

INTRODUCTION A LA SCIENCE DU SOL

COURS POUR LES ETUDIANTS PPV EN S3

Présenté par : Ir Mohamed Mahmoud Khattar

Ingénieur principal (agro-pédologie)

I- Définitions

Le terme **pédologie** provient du grec pedon qui signifie sol et logos qui veut dire science.

Pédologie est une conception relativement nouvelle de la science du sol, qui a vu le jour sous l'impulsion de l'école russe à la fin du dix-neuvième siècle ; dans cette conception le sol n'est plus considéré comme un milieu inerte reflétant uniquement la composition de la roche sous-jacente; il prend naissance, il évolue, sous l'action des facteurs du milieu dits actifs, climat et végétation, aux dépens d'un matériau minéral.

La **pédogenèse**, (du grec pedon, sol, et de geneseôs, naissance) est l'ensemble des processus (physiques, chimiques et biologiques) qui, en interaction les uns avec les autres, aboutissent à la formation, la transformation ou la différenciation des sols.

Le Russe Vassili Dokoutchaïev est considéré comme le père d'une vision moderne de la pédogenèse dans la mesure où il est le premier à affirmer, à la fin du XIXe siècle, que le sol dépend à la fois de la roche, du climat, de la géomorphologie, des agents biologiques et du temps.

Le **sol** est la partie la plus superficielle de l'écorce terrestre, à l'interface entre géosphère, biosphère et atmosphère, car en effet il possède des constituants minéraux, venant de l'altération de la roche-mère, des constituants organiques, venus de la décomposition d'êtres vivants, et des constituants gazeux circulant dans ses interstices. De plus, le rôle du sol est fondamental, nous l'avons vu, dans la production primaire, puisqu'il fournit aux végétaux chlorophylliens les ions minéraux dont ils ont besoin.

Le **sol** est la couche de « terre » qui recouvre les continents. Une couverture très fine, de quelques centimètres à quelques mètres seulement, dans laquelle vient s'ancrer la vie : les plantes y plongent leurs racines, de nombreux animaux y trouvent le gîte et le couvert, les sociétés humaines y puisent nourriture, énergie, matériaux. De la naissance à la mort, le sol est lieu de vie, continu ou discontinu, pour des milliards d'organismes animaux et végétaux. Il est également lieu de mort pour y redonner la vie. Il recouvre les deux tiers des terres émergées mais seules 22% de ces dernières sont cultivables (soit seulement 5,5% de la surface totale de la planète).

II- Composition du sol :

Les principaux constituants du sol sont de quatre types : constituants organiques (débris d'organismes végétaux par exemple), constituants minéraux (sable, argile...), des gaz qui circulent dans les interstices du sol, et enfin la " solution du sol ", formée d'eau et d'ions.

Le sol est constitué d'une fraction solide (composée de matières minérales et de matières organiques, cette fraction est caractérisée par sa nature et sa texture) et d'une fraction fluide (fraction liquide ou solution du sol contenant les éléments minéraux sous forme d'ions ou de molécules d'eau, et fraction gazeuse) qui jouent un rôle primordial au niveau de

l'agrégation des constituants du sol, de la stabilité de la structure du sol et des propriétés physiques qui en découlent (porosité, aération...).

La phase solide (constituée à de plus de 95 % par la fraction minérale) occupe 40 % (sol très fragmenté) à 70 % (sol très compacté) du volume du sol, le reste correspondant à la phase fluide (liquide et gazeuse). Les proportions des phases gazeuse et liquide dépendent de l'hydratation du sol²³. La fraction minérale solide représente 93 à 95 % du poids total du sol²⁴.

A- Fraction solide

a- Fraction minérale

La fraction minérale représente l'ensemble des produits de l'altération physique puis chimique de la roche mère.

On peut les classer par diamètres décroissants (granulométrie) :

- les graviers et cailloux (> 2 mm)
- les sables (20 µm-2 mm)
- les limons (2 µm-20 µm)
- l'argile granulométrique (< 2 µm)

Tous ces éléments constituent le « squelette » du sol.

La fraction minérale est composée d'une fraction grossière et d'une fraction fine :

- fraction grossière, les particules ont un diamètre supérieur à deux micromètres : les graviers et cailloux, les sables, les limons. Cette fraction est sans intérêt immédiat pour les plantes, mais est primordiale pour garder l'eau en réserve dans le sol (macroporosité). Il s'agit du squelette du sol, qui finira par se transformer en fraction fine par altération ;
- fraction fine : les particules sont inférieures à 2 µm. Cette fraction est biologiquement et chimiquement active. Elle est composée de colloïdes minéraux.

La fraction minérale est principalement constituée de silicates (il en existe près de 1 000 connus, représentant 95 % des constituants de l'écorce terrestre), de carbonates, d'oxydes et d'hydroxydes métalliques (notamment l'oxyde et l'hydroxyde de fer)²⁵. Les silicates les plus souvent rencontrés sont les tectosilicates (le groupe des feldspaths représente environ 60 % de la masse de l'écorce et celui de la silice — quartz essentiellement — 10 à 13 %) et les phyllosilicates, parmi lesquels les minéraux argileux.

b- Fraction organique

- La matière organique du sol peut être définie comme une matière carbonée provenant de la décomposition et du métabolisme d'êtres vivants végétaux, animaux et microbiens (fongiques, bactériens). Elle constitue l'humus.
- Elle est composée d'éléments principaux (carbone-C, hydrogène-H, oxygène-O et azote-N), d'éléments secondaires (soufre-S, phosphore-P, potassium-K, calcium-Ca et magnésium-Mg), ainsi que d'oligoéléments.

B- Fraction liquide

La fraction liquide est constituée d'eau et d'éléments dissouts. L'eau est sous trois états dans le sol : l'eau gravitaire (dite aussi eau de saturation, eau de percolation ou eau libre) qui circule dans la macroporosité, l'eau capillaire (dite aussi aussi eau pendulaire) qui occupe essentiellement la mésoporosité et l'eau pelliculaire (dite aussi eau liée) qui occupe la microporosité.

L'eau capillaire et l'eau pelliculaire forment l'eau de rétention (eau retenue dans tous les horizons pédologiques), le ressuyage consistant à éliminer l'eau gravitaire. Cependant, seule l'eau capillaire correspond à la réserve utile en eau d'un sol, l'eau pelliculaire étant inutilisable par les plantes car retenue très énergiquement (phénomène d'adsorption) sous forme de films très minces autour des particules de terre

C- Fraction gazeuse

L'air du sol est constitué de gaz libres et dissouts qui occupent les pores abandonnés par l'eau lors de son retrait. Il a une composition toujours assez voisine de celle de l'air atmosphérique avec lequel il est en contact permanent. Les variations de la composition de l'air du sol, dues aux processus de transformation de nature biochimique se produisant dans le sol, tendent en effet à être compensées par le biais d'échanges avec l'atmosphère. Les pédologues observent cependant des différences, une plus forte concentration en dioxyde de carbone et une moindre concentration en oxygène. Ces différences sont imputables essentiellement à la respiration microbienne (dans une moindre mesure à la respiration des racines et de la flore aérobie) qui se traduit par la consommation d'oxygène, prélevé dans le sol, laquelle s'accompagne de la production de gaz CO₂. Les bactéries et microchampignons du sol produisent les 2/3 de CO₂, en moyenne 15 tonnes/ha/an³⁷.

III- Caractéristiques du sol

A partir de là, un sol va avoir différentes caractéristiques que l'on peut déterminer en effectuant des analyses physico-chimiques :

Texture : composition granulométrique du sol, c'est à dire la proportion de chacun de ses constituants solides (argiles, sables, graviers...) , qui ont des tailles différentes.

Structure : façon dont ses constituants sont agencés les uns par rapport aux autres. Dans un sol brun, on a des agrégats de sable et de complexe argilo-humique qui peuvent être agencés de façon plus ou moins fragmentée.

Porosité : volume total des espaces laissés libres entre les agrégats ou les particules solides. Elle conditionne la circulation de l'eau, des gaz et de certains animaux dans le sol.

La perméabilité : dépend de la structure du sol, c'est sa capacité à laisser passer l'eau vers les couches inférieures.

Capacité de rétention en eau : quantité d'eau retenue par le sol et soit utilisable par les plantes, soit liée à des particules solides par des forces physiques qui empêchent cette utilisation.

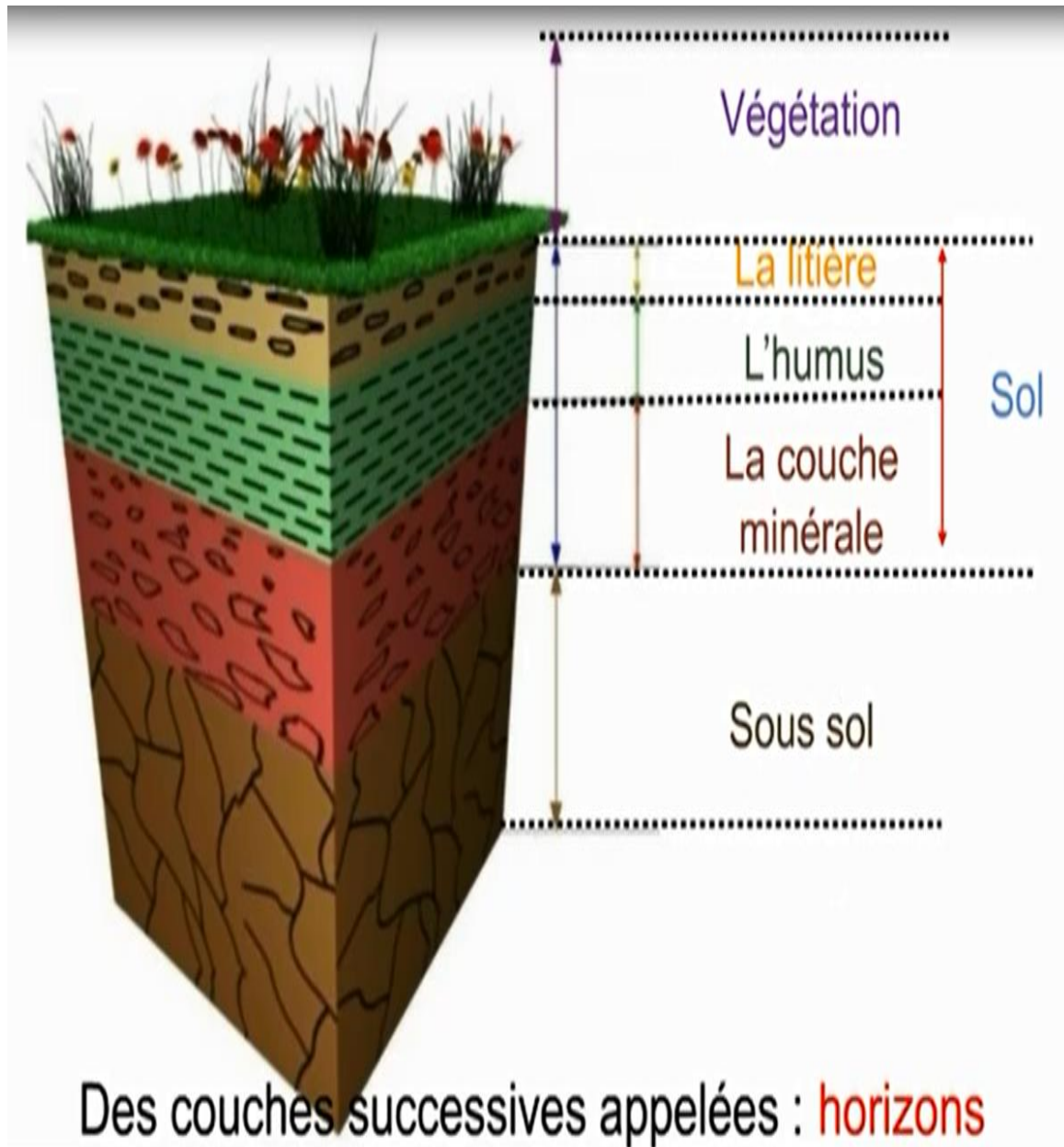
Le pouvoir absorbant : capacité à fixer des ions et à rendre ainsi plus aisé le passage de ces ions de l'humus aux racines des plantes, notamment par la création de complexes argilo-humiques, aussi appelés complexes absorbants, qui fixent des ions positifs apportés par les engrais. Leur présence dans le sol est un facteur essentiel de sa fertilité.

Comment se forme un sol ?

On peut distinguer globalement 3 étapes :

- ☐ **Altération de la roche mère** : elle est le résultat de processus physiques (gel, pénétration des racines...) qui fragmentent la roche, et de processus chimiques (action des eaux chargées d'acides) qui dissolvent calcaires et hydrolysent minéraux silicatés pour engendrer des complexes d'altération (argile, oxydes de fer, sels...) cimentant les grains résultant de la précédente fragmentation.
- ☐ **Incorporation de la matière organique par minéralisation de molécules organiques et humification**, c'est à dire édification d'acides humiques à partir des molécules issues de cette minéralisation.
- ☐ **Les horizons se différencient enfin sous l'action des eaux d'infiltration (lessivage)** : les éléments solubles sont entraînés et accumulés pour former des horizons dits d'accumulation.

Un sol possède donc une dynamique, dépendante des divers facteurs qui constituent son milieu.



Profil du sol (les horizons) :

Le profil de sol est l'ensemble des horizons d'un sol donné ; chaque horizon étant une couche repérable et distincte de ce sol. On parle aussi de solum ou des horizons du sol.

Horizon A : L'horizon A, aussi appelé Terre Arable, est par définition un horizon contenant à la fois de la matière organique et de la matière minérale

Horizon B : C'est un horizon enrichi ou horizon illuvial. Il est enrichi en divers constituants, selon les cas: argile, fer, matière organique, carbonate de calcium, etc.

Horizon C : C'est un horizon B peu évolué dans lequel on observe des changements de couleur et l'apparition d'une structure réellement pédologique remplaçant la structure originelle de la roche. Mais, il n'y a pas enrichissement net en argile ou autres matières

- **La texture du sol**

Texture – Granulométrie

- **granulométrie:**

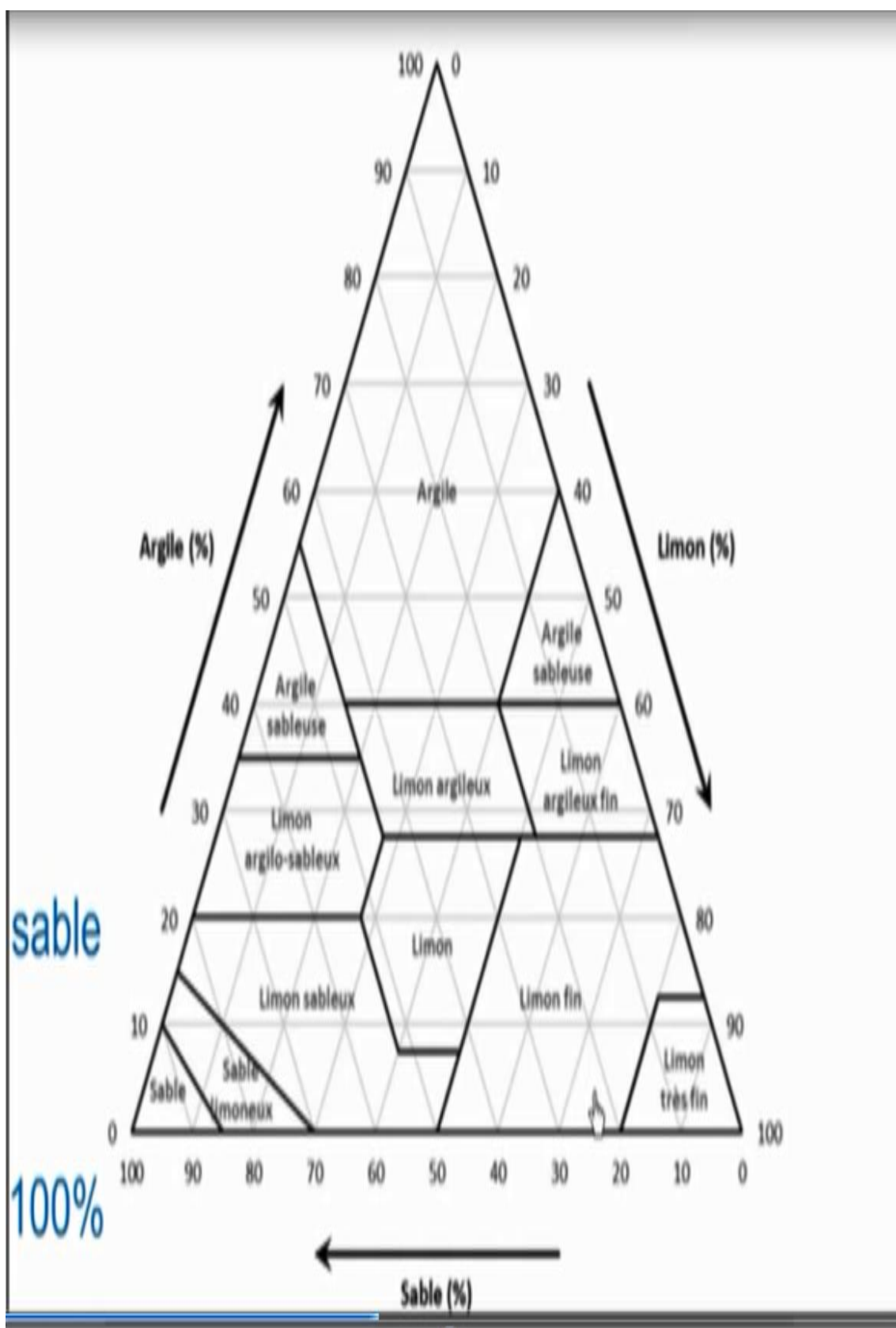
La granulométrie est l'étude de la distribution statistique des tailles des particules élémentaires qui constituent les ensembles des grains du sol : argile, limon, sable.

- **Texture:**

La texture d'un sol correspond à la répartition dans ce sol des minéraux par catégorie de grosseur (en fait, diamètre des particules supposées sphériques) indépendamment de la nature et de la composition de ces minéraux. La texture du sol ne tient pas compte du calcaire et de la matière organique.

La granulométrie d'un sol est rapportée dans le triangle granulométrique suivant pour connaître la nature du sol selon sa texture.

(Après les mesures, les valeurs obtenues sont converties en pourcentage)



La matière organique

La matière organique (MO) est la matière fabriquée par les êtres vivants (végétaux, animaux, champignons et autres décomposeurs dont micro-organismes). Les débris végétaux de toute nature, feuilles, rameaux morts, qui sous une végétation permanente, tombent sur le sol, constituent la source essentielle de la matière organique du sol, ils forment la litière qui subit une transformation essentiellement d'origine biologique appelée humification ; elle donne naissance à l'humus formé d'un ensemble de composés organiques colloïdaux de couleur foncée, le plus souvent résultant de néoformations microbiennes et ayant contracté de liaisons plus ou moins stables avec des éléments minéraux du sol (argiles, hydroxydes de fer et d'aluminium)

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** :

- amélioration de la stabilité structurale
- capacité de rétention des cations
- réserve d'éléments minéraux
- substrat de la vie microbienne

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.

- **la structure du sol**

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 :



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

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>en plaquette oblique</i> agrégats à orientation préférentielle oblique, à faces gauchies, presque toujours lissés et souvent striés, arêtes vives
	<i>polyédrique subanguleuse</i> agrégats à plusieurs types de face ou d'arêtes, forme mal définie, arêtes souvent émoussées		

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.

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 ($< 0,08\text{mm}$).

L'agrégation par liaison des colloïdes, l'activité biologique (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 ($< 0,08\text{ mm}$: chenaux de radicelles, de mycéliums...) et surtout de la macroporosité ($0,08\text{ a }5\text{mm}$).

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 compactes) à 60% (sols bien agrèges, riche en MO, avec une biomasse importante...)

Conductivité hydraulique

La loi expérimentale de Darcy (ou loi de Darcy) est une loi physique qui exprime le débit d'un fluide incompressible filtrant au travers d'un milieu poreux à l'échelle de travail. La circulation de ce fluide entre deux points est déterminée par la conductivité hydraulique ou le coefficient de perméabilité du substrat et par le gradient de pression du fluide. Dans le cas d'un cours d'eau ou d'un réservoir alimentant une nappe, ce gradient est lié à la hauteur de l'eau.

$Q = KA \Delta H/L$ où :

Q : le débit volumique (m^3/s) filtrant.

K : la conductivité hydraulique ou « coefficient de perméabilité » du milieu poreux (m/s), qui dépend à la fois des propriétés du milieu poreux et de la viscosité du fluide.

A : la surface de la section étudiée (m^2)

$\Delta H/L$: le gradient hydraulique, où ΔH est la différence des hauteurs piézométriques en amont et en aval de l'échantillon et L sa longueur.

La perméabilité intrinsèque est caractéristique d'un sol et est fonction de la grosseur des pores et de la distribution des différentes grosseurs, de la tortuosité des pores par rapport à un écoulement droit, et finalement de la texture du sol où les différents minéraux avec leurs surfaces spécifiques définissent l'intensité des forces d'adsorption dont découlent les frottements.

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 la rétention de l'eau et sa redistribution sur le profil par capillarité.

Surface spécifique : On appelle surface spécifique la surface des grains par unité de masse. Elle dépend principalement de la taille des grains (dans une moindre mesure de la forme des grains). Elle peut varier de $0,3 m^2/g$ pour les sables fins à plusieurs centaines de m^2/g pour les argiles de type Montmorillonite

PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS

1- Pouvoir adsorbant

Le sol possède des propriétés de retenue de diverses substances. En effet, les cations et les anions peuvent être retenus par le complexe adsorbant du sol (CAS), c'est-à-dire l'ensemble des colloïdes (substances humiques, argiles, sesquioxydes, etc.) dotés de charges négatives ou positives. Les ions y sont retenus sous **forme échangeables**, donc si l'on traite le sol par une solution contenant des ions différents de ceux retenus par le sol, il y aura un échange entre les ions du CAS et ceux de la solution.



L'absorption ionique dans le sol peut être considérée comme réversible. Les ions échangeables du CAS sont en équilibre avec la solution du sol ; toute modification de la composition de cette solution provoque un changement de cet équilibre, donc certains ions du CAS passent en solution (désorption) et sont remplacés par d'autres qui étaient en solution (adsorption).

Le pouvoir adsorbant est la propriété que possède le CAS de retenir à sa surface les ions provenant des solutions du sol.

2- La capacité d'échange cationique du sol (CEC)

La capacité d'échange cationique du sol est la quantité maximale de cations qu'un sol peut adsorber (pour 100 g de matière sèche), donc cette mesure représente le total des charges négatives du sol disponible pour la fixation :

- Des ions H^+ et Al^{+++}
- Des cations appelés bases échangeables : Ca^{++} , Na^+ , Mg^{++} , K^+

Elle est exprimée en milliéquivalents (méq) pour 100 g de matière sèche (le méq est le millième de l'équivalent qui est égale pour un corps de sa masse atomique (en gr)/ sa valence)

Exemple : un sol qui a une CEC de 20 Méq peut retenir

En Ca^{++} : $20 \times 40/2 = 400$ mg de Ca / 100 g de matière sèche

En Na^+ : $20 \times 23/1 = 460$ mg de Na / 100 g de matière sèche

La CEC d'un sol dépend de la nature de ses colloïdes et de son pH.

3- Le pH du sol

- Le pH du sol influe sur la croissance des plantes. Certaines plantes préfèrent un sol acide ($\text{pH} < 7$), d'autres un sol neutre ($\text{pH} = 7$), d'autres encore un sol basique - ou alcalin ($\text{pH} > 7$)

Très Acide $4 < \text{pH} < 6$	Acide à Neutre $6 < \text{pH} < 7$	Neutre à Basique $7 < \text{pH} < 7,5$
Pomme de terre	Tomate	Oignon
Patate douce	Navet	Laitue
	Courge	Concombre
	Céréales	Chou
	Aubergine	Carotte

LES GAZ DANS LE SOL

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 dissout dans la solution du sol et il y a des échanges entre ces deux états.

O₂ Atmosphère extérieure

O₂ Atmosphère du sol

O₂ en solution

Rapide

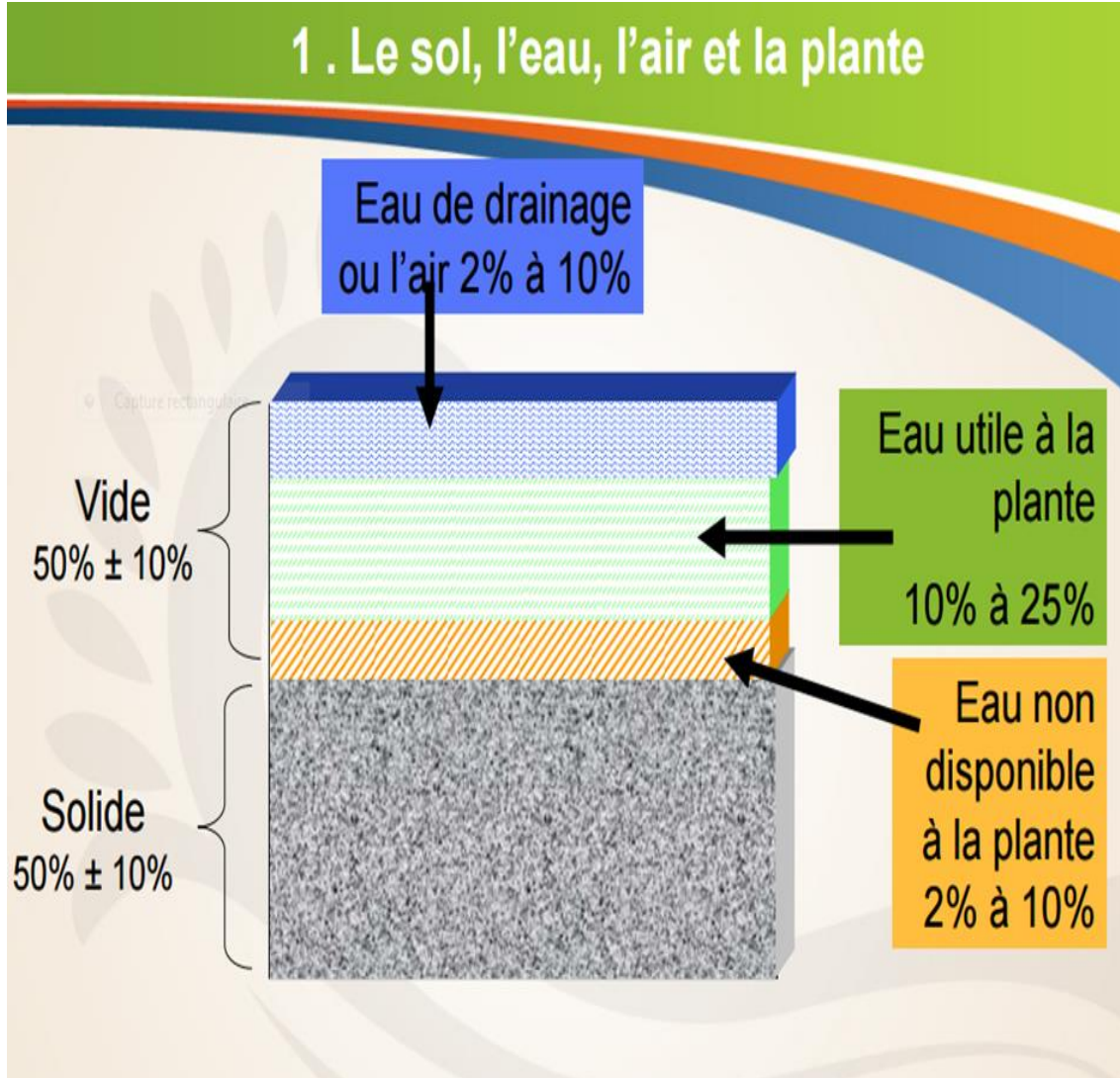
Lent

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%.

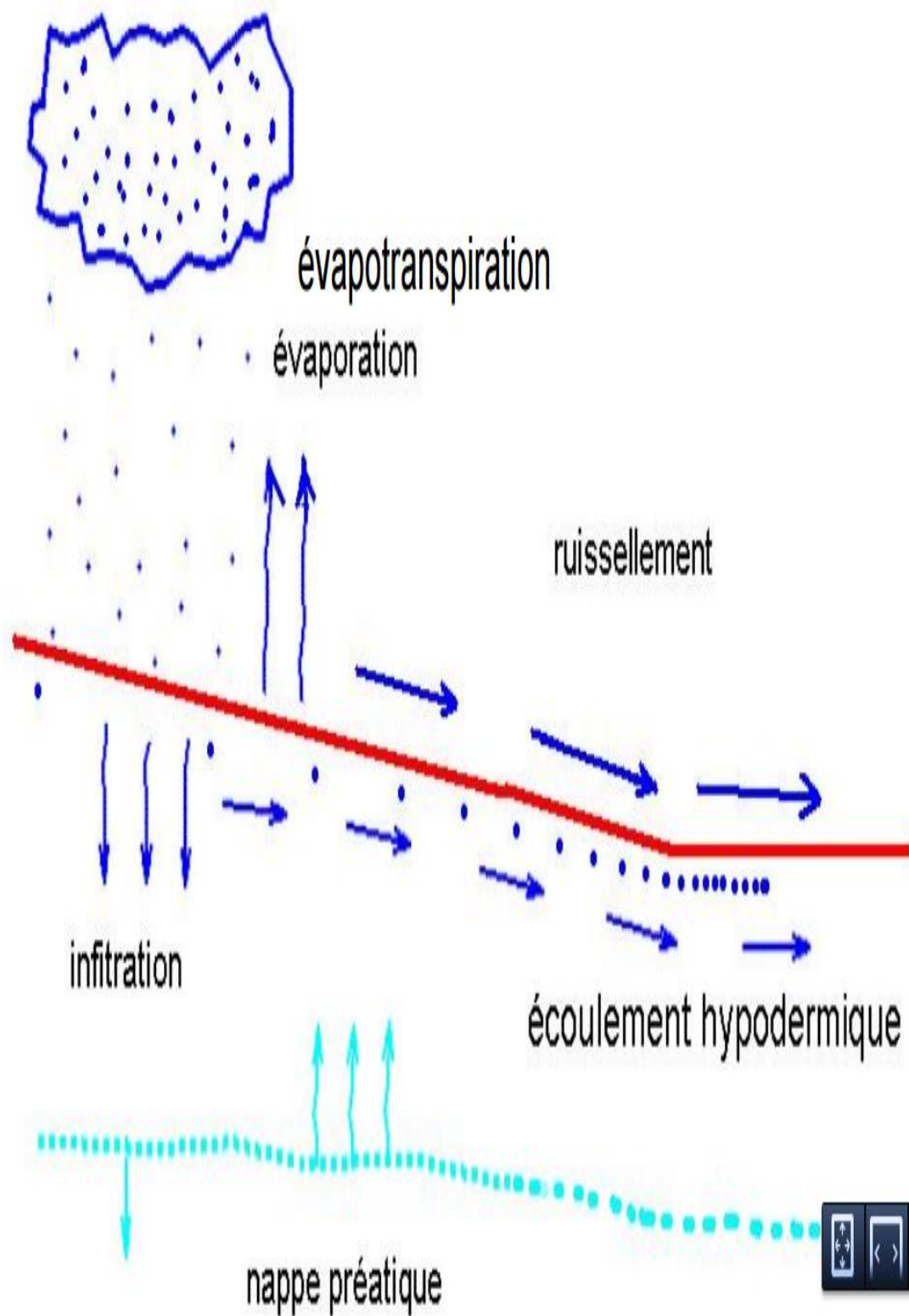
La teneur en CO₂ du sol est de 1 à 5, voire 10% alors que dans l'atmosphère extérieure, elle est de 0,035%.

III -L'eau dans le sol

A- Les composantes du volume de sol



Comportement de l'eau



Les formes de l'eau dans le sol

L'eau peut se trouver dans plusieurs états à l'intérieur d'un sol, ces états se distinguent essentiellement par l'intensité des forces qui lient l'eau et les grains.

On distingue classiquement :

1. l'eau de constitution qui entre dans la composition chimique/minéralogique de certains minéraux (essentiellement les argiles) ;
2. l'eau liée à la surface des grains (eau hygroscopique), qui est solidaire des grains ;
3. l'eau capillaire qui est retenue par les pores les plus fins du sol au dessus du niveau de la nappe : la zone de remontée capillaire peut être complètement ou partiellement saturée ;
4. l'eau libre (gravitaire) qui peut circuler dans les pores du sol sous l'effet des forces de pesanteur.

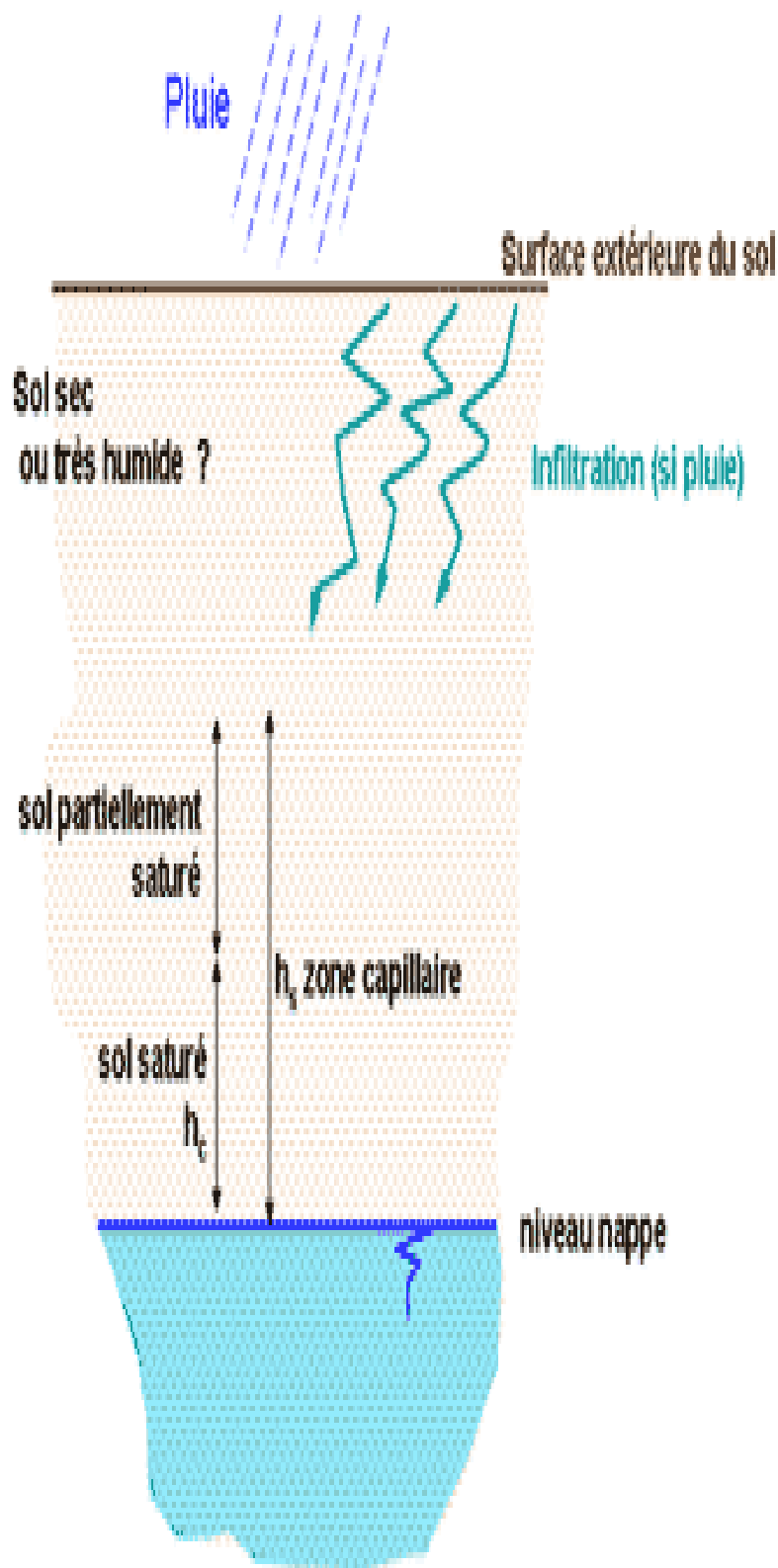
Remontées capillaires au dessus de la nappe

Les phénomènes de capillarité découlent de l'existence d'une tension superficielle des fluides qui se développe aux interfaces avec un autre matériau. Si l'on considère un tube de verre de faible section, les forces d'adhésion qui se développent entre la paroi du tube et l'eau entraînent une remontée de l'eau dans le tube.

La hauteur atteinte par l'eau sera inversement proportionnelle au diamètre du tube d :

$h_c = - 4 T / \rho_w g d$ où :

T est la tension capillaire, **ρ_w** la masse volumique de l'eau, **g** l'accélération de la pesanteur et **d** le diamètre du tube.



Une vision schématisée de l'humidité du sol au-dessus de la nappe

La pression hydrostatique exercée par une colonne d'eau de 10 mètres de hauteur est de 1 atmosphère. Lorsqu'un arbre de 10 mètres de hauteur veut faire monter de l'eau jusqu'aux feuilles au plus haut de son cime, il faut qu'il exerce une pression de succion de 1 atmosphère. Puisque les plantes ne peuvent pas exercer des pressions supérieures à 12 atmosphères leur permettant d'utiliser l'eau adsorbée, cela revient à dire qu'aucun arbre actuel ne pourrait faire monter de l'eau jusqu'à leurs feuilles si celles-ci sont situées à plus de 120 mètres du sol. Cela se confirme puisqu'on ne connaît pas beaucoup d'arbres qui atteignent ou dépassent cette taille.

IV- La classification des sols

Systématique des sols

La systématique des sols doit résoudre deux problèmes majeurs:

- ❑ Classer les sols mondiaux, en fonction de leurs genèses, de leurs propriétés fondamentales, donc fournir un cadre qui serve de base à la science pédologique.
- ❑ La classification des sols concerne le regroupement des sols ayant une gamme similaire de propriétés (chimiques, physiques et biologiques) dans des unités qui peuvent être géo-référencées et cartographiées. Les sols sont une ressource naturelle très complexe, beaucoup plus que l'air et l'eau.

Les sols contiennent tous les éléments chimiques naturels et combinent des états simultanément solides, liquides et gazeux. Par ailleurs, le nombre de caractéristiques physiques, chimiques et biologiques et leurs combinaisons est presque infini. Il n'est donc pas étonnant que de nombreuses approches différentes aient été proposées pour arriver à un regroupement judicieux des différents sols.

On peut distinguer trois étapes différentes pour illustrer le développement de systèmes de classification des sols.

- ❑ Les plus anciens systèmes de classification des sols (Russie, USDA 1938) ont porté sur l'environnement et les facteurs de formation des sols pour classer les sols en sols zonaux (déterminés par le climat et la végétation) et les sols azonaux et intra zonaux (déterminés par le matériau d'origine et le temps de développement).

La différence entre les sols azonaux et intra zonaux a été faite sur la base du développement du profil du sol.

- ❑ Un développement ultérieur a été axé sur les processus qui se produisent dans le sol lui-même (comme la ferralitisation, la salinisation, et l'accumulation etc.). Ces processus ont été grossièrement caractérisés par les propriétés du sol. Un bon exemple de cette dernière approche est le système de classification français (1967).
- ❑ La classification moderne des sols a commencé avec la publication de la 7e version de la *Soil Taxonomy*, où les propriétés du sol précisément définies et quantifiées en tant que telles, ou en combinaison, ont été utilisées pour définir

les «horizons de diagnostic ». Ceux-ci ont été utilisés à leur tour pour définir les grandes classes de sols.

Principales Ecoles de classification:

- ☐ Classification Russe;
- ☐ Classification de la FAO;
- ☐ Classification Américaine ;
- ☐ Classification Française.

Ex : Classification américaine

La première version publiée en 1960 cette classification est basée sur l'identification précise d'horizons diagnostic soigneusement hiérarchisés et définis par un ensemble de propriétés physiques, morphologiques et chimiques décrites et chiffrées par une grande précision.

Les ordres de la classification américaine:

1. Entisols : sols très peu évolués dépourvus d'horizons de diagnostic caractérisés;
2. Vertisols : sols à argiles gonflantes;
3. Inceptisols : sols peu évolués (à horizon de diagnostic)
4. Aridisols: sols de climat aride
5. Mollisols : sols à horizon mollique
6. Spodosols: sols à horizons spodiques (Podzols sont les sol typiques des conifères et de forêts d' [eucalypt](#) au sud de l'Australie).
7. Alfisols : Sols à horizons argileux altération réduite (typiquement sous un grand couvert forestier)
8. Ultisols: sols à horizons argileux, altération poussée;
9. Oxisols : sols à horizon oxique (majoritairement comme sol de la forêt tropicale humide)
10. Histosols : sols hydro morphes organiques.

Ex : Vertisols

Sols de couleur foncée, riche en argile gonflante ont été définis pour la première fois dans la classification américaine de 1960 qui en fait un ordre à part, cette idée a depuis lors été adoptée par la plupart des autres classifications.

En pédologie ou science du sol, le vertisol est un sol riche en argile du type 2/1 c'est-à-dire contenant une couche d'oxyde d'aluminium enserrée par deux couches de tétraèdres de silice. Il s'agit de smectite qui comprend en particulier le type « montmorillonite ».

Les montmorillonites ont un pouvoir de gonflement considérable lorsqu'elle passe de l'état sec à l'état humide le simple écartement des feuillets d'argile hydratées ne suffit pas pour expliquer les énormes variations de volume de la masse du sol qui ont sont constatées. Les molécules de l'argile gonflante ont tendance à former un réseau très simple en se juxtaposant bord à bord au lieu de s'empiler comme les illites : à l'état sec, ce réseau s'écrase, à l'état humide, il gonfle comme une éponge. L'homogénéisation du profil est liée à ces très fortes variations de volume de la masse argileuse

Morphologie et caractères physico- chimiques des Vertisols

Le caractère principal du profil des vertisols est son homogénéité, liée au brassage constant des horizons par les mouvements vertiques , la différenciation est faible sur une profondeur atteignant un mètre.

En règle générale la structure caractéristique des vertisols n'est pas bien visible qu' en saison sèche : l'horizon B est caractérisé par des fentes de retrait verticales plus ou moins larges (de 1 à 5 cm).

Malgré la faible quantité de matière organique (environ 2 % repartis de façon homogène dans le profil) , la teinte générale est foncée souvent noire, ce qui est lié à la qualité de cette matière organique très évolué : le C/N est de l'ordre de 15.

Propriétés agronomiques des Vertisols :

Influence sur la nutrition des plantes

Les Vertisols sont en général des sols fertiles, ils comptent parmi les plus fertiles des régions tropicales ; ils sont fréquemment voués à la culture du coton et ont été désignés par l'expression (black cotton soils). En fait, si la fertilité sur le plan chimique est élevée ,les propriétés physiques sont défavorables en raison de la

quantité excessive d'argiles gonflantes, la capacité du champ est certes élevée, mais le point de flétrissement étant également très haut, la quantité d'eau utile pouvant être mise en réserve dans le sol reste limitée, les mouvements vertiques et la fissuration profonde du sol en période sèche ont des effets très défavorables : ruptures des radicelles absorbantes, dessiccation profonde du profil, tassement et élévation de la densité apparente; le sol est difficile à travailler pendant une longue période, soit qu'il soit engorgé par l'eau , soit qu'il soit fortement durci en saison sèche.

VII - Les matières organiques du sol

Composées de 58 % de carbone organique en moyenne, les matières organiques du sol libèrent du dioxyde de carbone (CO₂) et des composés organiques en se décomposant sous l'influence du climat et des conditions ambiantes du sol. L'évolution du stock de carbone organique dans les sols résulte de l'équilibre entre les apports de matières organiques végétales au sol et leur minéralisation.

Le sol représente le plus grand réservoir de carbone de la biosphère continentale contenant environ deux fois le stock de carbone atmosphérique et trois fois le stock de carbone contenu dans la végétation (40 tonnes par hectare (t/ha) en sols cultivés et 65 t/ha sous prairies). Une augmentation des stocks de carbone organique des sols cultivés peut jouer un rôle significatif dans la limitation des émissions nettes de gaz à effet de serre vers l'atmosphère en stockant du CO₂ atmosphérique dans la MO des sols.

Matières organiques du sol

Le terme «**matières organiques du sol**» regroupe l'ensemble des constituants organiques morts ou vivants, d'origine végétale, animale ou microbienne, transformés ou non, présents dans le sol. Elles représentent en général 1 à 10 % de la masse des sols. Elles se répartissent en trois groupes :

- ☐ les Matières Organiques Vivantes (MOV), animale, végétale, fongique et microbienne, englobent la totalité de la biomasse en activité (racines, vers de terres, microflore du sol...),
- ☐ les débris d'origine végétale (résidus végétaux, exsudats), animale (déjections, cadavres), fongique et microbienne (cadavres, exsudats) appelés «Matières Organiques fraîches ». Associés aux composés organiques intermédiaires issus de l'activité de la biomasse microbienne, appelés produits transitoires (évolution de la matière organique fraîche), elles composent les MO facilement décomposables.
- ☐ des composés organiques stabilisés (« MO stable »), les matières humiques ou humus, provenant de l'évolution des matières précédentes. La partie humus représente 70 à 90 % du total.

Les rôles des matières organiques du sol

Le Complexe Argilo-Humique (CAH) est le relais entre les MO du sol et la plante.

A. Le Complexe Argilo-Humique et capacité d'échange en cations

L'humus et l'argile sont associés en un complexe : le Complexe Argilo-Humique. L'humus protège l'argile : en retenant l'eau, il évite sa dispersion. L'argile protège l'humus de l'action des micro-organismes en ralentissant sa minéralisation. Le tout forme un colloïde qui permet de stabiliser un sol. Argile et humus sont reliés entre eux par des cations comme le Ca^{2+} et le Fe^{2+} ou Fe^{3+} . Tous les cations n'ont pas le même pouvoir flocculant : $\text{Ca}^{2+} > \text{H}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$. Ainsi, parce qu'il fixe les cations, le CAH est le garde manger de la plante.

1. Le pouvoir adsorbant des colloïdes

L'absorption est la rétention de composants à la surface d'autres composés sans liaison. Le CAH, chargé négativement sur sa surface peut fixer les cations du sol.

2. La Capacité d'Echange en Cations

La Capacité d'Echange en Cations (CEC) est la quantité maximale de cations qu'un poids déterminé de sol peut retenir. Elle joue un rôle fondamental pour l'alimentation en éléments minéraux de la plante. La CEC dépend essentiellement du CAH du sol. La CEC sera élevée pour des sols argileux et/ou humifères et très basse pour des sols sableux. L'apport de MO dans un sol sableux a pour but d'augmenter cette CEC. L'apport de matière organique dans un sol argileux vise à stabiliser les argiles, limiter le lessivage et augmenter la CEC.

Elles jouent un rôle fondamental pour les autres compartiments de l'environnement en participant au maintien de la qualité de l'eau par leur forte capacité de rétention des polluants organiques (pesticides, hydrocarbures...) et minéraux (éléments traces métalliques). t Mais elles peuvent être aussi source de polluants potentiels, comme les nitrates et les phosphates. t Elles influencent également la qualité de l'air, par le stockage ou l'émission de gaz à effet de serre. Elles ont un rôle de puits ou d'émetteur de carbone (principalement sous forme de CO_2). Certains changements d'usage des pratiques agricoles favorisent le stockage du carbone dans les sols (conversion de cultures en prairies). Au contraire, la mise en culture de ces prairies entraîne une diminution du stock de carbone.

B. Les fonctions des MO du sol

Dans le sol, les MO assument de nombreuses fonctions agronomiques et environnementales (1) synthétisées dans la Figure 4 : t Elles assurent le stockage et la mise à disposition pour la plante, par minéralisation, des éléments nutritifs dont elle a besoin. t Elles stimulent l'activité biologique, étant à la fois source d'énergie et d'éléments nutritifs pour les organismes du sol. t Elles ont un rôle central dans la structuration du sol et participent à sa stabilité vis-à-vis des agressions extérieures (pluie, tassement...) en limitant notamment l'érosion hydrique. t Elles favorisent le réchauffement du sol (coloration plus sombre des matières organiques). t Elles contribuent à la perméabilité, l'aération du sol et la capacité de rétention en eau

L'évolution des MO dans le sol

Les MO du sol évoluent sous l'incidence de divers processus physiques, chimiques ou biologiques. Le processus physique correspond à la séquestration du carbone (Figure 5), qui est alors inaccessible par les microorganismes. Les transformations des matières organiques (4) se réalisent essentiellement par les processus de recombinaison (humification) et de dégradation (minéralisation).

A. L'Humification

La formation des produits stables « formation de l'humus, ou humification »(5), consiste en des recombinaisons et polymérisations de molécules organiques plus ou moins complexes. La nature biochimique des MO apportées au sol détermine le processus d'humification. Une des caractéristiques importantes de ce processus est l'incorporation d'azote (N) dans les macromolécules humiques, conduisant à un stockage de l'azote sous forme organique dans le sol.

Par exemple, en sol très peu aéré (tassement, hydro morphie), les MO s'humifient très peu, conduisant à des phénomènes de gleyfication dans un premier temps. Sans mesures rectificatives, cela peut aboutir, dans un deuxième temps, à la formation de tourbe.

Intérêt agronomique de la matière organique du sol.

En matière agricole, il convient de faire la distinction entre la matière organique fraîche et celle humifiée. C'est cette dernière qui joue un rôle important dans la fertilité des sols par l'évolution biochimique qu'elle y subit et par les propriétés physico-chimiques qui en découlent.

- La matière organique joue un rôle nutritionnel en fournissant des éléments nutritifs par l'intermédiaire des processus de minéralisation (notamment l'azote, le phosphore et le soufre).
- Elle a aussi un effet favorable sur les propriétés physico-chimiques du sol, effet d'autant plus marqué que l'humification de la matière organique est plus poussée :
- Elle régularise l'humidité de tous les types de sol : en favorisant l'évacuation de l'eau en excès des sols argileux. En augmentant la capacité de rétention en eau des sols sableux.
- Elle améliore les qualités chimiques du sol. Par sa réaction acide, ses propriétés colloïdales et sa minéralisation continue, l'humus agit sur les caractéristiques chimiques du sol et sur la nutrition des plantes.
- Elle augmente l'activité microbienne : la matière organique constitue, en effet, une source énergétique pour les micro-organismes.

B. La Minéralisation

C'est le passage du monde organique au monde minéral. Ce processus se déroule en plusieurs étapes :

- ☐ la minéralisation primaire qui concerne les matières organiques jeunes et la minéralisation secondaire ou minéralisation des produits stables (communément appelé « minéralisation de l'humus »).
- ☐ La minéralisation primaire est un processus assez rapide. Il aboutit à la libération de substances nutritives par désagrégation et dépolymérisations successives des matières organiques. Parmi ces substances, on trouve : l'eau, le CO₂, l'azote nitrique, les phosphates et sulfates, etc. Cette phase se déroule essentiellement sous l'action de la faune du sol et des microbes (champignons et bactéries). Ces matières minérales peuvent être assimilées par les plantes, adsorbées sur le complexe argilo-humique, perdues par lessivage ou reprise par certains microbes pour la synthèse de l'humine microbienne.
- ☐ La minéralisation secondaire est au contraire un processus très lent, à raison de 2 – 3 % par an. Elle affecte l'humus formé depuis de nombreuses années libère des quantités annuelles d'éléments nutritifs considérables qui sont mis à disposition des plantes.

La caractérisation des MO grâce à l'analyse de sol

Les laboratoires d'analyses de sols réalisent en routine la détermination du taux de MO, de sa teneur en azote total et le rapport carbone organique / azote total dénommé rapport C/N. Le taux de MO est un élément de base du suivi de la fertilité de la parcelle et un outil d'aide à la décision pour le raisonnement des apports. Cependant cette teneur ne présage en rien de la qualité des matières organiques. Des analyses complémentaires (fractionnement de la matière organique, biomasse microbienne, minéralisation du carbone et de l'azote) permettent de mieux caractériser ces matières organiques.

A. Les analyses de base

1. Le taux de matières organiques du sol

- ☐ L'analyse de terre permet de calculer le taux de matières organiques et aide au pilotage des apports de produits organiques pour l'entretien ou le redressement de ce taux.
- ☐ Le taux de MO d'un sol est calculé à partir de la mesure du carbone organique total d'un échantillon de terre fine.

2. La teneur en azote du sol

Les sols contiennent 2 à 10 t/ha d'azote, essentiellement sous forme organique située dans la couche labourée comprise entre 0 et 25/30 cm de profondeur. L'azote minéral est essentiellement présent sous deux formes : l'ion ammonium (NH_4^+), l'ion nitrate (NO_3^-). L'azote minéral présent dans le sol ne représente généralement que quelques dizaines de kg par hectare. L'azote total regroupe toutes les formes d'azote minéral et organique présentes dans un échantillon de sol, excepté l'azote gazeux. Il ne fournit aucun renseignement sur l'azote minéral disponible pour le végétal. Il s'interprète essentiellement au travers du rapport C/N. Sur les bulletins d'analyses, le dosage de l'azote total s'effectue par une méthode normalisée : la méthode Kjeldahl (NTK) qui cependant ne dose pas les formes oxydées (N-Nox). Donc $\text{NTK} = \text{azote organique} + \text{NH}_4^+$.

3. Le rapport C/N

C'est un indicateur de l'activité biologique des sols. Il renseigne sur : le degré d'évolution de la matière organique, l'activité biologique, le potentiel de fourniture d'azote par le sol (minéralisation).

B. Les analyses spécifiques de fertilité biologique des sols

Le rapport C/N n'est pas suffisant pour apprécier la diversité des MO et le fonctionnement biologique du sol. Il existe d'autres mesures complémentaires de fertilité biologique du sol : le fractionnement des MO du sol, la Biomasse Microbienne et la minéralisation du carbone et celle de l'azote

1. Le fractionnement des MO du sol

Le fractionnement granulométrique de la MO consiste à séparer selon leur taille, par tamisage à l'eau, les trois fractions de la MO qui se localisent dans les agrégats du sol

- **la fraction MO libre/rapide** (200 à 2 000 μm) : MO non protégée, elle est constituée de résidus végétaux associés à des composés microbiens. C'est la MO la plus sensible aux pratiques agricoles. Elle a un turn-over rapide, de 2 à 3 ans ;
- **la fraction MO libre/lente** (50 à 200 μm). Elle est située dans les micro-agrégats du sol (sites inaccessibles aux micro-organismes et/ou conditions défavorables à l'activité biologique) et est donc protégée physiquement de la dégradation. C'est la MO en cours de digestion avec un turn-over lent, d'une trentaine d'années ;
- **la fraction MO liée/lente** (< 50 μm). Il s'agit de la MO protégée chimiquement car en association intime avec les limons et les argiles et protégée biochimiquement car liée à sa composition intrinsèque qui la rend résistante à la dégradation. En général, cette fraction est en proportion majoritaire dans les sols cultivés. Elle a un temps de résidence de plus de 100 ans.

L'analyse de ces 3 fractions permettra d'apprécier la dynamique d'évolution des MO et l'effet des composts apportés sur la réserve naturelle du sol.

2. La Biomasse Microbienne

La mesure de la Biomasse Microbienne (BM) représente la quantité de microbes du sol : bactéries, champignons, protozoaires. Elle constitue un indicateur précoce de la dynamique des matières organiques qui réagit vite aux réactions favorables ou défavorables du milieu.

3. La mesure des activités microbiennes par incubations contrôlées :

L'objectif de la mesure de la quantité de carbone et d'azote potentiellement minéralisable est d'estimer les réserves de MO du sol potentiellement dégradables,

c'est à dire les réserves énergétiques facilement accessibles à la faune et à la flore, la stabilité des MO, ainsi que l'azote potentiellement disponible pour les plantes.

V- Analyses du sol:

1. L'échantillonnage:

La première étape concerne le prélèvement de l'échantillon, opération délicate. Il est important de réaliser un échantillon moyen représentatif de la parcelle à analyser. Vingt prélèvements en zigzag ou en croix doivent être effectués pour constituer un échantillon moyen de 500 g qui sera envoyé au laboratoire d'analyses. La profondeur de prélèvement sera de 0 à ± 25 cm, soit la couche arable. Il n'est pas conseillé de prélever un échantillon de terre par temps de pluie. Le prélèvement s'effectuera avant toute application d'engrais et en fin de saison hivernale.

2. L'analyse chimique des terres de potagers.

L'analyse chimique des terres poursuit deux objectifs distincts: soit de permettre le maintien des niveaux de production par un contrôle régulier de la fertilité des sols, soit de permettre l'amélioration de la fertilité des parcelles présentant des anomalies.

2.1. Analyse chimique classique des terres:

Cette analyse comprend :

- **la détermination du pH - KCl** qui mesure l'importance de l'acidité ou de l'alcalinité de la terre et informe sur les éventuels besoins en chaulage. Méthode recommandée: la potentiométrie.
- **le dosage du carbone oxydable** : l'humus qui est une substance organique, résultant de la décomposition des débris végétaux par la flore et la faune microbienne. Facteur capital de la fertilité, les micro-organismes dégradent progressivement la matière organique et la font évoluer vers des formes de plus en plus minérales qui seront assimilables par les plantes.
- **le dosage des éléments chimiques indispensables à la nutrition des plantes**
- **dosage des bases échangeables. K, Ca, Mg**: extractif recommandé: l'acétate d'ammonium EDTA pH 4.65. Méthode recommandée: la spectrophotométrie d'absorption atomique dans la flamme.
- **le dosage du phosphore échangeable** : Méthode recommandée: colorimétrie au bleu de molybdène

2.2. Analyse de la teneur en azote nitrique (nitrates) dans les terres agricoles. Cette analyse comprend:

- extraction des nitrates au KCl
- le dosage de l'azote nitrique Méthode recommandée: méthode colorimétrique de réduction des nitrates en nitrites au sulfate de cadmium.

3. L'analyse physique de terres de potagers

Cette analyse comprend: - l'analyse granulométrique qui permet de déterminer la texture du sol en séparant les particules minérales du sol en fractions argileuses, limoneuses et sableuses (limon grossier (20 à 50 µm) - fin (2 à 20 µm) - argile (0 à 2 µm) - sable (50 µm). Méthode recommandée: méthode de sédimentation - pipette de Robinson.

4. L'interprétation des résultats.

Les résultats des différentes analyses font alors l'objet d'un bulletin d'analyse qui est soumis à l'interprétation agronomique. L'agronome propose alors une réponse à la demande d'informations sur la fertilité de la parcelle et suggère un plan de fumure raisonné en fonction de l'occupation du sol, des antécédents, de l'ensemble des informations relatives à la parcelle et des résultats analytiques.

5. Fréquence de réalisation des analyses.

L'analyse granulométrique des parcelles de jardins familiaux ne doit se réaliser qu'une seule fois. Elle a pour objet de caractériser la parcelle au niveau de sa texture. Quant aux analyses chimiques présentées ci-dessus, il est recommandé de les réaliser une fois tous les trois ans.

VI- Le complexe argilo-humique

Le complexe argilo-humique (**CAH**), aussi appelé **complexe adsorbant** ou **complexe absorbant**, est l'ensemble des forces qui retiennent les cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ ...) sur la surface des constituants minéraux et organiques des sols (le mélange de minéraux argileux et d'humus constituant le "complexe argilo-humique" à proprement parler). Ces cations peuvent s'échanger avec la solution du sol et les plantes et constituent le réservoir de fertilité chimique du sol, c'est ce qu'on appelle la capacité d'échange cationique.

D'un point de vue chimique, argile et humus ne devraient normalement pas se lier entre eux car les micelles d'humus et d'argiles sont toutes deux électro-négatives, et se repoussent donc naturellement. Pourtant certaines communautés d'organismes vivant du sol (comme les vers de terre) sont capables de produire de tels complexes en liant les argiles et les humus.

On trouve ces complexes dans les agrégats constitutifs du sol où ils jouent un rôle écologique et agronomique majeur. Ils sont essentiellement d'origine biogénique (créés par le vivant) expliquent la stabilité (résistance à la pluie par exemple) et la productivité exceptionnelle des sols riches en humus et en matière organique. Ils protègent très efficacement les sols qui en contiennent de la battance des pluies ou de l'excès d'humidité.

Mais comment deux structures chargées négativement, alors qu'elles devraient se repousser, peuvent-elles être si étroitement liées ? Par l'intermédiaire de ponts cationiques chargés positivement et de « colles biologiques » :

- Le calcium a une action stabilisatrice. Il s'intercale entre l'humus et les feuillets des argiles, formant des ponts calciques très résistants et aérant la structure du sol.
- Le magnésium forme lui aussi des ponts cationiques mais avec une action de resserrement de la structure.
- Des ponts constitués d'hydroxydes de fer peuvent également se mettre en place, mais ils sont moins solides que les ponts calciques.
- Enfin, l'activité biologique a un rôle fondamental. La présence de molécules organiques permet d'"enrober" les complexes, ce qui les stabilise en présence

d'eau. Parmi ces substances, la glomaline, produite par certains champignons. Ces aspects sont développés dans la partie fertilité biologique.

Modalités de complexation

On connaît trois principaux processus de complexation de l'argile et de l'humus :

❑ Via des ponts calciques:

Ce sont les complexes les plus solides qu'on observe dans les sols calcaires, l'humus en vient à n'être pratiquement plus disponible par minéralisation et les agrégats du sol sont particulièrement résistants à la dispersion par les précipitations.

❑ via des ponts constitués d'hydroxydes de fer et d'alumine:

Ce mode de fixation est moins stable que celui assuré par les ponts calciques.

❑ via des ponts aluminium positionnés aux points de rupture des feuillets d'argile:

Ce type de pontage fait aussi intervenir un échange d'ions OH^- .

Qualités du complexe argilo-humique

Le complexe argilo-humique a la propriété d'être fortement adsorbant, ce qui lui permet de fixer de nombreux minéraux ; cette liaison « argile + éléments minéraux + humus » s'appelle la « complexolyse ». C'est un des nombreux phénomènes qui participent à la pédogenèse. La profondeur et l'importance de ce phénomène varient selon le climat, le pH du sol et la qualité des argiles et des humus en présence

Les propriétés adsorbantes de ces complexes sont agronomiquement intéressantes et même vitales, car seuls ces complexes sont capables de fixer dans le sol des cations qui sont des nutriments pour les plantes, qui seraient sans cela mobiles dans le sol, voire dans l'air ou la pluie : Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , protons H^+ qui peuvent alors attirer des anions ou groupements anioniques : phosphate PO_4^{3-} [réf. nécessaire].

Si le groupement ionique est composé d'ions calcium (Ca^{2+}), il prendra le nom de pont calcique

VII- Salinité des sols

Les sols salés ou sols halomorphes représentent un pourcentage important de la surface totale des sols dans le monde (Cherbuy, 1991).

Ils se différencient naturellement sous les climats plus ou moins aride, mais aussi tempérés, maritimes ou continentaux, là où l'évaporation excède les précipitations pluviales de façon permanente ou temporaire (Bouteyre et Loyer, 1992).

Par ailleurs le développement mondial de la culture irriguée entraîne et toujours une extension secondaire des terres salées liée à la dégradation chimique et physique des sols et à une mauvaise conduite de l'irrigation.

Définition et Dénomination des sols salés :

Les sols salés : sont ceux dont l'évolution est dominée par la présence de fortes quantités de sels solubles - plus solubles que le gypse- ou par la richesse de leur complexe absorbant en ions provenant de ces sels et susceptibles de dégrader leurs caractéristiques et propriétés physiques, en particulier leur structure, qu'ils rendent diffuse. Ces deux caractères de ces sols modifient également et diminuent le développement de leur végétation et des cultures que l'on peut y faire.

La salinité est provoquée par une concentration excessive de sels solubles dans le sol. Les principales espèces ioniques de sels sont celles de sodium, de calcium et de magnésium apparaissant sous forme de chlorures et de sulfates. Le chlorure de sodium (NaCl) est le sel prédominant. La salinité survient dans les régions côtières, arides et semi-arides. Dans les régions côtières, la salinité apparaît à cause de l'inondation par l'eau de mer et elle est souvent associée à des pH bas.

Dans les régions arides et semi-arides, la salinité apparaît le plus souvent dans les zones irriguées par canaux. Dans ces régions, l'évapotranspiration est très élevée, ce qui conduit à un mouvement ascendant de l'eau, se traduisant par une accumulation de sels au niveau de la zone racinaire. De tels sols salins sont caractérisés par la présence de croûtes de sel blanc à la surface du sol et sont souvent associés à des pH élevés.

- **Dans les régions arides et semi-arides, on observe deux types de sols.**
 1. Les sols «salins» correspondent normalement aux sols à pH inférieurs à **8,5** et ont une conductivité électrique de l'extrait de saturation supérieur à **4** mmho/cm à 25°C.

Le sol est dit «sodique» s'il présente des pourcentages de sodium échangeable supérieurs à 6 (PSE), et fortement sodique si le PSE est supérieur à 15.

Exemple : L'effet de la salinité sur la croissance du riz

- L'effet de la salinité sur la croissance du riz dépend du stade de développement auquel apparaît la salinité.
- Le riz est très tolérant à la salinité au moment de la germination.
- Il est très sensible au stade 1 à 2 feuilles de la plantule.
- La tolérance au sel augmente progressivement durant le tallage et l'élongation.
- La tolérance au sel décroît à partir de l'initiation florale jusqu'à la floraison.
- Le stage de maturation est peu touché par la salinité.

Les facteurs applicables aux sols salins sont:

- Les sols salins sodiques ont une très faible perméabilité et les problèmes d'adventices ne sont pas graves. Dans de telles conditions, la mise en boue n'est pas nécessaire.
- Un labour profond est nécessaire pour les sols très dégradés.
- Le tallage du riz est affecté, ce qui fait que pour augmenter les rendements, il est recommandé d'installer la culture avec de fortes densités de peuplement.
- Employer du sulfate d'ammonium comme source d'engrais azoté.
- Pour les sols salins sodiques, utiliser 8 à 15 tonnes/ha de gypse, en fonction des propriétés du sol afin d'améliorer l'état du sol et en conséquence le rendement en grain.
- Ajouter de la matière organique pour améliorer le sol.
- Cultiver des variétés tolérantes à la salinité (Sahel 201, Jaya)

Surveiller les désordres nutritionnels (carence ou toxicité en fer, problèmes de zinc) et les corriger rapidement. Bien gérer la pépinière au moyen d'un arrosage et d'un désherbage corrects pour produire des plantules saines.

Des plantules saines garantissent une bonne culture et un potentiel de rendement élevé.

Types de salinisation

✦ Salinisation **primaire** ou naturelle:

due aux sels se formant lors de l'altération des roches ou à des apports naturels externes:

- dans les régions côtières, intrusion d'eau salée ou submersion des terres basses
- inondations périodiques par de l'eau de mauvaise qualité
- remontée d'une nappe phréatique salée près de la zone racinaire

✦ Salinisation **secondaire** :

Induite par l'activité humaine; liée fréquemment à des pratiques agricoles inappropriées.

Causes principales de la salinisation

- Utilisation d'une eau d'irrigation de qualité médiocre et lessivage naturel insuffisant
- Remontée de la nappe souterraine à proximité de la surface et transport de sels par remontées capillaires

Caractéristiques des sols salés

Les sols affectés de problèmes de salinité présentent des concentrations excessives en sels solubles (sols **salins**), en sodium adsorbé (sols **sodiques** ou **alcalins**) ou les deux (sols **alcalino-salins**).

Les sels solubles concernés sont essentiellement : Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ , Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- (bicarbonates), CO_3^{--} et NO_3^-

Lessivage

Technique qui consiste à dissoudre les sels accumulés dans le sol par des apports d'eau importants et à les entraîner en-dessous de la zone racinaire par le mouvement descendant de l'eau.

Effets de la salinité des sols

- abaissement du **potentiel osmotique** p_o de la solution du sol:

$$p_o = 10^5 \cdot K \cdot CE \text{ (Pa)} = 10^3 \cdot K \cdot CE \text{ (cm)}$$

$0.28 < K < 0.38$ selon les sels; CE en $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 25 °C

- **toxicité** de certains ions (Cl, Na, D, etc.)
- **altération des propriétés du sol**, spécialement en présence de ions sodium

Appréciation du niveau de salinité d'un sol

- **conductivité électrique** à 25 °C d'un extrait de pâte saturée¹
- **alcalinité** représentée par le pourcentage de sodium échangeable (ESP) :

$$\text{ESP} = \frac{100 \text{ ES}}{\text{CEC}}$$

ES : quantité d'ions sodium échangeables (me/100g de sol)
CEC : capacité d'échange cationique (me/100g de sol)

¹ Extrait de pâte saturée : liquide obtenu par extraction sous vide de la solution d'un échantillon de sol mélangé intimement à de l'eau distillée jusqu'à la limite de liquidité (la surface de la pâte doit être brillante, mais il ne doit pas y avoir d'eau en excès).

Caractéristiques des différentes catégories de sols salés

	CE à 25°C (mS . cm ⁻¹)	ESP
Sols salins ¹	> 4	< 15
Sols alcalins (sodiques) ²	< 4	> 15
Sols alcalino-salins ³	> 4	> 15

¹ Pauvres en Na, mais riches en sels blancs (chlorures, sulfates, carbonates de Ca ou Mg); généralement à l'état floculé; lessivage efficace

² Riches en Na. Foncés en raison de la forte concentration en Na et de la dispersion de la MO. Sols dispersés: lessivage difficile et nécessité de remplacer le Na par un autre cation (Ca par ex.)

³ Structure généralement bonne mais pouvant se dégrader considérablement lors du lessivage. Nécessité d'apports de cations de substitution.

Il existe 2 mesures de la sodicité d'un sol :

1- Pourcentage de sodium échangeable (« Exchangeable Sodium Percentage - ESP »)

$$/(\text{Na}^+ \text{ échangeable} / \text{CEC}) * 100$$

2- Rapport de l'adsorption du sodium (« Sodium Adsorption Ratio - SAR »)

$$:[\text{Na}^+] / (0.5 * ([\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]))^{0.5}$$

Le sol est sodique si le « ESP » ≥ 15 ou si le « SAR » ≥ 13 .

Cependant, l'effet négatif du sodium se ressent à des valeurs plus faibles que 15 pour le ESP ou 13 pour le SAR, même des valeurs de 4-5 peuvent fortement réduire la stabilité structurale et faciliter l'érosion du sol.

Le SAR et l'irrigation

Qu'est ce que le SAR ?

L'index utilisé est le rapport d'adsorption du sodium (SAR) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative du sodium par rapport au calcium et au magnésium.

Risque du sodium pour l'eau d'irrigation

Une grande quantité d'ions [sodium](#) dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration. Ceci est dû au fait que le sodium présent dans le sol en forme échangeable remplace les [calcium](#) et les [magnésium](#) adsorbés sur les argiles de sol et cause la dispersion des particules dans le sol (c.-à-d. si le calcium et le magnésium sont les cations prédominants adsorbés sur le complexe d'échange du sol, le sol tend à être facilement cultivé et a une structure perméable et granulaire). Cette dispersion a comme conséquence l'altération des agrégats des sols. Le sol devient alors dur et compact (lorsqu'il est sec) réduisant ainsi les vitesses d'infiltration de l'eau et d'air, affectant ainsi sa structure. Le SAR est défini par l'équation suivante :

$$\text{SAR} = [\text{CNa}] / [\text{V}(\text{CCa} + \text{CMg})/2]$$

Où C : concentration en ion en mol/m³