux de pluie ;
- transport d'O₂ prélevé par les feuilles jusqu'aux racines, par des tissus aërières, chez certaines espèces comme le riz ;
- dégagement d'O₂ par des algues photosynthétiques.

2. que la consommation d'oxygène se fait par :

- activité des microorganismes du sol et de la pédofaune (près de 2/ 3 de la consommation totale) ;
- activités respiratoires des racines (environ 1/3 de la consommation totale) ;
- oxydation des roches et minéraux pour une part infime.

3. Importance des échanges gazeux :

Deux gaz jouent un rôle important dans les échanges gazeux, qui règnent dans le sol :

- l'oxygène d'abord, qui conditionne la respiration des racines et des organismes du sol, et qui intervient aussi dans les réactions d'oxydation.
- le dioxyde de carbone, produit de l'activité respiratoire, nécessaire à certains microorganismes (bactéries) pour leurs synthèses organiques.

Ces deux gaz existent, soit à l'état libre, au sein de l'atmosphère des sols (lorsque la « capacité en air » est suffisante), soit à l'état dissous dans les solutions du sol : des échanges ayant lieu constamment entre l'atmosphère extérieure, l'atmosphère du sol et les solutions du sol, un équilibre tend à s'établir.

Par exemple, pour l'oxygène :



Il a été démontré que la diffusion de l'oxygène jusqu'aux racines est assurée de façon satisfaisante dans les sols bien drainés et dont la capacité en air est suffisante : la respiration des racines est alors assurée. Si l'oxygène gazeux vient à manquer (dégradation de la structure du sol, saturation des pores par l'eau), l'oxygène dissous peut prendre le relais, à condition qu'il existe en quantité suffisante, ce qui n'est pas le cas des eaux stagnantes. Par ailleurs, la diffusion de l'oxygène dissous est très lente, ce qui empêche son renouvellement lorsqu'il est absorbé : cela explique l'importance de la circulation de l'eau des nappes autour des racines, lorsque les pores sont saturés d'eau.

4. Potentiel d'oxydo-réduction :

Lorsque l'oxygène gazeux tend à disparaître, ou tombe en dessous d'un seuil critique, les réserves d'oxygène (sous la forme libre dissoute ou sous forme d'oxyhydroxydes de fer par exemple) prennent une grande importance.

Le potentiel d'oxydo-réduction permet d'apprécier l'état du sol au niveau de son aération (tableau ci-dessous).

Relation processus réducteur - potentiel redox en mV

Processus	Eh en V	Métabolisme microbien	Matière organique	Pédogenèse
1. Sols aérés	700-400	aérobiose	biodégradation	Fe ³⁺
disparition O ₂	600-500			Mull
disparition NO ₃ ⁻	500-400			brunification
NO ₂ ⁻	400-350			
2. Sols gleyifiés	400-100	anaérobiose	Accumulation temporaire de mat. org.	Hydromorphie temporaire
réduction Mn ⁴⁺	400-200		faible minéralisation	Fe ³⁺ Fe ²⁺
réduction Fe ³⁺	300-100			migration Fe ²⁺
				podzols
				pseudogley
3. Sols réduits (asphyxiques)	100-200	anaérobiose stricte	Forte accumulation de la mat. org.	Hydromorphie d'eau stagnante et de nappe permanente.
réduction SO ₄ ²⁻	0-150		tourbes	
dégagement H ₂ et CH ₄	-150 -220			

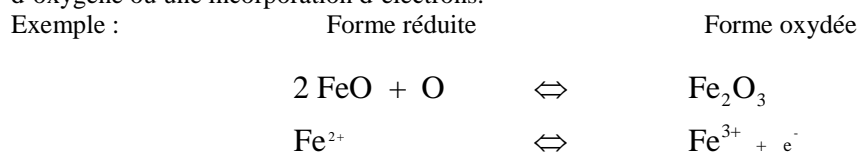
Sur le terrain, l'observation de l'état du fer dans le sol donne de bonnes indications quant à son aération : par sa répartition et sa couleur (forme oxydée : rouille, ocre ou rouge ; forme réduite : gris-verdâtre), c'est un excellent « traceur » des phénomènes d'oxydo-réduction dans les sols⁵.

Pour conclure, retenons encore que le manque d'oxygène par occupation permanente ou temporaire des pores (micro et macroporosité) peut entraîner les conséquences suivantes :

- mauvaise décomposition de la matière organique fraîche, vie du sol anaérobie, évolution tourbeuse de l'humus ;
- frein à l'installation ou à la croissance des plantes ;
- réduction du fer ferrique Fe³⁺ en fer ferreux Fe²⁺.

Les essences forestières **tolérantes à l'hydromorphie et au manque d'oxygène** sont, parmi les feuillus : les saules, les aulnes et les chênes (surtout pédonculé si hydromorphie permanente, sessile si hydromorphie contrastée c-à-d régime hydrique alternatif). Quant aux peupliers et trembles, ils préfèrent une alimentation en eau par nappe régulière, sans grandes fluctuations, et surtout une eau avec **oxygène dissous** où l'hydromorphie n'est pas contraignante.

⁵Une oxydation est une incorporation d'oxygène, ou une libération d'électrons. Une réduction est une perte d'oxygène ou une incorporation d'électrons.



5ème PARTIE : LE VOLUME DE SOL UTILISABLE :

Le volume de sol utilisable correspond à une porosité et une aération adéquates permettant sa colonisation par les racines.

C'est dans le volume de sol utilisable que la rétention de l'eau nous intéresse particulièrement. Tout comme les autres aspects évoqués, elle est directement tributaire de la dimension du volume poreux total, de la dimension des pores et de l'organisation de ceux-ci.

La porosité du sol dépend principalement de trois facteurs :

- de la texture du sol ;
- de la structure du sol ;
- et de la stabilité de cette structure.