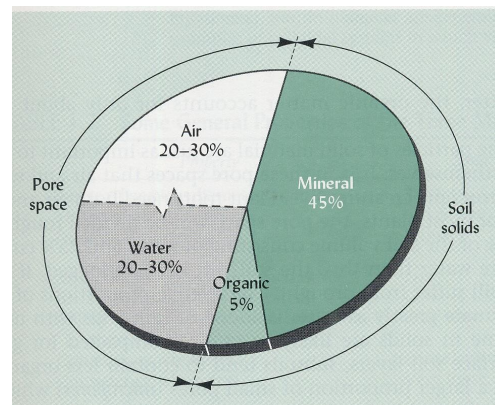




Chapitre 1 : caractéristiques et propriétés physiques des sols

1. Le sol est un mélange de plusieurs phases : solide, liquide, gazeuse

Ce qui pourrait passer pour un matériau homogène, se révèle, à la loupe, un mélange de "grains" durs, d'eau, d'air, d'êtres vivants ou morts et d'humus. On peut donc décrire le sol comme un système polyphasique. Il comprend :



Répartition moyenne en% des différentes phases du sol (*in 'The Nature and Properties of soils', 1999*)

- Une phase solide comportant les minéraux et les substances organiques inertes, mais aussi les êtres vivants
- Une phase liquide, quasi exclusivement aqueuse qui outre l'eau, contient l'ensemble des substances et gaz dissous qui jouent un grand rôle dans les fonctions du sol (nutrition, réservoir et filtre de certains éléments...)
- Une phase gazeuse en équilibre avec la phase liquide. Elle constitue 'l'air' du sol, dont la composition est assez différente de celle de l'air atmosphérique, avec lequel il existe de nombreux échanges. La teneur en CO₂ est notamment plus élevée (0,5 à 5%) contre 0,035% dans l'atmosphère. En contrepartie, la teneur en oxygène est parfois plus basse, mais nécessaire à la respiration des organismes vivants dans le sol (racines, champignons, vers de terre, etc...) . Elle est en outre pratiquement toujours à vapeur saturante pour la vapeur d'eau .

2. Les éléments constitutifs de la phase solide du sol

2.1 Les éléments minéraux

Ils proviennent de l'altération des roches, soit d'une façon mécanique (minéraux primaires) soit d'une façon chimique, avec transformations (minéraux secondaires : argiles, oxydes). L'ensemble des minéraux secondaires forme le complexe d'altération.

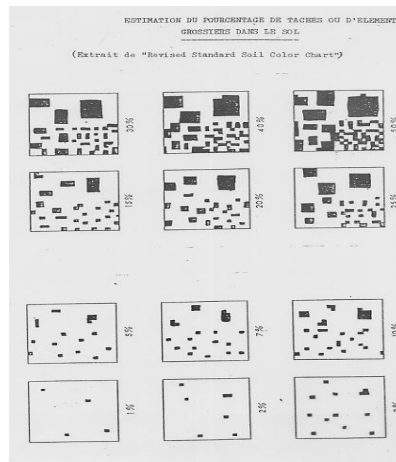
2.1.1 Les éléments grossiers

Ce sont les éléments > 2mm et on les classe par dimensions :

- ◆ 0,2 cm à 2 cm : graviers
- ◆ 2 à 5 cm : cailloux
- ◆ 5 à 20 cm : pierres
- ◆ > à 20 cm : blocs



Leur expression se fait en pourcentage, qu'on donne sur le terrain en fonction du volume et en laboratoire en fonction de la masse (sur un échantillon de sol, au laboratoire, on estime le % après passage au tamis de 2mm).



Grille d'estimation du % d'éléments grossiers (*in 'Revised Standard soil color chart'*)

Exercice : estimez, pour chaque horizon distingué sur ce profil de sol la teneur en éléments grossiers



Les conséquences agronomiques de la présence de ces éléments grossiers sont :

- ◆ une diminution de la réserve utile en eau du sol (dureté élevée)
- ◆ une augmentation de la réserve utile en eau du sol (si porosité... exemple : craie)
- ◆ une usure des pièces mécaniques des outils de travail du sol
- ◆ un développement racinaire difficile (si volume très élevé...)
- ◆ une protection contre l'évaporation (disposition horizontale...)
- ◆ un stockage d'énergie (effet d'inertie)

Les informations utiles concernant ces éléments grossiers :

- ◆ %, disposition dans le sol
- ◆ nature minéralogique, dimension, forme, dureté, porosité



2.1.2 La terre fine

La terre fine est la fraction de terre qu'il reste lorsqu'on retire les éléments grossiers (donc < 2 mm, au tamis). On peut classer les éléments de la terre fine par dimensions :

- ◆ de 2mm à 0,2 mm : sables grossiers
- ◆ de 0,2 mm à 50 μ m : sables fins
- ◆ de 50 μ m à 20 μ m : limons grossiers
- ◆ de 20 μ m à 2 μ m : limons fins
- ◆ < 2 μ m : argiles

Zoom sur... l'analyse granulométrique en laboratoire

Après avoir fractionné la terre délicatement et l'avoir faite passer au tamis 2mm pour déterminer le % d'éléments grossiers, la terre fine est d'abord passée dans une succession de tamis pour déterminer les fractions grossières, jusqu'à 50 μ m (sables).



Tamis



Après suppression des carbonates, des substances organiques et des possibles oxydes de fer (à cause de leur fonction liante), la fraction fine ($< 50 \mu$ m), est mise en suspension dans des tubes remplis d'eau. La méthode est basée sur la différence de vitesse de sédimentation entre les particules légères et les plus grosses; par application de la loi de Stokes, un échantillon est pipeté à différentes périodes et à différentes profondeurs de la suspension du prélèvement dans une éprouvette :

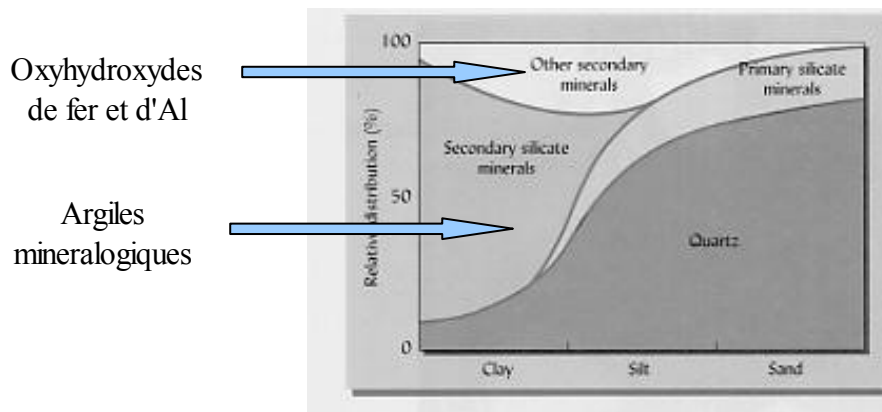




Puis la suspension pipetée est condensée et séchée et la pesée détermine le ratio de masse de la fraction.



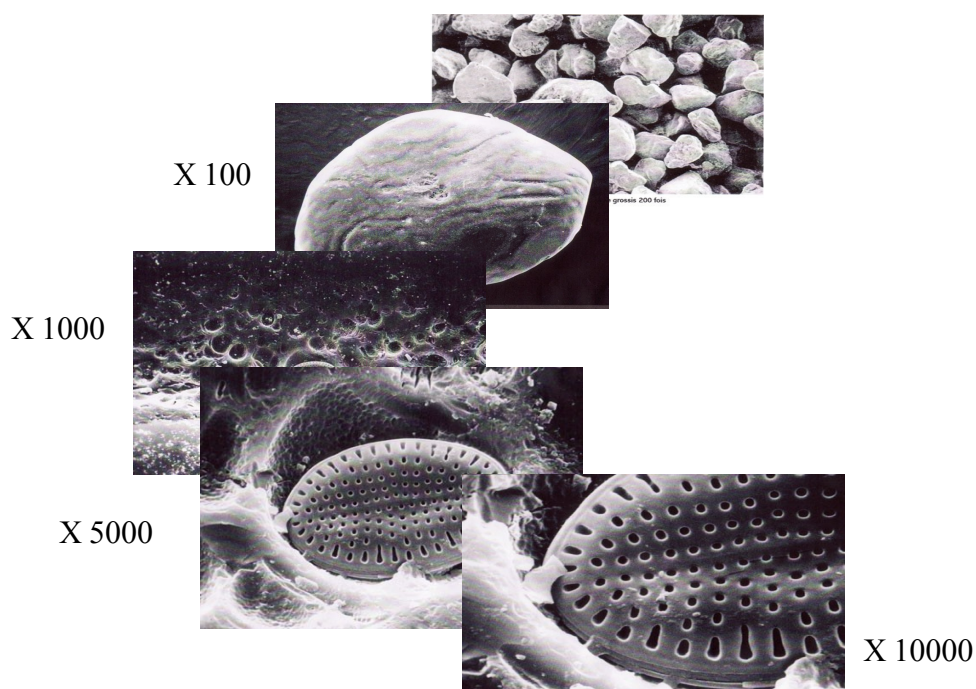
Ces différentes classes granulométriques représentent des natures minéralogiques différentes :



Nature minéralogique selon la dimension (in The Nature and Properties of soils, 1999)

2.1.2.1 Les sables et les limons

a. Nature



Ils constituent 'le squelette' du sol et sont constitués en majorité de minéraux primaires.



Les **sables** ne sont pas seulement des grains de quartz (SiO_2) mais aussi des grains de différentes composition minéralogique primaires (feldspath, micas, plagioclases, calcite...) et très peu de minéraux secondaires

Dans les **limons**, la part de quartz et de minéraux primaires diminuent, en faveur des minéraux secondaires, dont quelques silicatés .

b. Propriétés

D'un point de vue agronomique, ces fractions présentent les propriétés suivantes :

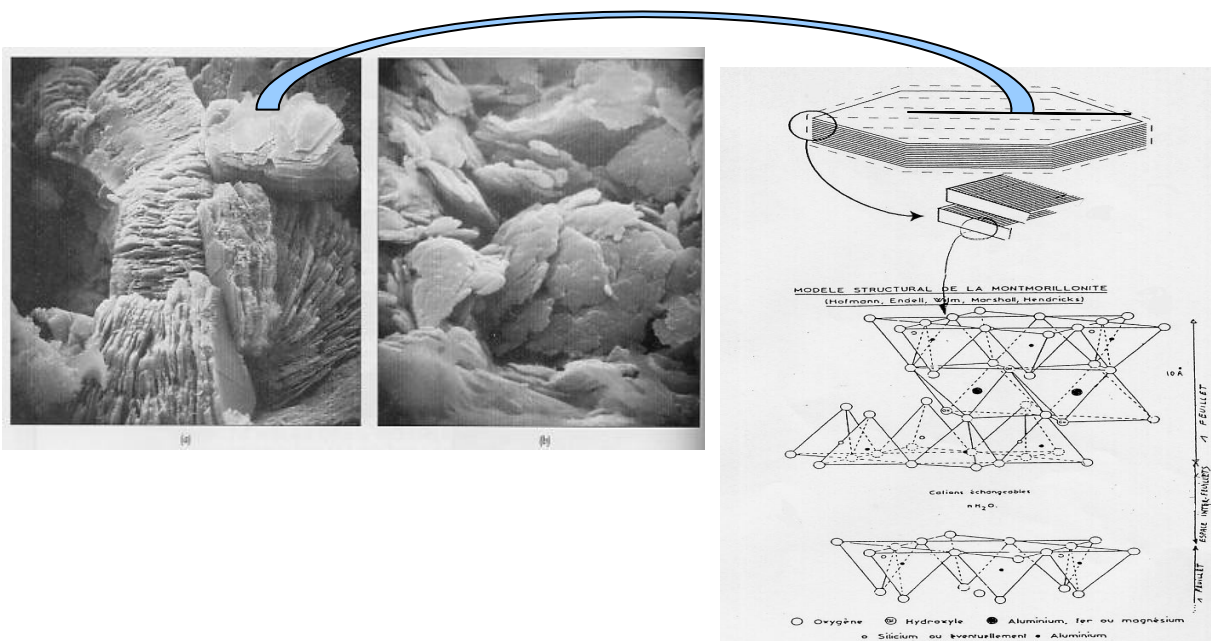
- ◆ ils ne sont pas réactifs (très peu chargés) et de ce fait, n'ont pas la capacité de retenir des ions minéraux nutritifs et de se lier avec d'autres particules du sol (argiles, MO, oxydes) On parle de matériaux inertes. Sur le long terme, ils constituent une réserve en minéraux après altération.
- ◆ Seuls les limons très fins ont suffisamment de charges pour pouvoir se lier avec de la matière organique
- ◆ Il ont très peu de propriétés rétensives vis à vis de l'eau (les sables encore moins que les limons)
- ◆ En quantité importantes ils vont permettre à un sol de se réchauffer plus vite au printemps surtout en ce qui concerne les sables (moins de rétention en eau, donc moins d'inertie pour le réchauffement)
- ◆ Ils permettent une facilité de travail par les outils (surtout les sables) mais en ayant un effet d'usure important (le quartz étant un minéral très dur et abrasif → 'papier de verre')

2.1.2.2 Les argiles

On accorde 2 sens au mot d'argile : la notion de dimension des particules que l'on vient de voir (sens granulométrique) et un sens minéralogique (composition et organisation du minéral)

Les argiles granulométriques ne sont pas que des argiles minéralogiques (il y a aussi de la calcite très fine, du quartz, des oxydes de Fer...)

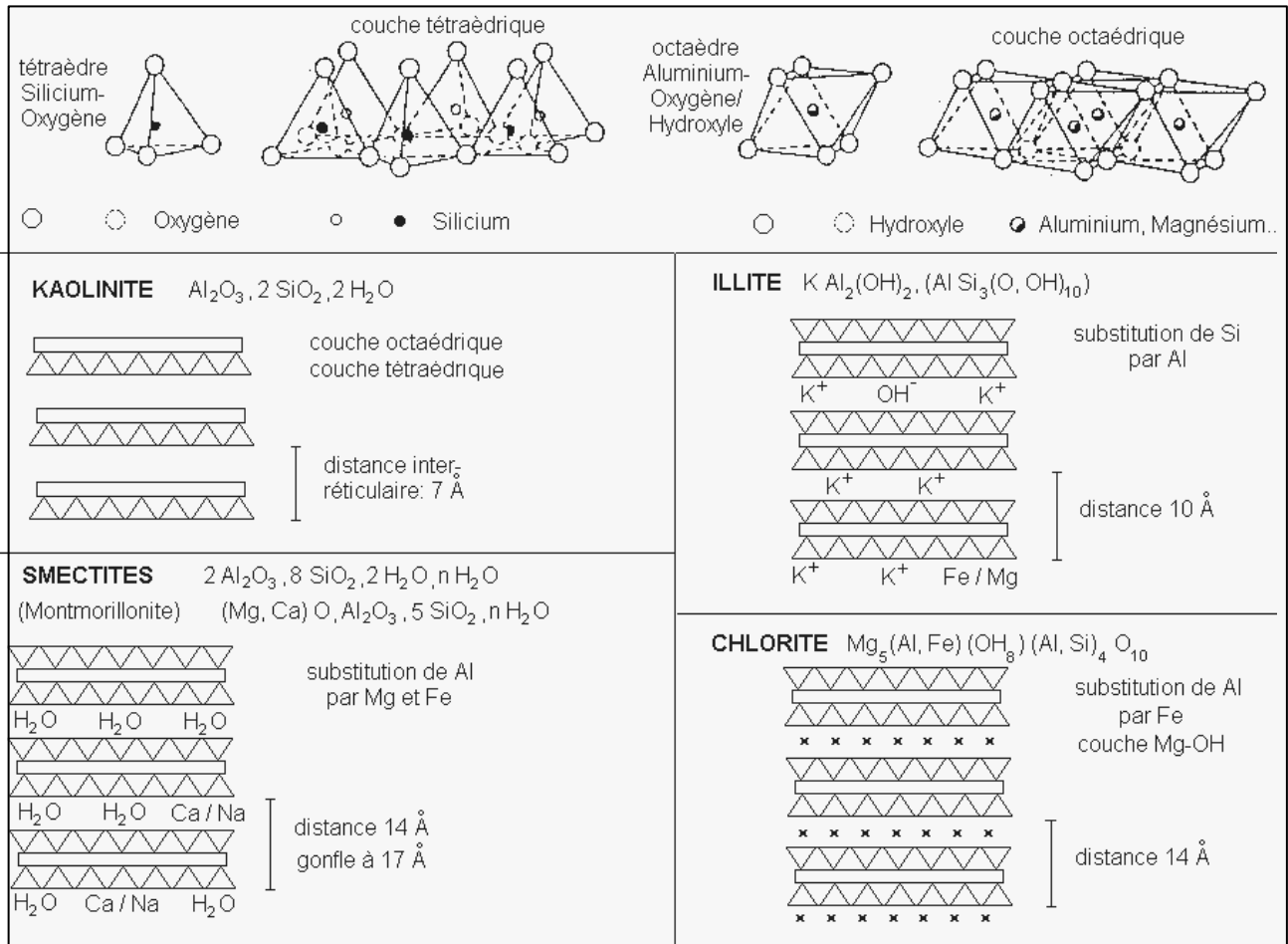
a. Nature



Ce sont des silicates d'alumine, plus ou moins hydratés, microcristallins à structure en feuillets. Ces feuillets sont constitués de couches de tétraèdres de silice et de couches d'octaèdres d'alumine.



Les différentes argiles sont en fait des agencements différents de couches d'octaèdres et de tétraèdres ; du plus simple (Kaolinite) au plus complexe (chlorite), les espaces entre feuillet, le nombres de charges négatives provenant de substitutions ioniques à l'intérieur des feuillet vont expliquer des différences de comportement vis à vis des ions minéraux nutritifs, des molécules d'eau...etc., à l'échelle microscopique mais aussi à la parcelle!!



Remarque : L'illite est l'argile la plus abondante en climat tempéré (50 % environ), suivi de la chlorite, des smectites et de la vermiculite; la kaolinite est plus rare. Au cours de l'évolution du sol, l'illite et la chlorite, minéraux hérités de la roche, peuvent se transformer en vermiculite et smectites

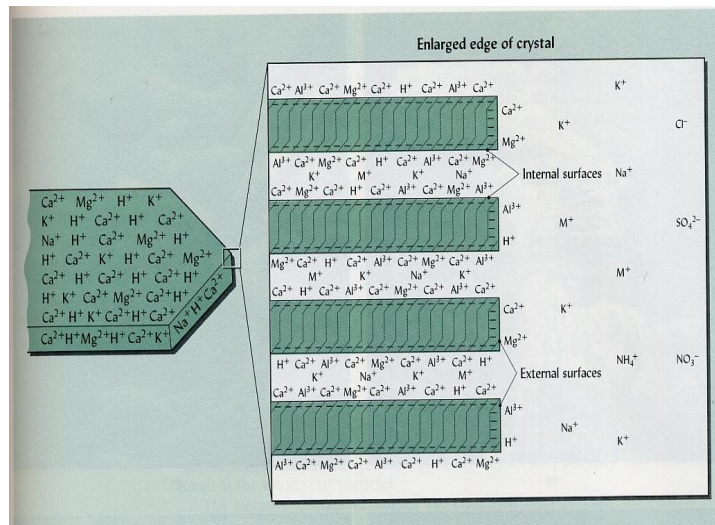
La vermiculite n'apparait pas dans ce tableau. La couche octaédrique contient du Fe et du Mg. La vermiculite est proche des illites et chlorite mais montre des propriétés gonflantes.

b. Propriétés

- les argiles **sont globalement électronégatifs** (il existe quelques sites positifs aussi à leur surface) ; de ce fait ils sont réactifs, notamment avec une capacité à adsorber des ions positifs qui seront échangeables avec la solution liquide du sol.



Représentation des cations adsorbés à la surface des argiles (in *The Nature and Properties of soils, 1999*)



La quantité d'ions électropositifs qu'une argile peut adsorber est exprimée en meq/100 g (ou $\text{cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$) ; elle dépend de des surfaces internes et externes développées, de l'écartement entre les feuillettes et du nombre de substitutions ioniques à l'intérieur des couches

Minéral	Surface interne (m ² /g)	Surface externe (m ² /g)	Surface totale (m ² /g)	C.E.C. (milliéquivalent/100g)
kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
illite	20-55	80-120	100-175	10-40
smectites	600-700	80	700-800	80-150
vermiculite	700	40-70	760	100-150
chlorite	-	100-175	100-175	10-40

Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux (d'après MOREL).

Exercice : Calcul théorique : quelle quantité de calcium peut adsorber 100g d'argile de type smectite?

Pour un ion donné, $1\text{meq} = 1/1000 * \text{masse atomique}/\text{valence}$

Ca^{2+} ; masse molaire atomique = 40g/mol Prenons CEC illite = 25 meq/100g, $1\text{meq} = 1/1000 * 40/2 = 20 \text{ mg}$, donc 100g d'illites pourront adsorber $25 * 20 = 500 \text{ mg}$ de calcium

Remarque : une partie des charges des argiles est fixe, une autre (faible) est variable et dépend du pH

- les argiles ont des propriétés colloïdales : c'est une substance faite de particules très fines, non solubles dans l'eau qui y restent en suspension. Un colloïde peut être à l'état floculé ou dispersé.



Dispersed

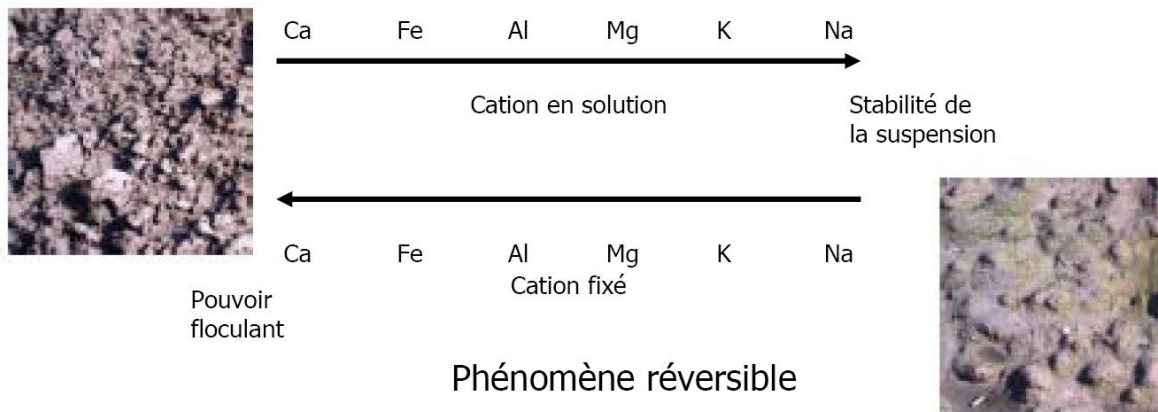


Flocculate

From Yaacov Kapiluto, Utah state university

Les argiles minéralogiques sont donc des colloïdes électronegatifs ; la floculation sera permise par la présence d'ions positifs : le Ca^{2+} est très floculant, le sodium Na^+ est dispersant. Cependant, dans les sols le Fer oxydé est l'élément de liaison le plus important.

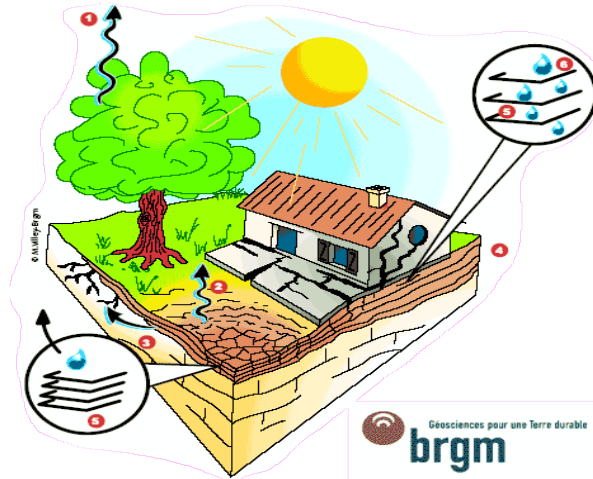
Floculation \Leftrightarrow Dispersion



Dispersion: milieu sodique \Leftrightarrow Floculation : milieu calcique

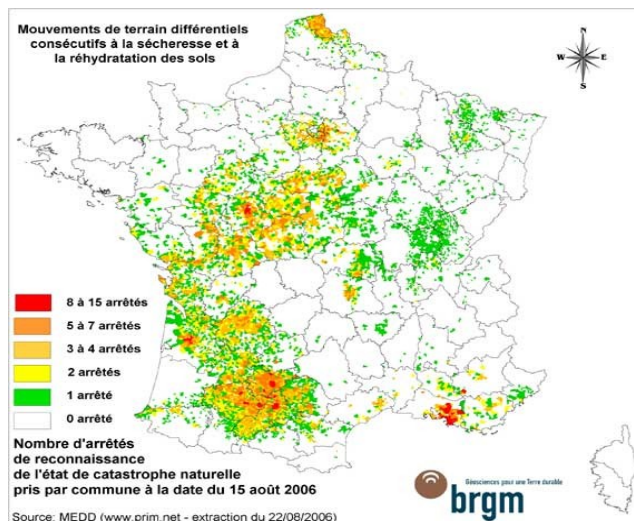
- **Les argiles ont la capacité de retenir des molécules d'eau** (entre feuillets ou à la surface des feuillets) ; c'est donc un composant du sol qui va permettre de constituer une réserve en eau, utilisable par la biologie du sol

- Certaines argiles (smectites-montmorillonites) **peuvent gonfler** en présence d'eau et se rétracter par dessiccation, à l'échelle microscopique (passage de l'écartement de 14 à 17 angström ; 1 angström = $1,0 \times 10^{-10}$ mètres) mais aussi à une échelle macroscopique...



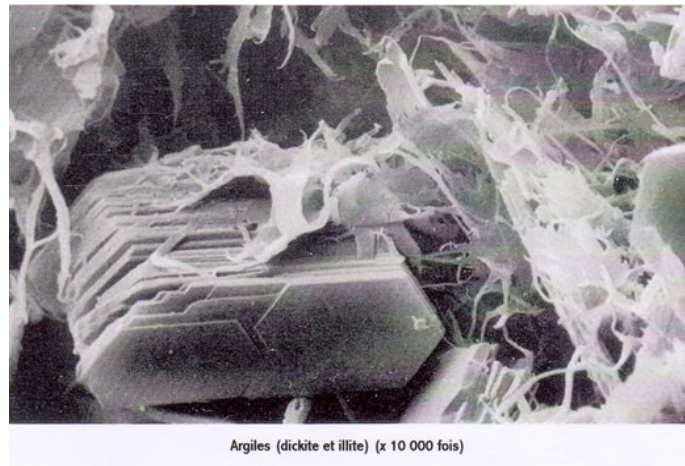
Légende du dessin

- (1) Evapotranspiration
- (2) Evaporation
- (3) Absorption par les racines
- (4) Couches argileuses
- (5) Feuilletés argileux
- (6) Eau interstitielle

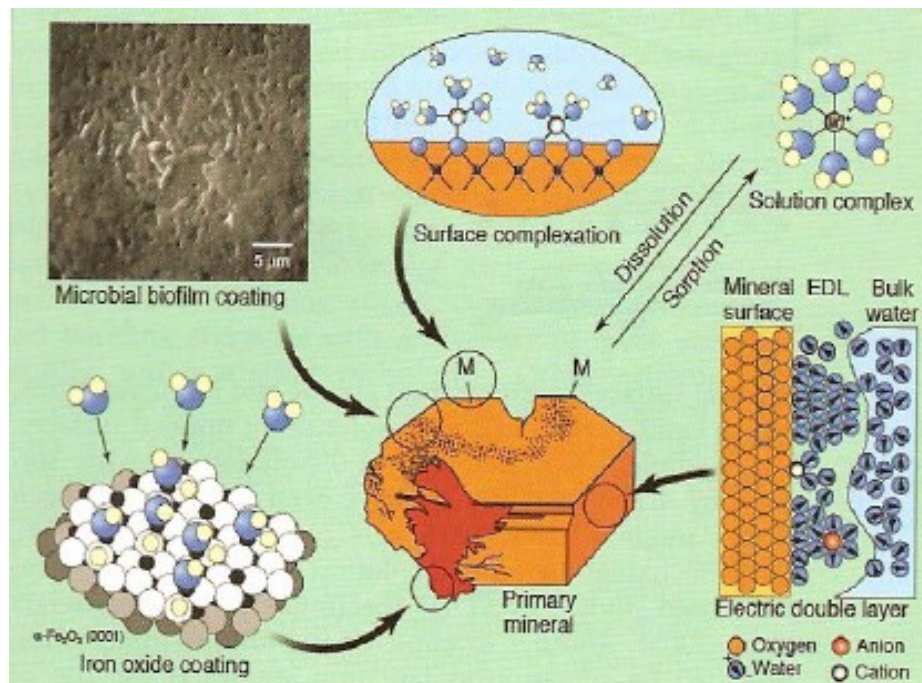
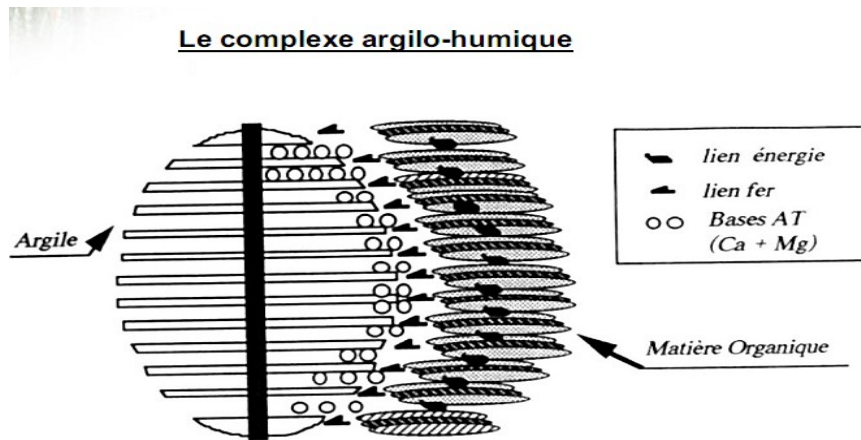


- Les argiles, en quantité importante **donnent des sols 'lourds'**, collant en présence d'eau, + difficiles, délicats à travailler ; comme ils retiennent + d'eau, ils se réchauffent + lentement au printemps

- Les argiles **vont pouvoir se lier à d'autres composants du sol** (composés organiques, carbonates, oxydes de fer...) grâce à des forces électriques (rôle des ions polyvalents, surtout le fer, renforcé par le calcium, le magnésium en pH alcalin ; l'Aluminium joue ce rôle en pH acide) et orienter les propriétés physiques du sol (agrégation, structure, stabilité structurale, porosité...)

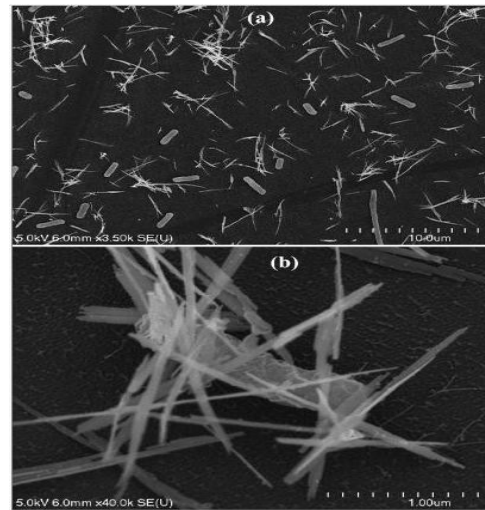


Voici 2 représentations schématiques de ces liaisons Argiles/MO :



2.1.2.3 Les oxydes (oxyhydroxydes)

Ce sont surtout des oxydes de fer et d'aluminium dans le sol qui peuvent être de différentes tailles selon qu'ils sont cristallisés, amorphes (gels)

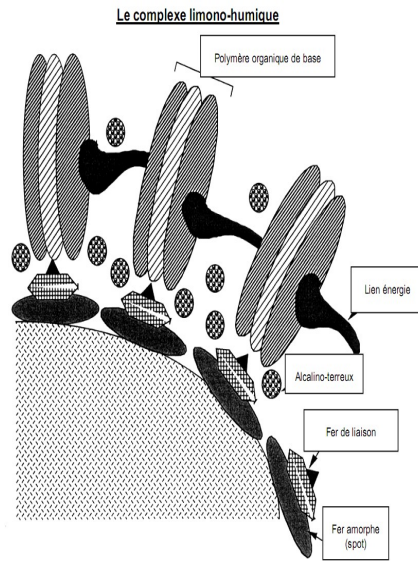


Ils ont la propriété de fixer des ions, comme les argiles, mais ils sont globalement électro positifs et donc adsorbent les ions négatifs (Phosphates PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , sulfates SO_4^{2-} , nitrates NO_3^- ...)

Ils vont participer à la capacité d'échange anionique (CEA) du sol, mesurée aussi en meq/100g.



Ils peuvent, sous forme amorphe, être à l'origine de liens entre limons fins et matière organique :



Ils ont la propriété de donner une couleur au sol : la goethite donne une couleur jaune et l'hématite une couleur rouge



Sol tempéré contenant de la goethite

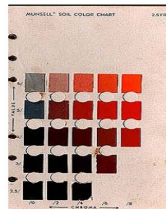
Extraits de la charte Munsell



Sol hydromorphe (Fe²⁺)



Sol tropical contenant de l'hématite



2.2 Granulométrie de la terre fine et notion de texture

Nous avons vu qu'au laboratoire, la terre fine, débarrassée du calcaire et de la MO, peut être analysée dans le but de donner sa composition granulométrique : par un jeu de tamis, puis de tubes de sédimentation.

Avec les trois données en pourcentage des fractions argiles, limons et sables on peut, à l'aide d'un diagramme, définir la classe de texture du sol dont la terre a été analysée :



Exemple de triangle textural



En France le diagramme le plus utilisé est celui nommé GEPPA :

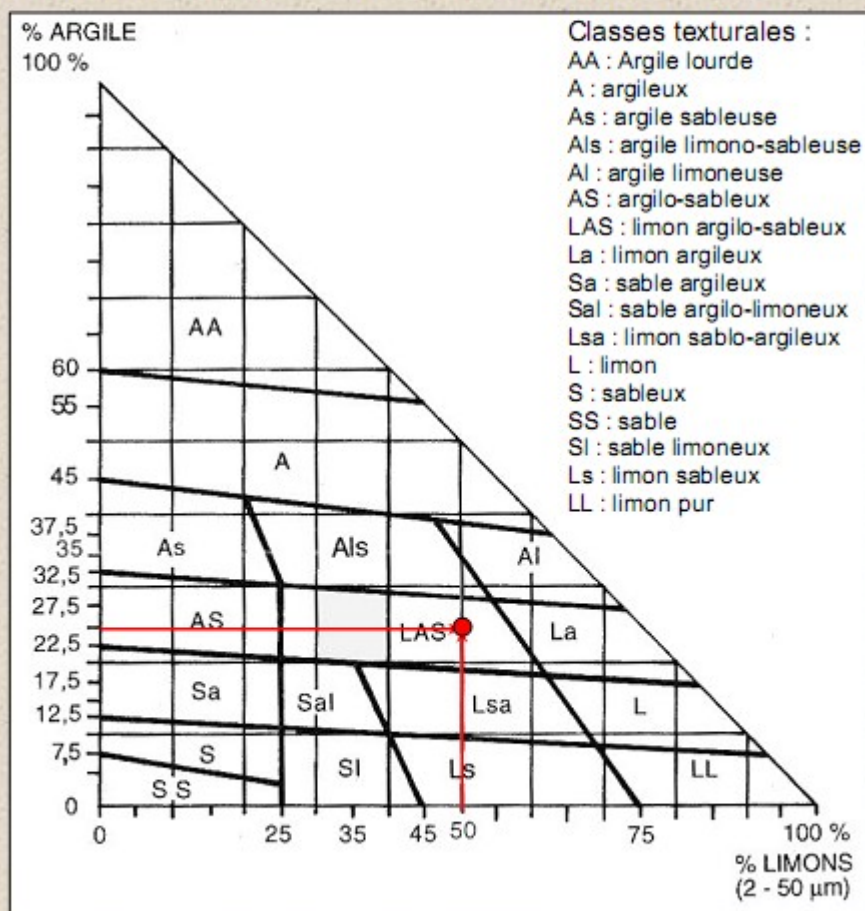
UTILISATION DU TRIANGLE DES TEXTURES GEPPA

Publié en 1963 et élaboré par un groupe de pédologue, le triangle GEPPA se présente sous la forme d'un triangle rectangle isocèle dont les côtés représentent les teneurs en argile (axe vertical), limons (axe horizontal) et sable (axe oblique), chaque axe étant gradué de 0 à 100%.

Positionnons dans ce triangle un point dont l'analyse granulométrique nous a donné la répartition suivante : 25% d'argile, 50% de limons et 25% de sable.

On repère tout d'abord la graduation 25 sur l'axe des argiles et on trace une droite perpendiculaire à cet axe et passant par ce point 25. On fait de même avec l'axe des limons en traçant une droite perpendiculaire à cet axe et passant par la graduation 50. L'intersection entre ces droites nous donne l'emplacement du point recherché dans le triangle de texture. Ce point se trouve dans la classe LAS, c'est-à-dire qu'il représente un échantillon de sol dont la texture est limono-argilo-sableuse.

Dix-sept classes sont identifiées dans le triangle des textures GEPPA.



Source : Guide pour la description des sols (D. BAIZE, 1995)

Exercice : donner, en s'aidant du diagramme de texture fourni, la classe texturale des échantillons de terre suivant :

A : 11 L : 40 S

A : 40 L : 20 S

A : 25 L : 10 S



Exercice/TP : On peut aussi tenter d'estimer cette texture sur le terrain, à partir de tests simples : Avec les différents échantillons de terre (6) présents sur vos paillasses, estimez manuellement la texture...



L'examen du sol à la main, sur place, permet de rapidement identifier la texture du sol. La première étape est de déterminer sa teneur en sable. Frottez un peu de terre dans votre main – contient-elle plus ou moins 50 % de sable?



Si la teneur en sable est inférieure à 50 %, ajoutez de l'eau si nécessaire afin que la terre soit assez mouillée pour être roulée.



Pressez la terre entre votre pouce et le côté de votre index pour former le ruban le plus long possible. Un loam formera seulement un ruban court.



Les sols argileux formeront un ruban beaucoup plus long.

Conclusion : La texture du sol peut être considérée comme étant une propriété inhérente du sol que l'on ne peut pas influencer facilement (cas des apports de sables en maraichage...). Cependant, il vous faut connaître la texture de votre sol et prendre en compte ses limites.

2.3 La matière organique

De la 'litière' à la matière organique humifiée : la mort des êtres vivants, leurs déchets et sécrétions apportent au sol sa matière organique, qualifiée de fraîche avant qu'elle ne se transforme en matière humifiée (humus).

2.3.1 Matière organique fraîche: la litière

La première catégorie de matière organique, la *litière* au sens large, est constituée de l'ensemble des matières organiques d'origine biologique, à différents stades de décomposition, qui représentent une source d'énergie potentielle pour les espèces qui les consomment. Elle comprend les organismes et les parties d'entre eux qui viennent de mourir et qui en sont détachés, qu'ils soient végétaux, animaux ou microbiens, aériens ou sou-terrains, ainsi que les excréments des animaux et différents composés émis directement dans le milieu.

2.3.1.1 Quelques données quantitatives

La quantité de litière aérienne est variable selon les formations végétales, elles-mêmes dépendantes du climat (voir tableau ci-dessous); dans les sols cultivés les restitutions organiques sont en général faibles, ce qui pose le problème de la gestion de l'état humique d'un sol (cad la quantité de matière organique qu'il contient...)



Végétation	Chute annuelle de litière aérienne (t/ha-an)	Masse totale sur la planète (10 ⁹ t)
Toundra arctique et alpine	1,0 - 4,0	8,0
Toundra arbustive, fourrés	2,5 - 5,0	5,1
Forêt boréale d'épicéa	3,5 - 7,5	48,0
Forêt tempérée caducifoliée	11,0	14,0
Savane	9,5	3,0
Semi-désert	0,6 - 1,1	0,4
Forêt tropicale et équatoriale	20,0 - 40,0	7,2
Prairie tempérée	7,5	3,6
Cultures, agroécosystèmes	0,3 - 2,0	1,4
Zones marécageuses	5,0 - 35,0	5,0

Tableau Chute annuelle et masse totale de litière aérienne de quelques formations végétales (diverses sources).

Dans certains cas, la litière d'origine animale peut être importante, par exemple, un troupeau de vaches dans un pâturage, avec une densité de deux bovins à l'hectare, laisse environ 4 500kg/an de bouses recouvrant quelques 300 m². Sans décomposition, le sol serait entièrement recouvert en 33 ans (Matthey, in Schwarz, 1988; § 8.3.2) !

En général, les données de la littérature concernent la définition étroite de la litière, oubliant d'autres apports très importants, comme la litière souterraine issue de la mort des racines. Or, Fogel (in Fitter, 1985) mentionne que la production racinaire peut représenter 85% de la production primaire nette totale et la perte annuelle en racines fines 92% de leur biomasse. De plus, le taux de renouvellement de la biomasse des racinelles est rapide.

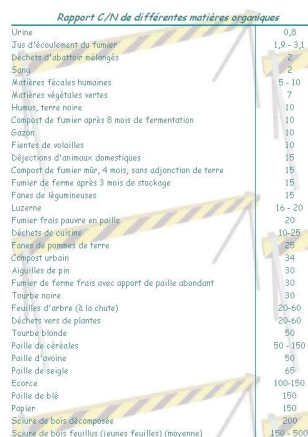
Les sécrétions végétales liquides peuvent être fort concentrées en carbone et jouer ainsi un rôle majeur dans les bilans. Il suffit de penser aux exsudats des racines : le carbone sécrété par les radicelles dans la rhizodéposition peut représenter 20 à 50% du carbone organique fourni au sol, voire plus (Coleman & Crossley, 1996).

Dans cette litière liquide figurent aussi de nombreux composés industriels volatils, rabattus au sol par les précipitations, comme des hydrocarbures polychlorés (Benckiser, 1997). Certains sont dégradés par les organismes du sol mais d'autres peuvent persister très longtemps.

2.3.1.2 Quelques aspects qualitatifs

Un indicateur fort utilisé de la qualité des litières est le *rapport C/N*. Les valeurs élevées de ce rapport, au-dessus de 25 à 30, traduisent des litières à faible pouvoir de dégradation, résistantes aux organismes et aux attaques biochimiques. Les valeurs basses, néanmoins supérieures à 6 ou 7, signalent des litières riches en azote et bien accessibles aux décomposeurs.

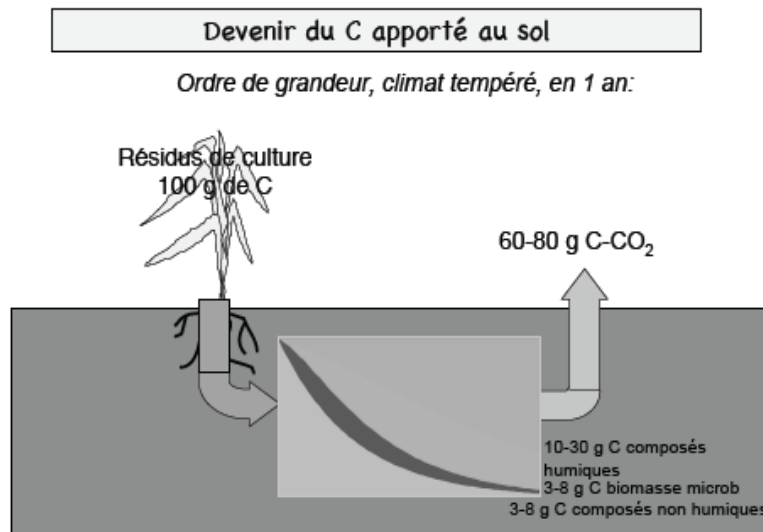
Remarque : Le rapport C/N est aussi appliqué aux autres catégories de matière organique du sol, comme les produits humifiés





2.3.2 Matière organique héritée ou évoluée?

Si certaines des molécules organiques sont héritées directement des débris organiques, la plupart sont synthétisées dans le sol, à la suite de processus chimiques et biochimiques complexes qui constituent l'humification.



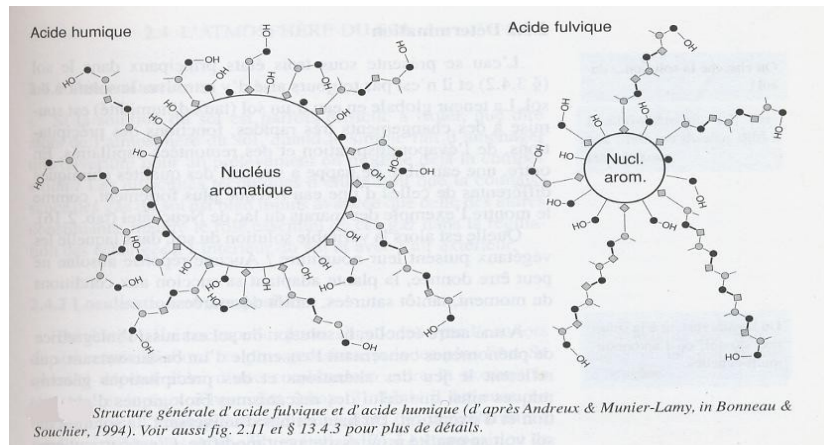
Parmi les premières (héritées) dominent la cellulose, la lignine, les protéines et les lipides.

Dans les secondes (humifiées = évoluées) se retrouvent des composés **aromatiques** à des degrés divers de **polycondensation** :

Type	Masse moléculaire (dalton)	Solubilité			
		Eau	Alcool	Alcalin	Acide
Acides créniques	100 - 500	oui	oui	oui	oui
Ac. hymatomélaniques	500 - 900	non	oui	oui	non
fulviques	900 - 2·10 ³	oui	oui	oui	oui
humiques:		non	non	oui	non
• gris	2·10 ³ - 5·10 ⁴	• insolubles en solution saline			
• bruns	5·10 ⁴ - 10 ⁵	• solubles en solution saline			
Humines	10 ⁵ - 5·10 ⁵	non	non	non	non

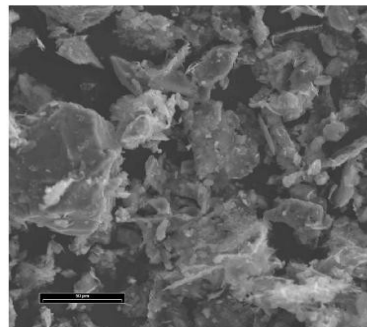
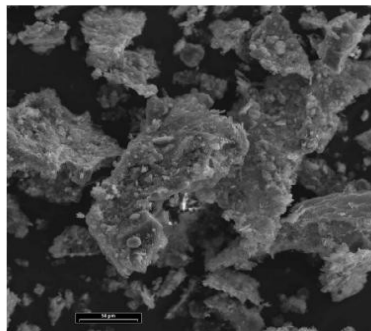
(Un dalton est défini comme égal à 1/12e de la masse d'un atome de carbone 12)

- les **acides créniques** sont les plus petits, solubles dans l'eau, sont formés par polycondensation de deux ou trois noyaux aromatiques. Reconnus en 1806 déjà par le chimiste suédois Berzelius - qui a aussi distingué par la suite les acides humiques et l'humine (Bou-laine, 1989) - ils sont maintenant souvent assimilés à des acides fulviques très légers.
- Un peu plus gros que les précédents, les **acides hymatomélaniques** se composent de polycondensats des précédents mais aussi de molécules héritées en grande partie aliphatiques, comme les **bitumes** fréquents dans les humus bruts et les tourbes.
- De couleur jaune, les **acides fulviques** comportent de longues chaînes latérales de nature aliphatique ou peptidique et un nucléus aromatique de petite taille. Ils sont très réactifs par leurs groupes -COOH dissociés, qui leur fournissent, par leur électronégativité, une bonne aptitude à la liaison avec les cations bivalents ou trivalents.



- les **acides humiques** diffèrent des précédents par des chaînes latérales plus courtes rattachées à un nucléus aromatique plus important. Ils en dérivent généralement par polycondensation.
- Avec un très gros nucléus et de courtes chaînes, l'**humine** est extrêmement stable et se fixe solidement sur les argiles ou les gels colloïdaux, garantissant la pérennité structurale. Elle résulte soit de polycondensation d'acides fulviques et humiques (**humine d'insolubilisation**, soit de néosynthèse bactérienne (**humine microbienne**), soit encore d'héritage de produits déjà présents dans la litière (**humine résiduelle** ou **héritée**).

Photographies au MEB de l'humine



2.3.3 Propriétés de ces matières humifiées

Les **substances humiques** (acides fulviques, acides humiques, humines) sont stables, leur minéralisation étant très lente. L'ensemble de ces substances humiques constitue l'**humus** (bien que ce mot soit aussi utilisé pour désigner l'ensemble des constituants organiques morts) dont le rôle sur les propriétés du sol est essentiel :



Humus : propriétés et effets sur le sol

Propriétés	Remarques	Effets sur le sol
Couleur	La couleur typiquement noire de nombreux sols est due à leur teneur en matière organique	Le sol se réchauffe plus vite, et la levée est plus rapide
Rétention en eau	La matière organique retient jusqu'à 20 fois son propre poids en eau	Évite que le sol se dessèche et se crevasse Améliore la rétention en eau des sols sableux : permet de réduire l'irrigation
Combinaison avec les argiles	Cimente les particules du sol en unités structurales appelées « agrégats »	Facilite les échanges gazeux et augmente la perméabilité (oxygène) Stabilise la structure : diminue l'érosion et le glissement des sols
Chélation	Forme des complexes stables avec Cu^{++} , Mn^{++} , Zn^{++} et les autres cations polyvalents	Augmente la bio-disponibilité du Phosphore et de certains oligo-éléments
Insolubilité dans l'eau	L'insolubilité de la matière organique est due à son association avec les argiles	La matière organique ne se lessive que très lentement ; des apports réguliers permettent une élévation progressive du taux d'humus
Pouvoir tampon	La matière organique tamponne les pH acides, neutres et basiques	Diminue fortement les blocages et antagonismes entre éléments nutritifs
Echange cationique	La CEC de l'humus se situe entre 200 et 1400 cmol/kg	Augmente la Capacité d'Echange Cationique des sols (20 à 70% de la CEC dépend de la matière organique)

Source : F.J. Stevenson, Humus Chemistry : Genesis, Composition, Reactions, 2^e ed. John Wiley & Sons, Inc., 1994, p.15

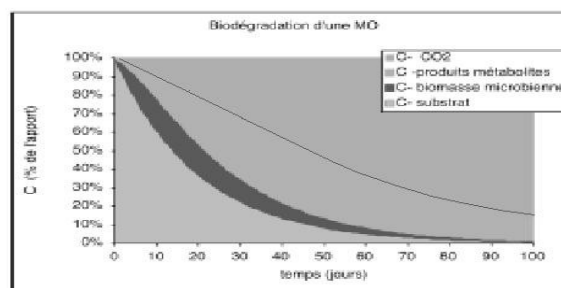
- amélioration de la stabilité structurale
- capacité de rétention des cations
- réserve d'éléments minéraux
- substrat de la vie microbienne
- agent de rétention de substances polluantes... Les principales propriétés de ces molécules sont dues aux groupements acides (carboxyliques et phénoliques) qui en font des échangeurs de cations et des agents complexant des métaux .

2.3.4 Dynamique d'évolution des matières organiques dans le sol

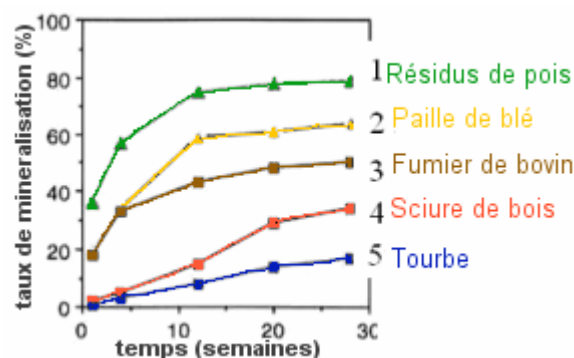
L'évolution des matières organiques est assez rapide en climat tempéré (moins qu'en climat tropical, plus qu'en boréal !...), notamment la minéralisation (qui dépend aussi du rapport C/N, de l'activité biologique du sol...).

On peut retenir qu'environ 100 jours en bonnes conditions (humidité, température), 80% de la matière organique est minéralisée pour une MO à C/N bas.

Biodégradation : devenir du carbone



Mais le rapport C/N reste important ! :





2.3.5 Cycle des matières organiques dans le sol

Des matières organiques fraîches aux molécules minérales qui pourront être prélevées de nouveau par les végétaux, le cycle peut être compartimenté dans le sol avec différentes voies d'évolution et différents degrés d'évolutions. (cf schéma ci dessous)

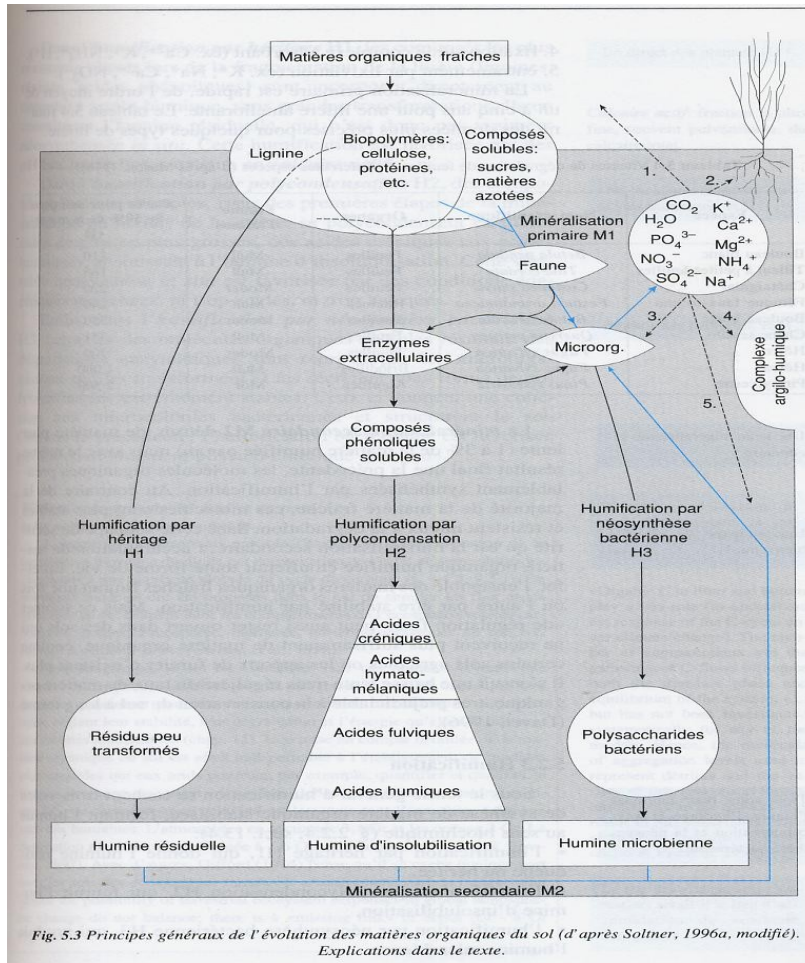
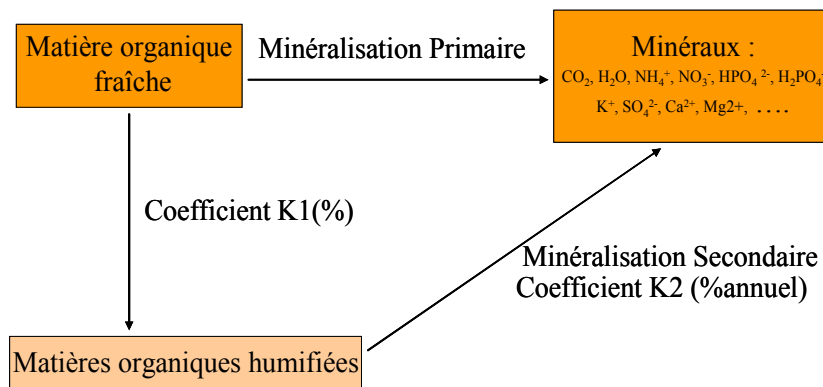


Fig. 5.3 Principes généraux de l'évolution des matières organiques du sol (d'après Soltnner, 1996a, modifié). Explications dans le texte.

De manière plus simple, il peut être écrit de la manière suivante :

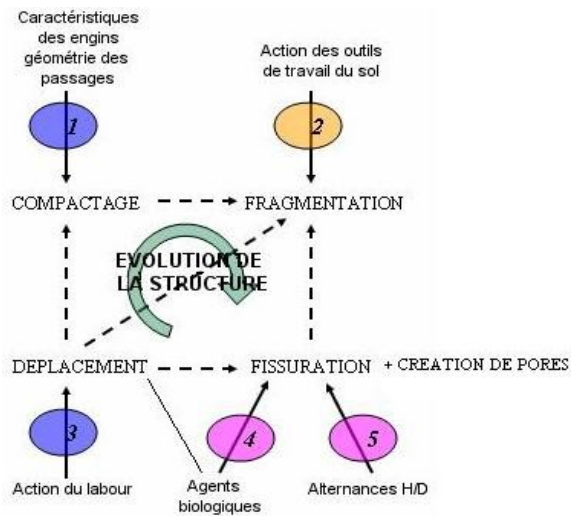


3. La structure

Caractériser la structure d'un sol sur le terrain est essentiel. En effet, la *structure du sol* a un impact direct sur le fonctionnement du couvert végétal (germination, développement racinaire, respiration racinaire...) et, ce qui est aussi lié au développement du végétal, au comportement vis à vis de l'eau (infiltration surtout).



Aussi, la structure d'un sol (contrairement à la texture) est une caractéristiques qui évolue fortement et parfois très rapidement. Elle évolue au cours du temps sous l'effet des contraintes mécaniques qui sont appliquées au sol lors des opérations culturales et qui entraînent fragmentation, déplacement ou compactage. Les agents naturels (climat, faune, racines,...) agissent également sur la structure et la porosité.

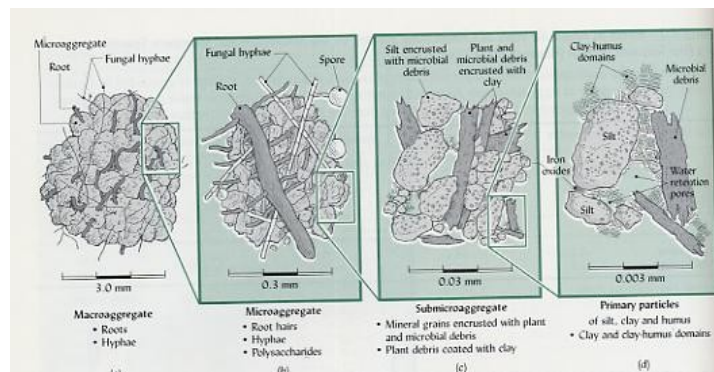


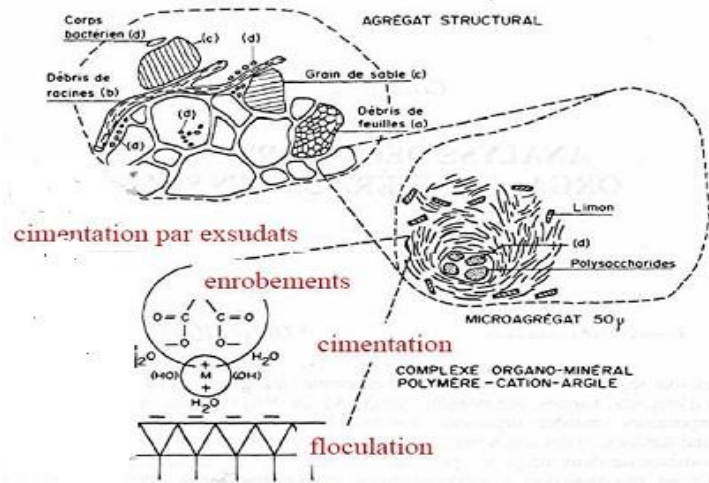
3.1 Définition

La structure est le mode d'agencement des particules du sol (sable, de limon et d'argile, matière organique) entre elles. Les particules isolées, une fois assemblées, apparaissent comme des



particules plus grosses. C'est ce qu'on appelle des grumeaux. Ces grumeaux s'organisent en agrégats. Ils peuvent être envisagés à différentes échelles :



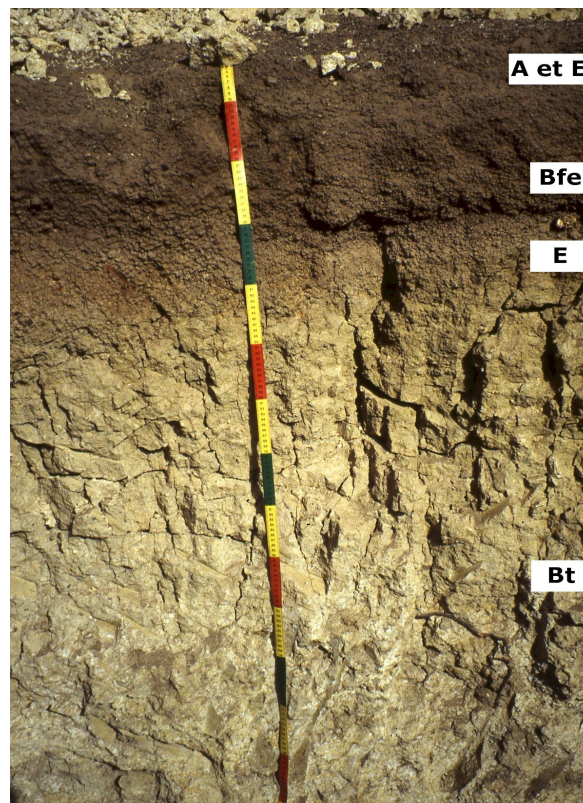


3.2. Décrire la structure d'un sol

Sur le terrain, on décrit généralement la structure de chaque horizon à 3 niveaux :

- degré de structure (intensité d'agrégation)
- classe (taille moyenne des agrégats)
- type de structure (forme de l'agrégation)

Note: Il est plus facile d'identifier les caractéristiques de la structure d'un sol quand celui-ci est sec ou à peine humide. Quand vous étudiez le profil d'un sol en vue de déterminer le degré de structure, examinez le à l'état frais. Dans les sols agricoles il arrive fréquemment que la structure d'un même horizon varie fortement sur quelques mètres voire quelques dm (voir chapitre profil cultural, dans lequel la méthode de description diffère un peu et TP 'Profil')





3.2.1 Degré de structure

Par définition, le degré de structure est l'intensité d'agrégation, qui exprime la plus ou moins grande cohésion* d'assemblage des particules à l'intérieur des grumeaux et l'adhérence* entre les grumeaux dans les agrégats. Comme ces propriétés varient avec la teneur du sol en eau, il faut établir le degré de structure alors que le sol n'est ni exceptionnellement humide, ni exceptionnellement sec. Il y a quatre principaux degrés de structure, classés de 0 à 3, comme suit:

0 Sans structure. Il n'y a aucun agrégat, ni organisation visible des lignes naturelles de faiblesse, comme dans:

- une structure massive (sol cohérent), où l'horizon entier paraît cimenté en une seule masse;



- une structure à grains isolés (sol non cohérent), où les particules ne montrent aucune tendance à s'agréger, comme dans le cas du sable pur.

1 Structure faible. On y observe à peine, par endroits, des agrégats indistincts. Quand on le détache du profil, le matériau de sol se brise en un mélange comprenant un très petit nombre d'agrégats entiers, de nombreux agrégats brisés et quelques éléments hétérogènes.

2 Structure modérée. Le sol est bien constitué d'agrégats distincts, moyennement durables et visibles, mais non distincts dans un sol intact. Quand on le détache du profil, le matériau se brise en un mélange comprenant de nombreux agrégats entiers, quelques agrégats brisés et une petite quantité d'éléments hétérogènes.

3 Structure forte. Le sol est bien constitué d'agrégats distincts, durables et très visibles dans un sol intact. Quand on le détache du profil, le matériau consiste en très grande partie d'agrégats entiers et comprend un petit nombre d'agrégats brisés et peu ou pas d'autres éléments non agrégés.

3.2.2 Classe de structure

Par définition, la classe de structure décrit la taille moyenne des agrégats individuels. On distingue généralement cinq classes, en fonction du type de structure du sol dont les agrégats proviennent. Ce sont les structures:

- Très fine ou très mince
- Fine ou mince



- Moyenne
- Grossière ou épaisse
- Très grossière ou très épaisse

3.2.3 Types de structure des sols

Par définition, le type de structure décrit la forme des agrégats individuels. Le tableau ci-dessous présente les différents types de structures :

exemple anguleux prismatique

	<i>grenue</i> agrégats plus ou moins sphériques, peu ou non poreux, à faces courbes, pas d'arête ni d'orientation préférentielle		<i>prismatique</i> agrégats allongés suivant une direction préférentielle généralement verticale, faces planes, arêtes anguleuses
	<i>grumeleuse</i> agrégats poreux, irréguliers, mammelonnés et qui présentent un ensemble de faces courbes dominantes		
	<i>lamellaire</i> agrégats à orientation préférentielle dans deux directions de l'espace, arêtes anguleuses		<i>columnnaire</i> agrégats allongés, de type prismatique mais à sommet arrondi
	<i>cubique</i> agrégats à faces planes et peu nombreuses, arêtes anguleuses et toutes sensiblement de même dimension		
	<i>polyédrique anguleuse</i> agrégats à nombreuses faces planes, sans orientation préférentielle, arêtes anguleuses		
	<i>polyédrique subanguleuse</i> agrégats à plusieurs types de face ou d'arêtes, forme mal définie, arêtes souvent émoussées		<i>en plaquette oblique</i> agrégats à orientation préférentielle oblique, à faces gauchies, presque toujours lissés et souvent striés, arêtes vives



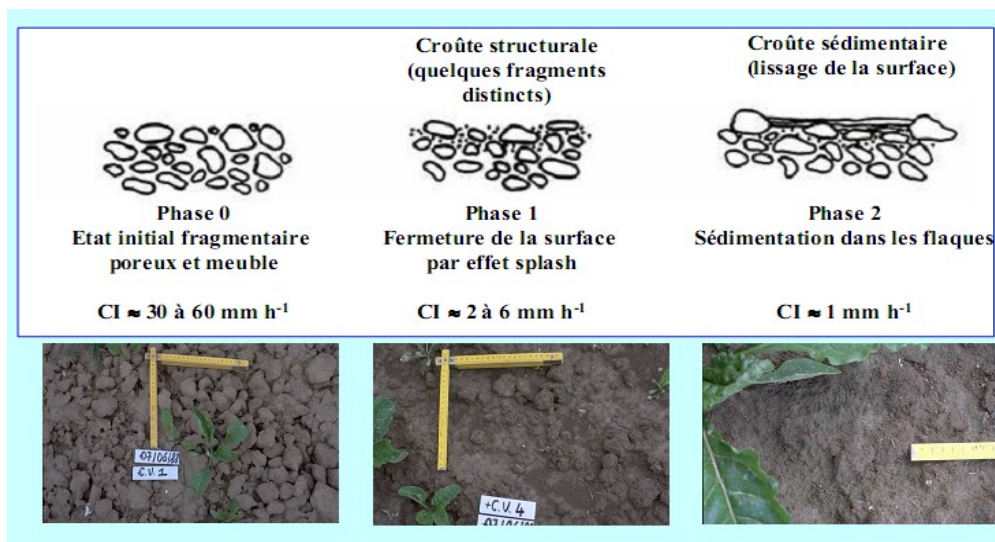


3.3 Lien entre structure et propriétés physiques

Selon le degré de structuration des particules solides du sol, celui-ci sera plus ou moins poreux, c'est à dire qu'il aura des vides qui seront remplis d'air ou d'eau suivant l'humectation du sol.

Plus les particules sont agrégées, plus la porosité est importante. Aussi, plus cette agrégation est stable (rôle de la MO et des ions flocculants : Fer, Calcium, Magnésium), plus la porosité est durable et non détruite par l'action de la pluie.

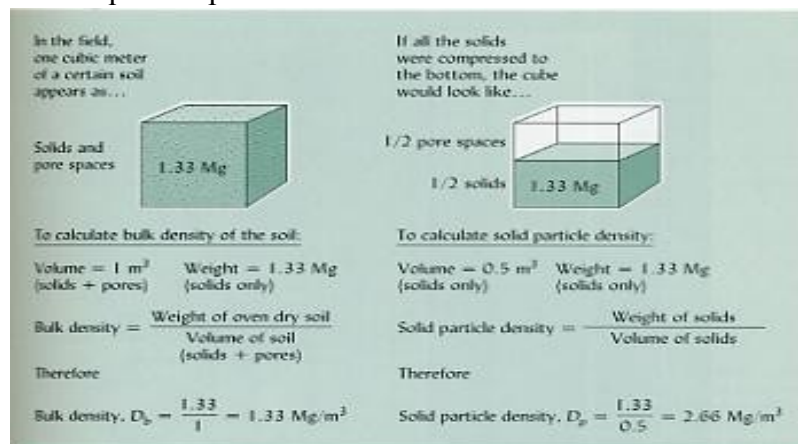
Remarque : c'est la première fois que nous introduisons la notion de stabilité de la structure : elle correspond au test réalisé en cours, qui consiste à plonger un agrégat dans l'eau et d'observer son évolution. Au champ, cela peut être illustré par ce document :



4. Densités, porosité ; atmosphère du sol et l'eau dans le sol

4.1 Les densités du sol : densité réelle et densité apparente

On distingue 2 densités que l'on peut mesurer dans le sol :



4.1.1 La densité des particules du sol ou densité réelle.

Pour la plupart des sols, elle est en moyenne entre 2,6 et 2,7. (C'est à dire qu'un sol qui n'aurait aucune porosité, aucuns espaces entre ses particules solides (ce qui n'existe pas !..) pèserait entre 2,6 et 2,7 kg/L ou t/m³)



Mais ce chiffre est une moyenne entre les différentes particules du sol qui ont des densités différentes :

Argiles, minéraux silicatés :	2,65
Oxydes :	> 2,65
MO :	entre 0,9 et 1,3

Ainsi, plus un sol aura une teneur organique élevée, plus sa densité réelle sera faible.

Exemple : un même sol à 5% de MO a une densité de 2,55 et à 15 % de MO passe à 2,4.

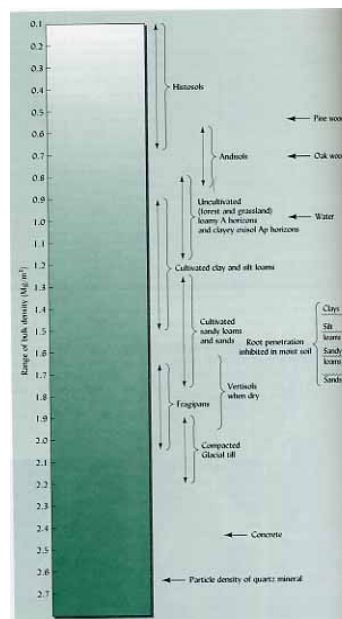
Comment mesure-t-on la densité réelle des particules ?

- on pèse un échantillon de sol sec
- on le met dans l'eau et on mesure le déplacement du volume de liquide
- on réalise le rapport masse sur volume d'eau déplacé

4.1.2 La densité apparente



C'est la mesure de la densité du sol en tenant compte qu'il y a des vides entre les particules solides du sol. Pour cela, on prélève un échantillon de sol non remanié, souvent cylindrique et on le pèse après séchage : le rapport masse sur volume donne alors la densité apparente.





Voici un document (ci dessus) qui présente la 'gamme ' de valeurs de densités apparentes que l'on peut avoir dans les sols ; reprenez que pour les sols cultivés, la Dapp est autour de 1,5.

- **Questions :**

- ① Plus la granulométrie d'un sol est fine et plus il a tendance à avoir une densité apparente faible... pourquoi ? Matériau + réactif (A, LF...) donc agrégation avec MO, les vides augmentent donc Dapp diminue
- ② En profondeur, les Dapp augmentent, pourquoi ? MO diminue, moins d'agrégation, moins de racines...
- ③ Quel effet a la mise en culture des sols sur leurs densités apparentes ?

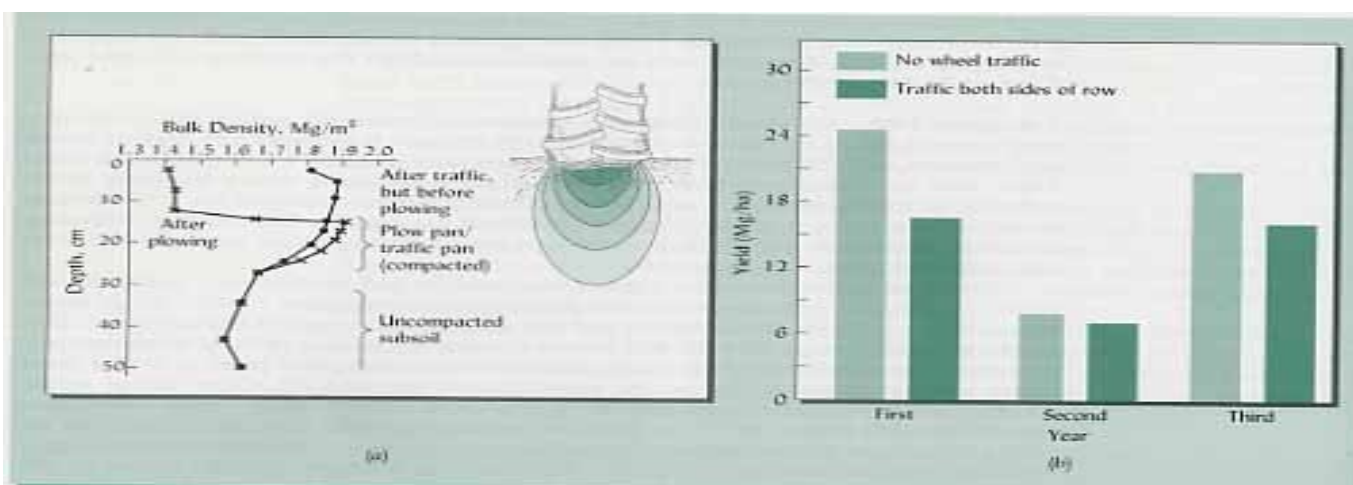
TABLE 4.4 Bulk Density and Pore Space of Some Surface Soils from Cultivated and Nearby Uncultivated Areas (One Subsoil Included)
The bulk density was increased, and the pore space proportionately decreased, in every case.

Soil	Texture	Years cropped	Bulk density, Mg/m ³		Pore space, %	
			Cultivated soil	Uncultivated soil	Cultivated soil	Uncultivated soil
Udalf (Pennsylvania)	Loam	58	1.25	1.07	50	57
Udalf (Iowa)	Silt loam	50+	1.13	0.93	56.2	62
Aqualf (Ohio)	Silt loam	40	1.31	1.05	50.5	60
Ustoll (Canada)	Silt loam	90	1.30	1.04	50.9	60
Cambid (Canada)	Clay	70	1.28	0.98	51.7	63
Cambid, subsoil (Canada)	Clay	70	1.38	1.21	47.9	54
Mean of 3 Ustalfs (Zimbabwe)	Clay	20-50	1.44	1.20	54.1	62
Mean of 3 Ustalfs (Zimbabwe)	Sandy loam	20-50	1.54	1.43	42.9	47

Data for Canadian soils from Tiessen, et al. (1982), for Zimbabwe soils from Weil (unpublished), and for other soils from Lyon, et al. (1952).

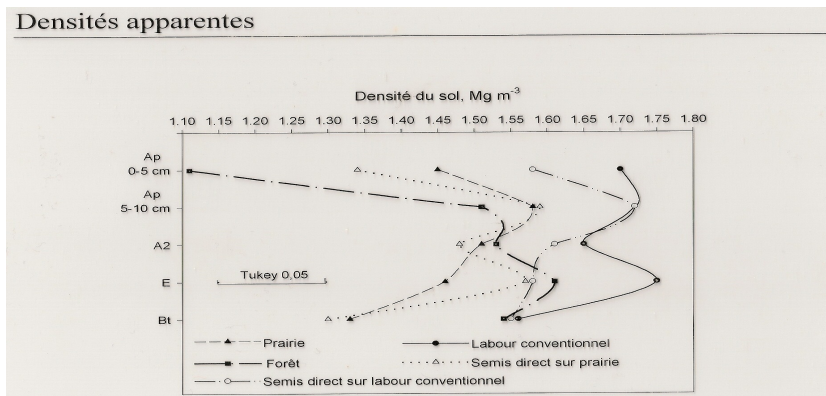
Hypothèses qui expliquent que Dapp des sols cultivés > Dapp sols naturels ?

- Baisse des teneurs en MO et dilution sur profondeur plus importante (labour)
- Nombreux chocs mécaniques avec Travail du sol
- faune du sol diminue en biomasse donc agrégation diminue, porosité diminue
- Matériels lourds, tassement (pneumatiques, charrues) surtout si sol humide

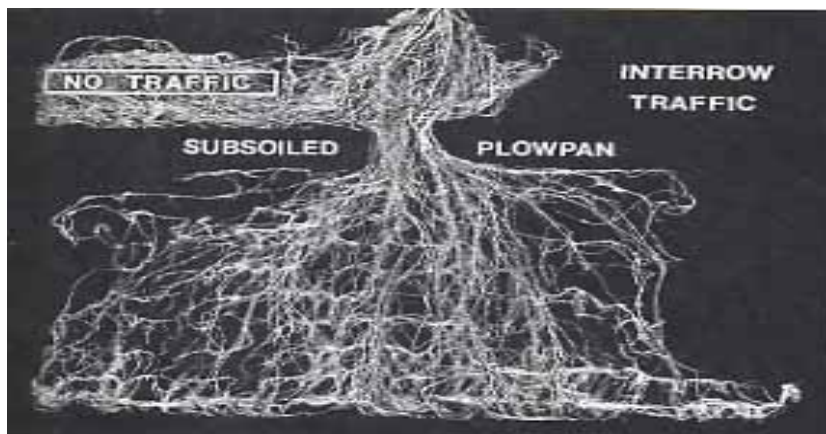




Exercice : Voici un exemple de densités apparentes mesurées sur différents usages du sol et différents systèmes de culture sud du Brésil). Qu'observez-vous ? Est-ce contradictoire avec les éléments précédents ?



Exercice : Des chercheurs ont pris en photos (par fluorescence) un système racinaire de coton au champ. Qu'observez-vous ?



4.2 Porosité du sol

Un sol sans structure n'a quasiment pas de porosité : elle est très faible, ce sont quelques vides créés par l'assemblage des grains, on parle de porosité texturale. Cette porosité texturale est surtout de la microporosité (<0,08mm).

L'agrégation par liaison des colloïdes, l'activité biologiques (racines, faune...), le climat (humectation, dessiccation) vont créer une porosité structurale qui est surtout d'origine biologique. Cette porosité structurale est à la fois de la microporosité (< 0,08 mm : chenaux de racelles, de myceliums...) et surtout de la macroporosité (0,08 à 5mm).

Les hausses de densités apparentes dans les sols agricoles sont synonymes de diminution des porosités des sols (surtout la macroporosité). On considère qu'un minimum de 50 % de porosité totale, sur l'ensemble de la profondeur exploitable par les racines, est un seuil de bonne condition de croissance pour les plantes.

La porosité des sols agricoles va de 25 % (sols compactés) à 60% (sols bien agrégés, riche en MO, avec une biomasse importante...)



Calcul de la porosité d'un sol, connaissant Dréelle et Dapparente :

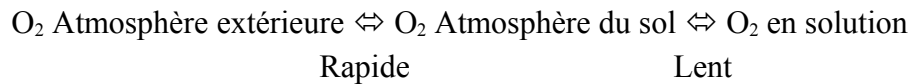
$$P(\%) = 100 - (Dapp/Dréelle * 100)$$

La macroporosité permet le drainage vertical des eaux, l'aération du sol et le développement racinaire + un habitat optimal pour la faune du sol.

La microporosité permet de retenir de l'eau et sa redistribution sur le profil par capillarité.

4.3 L'atmosphère des sols

L'O₂ est nécessaire à la respiration des racines et à la vie des microorganismes ; il se trouve à l'état gazeux et dissous dans la solution du sol et il y a des échanges entre ces 2 états.



La teneur en O₂ du sol est de 20% tandis que l'atmosphère extérieure a une teneur de 21 % ; dans le sol, elle peut baisser jusqu'à moins de 10%.

La teneur en CO₂ du sol est de 1 à 5, voire 10% alors que dans l'atmosphère extérieure, elle est de 0,035%.

Pour mesurer la teneur d'O₂ en solution, on mesure le potentiel RedOx (Eh).

Rappel : l'oxydation est une fixation d'O₂, libération d' e-
la réduction est une libération d'O₂, fixation d' e-

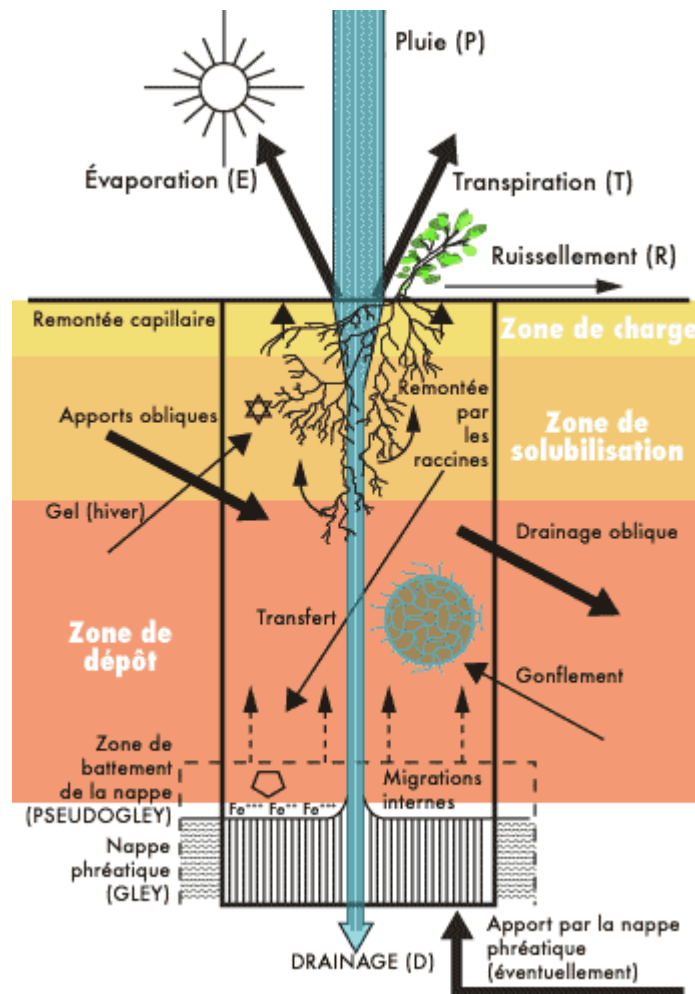
Gamme de valeurs :

- 450 < Eh < 800 mV : bon potentiel (O₂ n'est pas un facteur limitant)
- 0 < Eh < 450 mV : Potentiel critique
- Eh < -200 mV : milieu fortement réducteur

4.4 L'eau du sol

4.4.1 Forme de l'eau dans le sol

Le sol est une étape du cycle de l'eau : il fonctionne comme un réservoir qui se remplit essentiellement par précipitations ou apports par irrigation ; les pertes se font par drainage, par transpiration et évaporation (la somme de ces 2 dernières étant nommée 2vapotranspiration ou ETP).



Pour le drainage, l'eau de gravité a un écoulement rapide dans les pores $> 50 \mu\text{m}$ (quelques heures) et lentement dans les pores entre 10 et $50 \mu\text{m}$ (quelques jours).

L'eau est retenue dans les pores $< 10 \mu\text{m}$, c'est une eau capillaire absorbable par les racines ; dans les pores $< 0,2 \mu\text{m}$, c'est une eau liée non absorbable par les racines.

4.4.2 Quelques définitions

4.4.2.1 L'état de l'eau dans le sol

Différentes forces s'appliquent à l'eau dans le sol ; on parle de potentiels : potentiel de gravité, un potentiel osmotique, et un potentiel créé par l'attraction des particules solides (= potentiel matriciel, c'est lui qui domine...)....

Pour extraire de l'eau du sol, il faut exercer une force de succion au moins égal à l'ensemble de ces forces : c'est ce que l'on nomme le **potentiel hydrique, noté Ψ** . Cette succion représente la force d'attraction exercée du sol sur l'eau (cette succion est considérée comme une pression, ainsi que le potentiel hydrique) Il est égal mais de signe opposé à l'énergie qu'il faut appliquer pour libérer l'eau. La valeur de ce potentiel est donc toujours inférieure à 0. Plus cette valeur est basse, plus les liaisons eau/sol sont fortes.

Quand un sol se dessèche, Ψ va donc baisser. On exprime le potentiel hydrique Ψ en hecto pascal ou millibars ou en cm d'eau. Le pF est le log décimal de cette force (exprimée en cm d'eau)
Ex : force de $- 10000 \text{ cm d'eau}$ (Ψ) correspond à un $\text{pF} = - 4$



Dans le cas où il existe différents potentiels hydriques, l'eau s'écoule toujours du plus fort potentiel vers les potentiels les plus faibles.

Exemple de la plante : *module 1 séquence 1 de do it your soil L'eau du sol Animation*

Remarque : la plante ne dispose pas d'un système actif de pompe pour que l'eau soit extraite, puis circule dans la plante et s'évapore par les stomates...c'est une différence de potentiel hydrique entre l'atmosphère et le sol qui fait circuler cette eau, car le potentiel de l'eau dans l'atmosphère est alors plus bas que celui dans le sol.

Exemple du laboratoire : Courbes désorption (introduction, animation, synthèse) de do it your soil : Dispositif expérimental de mesure : échantillon de sol sous cloche hermétique + pompe

4.4.2.2 La capacité au champ ou capacité de rétention.

Elle correspond à un pF de -2,5. C'est le maximum d'eau retenue dans un sol après le ressuyage. Elle est calculée sur le terrain après une forte pluie, ou en mettant des échantillons de sols non remaniés, sous cloche, à un potentiel pF de -2,5.

4.4.2.3 Le point de flétrissement

À partir d'un pF de -4,2, les racines ne sont plus en mesure d'absorber l'eau, qui est trop fortement liée aux particules du sol.

4.4.2.3 La réserve utile en eau du sol

a. Explication

Lors d'une forte pluie : un front d'humectation se forme et descend par gravité:



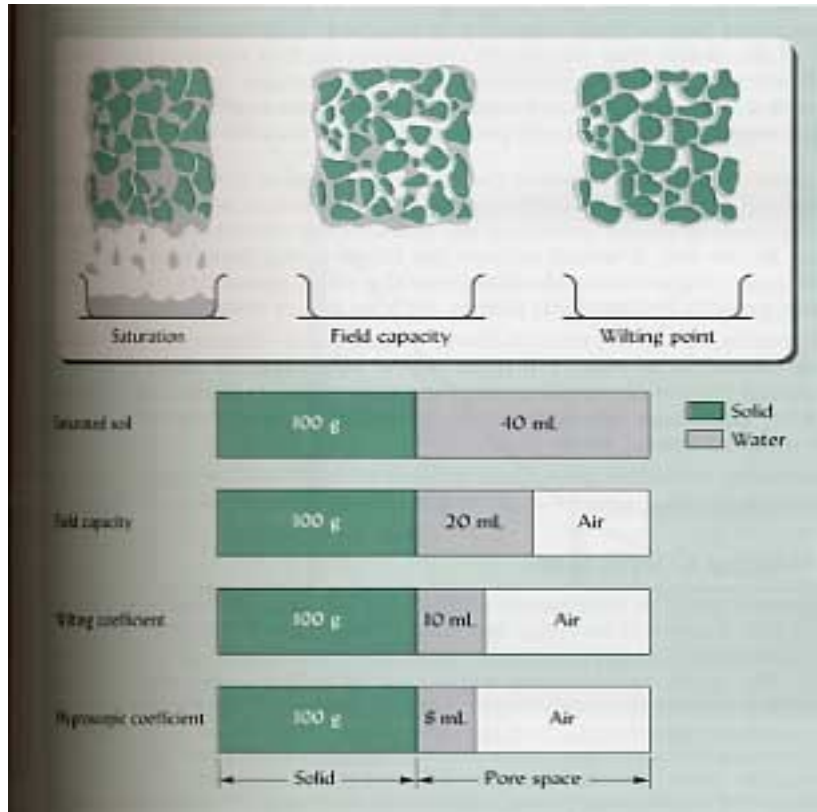
Si la pluie est suffisamment importante et longue, le sol peut se retrouver saturé en eau : la quasi totalité de ses pores sont remplies d'eau (saturation, soit un pF proche de 0)

Dans cet état de saturation l'eau s'infiltré selon un coefficient K qui peut varier de seulement qq mm/h jusqu'à 50 cm/h selon la structure du sol !

Après saturation, si il n'y a plus d'apport d'eau, on considère après une durée de 3 jours, que l'on a atteint **la capacité au champ**, c'est à dire la quantité maximale d'eau qu'un sol peut retenir sur toute sa profondeur.

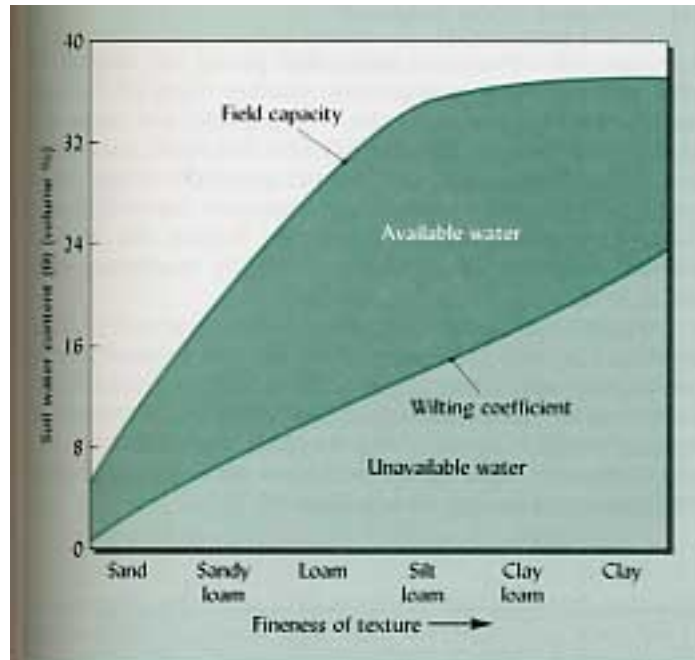


Imaginons un couvert végétal sur un sol dans cet état de capacité au champ, les plantes vont absorber l'eau du sol par leurs poils racinaires et, s'il n'y a pas de nouvel apport d'eau, les plantes vont atteindre **leur point de flétrissement**, alors qu'il reste encore une quantité d'eau dans le sol, non utilisable par les plantes.

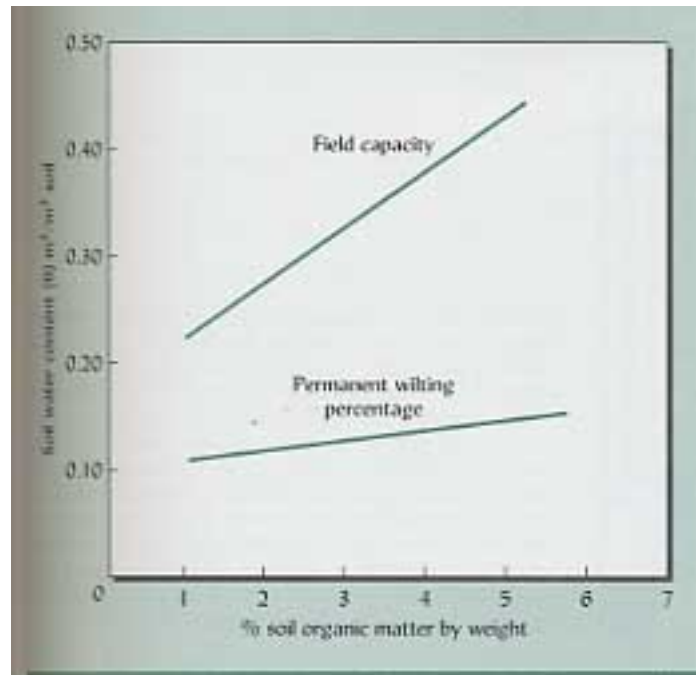


La quantité d'eau entre la capacité au champ et le point de flétrissement s'appelle la réserve en eau utile du sol (RU). On l'exprime en mm d'eau pour un sol donné.

Lien entre granulométrie du sol et réserve utile?



Effet de la matière organique sur la réserve utile ?



b. estimation de la réserve utile d'un sol ('taille du réservoir')

Il est très intéressant de connaître cette réserve utile d'un sol lorsqu'on a en la responsabilité de la gestion de ce sol en vue de réaliser une production végétale :

- prévoir si certaines cultures, exigeantes en eau, vont pouvoir être cultivées
- prévoir une gestion de l'irrigation
-

L'INRA d'Orléans a réalisé de nombreuses courbes de désorption sur un grand nombre d'échantillons de sols pour produire un tableau indicateur des réserves utiles des sols.

Exercice : profil de sol lessivé avec 4 horizons, % pierres, texture : estimer RU

Tableau 2 - Réserve en eau utile (RU) des horizons A et E, B, C en fonction de leur texture seule, puis de leur texture et de leur densité apparente.

Table 2 - Available water capacity for A horizons and E, B, C horizons according to their texture, then to both their texture and bulk density

Type d'horizon	Texture	Réserve en eau en mm cm ⁻¹					
		Sans prise en compte de Da			Avec prise en compte de Da		
		$\theta_{1.5} - \theta_{4.2}$ (pF 1.5 - pF 4.2)	$\theta_{2.0} - \theta_{4.2}$ (pF 2.0 - pF 4.2)	Da horizon	$\theta_{1.5} - \theta_{4.2}$ (pF 1.5 - pF 4.2)	$\theta_{2.0} - \theta_{4.2}$ (pF 2.0 - pF 4.2)	
A	ALO	1,42	1,24	1,10	1,53	1,30	
	AL	1,49	1,36	1,30	1,53	1,41	
	AS	1,73	1,73	1,50	1,50	1,41	
	A	-	-	1,30	1,80	1,58	
	LA	1,88	1,73	1,30	1,81	1,71	
	LAS	1,82	1,67	1,50	1,85	1,76	
	L			1,30	1,84	1,72	
	LSA	1,63	1,43	1,50	1,73	1,67	
	LM	2,28	2,13	1,30	2,37	2,26	
	LMS	1,94	1,83	1,50	2,33	2,19	
	L			1,30	1,98	1,83	
	LS	1,73	1,62	1,50	2,00	1,92	
	LLS	-	-	1,70	1,77	1,72	
	LL	-	-	-	-	-	
	SA	1,47	1,28	1,70	1,52	1,34	
	SL	1,74	1,31	1,50	1,57	1,28	
S	0,83	0,60	1,70	1,89	1,49		
			1,30	1,00	0,72		
			1,50	0,72	0,49		
E, B, C	ALO	1,24	1,12	1,25	1,67	1,49	
				1,35	1,25	1,04	
				1,45	1,23	1,12	
				1,65	1,01	0,93	
				1,65	0,75	0,68	
	AL	1,29	1,13	1,35	1,42	1,26	
				1,45	1,30	1,20	
				1,65	1,27	1,11	
				1,65	1,14	1,04	
	AS	1,15	0,95	1,65	1,28	1,10	
				1,65	1,15	1,01	
				1,75	0,98	0,85	
	A	1,10	0,93	1,65	1,18	1,07	
				1,75	0,96	0,87	
	LA	1,68	1,49	1,45	1,81	1,55	
				1,65	1,78	1,57	
	LAS	1,65	1,48	1,65	1,88	1,44	
				1,65	1,63	1,50	
	L			1,50	1,41	1,08	
	LSA	1,50	1,27	1,65	1,48	1,24	
			1,65	1,48	1,24		
LM	2,15	2,07	1,65	2,42	2,36		
LMS	2,19	1,96	1,65	2,11	1,80		
L	-	-	-	-	-		
LS	-	-	-	-	-		
LLS	-	-	-	-	-		
LL	-	-	-	-	-		
SA	1,26	1,03	1,65	1,34	1,07		
SL	1,55	1,16	1,65	1,74	1,44		
S	1,27	0,73	1,65	1,32	0,92		



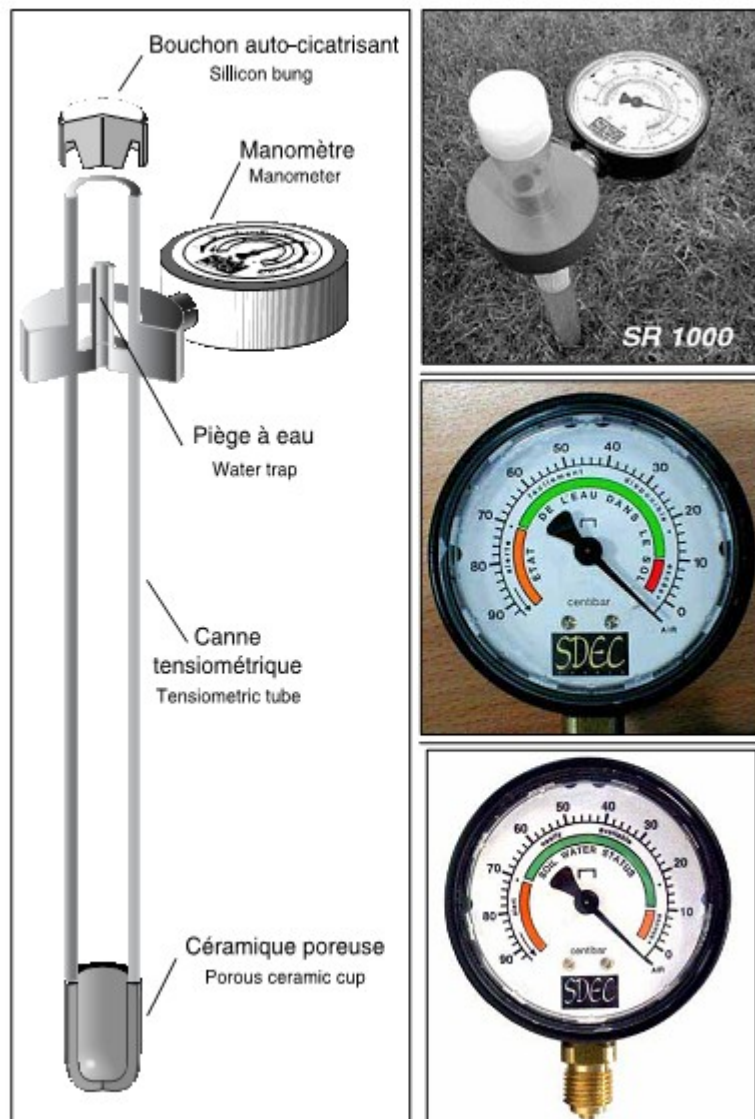
Connaître la réserve utile d'un sol est intéressant pour connaître son potentiel agronomique mais ce n'est pas suffisant pour gérer les apports d'eau au cours d'une culture, car la méthode du bilan hydrique (comment varie la réserve du sol en fonction de l'ETP, des précipitations, de l'irrigation..) est lourde à réaliser et n'est faite en pratique par aucun agriculteur...

Il existe un moyen qui se développe depuis quelques années, très pratique, rapide et peu coûteux : les sondes tensiométriques....

4.4.3 Tensiométrie

Il existe 2 types de sondes :

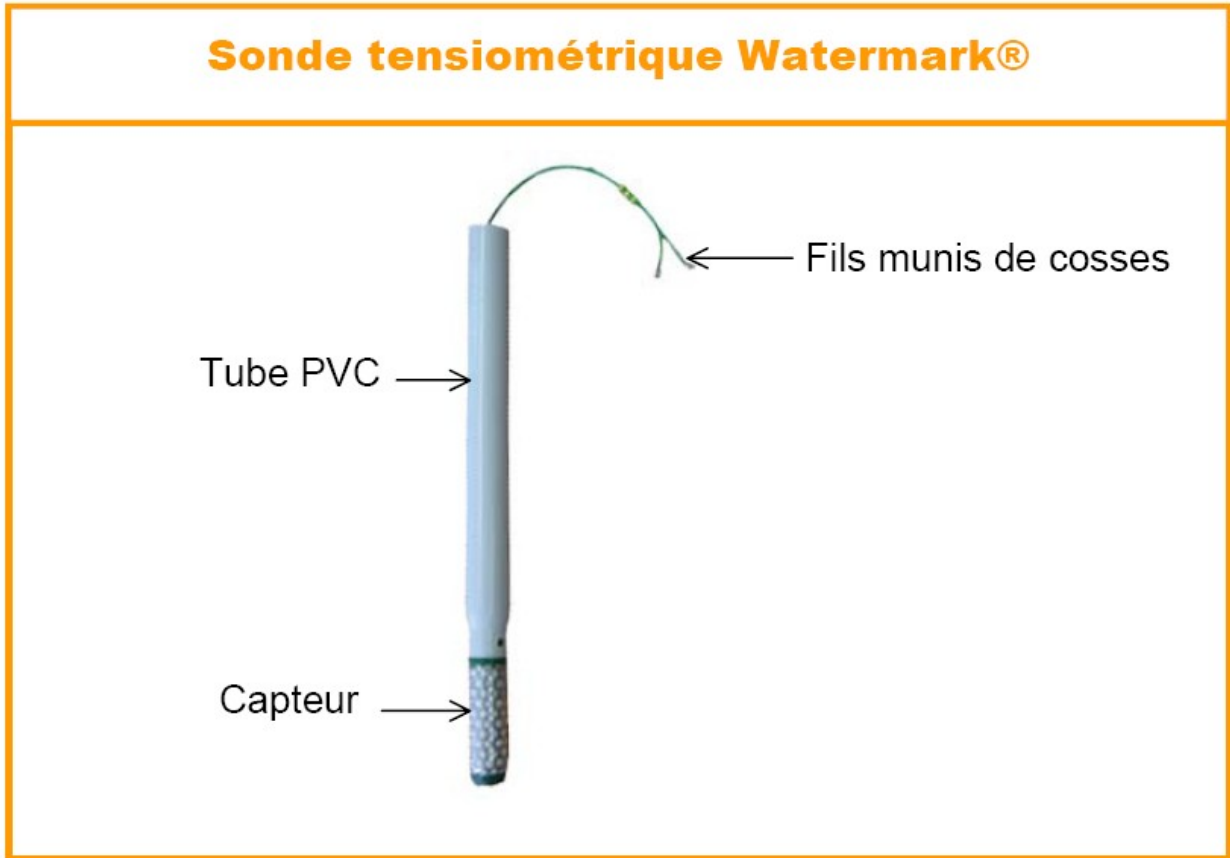
- les tensiomètres à eau (bougies poreuses céramique) ; le principe de mesure est basé sur la différence de potentiel hydrique entre le sol et l'intérieur de la sonde (saturation). La force engendrée active un manomètre à aiguille.





- les sondes tensiométriques

Elles mesurent la résistivité du sol, qui est corrélée au potentiel hydrique du sol (pF). L'avantage par rapport aux tensiomètres à aiguille est qu'elles ne nécessitent pas de remplissage à l'eau et qu'elles 'décrochent' à des potentiels plus élevés.



Exercice : Exemple de suivi de courbes tensiométriques