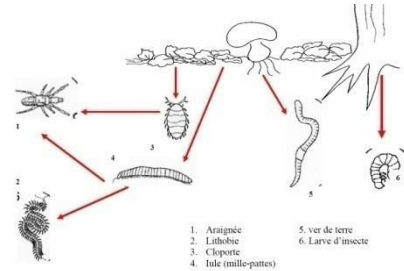


COURS



*Module Fonctionnement des Ecosystèmes Naturels
Option Biodiversité et Fonctionnement des Ecosystèmes Naturels
Environnement, S6*

CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES SOLS

I-DEFINITIONS

II- FONCTIONS DU SOL

II-1-Fonctions écologiques

II-1-1- Fonction de La production de biomasse

II-1-2- Fonction de milieu biologique

II-1-3- Fonction de déterminant de la qualité de l'environnement

II-1-4- Fonction « puits et sources dans les cycles biogéochimiques »

II-1-5- Fonction de réservoir biologique

II-2- Fonctions technologiques.

II-2-1- Fonction de support mécanique

II-2-2- Fonction source de matériaux

II-2-3- Fonction de réceptacle de déchets industriels et urbains.

II-3- Fonctions socio-économiques

III- LES CONSTITUANTS DU SOL

IV- LES FACTEURS DE DIFFERENCIATION DU SOL

IV-1- La roche mère (matériau parental)

IV-2- Le climat

IV-3- Le relief (topographie)

IV-4- Activité biologique

IV-5- Le temps

CHAPITRE II : LA FRACTION MINERALE DU SOL ET SON EVOLUTION

I- LES DIFFERENTS CONSTITUANTS MINERAUX DU SOL

II- ALTERATION DES MINERAUX.

II-1- Principaux aspects de l'altération

II-2- Processus d'altération

III- LES ARGILES

III-1- Structure générale des argiles

III-2- Propriétés des argiles

III-2-1- Substitutions isomorphiques et compensation de charges

III-2-2- Flocculation et dispersion des argiles

III-2-3- Le système argile eau

IV- LE PROFIL DU SOL

CHAPITRE III: LA MATIERE ORGANIQUE DU SOL

I- GENERALITES ET DEFINITIONS

II- EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE

- II-A- LA MINERALISATION PRIMAIRE
 - II-A-1- Les deux phases de la minéralisation
 - II-A-2- Composés impliqués dans la minéralisation
- II-B- HUMIFICATION
 - II-B-1- L'insolubilisation
 - II-B-2- Voie de l'héritage
 - II-B-3- La néosynthèse μbienne
- II-C- LA MINERALISATION SECONDAIRE
- III- PROPRIETES DES SUBSTANCES HUMIQUES
 - III-1- Charge, acidité, C.E.C.
 - III-2- La capacité d'hydratation
- IV- LE COMPLEXE ARGILO-HUMIQUE
- V- IMPORTANCE DE LA M.O.

CHAPITRE IV: PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL

- I- TEXTURE DU SOL
 - I-1-Analyse granulométrique
 - I-2-Représentation graphique
 - I-3-Influence de la texture sur les propriétés du sol
- II- STRUCTURE DU SOL
 - II-1- Espace poral
 - II-2- Différents types de structures (Voir planche)
 - II-3- Stabilité structurale
- III- BESOINS DES VEGETAUX ET DISPONIBILITES DU SOL
 - III-1- Besoins des végétaux
 - III-2- Formes d'absorption
 - III-3- Disponibilité des éléments dans le sol

Le pouvoir absorbant
- IV- VALEURS CARACTERISTIQUES DU COMPLEXE ABSORBANT
 - IV-1- Capacité d'échange cationique:C.E.C.
 - IV-2- Le pH du sol
 - IV-3- Rôle du complexe absorbant
- V- CONSTITUANTS CHIMIQUES DU SOL ET LEURS FORMES DANS LE SOL
 - V-1- Le phosphore
 - a- Rôle du P
 - b- Les différentes formes de P dans le sol et disponibilité à la plante
 - b-1- P dissous dans la solution du sol
 - b-2- Le P adsorbé ou autodiffusible
 - b-3-Le phosphore peu soluble ou insoluble
 - b-4- le phosphore organique
 - c- Dynamique de P dans le sol
 - V-2- L'azote
 - a- Rôle de l'azote

- b- Les différentes sources d'N dans le sol
- c- Les formes d'azote dans le sol.

CHAPITRE V: FONCTIONNEMENT BIOLOGIQUE DU SOL

I- L'ECOSYSTEME SOL

I-1- Notion d'écosystème

II- LA BIODIVERSITE DU SOL

II-1 LES ORGANISMES DU SOL

- La microflore <20 μ .
- La microfaune : 20 μ m<<100 μ m.
- La mésofaune 100 μ m-2mm
- La macrofaune > 2mm

II-2 Rôles fonctionnels des organismes du sol

III- LES SERVICES RENDUS PAR LA BIODIVERSITE DES SOLS.

IV- MENACES SUR LA BIODIVERSITE

V- MOYENS DE PRESERVATION DE LA BIODIVERSITE DES SOLS

CHAPITRE VI : DEGRADATION ET CONSERVATION DES SOLS

I-DEGRADATION DES SOLS

Définitions

I-A- Erosion des sols

I-A-1- Erosion hydrique

I-A-1-a- Facteurs de l'érosion

- ✓ Les activités humaines
- ✓ La régression du couvert végétal
- ✓ Les facteurs climatiques
- ✓ La topographie
- ✓ Le sol

I-A-1-b- différents types d'érosions hydriques

I-A-1-c-Conséquences de l'érosion hydrique

I-B- Erosion éolienne

I-C- Salinisation des sols

I-D- Pollution des sols

I-E- Pertes de sols par l'artificialisation

I-F- Pression sur les forêts et parcours

II-LES RETOMBEES DE LA DEGRADATION DES SOLS

II-A- Menace sur la sécurité alimentaire

II-B- Les changements climatiques

II-C- Dégradation des sols et pauvreté

II-D- Dégradation des sols et biodiversité

II-E- La désertification

II-F- Entrave au développement durable

III-MOYENS DE CONSERVATION DES SOLS

III-A- Plans et programmes nationaux

III-B- TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LA DEGRADATION DES SOLS

III-B-1- Mesures de lutte contre l'érosion hydrique

III-B-2- Lutte contre l'érosion éolienne

III-B-3- Lutte contre la salinité des sols

III-B-4- Lutte contre la pollution des sols

III-B-5- L'agriculture de conservation une alternative pour la conservation des sols

A méditer

- Les sols constituent le fondement de la vie des hommes, des animaux et des plantes, ainsi que le lieu d'une intense activité biologique.
- Il faut environ 100 000 ans pour former un sol rouge méditerranéen de 1 m d'épaisseur. Cette durée et les variations climatiques en font une ressource non renouvelable à l'échelle humaine (Ifen 1998)
- Si la formation du sol est un processus lent, la dégradation des terres cultivables, est en revanche un processus rapide.
- Selon un rapport de l'ONU publié en 2016, un tiers des terres arables de la planète sont plus ou moins menacées de disparaître.
- entre 25 et 40 milliards de tonnes de l'épiderme de la planète sont emportés chaque année à cause de l'érosion, du tassement, de la perte de nutriments et de biodiversité, de l'acidification, des pollutions, de l'engorgement ou encore de la salinisation.
- En 2018, la population mondiale a dépassé les 7,5 milliards de personnes, elle sera de 9 milliards en 2030.

□ Il y a une prise de conscience que les sols sont des ressources limitées et précaires :

- limitées : 23 % des terres émergées sont considérées comme cultivables, et 3 % à productivité élevée. *S. Bonin, Cours pédologie 2006.*
- précaires : soumises aux agressions climatiques et anthropiques qui entraînent dégradation, et finalement désertification.

CHAPITRE I GENERALITES SUR LES SOLS

I- DÉFINITIONS

Le sol est défini comme étant le produit d'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie, de l'atmosphère et les échanges d'énergie et de matière qui s'y manifestent.

Très ancienne, la science du sol se situe au croisement des sciences de la Terre et des sciences de la vie. Elle s'intéresse aux propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, qu'elle a longtemps considéré comme un milieu stable. Petit à petit, le sol s'est révélé être **un milieu vivant et évolutif**. Cette prise de conscience a donné le jour à une nouvelle discipline, **la pédologie** (du grec *pedon*, «sol», et *logos*, «science»), grâce à l'impulsion d'un savant russe, Vassili Dokoutchaïev, à la fin du XIX^e siècle.

Progressivement, science du sol et pédologie se sont confondues en une seule discipline. Plus récemment, on a proposé de limiter le terme pédologie à l'étude la pédogenèse (science de la formation et de l'évolution des sols), la science du sol gardant une acception plus générale.

Alors que pendant des décennies, l'étude du sol s'est beaucoup construite autour des **questions agricoles**, de fertilité et à la mise en valeur du territoire : aménagements, agriculture, sylviculture, aujourd'hui elle se tourne vers **des problèmes**

environnementaux de pollution des sols et de l'eau, d'érosion, de désertification, de risques naturels...

II- FONCTIONS DU SOL

Pendant très longtemps, la seule fonction du sol reconnue était de permettre la production d'aliments, et c'est sous les pressions exercées par diverses activités humaines que l'on s'est rendu compte de l'importance du sol en tant que compartiment de l'écosystème global représenté par « la surface continentale ».

On peut définir plusieurs fonctions du sol groupées en trois ensembles : des fonctions écologiques des fonctions technologiques et des fonctions sociologiques.

II-1-Fonctions écologiques

II-1-1- Fonction de La production de biomasse

A ce titre, **le sol permet de nourrir les hommes et les animaux**, son potentiel de production certes variable en fonction de la fertilité, étant permis par les processus d'adsorption, de biotransformations (carbone, azote) et de régulation, présents à son niveau.

II-1-2- Fonction de milieu biologique

Le sol est un **milieu où croissent et se développent de très nombreux organismes vivants animaux et végétaux** et c'est en cela qu'il remplit une fonction de milieu biologique. Cette fonction repose sur le fait que le sol constitue pour les organismes vivants qui s'y trouvent un environnement physique, physico-chimique, chimique et biologique.

II-1-3- Fonction de déterminant de la qualité de l'environnement

Le sol est un milieu de transit, de stockage et de transformation de très nombreuses substances, quelles que soient leurs natures, inorganiques ou organiques résultant de processus naturels ou d'activités humaines. Cette fonction est liée au **rôle du sol dans le déterminisme de la qualité des eaux, de l'air et de la chaîne alimentaire**.

II-1-4- Fonction « puits et sources dans les cycles biogéochimiques »

Le sol constitue une **plaque tournante dans les cycles biogéochimiques des éléments** en particulier dans les cycles du carbone, de l'azote, du soufre et du phosphore. Il se comporte à la fois comme **un milieu de stockage et comme un milieu de transformation**, ce qui en fait un compartiment de régulation des flux de matières et d'énergie fondamentale pour le fonctionnement des écosystèmes de la surface continentale.

II-1-5- Fonction de réservoir biologique

Le nombre et la variété des organismes vivants présents dans les sols font qu'ils constituent **une réserve biologique considérablement importante pour la biodiversité de l'écosystème terrestre.**

II-2- Fonctions technologiques.

II-2-1- Fonction de support mécanique

Cette fonction s'exerce à l'égard des végétaux mais aussi des outils et machines utilisées pour le travail du sol. Elle peut aussi être invoquée pour les bâtiments et les infrastructures de transport.

II-2-2- Fonction source de matériaux

Cette fonction a de l'importance dans de nombreuses régions dans divers pays en particulier pour la construction d'habitations.

II-2-3- Fonction de réceptacle de déchets industriels et urbains.

Cette fonction n'en est pas réellement une, mais de nombreux sites industriels et urbains ont reçu des déchets de toute nature dans des conditions le plus souvent incontrôlées.

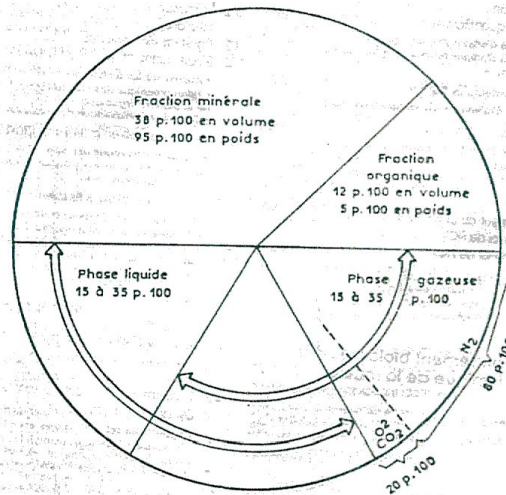
II-3- Fonctions socio-économiques

L'évocation historique montre l'existence de rapports complexes entre les sols et les civilisations. Les sols ont une valeur patrimoniale qui est de plus en plus prise en compte dans la gestion des territoires.

III- LES CONSTITUANTS DU SOL

Le sol apparaît comme un complexe dynamique à 3 phases : la phase solide, la phase liquide et la phase gazeuse. Ces différents constituants s'interpénètrent et s'influencent réciproquement (Fig.I-1).

**Fig. I-1
DE
COMPOSITION**



**EXEMPLE
DU SOL**

- La phase comprend, les minéraux et
- La fraction rassemble les dimensions, de compositions variées (pierres, graviers, sables, limon, argile, calcaire)
- La fraction organique, formée : d'organismes vivants divers et de résidus organiques à différents stades de leur évolution.
- La phase liquide est une solution dans l'eau d'ions minéraux et de petites molécules organiques. La phase liquide remplit complètement ou partiellement les espaces libres compris entre les particules solides
- La phase gazeuse composée de gaz (oxygène, azote et CO₂) et de vapeur d'eau. Elle occupe les espaces libres entre les particules solides non remplis par la phase liquide.

solide
constituants
organiques.
minérale
particules de
formes et de

IV- LES FACTEURS DE DIFFÉRENCIATION DU SOL

Cinq facteurs pédogénétiques (facteurs de formation et d'évolution du sol) sont responsables de la différenciation du sol.

- La roche mère (matériau parental)
- Le climat
- Le relief (topographie)
- Les organismes végétaux et animaux
- Le temps

Les facteurs roche mère, temps et climat sont indépendants, la topographie et l'ensemble des facteurs biologiques sont étroitement liés et présentent des relations particulièrement complexes avec les autres facteurs.

IV-1- La roche mère (matériau parental)

Son influence sur les propriétés du sol dépend de ses propriétés minéralogiques, physiques et chimiques en particulier:

- son origine (volcanique, sédimentaire, plutonique).
- sa dureté (résistance à l'érosion)
- sa composition chimique (la quantité et la nature des minéraux qui la composent, le bilan des ions basiques)
- sa structure (massive, friable, poreuse, fissurée, particulière..)
- sa perméabilité et la vitesse de circulation des solutions.

IV-2- Le climat

Il joue un rôle considérable dans la différenciation du sol. Il agit essentiellement par les précipitations et la température. Les autres paramètres du climat comme le rayonnement solaire, le vent, l'humidité de l'air ont aussi des effets sur la différenciation du sol en particulier par l'intermédiaire des végétaux. L'action du climat se résume en trois processus fondamentaux de la pédogenèse:

- l'altération et la transformation du matériau parental
- les processus de migration et d'accumulation des éléments (lessivage, lixiviation...)

lessivage: transport d'éléments (argiles, ions) composant un sol sous l'effet de l'écoulement des eaux d'infiltration

lixiviation: entrainement de sels solubles vers la profondeur

- l'évolution de la matière organique et sa distribution dans le sol.

IV-3- Le relief (topographie)

Le relief est un facteur essentiel dans la pédogenèse. Son effet peut être vu comme étant une combinaison de l'effet de la variation de la pente (degré et longueur) et de l'exposition qui modifie l'incidence du rayonnement et des précipitations sur le sol.

Le relief détermine :

- l'importance de l'infiltration et du drainage

infiltration : l'entrée de l'eau dans les couches rocheuses constituant le sol et le sous-sol, synonyme de ***percolation***

drainage : l'évacuation de l'eau gravitaire présente dans la macro-porosité du sol à la suite de précipitation

- l'incidence des précipitations et du rayonnement
- l'intensité du ruissellement et de l'érosion

ruissellement : Ecoulement par gravité à la surface du sol, suivant la pente de terrain, des eaux météoriques qui ont échappé à l'infiltration, à l'évaporation et au stockage à la surface du sol.

Le ruissellement est un des moteurs de l'***érosion*** : l'eau qui s'écoule entraîne avec elle des particules plus ou moins grosses en fonction de la quantité d'eau en mouvement et de la pente, ce qui peut avoir un effet abrasif sur le terrain soumis au ruissellement.

- l'importance du lessivage vertical et oblique

IV-4- Activité biologique

● La végétation

Elle peut agir

- par les racines : action sur l'altération des roches en modifiant l'ambiance physico-chimique au niveau de la rhizosphère
- comme source de matière organique et dans l'activation de la microfaune et la microflore du sol
- par son effet sur la transpiration qui fait remonter certains éléments solubles colloïdaux vers la surface
- pour protéger le sol contre l'érosion et réduire l'entraînement des éléments nutritifs surtout en forte pente.

- **les animaux et les microorganismes**

Les animaux interviennent dans le transport de la matière (terriers des animaux fouisseurs, sol transporté par les vers de terre et les termites) et la transformation de la matière organique (transformation dans le tube digestif des animaux).

Les microorganismes sont les principaux transformateurs de la matière organique. Ils interviennent dans plusieurs cycles d'éléments importants: le cycle de l'azote, du carbone et du phosphore...

- **L'homme**

Par ses actions positives ou négatives, l'homme modifie la nature et même l'évolution du sol. Par exemple, l'érosion accélérée actuelle est due à une exploitation intense des forêts, au surpâturage et la mise en culture après défrichage. Par contre le terrassement et le labour de niveau protègent le sol contre l'érosion.

- **Le temps**

Les propriétés et l'évolution du sol varient en fonction du temps à des échelles différentes; en fonction de l'heure de la journée, en fonction de la saison et aussi au cours des années (milliers, millions d'années)

CHAPITRE II

LA FRACTION MINERALE DU SOL ET SON EVOLUTION

I- LES DIFFÉRENTS CONSTITUANTS MINÉRAUX DU SOL

La fraction minérale du sol forme avec la fraction organique les constituants fondamentaux du sol.

Dans la fraction minérale on distingue :

- La fraction minérale grossière, organisée à base d'ions silicium reflétant la composition des roches mères (quartz, micas, feldspath).
- La fraction argileuse, issue d'un héritage ou de processus de néoformation également organisée à base d'ion silicium.
- Le carbonate de calcium peut être présent ou absent, mais représente la fraction dominante des sols calcaires.

La proportion des minéraux primaires diminue à mesure que décroissent les dimensions des particules. Ainsi, pour les particules de dimensions inférieures à 2μ , les minéraux néoformés remplacent les minéraux primaires et l'argile devient l'espèce dominante.

II- ALTÉRATION DES MINÉRAUX.

II-1- Principaux aspects de l'altération

Le sol provient de la désagrégation du matériau parental qui peut être la roche mère sous-jacente ou bien un sol résultant d'un transport par l'eau et le vent (sol allochtone). Cette désagrégation se produit sous l'action de processus énergétiques chimiques, physico-chimiques et biologiques. Le sol va être ainsi formé de minéraux primaires dits hérités dont la composition reflète celle du matériau parental et surtout de minéraux secondaires dits néoformés à partir des minéraux primaires sous l'action des différents processus d'altération.

II-2- Processus d'altération

Les mécanismes d'altération peuvent agir simultanément et se distinguent les uns des autres par leurs modes d'action et leurs résultats.

Les actions purement mécaniques des agents d'érosion produisent des fragments de même composition chimique que la roche d'origine. Les phénomènes chimiques donnent des solutions de lessivage qui sont exportées ou fournissent les éléments pour former de nouveaux minéraux dans le sol (néoformation). La contribution des organismes à cette couche, sous forme d'humus, aboutit à la formation d'un sol dont la nature et l'épaisseur varie selon les climats (fig. II.1)

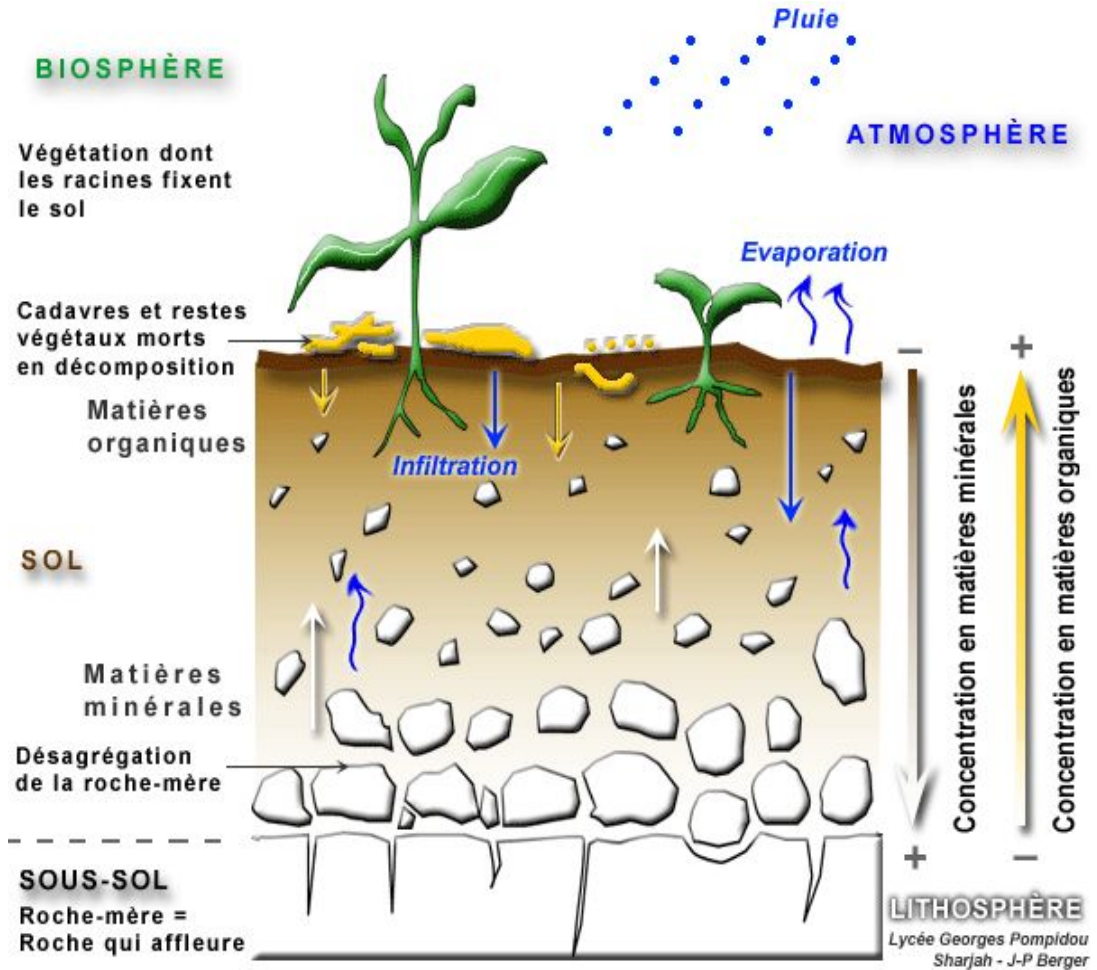


Fig.II.1: FORMATION D'UN SOL
LES ARGILES

III- 1- Structure générale des argiles

L'argile est la fraction minérale du sol dont la dimension des particules est $< 2\mu$. Généralement, ce sont des **phyllosilicates**, constitués d'un empilement de **feuillet** de structure bien définie, séparés par des intervalles appelés **espaces interfoliaires** dont les dimensions peuvent varier selon le type d'argile Fig.II-2.

Un feuillet est une superposition de plans ioniques organisés selon deux types précis de couches:

- **Le type tétraédrique:** l'ion Si^{4+} occupe le centre d'un tétraèdre dont les quatre sommets seraient les centres des ions oxygène. Les quatre charges - libres sont compensées par les charges + des cations voisins. Les dispositifs tétraédriques placés les uns à côté des autres constituent la **couche tétraédrique**.
- **Le type octaédrique:** l'ion Al^{+++} occupe le centre d'un octaèdre dont les six sommets seraient les centres des ions O^{--} ou OH^- qui compensent les charges + appartenant soit à des octaèdres voisins soit à des tétraèdres voisins.

On distingue:

- **les argiles de type 1/1** à deux couches (Te, Oc)
- **Les argiles de type 2/1** à trois couches (Te, Oc, Te)

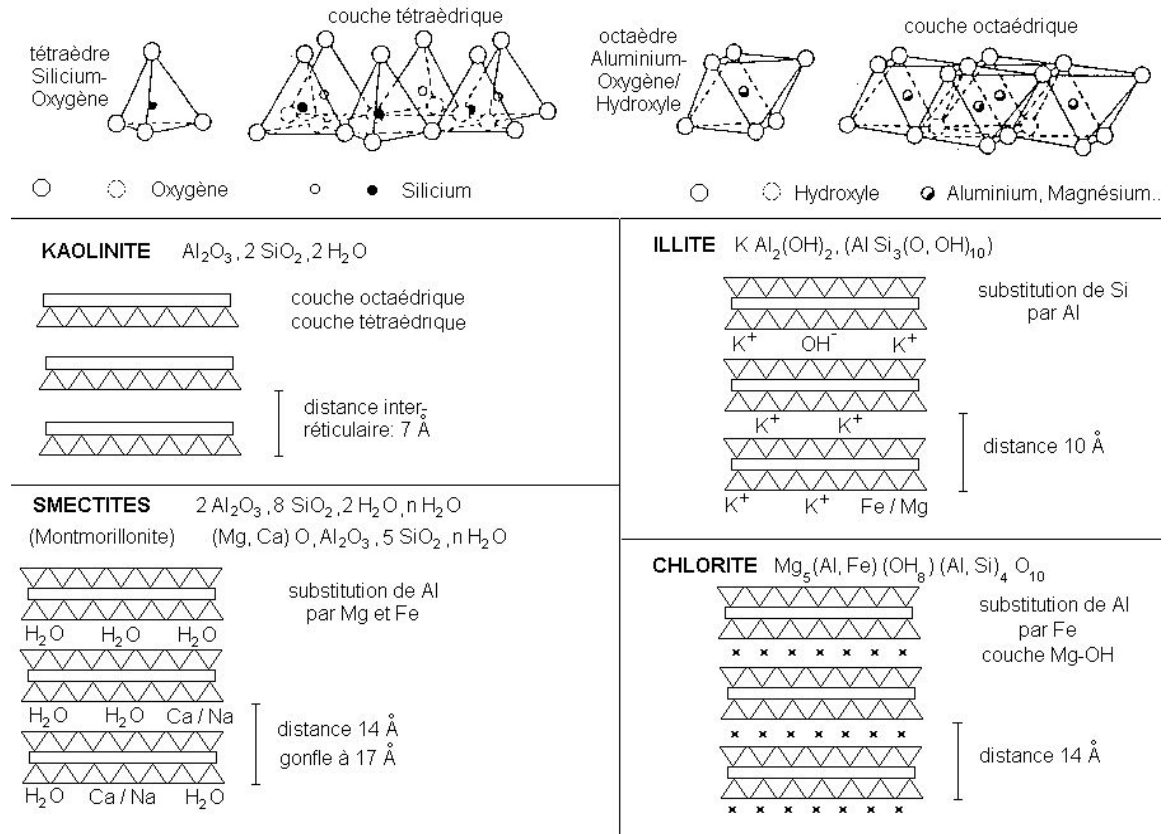


Fig.II-2 : STRUCTURES DES ARGILES

III-2- Propriétés des argiles

III-2-1- Substitutions isomorphiques et compensation de charges

Substitution isomorphique: Remplacement de Si^{4+} par Al^{3+} dans la couche tétraédrique, ou de Al^{3+} par Fe^{2+} ou Mg^{2+} dans la couche octaédrique -----> apparition d'une **charge négative non compensée** (trois charges + se substituent à 4+ ou bien 2 charges + à la place de 3 +) ----->

compensation des charges négatives par **des cations mobiles = échangeables** qui peuvent se placer soit sur les faces externes ou internes des feuillets, soit aux extrémités brisées des feuillets. Ce comportement constitue sur le plan agronomique, une propriété majeure des argiles du sol.

III-2-2- Flocculation et dispersion des argiles

Les argiles par leur ténuité sont des substances colloïdales -----> forment des suspensions stables dans un liquide = les particules d'argile demeurent régulièrement réparties dans la phase liquide.

Cause de la stabilité des argiles: répulsion mutuelle est permanente des particules chargées négativement. L'argile est dite dans ce cas **dispersée**

■

Addition de CaCl_2 -----> particules d'argile se tassent au fond du récipient -----> l'argile floculée. Cause de la flocculation: liaison de l'argile chargée négativement aux ions Ca^{2+} de la solution.
phénomène réversible -----> retour à l'état dispersé avec l'élimination de CaCl_2 .

Dans le sol, les argiles se trouvent généralement à l'état floclé par l'action dominante des ions Ca^{2+} et H^{+} . Cet état confère au sol des propriétés agronomiques essentielles:

- Organisation structurale aérée, favorable au développement des racines.
- Bonne perméabilité de l'air et de l'eau.
- Retrait modéré à la dessiccation.
- Adhérence modérée aux instruments aratoires.

III-2-3- Le système argile eau

Au contact de l'eau, l'argile s'hydrate d'une manière réversible. L'eau peut être retenue

- entre les particules d'argile et sur les surfaces externes.
- Dans les espaces interfoliaires. Les quantités d'eau absorbées dépendent des types d'argiles. La kaolinite et l'illite n'en retiennent pas (pas d'espace interfoliaire). Les smectites présentent de grandes possibilités d'hydratation.

III- LE PROFIL DU SOL

Le sol est un milieu en équilibre, souvent résultant de plusieurs années d'évolution. Cette évolution différencie à partir d'un matériau originel des couches successives ou **horizons** dont l'ensemble constitue le **profil du sol** (Fig.II-2).

Les horizons: couches continues ou discontinues plus ou moins parallèles à la surface dont les caractéristiques ont été affectées par les processus pédogénétiques (lors de la formation) et définies à partir des caractères morphologiques.

La plupart des classifications mondiales utilisent les 3 lettres majuscules pour désigner les horizons fondamentaux des profils ayant évolué en station drainée.

- **L'horizon A** horizon de surface, contient de la matière organique.
- **L'horizon B** est essentiellement un horizon d'accumulation, il résulte de l'altération du matériau minéral, différent de A et de C par son altération et sa structure.
- **L'horizon C** se forme par simple désagrégation physique de la roche mère
- **L'horizon R:** roche mère non altérée.

Les phases de la pédogenèse sont précisées par la formation progressive des horizons clés : (A)C \longrightarrow AC (incorporation de la matière organique) \longrightarrow A(B)C (formation de l'horizon d'altération) \longrightarrow ABC (redistribution de la matière organique de A vers B)

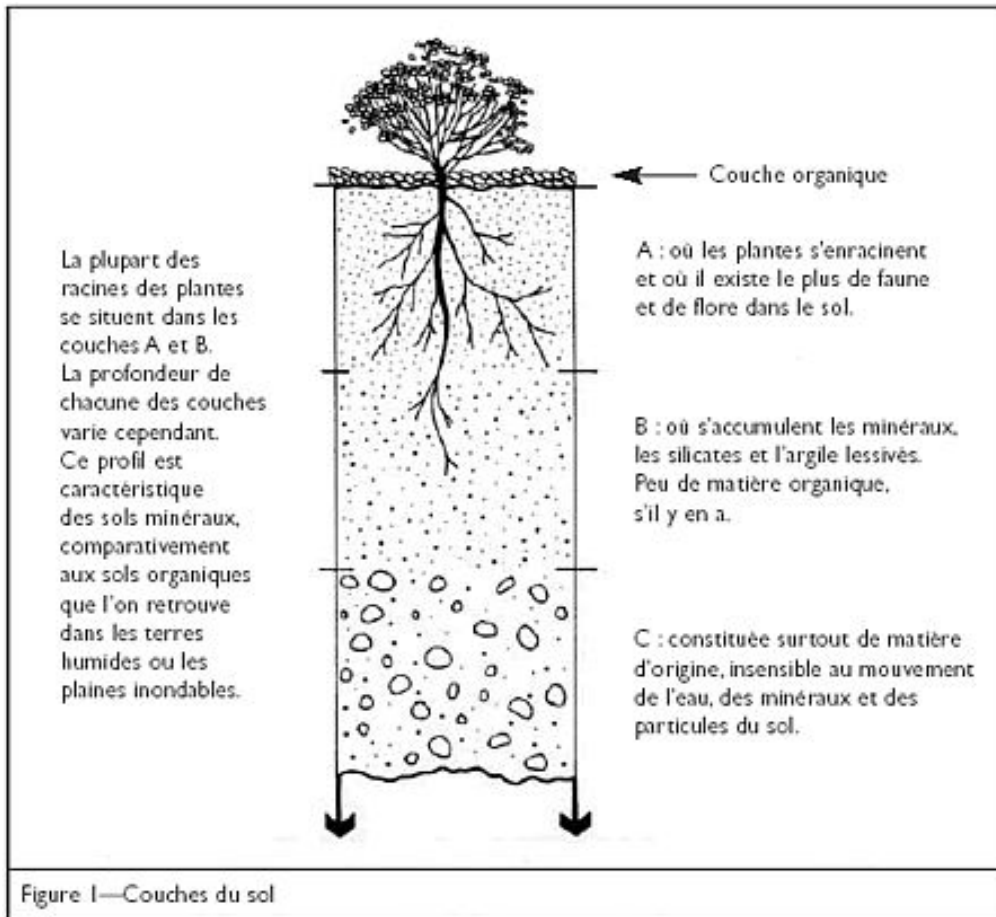


Fig.II-2 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN PROFIL DE SOL

CHAPITRE III: LA MATIERE ORGANIQUE DU SOL

I- GENERALITES ET DEFINITIONS

Le terme «matières organiques du sol» désigne l'ensemble des constituants organiques d'origine végétale, animale ou microbienne, morts ou vivants, transformés ou non, présents dans le sol. Elles représentent en général 1 à 10 % de la masse des sols. Les résidus végétaux constituent la première source de matière organique des sols.

Les constituants vivants sont :

- **Les tissus végétaux** vivants des plantes
- **Les animaux** du sol comprenant la microfaune, la mésofaune et la macrofaune
- **La biomasse microbienne** qui correspond à la microflore vivante du sol.

Les constituants morts comprennent :

- **La matière organique fraîche** (M.O.F.) qui regroupe la litière (débris végétaux à la surface du sol) mais aussi, les racines mortes, les exsudats racinaires, les déjections et les cadavres d'animaux. Cette M.O.F. va servir de support et d'aliment à la faune et à la biomasse microbienne.
- **La matière organique labile** ou matière organique transitoire, elle est issue de la dégradation de la matière organique fraîche. Cette fraction est la principale source de nutriments issus de la minéralisation de la matière organique. Elle a donc une forte importance agronomique du fait qu'elle assure la nutrition des plantes à court terme (cycle d'une culture).
- **La matière organique stable ou humus** dérive de l'assemblage de certains produits transitoires et de matières minérales en de nouvelles molécules de plus

en plus complexes. L'humus assure la fertilité du sol à moyen et long terme, il représente plus de 90 % de la matière organique totale d'un sol. Ainsi, la teneur en matière organique donnée par l'analyse de sol correspond en grande partie à cette forme.

II- EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE

La décomposition de la M.O. est définie comme étant le processus de séparation de matériaux organiques dans le sol de leurs constituants de base.

Sous l'action des microorganismes du sol, une partie de ces constituants subit le processus de minéralisation, c'est-à-dire la transformation en composés minéraux solubles ou gazeux: c'est « la minéralisation primaire».

Une partie échappe à la minéralisation et sert de matériau à l'édification de molécules nouvelles, de plus en plus complexes, dont l'ensemble constitue l'humus: c'est «l'humification». Ces composés humiques contractent des liens plus ou moins étroits avec les composés minéraux (argiles et oxydes).

L'humus peut à son tour se minéraliser mais plus lentement que la matière organique fraîche c'est « la minéralisation secondaire » (fig.III-1).

ORGANISMES VIVANTS

mort

SUBSTANCES ORGANIQUES

Non vivantes d'origine végétales,
animales, microbiennes

SIMPLIFICATIONS MOLECULAIRES

HUMIFICATION

SUBSTANCES HUMIQUES
COMPOSES ORGANIQUES

*MINÉRALISATION Ière**MINÉRALISATION IIère*

MOLECULES OU IONS DE PETITES DIMENSIONS

(CO₂, H₂O, NH₄⁺, HPO₄²⁻, SO₄²⁻, K⁺.....)**fig.III-1 EVOLUTION GÉNÉRALE DES SUBSTANCES ORGANIQUES
DANS LE SOL****II-A-LA MINÉRALISATION PRIMAIRE**

Dégradation de la M.O.F= simplification moléculaire

II-A-1-Les deux phases de la minéralisation

- la 1^{ère} phase de la minéralisation primaire correspond à une prolifération microbienne en présence de la M.O.F. avec dégagement de H₂O, CO₂ et la formation de produits transitoires.
- Dans la 2^{ème} phase de la minéralisation, à partir des cadavres microbiens et de la M.O. dégradée, il y a libération des substances nutritives, CO₂, H₂O, N nitrique, P, Ca, Mg, K, Na, oligo-éléments, ces composés vont être soit absorbés par les plantes, fixés par le complexe absorbant, perdus par lessivage ou vont participer à la synthèse des composés humiques par les microorganismes.

II-A-2-Composés impliqués dans la minéralisation

a- Sucres et amidon: utilisés par les microorganismes pour dégrader la cellulose.

b- Les composés phénoliques solubles: tannins, pigments, acides organiques, ce sont des groupements phénols ou quinones portant des radicaux aliphatiques (figure III-2).

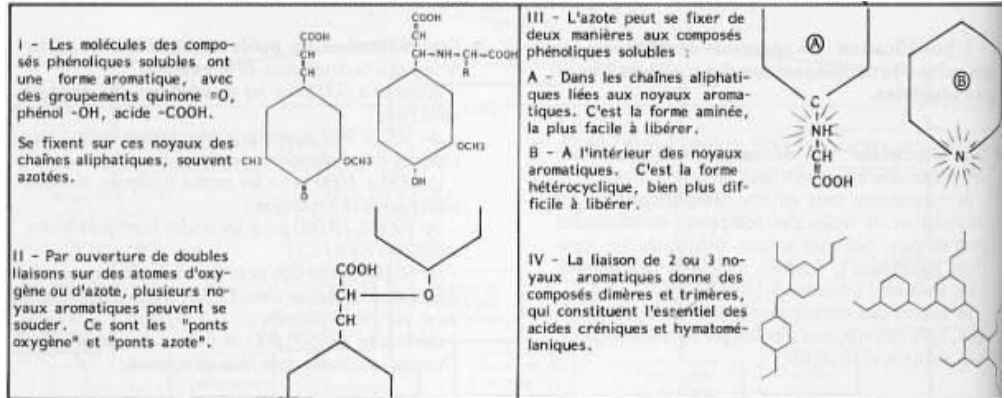


FIG.III - 2 : COMPOSES PHENOLIQUES SOLUBLES ; MOLECULES DE BASE DE L'HUMUS

Les noyaux aromatiques se soudent par des ponts oxygène ou azote ou fixer des chaînes aliphatiques.

Les composés phénoliques peuvent exister dans les tissus, provenir de la dégradation de la lignine ou bien sont synthétisés par les microorganismes à partir de la cellulose.

c- la cellulose

Sa dégradation, en milieu neutre et aéré, conduit à des sucres solubles.

d- la lignine

Groupements de noyaux aromatiques agglutinés polymérisés. Donc elle est très difficile à dégrader.

Sa dégradation en milieu aéré peu acide et riche en N permet la formation de composés phénoliques solubles, édification de composés humiques insolubles: les ac. humiques et humines.

e- les protéines

décomposition passe par 3 étapes :

Protéolyse: protéine □ polypeptide □ peptide □ aa □ amide (urée)

- Ammonification: formation de l'ammoniac
- Nitrification: en présence de O₂, ammoniac □ nitrites □ nitrates □ NO₂-

f- les autres corps organiques

nombreux éléments minéraux libérés par minéralisation de la M.O.: P, S, K, Ca, Mg, Fe, oligo-éléments qui seront absorbés par les plantes ou serviront à la synthèse des composés humiques.

II-B-HUMIFICATION

L'humification est un ensemble de synthèses qui permet l'édification de molécules complexes, l'humus stable. La minéralisation et l'humification se déroulent simultanément. Si la minéralisation est microbienne, l'humification est un processus à la fois physique chimiques et biologique (bactéries, champignons, faune du sol).

.Sous le terme général d'humification se cachent trois voies de synthèse de M.O. stabilisée, formant l'humus : l'héritage, la néosynthèse microbienne et l'insolubilisation.

a- la voie de l'héritage

Consiste en une conservation intacte de molécules complexes de lignine peu à peu transformée. Cette lignine peu décomposée donne alors l'humine héritée.

b- La néosynthèse microbienne

Les polysaccharides issus de la biodégradation de certains microorganismes peuvent se lier à la matière minérale pour donner l'humine de néosynthèse microbienne.

c- L'insolubilisation

Par oxydation, les noyaux aromatiques se soudent par des ponts N ou O, il en résulte des composés dimères ou trimères, puis les acides fulviques, puis les acides humiques et les humines.

Par polycondensation on a augmentation du noyau aromatique et diminution des chaînes aliphatiques (Figures III-3, III-4).

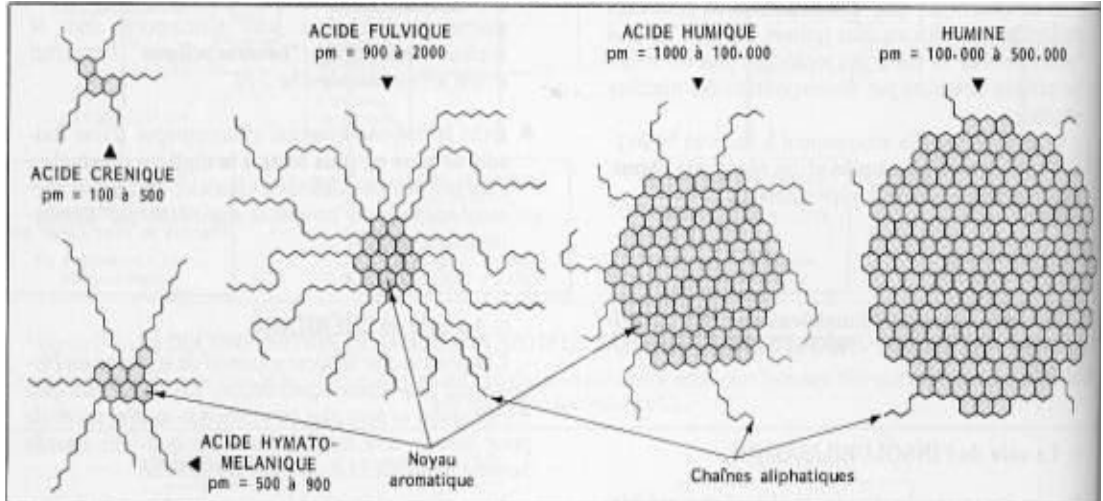


FIG.III-3 : LES MACROMOLECULES D'HUMUS

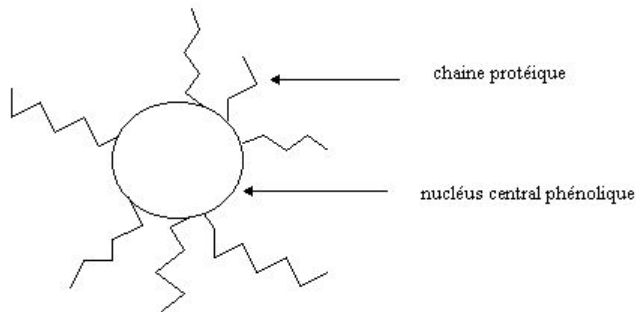


FIG.III-4 :STRUCTURE D'UNE MACROMOLECULE HUMIQUE

II-C- LA MINERALISATION SECONDAIRE

Minéralisation de l'humus stable. Se fait à long et à très long terme.
1.5 à 2% de l'humus est minéralisé/an.

III- PROPRIÉTÉS DES SUBSTANCES HUMIQUES

III-1- charge, acidité, C.E.C.

- Présence de COOH, l'humus se comporte comme un acide faible.
- Avec les bases du sol, l'humus donnera des humates: humate de Ca, humate de K, de Mg, de Na et d'ammonium.
- Formation des humophosphates facilement utilisables par les plantes.
- Fixation des H⁺ responsables de l'acidité du sol.
- Grande C.E.C. supérieure à celle de l'argile (5x).
- Grâce aux ions polyvalents, formation de complexes organiques stables.
- Agents complexants des cations métalliques ; 3 catégories des complexes dont la stabilité décroît dans l'ordre : Pb²⁺, Cu²⁺ > Zn²⁺, Cd²⁺ > Mn²⁺, Mg²⁺.
- En raison de leurs nombreux groupes fonctionnels, les molécules humiques possèdent une grande réactivité chimique et adsorption des molécules organiques non ionisées (éléments fertilisants, pesticides, polluants organiques)

III-2- La capacité d'hydratation

Forte capacité de rétention d'eau (15 x son poids)

Rôle dans l'économie de l'eau dans le sol

IV- LE COMPLEXE ARGILO-HUMIQUE

Les substances organiques se trouvent dans le sol sous des formes libres, de complexes organiques et de complexes argilo-humiques (50 à 100%) qui est une association argile humus liés essentiellement par des ponts cationiques (Figure III-5).

Argile-Z^{v+}-Humus (v: valence>1)

On parle de pont calcique lorsqu'on a

Argile- Ca²⁺ -Humus

Argile-Ca-O-CO-R

Humus

On peut avoir aussi ponts ferriques.

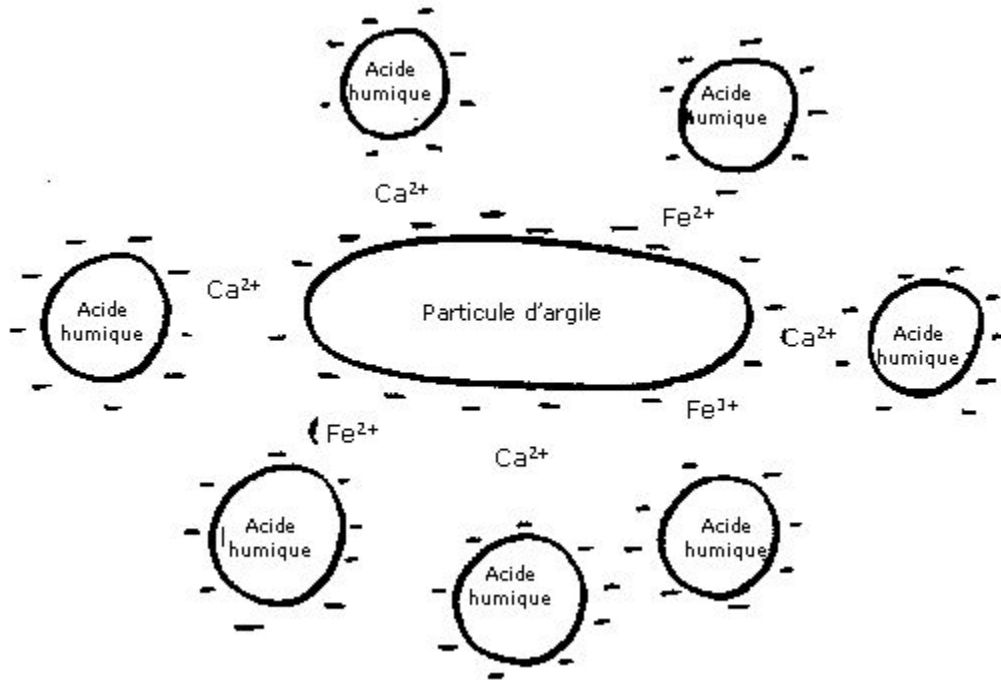


fig.III.5 : le complexe argilo-humique

Dans cette association;

- * l'humus protège l'argile contre la dispersion par l'eau de ce fait l'humus stabilise la structure.
- * L'argile protège l'humus contre la dégradation par les microorganismes donc favorise l'humification.

V- IMPORTANCE DE LA M.O.

- Par sa par minéralisation, la MO constitue une réserve importante d'éléments nutritifs N,P,S, K...95 à 98 % N, 20 à 80% P, majeure partie de S

- Augmente la C.E.C. du sol.
- Améliore la structure du sol, allège les sols lourds ce qui permet un bon enracinement, permet une meilleure porosité des sol et la circulation de l'eau dans le sol et favorise la stabilité de la structure.
- Grande capacité de rétention de l'eau par le sol.
- Support nutritif et énergétique de la microflore du sol (microflore qui intervient dans : le cycle des éléments, la dégradation des polluants)
- Capacité de piéger les polluants organiques potentiels, pesticides et produits pétroliers.
- Peut fixer les métaux et modifier leur solubilité et leurs possibilités de transfert dans le sol.
- Réservoir de carbone dans le sol. Permet de lutter contre l'effet de serre et le réchauffement climatique

CHAPITRE IV

PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL

I- TEXTURE DU SOL

La granulométrie ou texture est la répartition des minéraux selon leur grosseur. Ainsi, les particules élémentaires minérales du sol sont classées en quatre catégories selon leurs dimensions: graviers, sable, limon, argile.

- les pierres et graviers: éléments de dimensions > 2 mm.
- **Sables:** 2 mm-0,02 mm; sables grossiers: 2 mm-0,2 mm, sables fins: 0,2-0,02 mm.

- **Limons:** 0,02- 0,002 mm.
- **Argiles** < 2 μ

I-1-Analyse granulométrique

Evaluation quantitative de 3 classes de particules: sable, limon, argile

- Destruction des ciments responsables de la formation des agrégats.
- Elimination de la matière organique par l'eau oxygénée
- Destruction du calcaire par HCl
- Dispersion de l'argile par l'examétaphosphate de Na ou une résine cationique.
- Agitation mécanique par action mécanique ou action ultrasonique.

Dans la suspension ainsi réalisée, les particules élémentaires ainsi séparées se détachent d'autant plus vite qu'elles sont ténues. Elles obéissent à la loi de Stokes $V = Kr^2$. V: vitesse de sédimentation, K: constante pour une température donnée, r: rayon de la particule.

I-2-Représentation graphique

La classification des textures est matérialisée à l'aide d'un **triangle des textures**, dont les trois côtés correspondent respectivement au pourcentage de sable, de limon et d'argile pour un sol donné.

Les domaines délimités à l'intérieur du triangle correspondent aux différentes **classes de textures** (fig. IV.1)

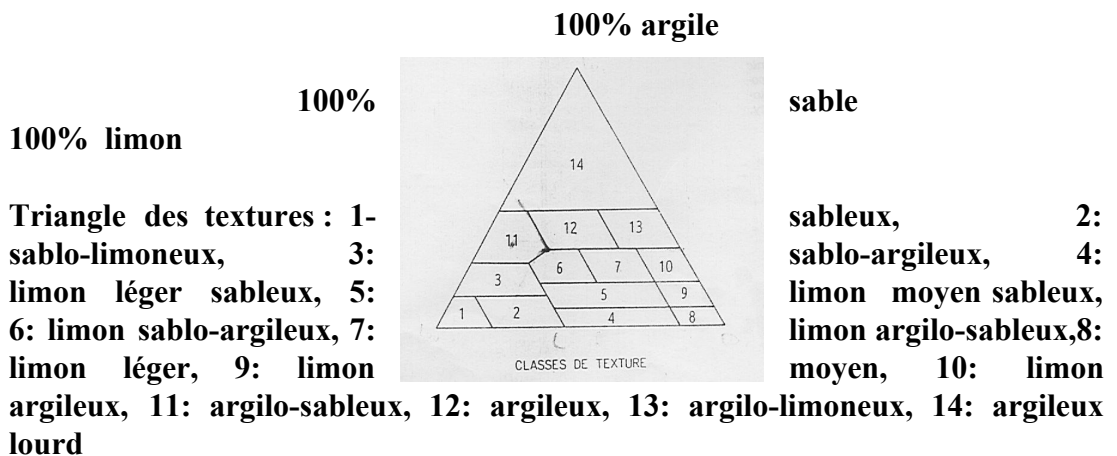


fig. IV.1- **CLASSES DE TEXTURES** (Jamagne, 1967)

I-3-Influence de la texture sur les propriétés du sol

- Texture sableuse: sol filtrant, bien aéré, facile à travailler, pauvre en réserves d'eau, pauvre en éléments nutritifs, faible capacité d'échange cationique.
- Texture limoneuse: l'excès de limon et l'insuffisance d'argile peuvent créer une structure massive rendant le sol imperméable ou "battant", cette tendance peut être corrigée par une suffisance en humus et en calcium.
- Texture argileuse: sol chimiquement riche mais à mauvaises propriétés physiques; milieu imperméable et mal aéré, formant obstacle à la formation des racines, travail du sol difficile en raison la forte plasticité (état humide) ou la compacité (état sec). Une bonne structure favorisée par l'humification corrige en grande partie ces propriétés défavorables.
- Texture franche: elle correspond à l'optimum dans la mesure où elle présente la plus part des qualités des types précédents sans en avoir les défauts.

Exemple de granulométrie favorable aux cultures: 25% d'argile, 30 à 35% de limons, 40 à 45% de sables.

II- STRUCTURE DU SOL

La structure du sol se définit par l'agrégation de particules élémentaires (sable, limon, argile) en amas, agrégats ou peds, séparées des agrégats voisins par des plans de faible résistance. La structure du sol désigne donc l'arrangement spatial des particules minérales du sol ainsi que leur liaison par l'intermédiaire de ciments minéraux, organiques ou organo-minéraux (substances humiques, des hydroxydes de fer, de manganèse ou d'aluminium, ciments de calcaire ou de silice...). La présence ou non de structure dans un sol est fonction de la présence ou non d'agrégats (fig. IV.3, fig. IV.4). Ainsi, un sol sans agrégats est sans structure alors qu'un sol avec agrégats est structuré.

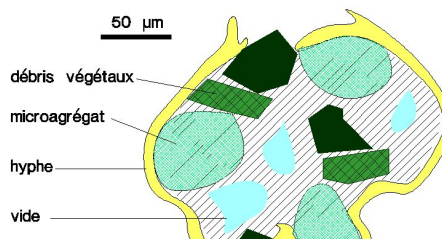
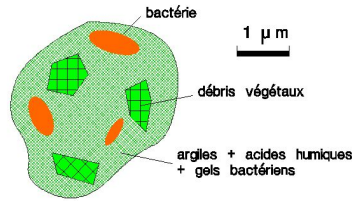


fig. IV.3- STRUCTURE SCHEMATIQUE D'UN MACRO-AGREGAT.

fig. IV.4- STRUCTURE D'UN MICRO-AGREGAT.



SCHEMATIQUE

Le micro-agrégat est le plus cohérent du sol. La réunion de forme un macro-agrégat dont l'assemblage donne une motte.

petit assemblage micro-agrégats

II-1- Espace poral

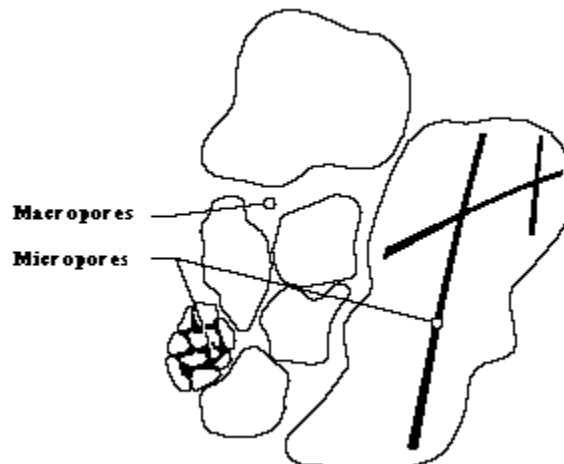
En s'agglomérant, les particules créent des vides occupés par de l'eau ou des gaz (oxygène, azote, CO₂). Ce sont ces vides qui constituent l'espace poral du sol (porosité) (fig. IV.5).

Suivant la taille des pores, il est possible de distinguer :

- macroporosité où l'eau circule par gravité, elle représente le volume occupé par l'air après ressuyage. associée à l'espace entre les agrégats, la macroporosité est une propriété dynamique qui contrôle la perméabilité du sol. Plus l'agrégation du sol est développée, plus la circulation de l'eau y est facile, ce qui permet d'éviter les excès d'eau et les engorgements printaniers ou automnaux.
- microporosité où l'eau circule par capillarité, elle correspond au volume des

retiennent

Associée du sol, la influe sur utile (eau



capillaires qui l'eau après ressuyage. à la réserve en eau microporosité la réserve en eau disponible pour la croissance des végétaux).

fig. IV.5 : AGREGATION ET ESPACE PORAL

II-2- différents types de structures (Voir planche)

Tableau IV.1

Les différentes structures du sol et leurs propriétés

Structure	Texture	Complexes argilo-humiques	Propriétés
Particulaire	Eléments grossiers (sables)	Peu nombreux	- Faible rétention de l'eau - Porosité élevée - Faible rétention des ions
Compacte	Eléments fins (argiles, limons fins)	Peu nombreux	- Forte rétention de l'eau - Porosité faible, résistance à la pénétration des racines - Faible rétention des ions
Grumeleuse ou fragmentaire	Mixte	Très nombreux	- Forte rétention de l'eau - Bonne porosité, permet une bonne pénétration des racines - Forte rétention des ions

II-3- Stabilité structurale

Pour un sol cultivé, la qualité structurale demeure sous l'étroite dépendance des facteurs externes dont l'impact conduit à des dégradations de structure. La stabilité structurale est l'aptitude d'un sol à résister aux agents de dégradation.

Les facteurs de dégradation les plus importants sont:

- l'eau:
 - en saison humide, dégradation des structures « fragmentées » par gonflement des argiles.

- Orages violents provoquant la rupture des agrégats par action mécanique des gouttes (splash erosion), la dilution des cations flocculants, la dispersion des ciments accompagnée souvent d'entraînement des particules fines.
- Travail du sol :
 - Le travail excessif activant la biodégradation de l'humus et la disparition des ciments organiques.
 - Tassement par les instruments aratoires lourds sur sol cultivé, ce qui provoque une baisse de la porosité avec disparition des pores grossiers.

III- BESOINS DES VEGETAUX ET DISPONIBILITES DU SOL

III-1- Besoins des végétaux

Éléments majeurs: C, H, O, N, P, S, K, Ca, Mg, Cl, Na

C, H, O, constituent 95% du végétal, ce sont des éléments nutritifs non minéraux. Le C est intégré par photosynthèse.

Éléments majeurs (à l'exception de Cl et Na) indispensables à la vie de la plante.

Éléments mineurs: Fe, B, Mn, Cu, Zn, Mo, indispensables à la vie de la plante mais retrouvés en quantités faibles. Ont des propriétés réactionnelles importantes (à l'exception du B)

III-2- Formes d'absorption

Les éléments sont absorbés sous forme ionique (cations ou anions)

N □ NO₃⁻, NH₄⁺. □ HPO₄⁻⁻ HPO₄⁻. K □ K⁺.

Mg □ Mg⁺⁺. Ca □ Ca⁺⁺. Na □ Na⁺. S □ SO₄⁻⁻. Fe □ Fe⁺⁺

III-3- Disponibilité des éléments dans le sol

Les quantités d'éléments dans le sol sont généralement très supérieures aux besoins des plantes. Mais ces éléments ne sont pas immédiatement disponibles pour les plantes. Ils se trouvent sous forme de combinaisons plus ou moins complexes et donc de disponibilités différentes.

Classement des éléments dans le sol par ordre de disponibilité décroissant:

a- Éléments dissous dans la solution du sol

Eléments solubles.

b- Eléments absorbés sous forme échangeables

Une importante réserve des cations ou d'anions est fixée par les colloïdes du sol = complexe argilo-humique.

Les cations sont retenus par le complexe et libérés progressivement par échange dans la solution du sol.

c- Eléments absorbés sous forme non échangeable

Les ions habituellement échangeables ; K^+ , Ca^{++} , Na^+ , Mg^{++} sont énergiquement fixés par les colloïdes, notamment lorsque leur concentration est faible. Ils deviennent difficilement disponibles pour les plantes.

d- Eléments engagés dans des combinaisons complexes

Minéraux inaltérés totalement insolubles et non assimilables. Exemple: Ca, Mg, K contenus dans les minéraux tel que feldspaths, micas...

Passage d'une forme à l'autre: par altération des minéraux, il y a libération des ions K, Ca... qui sont retenus par le complexe absorbant.

Inversement les éléments échangeables évoluent sous une forme non échangeable peu soluble, comme dans le cas de la **rétrogradation**.

1- Le pouvoir absorbant

Les colloïdes électronégatifs du sol : **le complexe argilo-humique**, retiennent autour de leur molécules les cations; les H^+ ou les ions métalliques Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ (en quantités faibles les NH_4^+). Ces ions sont **échangés réversiblement** avec les cations de la solution du sol, ils sont dits échangeables. Cette rétention temporaire des ions est dite **pouvoir absorbant** du sol (Fig .IV.6).

Le complexe est approvisionné en éléments par altération des minéraux et les apports extérieurs (engrais).

A fur et à mesure de leur absorption par les plantes, les cations métalliques sont remplacés dans la solution du sol par libération à partir du complexe.



Fig.IV.6 : ECHANGES DE CATIONS ENTRE LE COMPLEXE ABSORBANT ET LA SOLUTION DU SOL

IV- VALEURS CARACTERISTIQUES DU COMPLEXE ABSORBANT

IV-1- Capacité d'échange cationique:C.E.C.

complexe d'échange: l'ensemble des ions échangeables:

- les cations basiques: Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺, Na⁺. La somme est S
- les ions H⁺
- les ions Al⁺⁺⁺ dans les sols très acide

$$\text{C.E.C.} = \text{T} = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na} + \text{H} + \text{Al}$$

S

A

A= H⁺ +Al⁺ est l'acidité d'échange

$$\text{T}=\text{S}+\text{A}$$

La C.E.C varie avec la nature et la proportion dans le sol des constituants responsables de leur rétention : argiles et humus

La C.E.C : meq/100g du sol

eq = masse atomique/valence

IV-2- Le pH du sol

$$\text{pH} = \text{Log}1/\text{H}^+ = - \log \text{H}^+$$

Grâce au pouvoir tampon du complexe argilo-humique, le pH varie de 4 à 10.

4 groupes de sol sont considérés

- Sols très acides $\text{pH} < 5.5$, taux élevé de Al et Mg -----> toxicité pour les plantes.
- Sols acides $5.6 < \text{pH} < 6.5$ -----> apparition de formes difficilement échangeables; Les engrais phosphatés évoluent vers des formes assez mal définies de fer et d'aluminium.
- les sols au voisinage de la neutralité $6.6 < \text{pH} < 7.2$; sols les plus aptes à une production maximale pour la plus part des plantes.
- Les sols calcaires, le pH peut atteindre 8.5

CaCO_3 préserve le sol contre l'acidification



Mais, les pH élevés peuvent causer des problèmes d'assimilabilité pour certains éléments.

Exemple: les engrais phosphatés calciques peuvent évoluer sous des formes moins solubles (apatite).

IV-3- Rôle agricole du complexe absorbant

le complexe argilo- humique:

- met en réserve les éléments nutritifs et les échange contre le Ca, préserve contre les pertes par lessivage
- libère les éléments pour les racines en les échangeant contre les H^+ formés par les μo
- régularise le pH du sol par échange des H^+

V- CONSTITUANTS CHIMIQUES DU SOL ET LEURS FORMES DANS LE SOL

Les éléments majeurs Net P seront étudiés

V-1- LE PHOSPHORE

a- Rôle du P

Constituant des acides nucléiques, véhicule de l'énergie (ATP.ADP), élément de structures membranaires dans son association avec les lipides.

b- Les différentes formes de P dans le sol et disponibilité à la plante (Fig .IV.8)

Le P existe dans le sol sous multiples formes

b-1- P dissous dans la solution du sol

- la concentration de P est très faible 0.2 à 0.5 ppm
- les ions phosphatés sont sous forme de $H_2PO_4^-$ HPO_4^{2-}

b-2- Le P adsorbé ou autodiffusible

- **fixation sous forme facilement échangeable** sur l'argile, l'humus et le calcaire fin.

- **Fixation moins facilement échangeable sous forme d'hydroxyde de fer d'alumine**

b-3-Le phosphore peu soluble ou insoluble

Réserve très lentement utilisable par les plantes. Les roches mères contiennent le P sous forme d'apatite phosphate très insoluble.

b-4- le phosphore organique

20 à 80% du P total du sol

- sous forme typiquement organique dans les M.O. fraîches, corps microbiens, humus.
- En combinaison avec l'humus sous forme d'humophosphate.

La dynamique du phosphore dans le sol

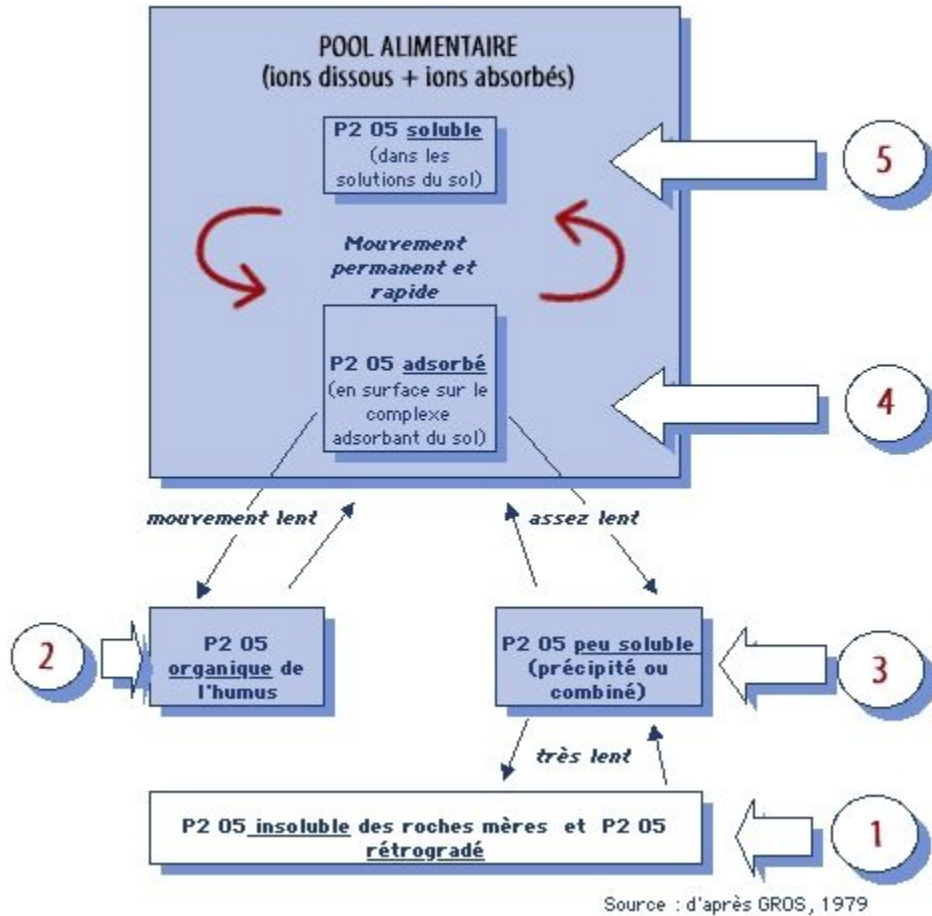


Fig .IV.8 DYNAMIQUE DE P DANS LE SOL

V-2- L'azote

a- Rôle de l'azote

L'azote est utilisé par la plante dans sa croissance et son développement. L'N est le constituant de toutes les protéines, de toutes enzymes, de plusieurs intermédiaires

métaboliques impliqués dans la synthèse et le transport de l'énergie, et aussi de l'ADN, porteur du code génétique.

b- Les différentes sources d'N dans le sol (Fig .IV.9)

Contrairement au K et P, l' N ne provient pas de la dégradation des roches. Il peut avoir une source

- atmosphérique (orages, bactéries fixatrices symbiotiques et non symbiotiques)
- Organique: incorporé à la matière organique (C'est la seconde source d'azote). Il est libéré par les μ o par le processus de **minéralisation**.

c- Les formes d'azote dans le sol .

c-1- L'N organique

Près de 95% de N total, on distingue:

- **l'azote organique de l'humus:**

5% de l'humus (C/N de l'humus est voisin de 10). Du fait de sa stabilité, le taux de minéralisation de l'humus est faible. Les facteurs de minéralisation de l'N sont ceux de la minéralisation de l'humus; la température, l'aération, l'humidité, le travail du sol, la nature du sol.

Dans les sols cultivés, la minéralisation varie de 0.2 à 0.3%/an.

- **L'N des matières organiques fraîches**

Selon le rapport C/N de la M.O. enfouie dans le sol, L'N minéral va évoluer dans 2 sens différents:

- C/N>30: paille de blé, de maïs, tiges de tournesol. La minéralisation va nécessiter le prélèvement de l'N minéral du sol, c'est l'immobilisation = réorganisation de l'N. une partie de l'N immobilisé est minéralisée après un temps plus ou moins long.
- C/N<20: résidus de légumineuse. La minéralisation va permettre la libération de l'N minéral dans le sol, dans les 3 à 4 mois qui suivent l'enfouissement.

- **L'N microbien**

C'est l'N qui entre dans la constitution des corps microbiens, il est rapidement dégradé en quelques jours.

c-2- Le N minéral

Se trouve principalement sous 2 formes:

* **L'N ammoniacal** résultant de l'ammonification, le NH_4^+ libéré est retenu par le complexe absorbant. Mais il est rapidement oxydé par les bactéries nitrifiantes.

* L'N nitrique, NO_3^- , très soluble, la principale forme d'absorption par la plante. Sa teneur dans les sols cultivés est de 15-20 ppm. Ces anions ne sont pas retenus par le complexe absorbant. Ils sont rapidement perdus par lessivage.

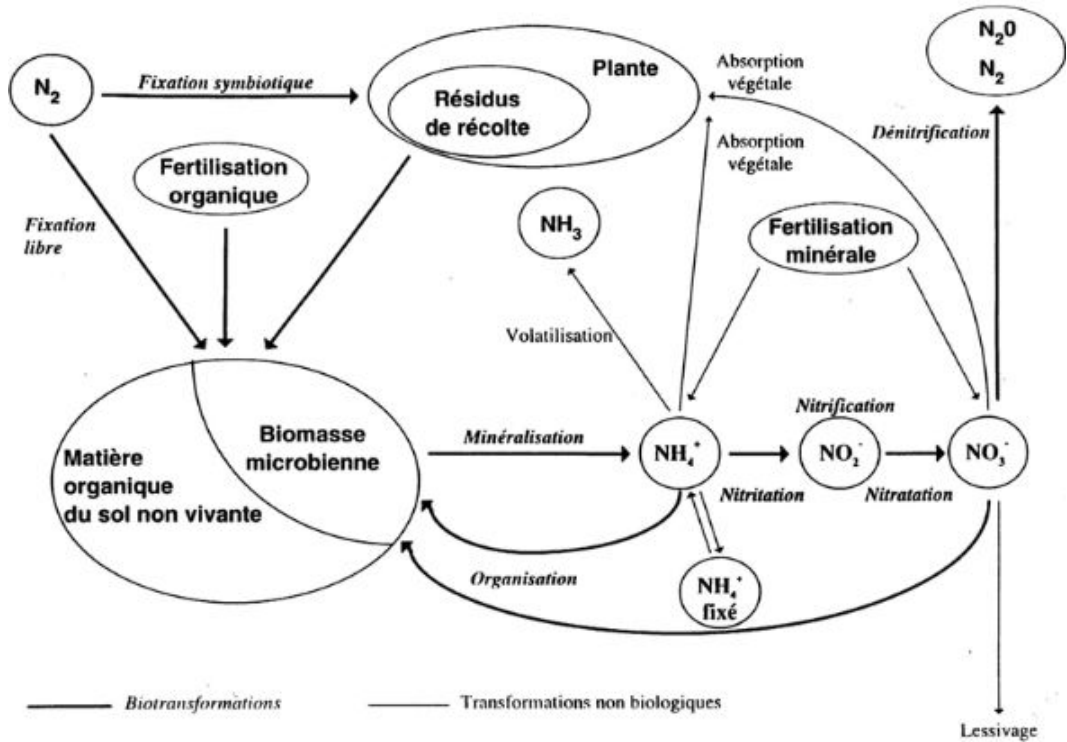


Fig .IV.9 CYCLE DE L'AZOTE DANS LE SOL

CHAPITRE V : FONCTIONNEMENT BIOLOGIQUE DU SOL

I- L'ECOSYSTEME SOL

I-1- Notion d'écosystème

Un écosystème est une unité naturelle constituée d'une association d'êtres (animaux, végétaux et microorganismes) vivants dans le même endroit en interaction et qui fonctionnent ensemble.

Cette association d'êtres vivants est appelée biocénose et leur environnement biotope. Le biotope est défini par l'ensemble des caractéristiques du milieu (luminosité, pH, humidité...).

Ces organismes interagissent les uns avec les autres dans des relations trophiques (relations alimentaires entre les organismes d'un même écosystème). L'ensemble de ces relations forme un réseau trophique, par lequel circule l'ensemble de l'énergie et de la biomasse.

La biocénose se compose en trois groupes écologiques fondamentaux d'organismes : **les producteurs** (=les végétaux), **les consommateurs** (=les animaux), et **les décomposeurs** (=les bactéries, champignons, insectes...).

De ce fait, nous pouvons considérer que le sol est un véritable écosystème où la biocénose est l'ensemble des êtres qu'il abrite et où le biotope est son milieu physique.

Le sol est un écosystème complexe, il est le siège de plusieurs chaînes alimentaires étroitement imbriquées. Ses organismes vivants peuvent être classés en fonction de leur place dans la chaîne des consommateurs.

II- LA BIODIVERSITE DU SOL

La biodiversité du sol regroupe l'ensemble des formes de vie qui présentent au moins un stade actif de leur cycle biologique dans le sol. Elle inclut les habitants de la matrice du sol ainsi que ceux de la litière et des bois morts en décomposition.

Les sols constituent l'un des milieux les plus mal connus du point de vue de la biodiversité, mais aussi les plus diversifiés sur Terre. On estime que près d'un quart

des espèces connues (près de deux millions d'espèces sont décrites) sont inféodées au sol. Presque tous les embranchements du vivant sont représentés, à l'exception des groupes typiquement marins.

A travers des interactions trophiques et non trophiques, Ces organismes assurent le fonctionnement du sol et participent ainsi à la mise en place des services écosystémiques.

II-1 Les organismes du sol

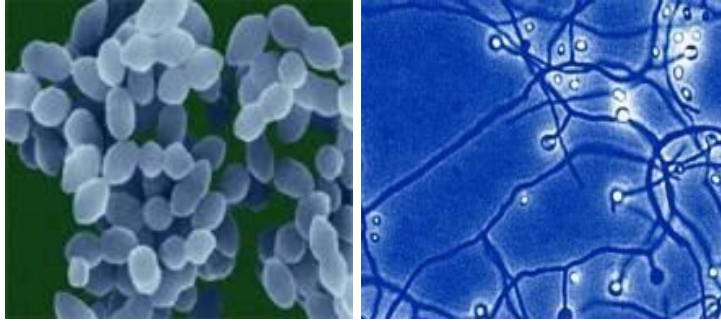
Il est courant de les classer ces organismes selon leur taille (tableau 1)

Tableau 1 : Estimations pour un m² de prairie tempérée du nombre d'individus et du nombre d'espèces des groupes d'organismes du sol les plus communs. Inspiré de l'Atlas européen de la biodiversité des sols.

Microfaune/Microflore Taille : 1-100 µm	Mésafaune Taille : 100 µm – 2 mm	Macrofaune Taille : 2 mm et plus
Bactéries 10 ¹⁵ cellules appartenant à des dizaines de milliers d'espèces	Collemboles (classe d'arthropodes apparentés aux insectes)	Insectes variés : fourmis, coléoptères, ...
Champignons 50 km d' <u>hyphes</u> ⁽¹⁾ appartenant à plusieurs centaines d'espèces	Acariens (arachnides)	Cloportes (crustacés)
Protozoaires Dix millions d'individus appartenant à plusieurs centaines d'espèces	Tardigrades	Myriapodes
Nématodes Un million d'individus appartenant à plusieurs centaines d'espèces	Enchytréides (annélides)	Lombrics ou "vers de terre" (annélides)
	Au total plusieurs milliers d'individus appartenant à plusieurs centaines d'espèces	Au total plusieurs centaines d'individus appartenant à plusieurs dizaines d'espèces

La microflore <20µ.

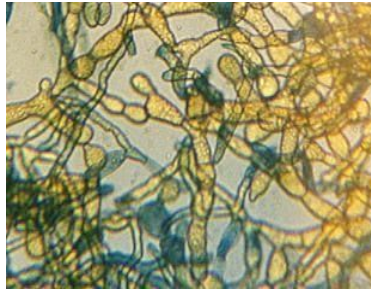
- *Les bactéries* :



On distingue, les eubactéries, les archés et les actinobactéries (les bactéries filamenteuses dont les bactéries symbiotiques fixatrices d'azote).

Les bactéries participent à la décomposition de la matière organique morte des sols, au recyclage des éléments minéraux (azote, phosphore...) et à la fixation symbiotique et non symbiotique de l'azote.

- ***Les champignons :***



Ce sont des hétérotrophes, ils participent à la décomposition de la matière organique morte, ils sont capables de dégrader la lignine et les complexes phénolprotéines, ils font des symbioses mycorhiziennes.

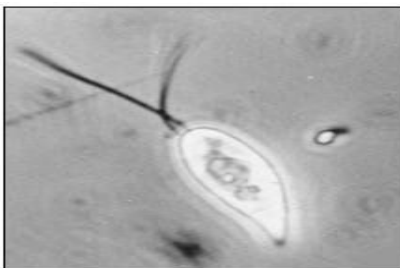
La microfaune : $20\mu\text{m} \ll 100\mu\text{m}$.

- ***Les nématodes***



Régime alimentaire varié : bactériophages, fongivores, ils peuvent être aussi des prédateurs (nématodes...), des phytoparasites (maladies des plantes) ou omnivores.

- ***Les protozoaires*** : se nourrissent de bactéries.



- ***Les rotifères*** : mangent les particules en suspension



La mésofaune 100µm-2mm

- ***Les collemboles :***



vivent dans l'espace poral de la surface du sol ou dans la litière. Se nourrissent de mycéliums de bactéries et des algues de la litière et aussi de la M.O. Ils participent d'une manière importante à la dégradation de la M.O. du sol.

- ***Les enchytréides :*** mangent de la litière, myceliums, fèces

- ***Les acariens :***



peuvent se nourrir de la litière ou des bactéries, algues et champignons ou être prédateurs.

La macrofaune > 2mm

- ***Les myriapodes***



Prédateurs ou consomment de la litière, interviennent dans la structure du sol.

- *Les isopodes (clopotre)*



Détritivores , ont un rôle dans la décomposition de la litière.

- *Insectes*

- Nombreuses larves



- Fourmis



- Termites



Les fourmis et les termites vivent en castes et ont un rôle dans le recyclage de la M.O. et dans le travail du sol (formation de galeries, nids...)

- *Les vers de terre :*



Taille très variable (de 1cm à plusieurs mètres), plus de 6000 espèces dont seulement la moitié a été décrite.

Ils se nourrissent de sol contenant de la M.O. qui passe dans le tube digestif du ver et est ensuite redéposé soit dans le sol, soit à la surface du sol sous forme de turricules. Ces espèces peuvent être regroupées en 3 groupes écologiques correspondant à leur distribution dans le sol, leur morphologie et leur écologie (Fig.2)

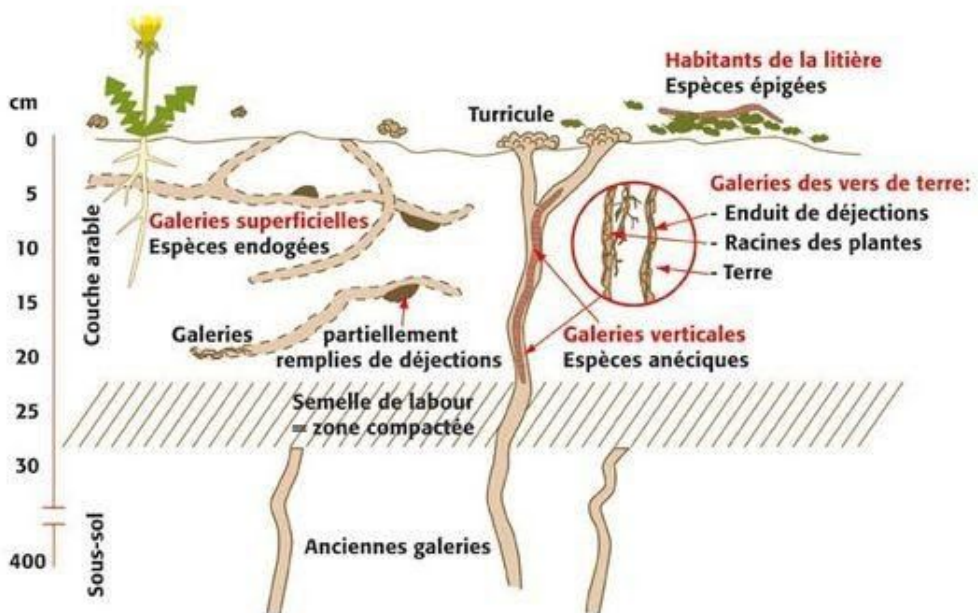


Fig1. : Distribution spatiale de 3 groupes écologiques de vers de terre (espèces épigées, espèces anéciques et espèces endogées).

Les espèces épigées (appelés aussi espèces de litière ou espèces de surface) vivent à la surface du sol. Ils sont généralement de petite taille, entre 1 - 5 cm de long, et sont très colorés (rouge, brun foncé). Ils jouent un rôle important dans le recyclage de la matière organique. Ils ne créent pas ou peu de galeries et se nourrissent de matière organique morte ou en décomposition à la surface du sol (saprophages).

Les espèces anéciques vivent dans des galeries permanentes, verticales à sub-verticales qui sont connectées à la surface du sol et peuvent atteindre 5 à 6 m de long, entre 10 et 110 cm de long. Leur tête est plus colorée que la queue. Ils viennent à la surface du sol préférentiellement la nuit, pour se nourrir de matière organique morte (litière en décomposition, feuille etc..) qu'ils enfouissent et mélangent avec le sol. Ils déposent leurs déjections majoritairement à la surface du sol (30 t/ha/an en prairie) sous forme de turricules, et jouent un rôle très important dans l'enrichissement organique du sol. A la surface du sol, les turricules peuvent être associées à des résidus organiques.

Les espèces endogés vivent tout le temps dans le sol et ne remontent pas en surface. Ils peuvent être localisés dans les premiers centimètres du sol jusqu'aux horizons de profondeur. De taille moyenne, entre 1 et 20 cm de long (Fig.) et sont très peu colorés. Ils ingèrent le sol et en consomment la matière organique humifiée. Ils creusent des réseaux de galeries temporaires, horizontaux, très ramifiés et dans lesquels ils déposent leurs déjections (190 t/ha/an sous prairie) générant ainsi une structure grumeleuse.

A ces organismes du sol s'associent *les racines* qui apportent la matière organique du sol (racines mortes) et modifient l'environnement physico-chimique du sol (libération de petites molécules comme les phytohormones, porosité dans le sol).

II-2 Rôles fonctionnels des organismes du sol

Les organismes telluriques ont des rôles fonctionnels variés et complémentaires. Le fonctionnement d'un sol repose schématiquement sur trois principaux groupes d'organismes :

- **des organismes responsables des modifications chimiques de la matière = ingénieurs chimiques du sol** : microorganismes décomposeurs, bactéries et champignons. Les microorganismes agissent sur la dynamique et le recyclage de la matière organique (décomposition de la M.O.) et des nutriments (éléments minéraux sous des formes assimilables pour les plantes, N,P...). Certaines bactéries libres ou associées aux racines de certaines plantes ont la capacité de fixer l'azote atmosphérique. Ils sont également responsables de la dégradation des polluants organiques comme les hydrocarbures et les pesticides.
- **des organismes responsables des modifications physiques du milieu= ingénieurs physiques du sol**, interviennent dans la structuration du sol (porosité, circulation de l'eau) et l'incorporation de la matière organique (complexe argilo-humique) : les macroinvertébrés (vers de terre, termites, fourmis..) et les racines.
- **les prédateurs ou parasites= régulateurs** : ils peuvent consommer des racines (pour les nématodes), des bactéries, des champignons ou être carnivores: protozoaires et nématodes.) Ils contrôlent donc la dynamique et l'activité des populations (micro-organismes du sol). La présence d'une diversité de prédateurs permet par exemple de limiter la prolifération de certains champignons ou bactéries pathogènes des cultures.

Remarque :

Les invertébrés de la macrofaune peuvent être saprophages, phytophages, carnivores ou géophages. Les acariens et collemboles (microfaune) ont également des régimes trophiques variés même si l'essentiel des espèces sont saprophages (ou détritivores) ; ils consomment la matière organique en décomposition et sont très abondants dans les litières.

III- LES SERVICES RENDUS PAR LA BIODIVERSITE DES SOLS.

La biodiversité des sols est à la base de plusieurs services écosystémiques, essentiels aux sociétés humaines.

- **Support de la production végétale :** en permettant la décomposition des matières organiques et en facilitant l'assimilation des nutriments minéraux disponibles pour les plantes et en renouvelant la structure du sol.
- **La formation du sol :** Les organismes du sol assurent la transformation de la matière organique et permettent sa redistribution et son incorporation à la matière minérale qui sont des processus essentiels dans la formation du sol.
- **La régulation du cycle de l'eau et la lutte contre l'érosion des sols :** La présence d'ingénieurs de l'écosystème tels que les vers de terre augmente la perméabilité des horizons de surface en favorisant l'infiltration de l'eau dans le sol. Par exemple, la disparition de population de vers de terre dans des sols contaminés peut réduire jusqu'à 93 % la capacité d'infiltration des sols et amplifier le phénomène d'érosion.
- **La protection des cultures :** Une biodiversité importante du sol est en faveur de la prolifération des ennemis naturels des maladies des cultures et permet donc de limiter l'utilisation de pesticides.
- **La décontamination des eaux et des sols.** Les microorganismes peuvent immobiliser et dégrader les polluants et réduire ainsi le coût de la décontamination des sols (estimé en Europe en 2000 entre 59 et 109 milliards d'Euro).
- **La santé humaine.** Les organismes du sol constituent le plus important réservoir de ressources génétiques et chimiques pour le développement de nouveaux produits pharmaceutiques. Par exemple, l'actinomycine et la streptomycine sont des antibiotiques communs dérivés des champignons du sol. Actuellement, de nombreuses recherches visent à découvrir les médicaments du futur à partir de la biodiversité du sol.

IV- MENACES SUR LA BIODIVERSITE

Les dégradations du sol telles que l'érosion, la diminution des teneurs en matières organiques, les pollutions locales et diffuses, le tassement, l'acidification, l'imperméabilisation et la salinisation des sols menacent directement la biodiversité du sol. Le changement d'usage des terres (ex: urbanisation, mise en culture, déforestation) est la première cause de baisse de biodiversité car les organismes du sol n'ont généralement pas le temps de se déplacer ou de s'adapter à leur nouvel environnement. Dans les agglomérations urbaines, la fermeture des sols et le

cloisonnement des espaces verts menacent directement le maintien de la biodiversité. Généralement, les prairies naturelles abritent une plus grande diversité d'organismes que les sols agricoles soumis à des pratiques plus intensives.

V- MOYENS DE PRESERVATION DE LA BIODIVERSITE DES SOLS

Les politiques de la gestion des sols et l'aménagement du territoire sont primordiales pour la protection des sols et par conséquent sur la préservation la biodiversité du sol et des les services rendus.

Exemples de pratiques favorables à la biodiversité du sol :

- **Minimiser le risque d'érosion** : Un sol nu est sensible à l'érosion par le vent et l'eau, au dessèchement et à l'encroûtement. La présence d'une couverture végétale ou de résidus de cultures protège le sol, fournit des habitats pour les organismes du sol et peut améliorer la disponibilité en eau et en nutriments.
- **Augmenter la teneur en matière organique du sol** : Des apports réguliers de matière organique améliorent la structure du sol, augmentent la capacité de rétention de l'eau et des nutriments, protègent le sol contre l'érosion et le tassement et soutiennent le développement d'une communauté saine d'organismes du sol. Des pratiques, comme le maintien des résidus de culture à la surface du sol, les rotations qui incluent des plantes à fort taux de résidus, les cultures intercalaires, les systèmes avec peu ou pas de labour ou l'épandage de compost ou d'autres produits résiduaux organiques augmentent la teneur en matière organique des sols.
- **Limiter les intrants agro-chimiques et la contamination des sols** : L'utilisation de pesticides et de fertilisants chimiques favorise les rendements mais les matières actives peuvent nuire aux organismes du sol. Par ailleurs, les apports involontaires (ex: cadmium dans les engrais) peuvent avoir une influence sur les organismes du sol conduisant à des modifications de la biodiversité.
- **Prévenir le tassement du sol** : Par des passages répétés d'engins, en particulier sur sol mouillé, diminue les quantités d'air, d'eau et d'espace disponibles pour les racines et les organismes du sol. Comme la remédiation est difficile voire impossible, la prévention est essentielle (ex: utilisation de pneus basse pression, réduction du nombre de passages).

CHAPITRE VI DEGRADATION ET CONSERVATION DES SOLS

I- DEGRADATION DES SOLS

Définitions

La dégradation des sols se définit comme un processus qui réduit le potentiel de production des sols ou de l'utilité des ressources naturelles. Dans le domaine de la pédologie et de l'écologie, la **régression** et la **dégradation** sont des processus d'évolution associés à une perte d'équilibre d'un sol antérieurement stable. De façon générale, on distingue 2 aspects de la dégradation :

- l'arrachement et le déplacement des matériaux de la surface du sol par les érosions hydrique et éolienne
- la dégradation sur place par l'action de processus chimiques, physiques ou biologiques.

I-A- Erosion des sols

L'érosion est un phénomène de déplacement des matériaux à la surface du sol sous l'action de l'eau, du vent, de l'homme ou simplement de la gravité. Elle causerait annuellement une perte de 25 milliards de tonnes de sol.

L'érosion limite la disponibilité en terres cultivables, elle contribue à la dégradation des terres et des eaux: abrasion progressive de la couverture pédologique, diminution de la fertilité des terres, entraînement des polluants véhiculés par les fractions colloïdales et particules de terre, en particulier phosphore, pesticides, métaux...

I-A-1- Erosion hydrique

L'érosion hydrique est reconnue comme étant la forme de dégradation des sols la plus dangereuse au Maroc. Elle se manifeste essentiellement dans les montagnes du Rif et du Pré-Rif où la dégradation spécifique dépasse souvent 3000 tonnes/km².an. Les précipitations fortement érosives, associées aux fortes pentes et aux matériaux géologiques tendres explique les fortes taux d'érosion enregistrés. En plus, les pratiques agricoles non conservatoires des sols et des eaux accentuent l'érosion hydrique.

I-A-1-a- Facteurs de l'érosion

✓ Les activités humaines

L'homme qui, par des pratiques inadaptées sur les versants, est le facteur principal conditionnant l'intensité de l'érosion par

- Les défrichements qu'il opère sur les forêts et les parcours naturels
- le surpâturage

- la mise en culture sans précaution des terres susceptibles à l'érosion en pentes
- les labours mécanisés dans le sens des grandes pentes
- la non restitution au sol de ses éléments nutritifs enlevés par les cultures

Ces pratiques facilitent le ruissellement et par conséquent l'érosion et ses effets indésirables pour l'environnement et pour l'économie.

✓ **La régression du couvert végétal**

L'absence du couvert végétal expose le sol à l'action directe des gouttes de pluie. La végétation protège le sol de diverses manières :

- L'interception par les végétaux des gouttes de pluies permet la dissipation de l'énergie cinétique, ce qui diminue dans une large mesure l'effet "splash".

L'effet splash désigne l'érosion d'un sol nu provoquée par l'impact des gouttes d'eau

- Les plantes ralentissent les eaux de ruissellement par la rugosité qu'elles donnent au terrain.
- Son système racinaire maintient le sol en place et y favorise l'infiltration.
- L'apport en M.O suite à l'activité microbienne dans la zone racinaire améliore la structure du sol et sa cohésion et par suite diminue les risques d'érosion.

✓ **Les facteurs climatiques**

Le climat constitue la cause et la source d'énergie érosive. L'efficacité de la pluie vis à vis des processus d'érosion est liée aux rôles qu'elle a dans le détachement des particules des sols, mais surtout dans la formation du **ruissellement**. Celui-ci apparaît soit lorsque l'intensité des précipitations est supérieure à la capacité d'infiltration de la surface du sol, soit lorsque le sol est déjà partiellement ou

totallement saturé en eau avant l'arrivée des pluies. L'érosivité dépend essentiellement de l'intensité et du volume des précipitations.

Le **ruissellement** désigne le phénomène d'écoulement des eaux à la surface des sols. Il s'oppose au phénomène d'**infiltration** qui est l'entrée de l'eau dans les couches du sol et le sous-sol. Le ruissellement est un des moteurs de l'**érosion** : l'eau qui s'écoule entraîne avec elle des particules plus ou moins grosses en fonction de la quantité d'eau en mouvement et de la pente, ce qui peut avoir un effet abrasif sur le terrain soumis au ruissellement.

Battage du sol



Perte de la
stabilité



Entraînement des
particules fines

Perte du sol



diminution de la
porosité de surface

EROSION



Réduction de la
capacité
d'infiltration



Augmentation du
ruissellement

✓ **La topographie**

L'érosion augmente avec la pente. Egalement, la perméabilité des sols est un facteur déterminant. En effet, si les sols sont absolument imperméables, le ruissellement de la pluie sera total et ne dépendra pour une surface donnée que de l'intensité de la pluie. Par contre, si les sols sont relativement perméables, la pente aura une influence certaine sur l'infiltration et donc le ruissellement.

✓ Le sol

Le critère le plus important pour apprécier la résistance d'un sol à l'érosion est la stabilité structurale qui est l'aptitude de la terre à résister à l'action dégradante de l'eau. Celle-ci est influencée par de nombreuses caractéristiques des sols dont les plus souvent évoquées sont la texture, la nature minéralogique des argiles, la teneur en matière organique.

▪ La composition granulométrique

Il a été montré que les sols limoneux se révèlent comme les plus instables au contraire des sols argileux. Par ailleurs, les sols à texture plus grossière ou plus fine sont moins sensibles au détachement par la pluie du fait de la masse plus importante de leurs particules ou de la plus grande stabilité des agrégats.

• **Les matières organiques** : Elles favorisent l'agrégation des particules entre elles et ont ainsi une influence positive sur la stabilité structurale. Leur influence est d'autant plus grande que la teneur en argile est grande.

▪ La structure du sol

La structure initiale du sol peut être totalement détruite si l'action des pluies sur la surface du sol détruit les agrégats et si la texture et la composition physico-chimique du sol s'y prêtent (texture limoneuse associée à un faible taux de matière organique), La surface du sol passe d'un état meuble et poreux à un état plus compact. La couche superficielle s'individualise par rapport au reste du profil et forme **une croûte de battance** qui diminue considérablement la perméabilité du sol. Elle participe ainsi à la formation du ruissellement (photoVI.1)



PhotoVI.1 : LIMONS TASSES PAR LA PLUIE FORMANT UNE CROÛTE DE BATTANCE (SOLTNER, 1975).

I-A-1-b- différents types d'érosions hydriques (voir sortie)

I-A-1-c-Conséquences de l'érosion hydrique

L'érosion se traduit par :

- ✓ l'envasement et, en conséquent, par la réduction des capacités de retenue des barrages édifiés pour la mobilisation des ressources en eau pour l'agriculture, l'eau potable ou la production d'électricité. Cet envasement a atteint un rythme annuel de 50 millions de m³ soit 0,5 % de la capacité totale.
- ✓ l'appauvrissement des terres agricoles et de leur productivité
- ✓ le rehaussement des lits de cours d'eau et l'augmentation des risques d'inondation ;
- ✓ la menace pour les voies de communications ;
- ✓ l'eutrophisation des eaux de lacs et de retenues de barrages ;
- ✓ l'ensablement des infrastructures portuaires.

I-B- Erosion éolienne

L'érosion éolienne est contrôlée par l'intensité de vent, l'état du sol et son humidité. Une surface lisse, sèche, sans végétation et avec des particules (grains de sable ou agrégats) de 100 µm libre en surface de sol sera hautement érodible, alors qu'un sol argileux, couvert de végétaux ne subira pas l'érosion éolienne.

Les principales zones sensibles à l'érosion éolienne sont situées en régions désertiques. Néanmoins la mise en culture de certains sols, principalement dans les zones semi-arides, provoque leur érosion en diminuant leur rugosité de surface par suppression de la végétation naturelle et en produisant des particules libres à la surface de sol.

Le problème de l'ensablement est d'une acuité particulière à l'intérieur du pays. Dans ces zones, en plus de l'ensablement des palmeraies, les accumulations sableuses posent de sérieux problèmes au niveau des canaux d'irrigations, des voies de communication (ville de laayoune) et des agglomérations rurales. Ce

phénomène atteint son maximum dans l'étage bioclimatique saharien avec des précipitations annuelles inférieures à 100 mm (Zagora , Erfoud).

I-C- Salinisation des sols

Le processus de salinisation des sols se produit lorsque la minéralisation de la solution du sol dépasse un certain seuil sous l'influence d'un mécanisme physique (évaporation, altération de minéraux et accumulation...).

On distingue :

- La salinité primaire, d'origine naturelle, due à la proximité de la mer, ou à l'existence de dépôts salins géologiques ou parfois actuels.

Les sols naturellement salins sont fréquents dans les zones arides, parce que l'évaporation potentielle du sol dépasse largement la quantité d'eau qui arrive au sol, ce qui permet aux sels de s'accumuler près de la surface.

- la salinité secondaire due à des processus de salinisation liés à des activités anthropiques, en particulier à l'irrigation mal conduite dans certaines zones agricoles. Elle concerne des surfaces plus réduites que la salinité primaire mais a des conséquences économiques plus importantes car elle peut dégrader gravement la fertilité de zones cultivées.

Les ions les plus fréquemment présents dans les sols salés sont les cations Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} et les anions HCO_3^- , Cl^- .

La présence de sels solubles dans le sol causent :

- Un effet dépressif sur la croissance des plantes à partir d'un certain seuil qui varie d'une espèce à l'autre.
- Une dégradation de la structure du sol favorisant la dispersion des colloïdes minéraux en présence des ions Na^+ .

I-D- Pollution des sols

Les polluants organiques des sols proviennent principalement de trois ensembles d'activités: industrielles (production d'énergie, métallurgie, industries

chimiques...) urbaines (transports, gestion et traitement des déchets) et agricoles (Engrais et pesticides) (Fig.IV-4)

Les apports par l'agriculture de pesticides, de nitrates et de phosphates modifient l'équilibre biochimique des sols et par conséquent, leurs propriétés. Les impacts positifs de ces modifications (augmentation de la fertilité, diminution des maladies) sont bien évidemment les effets visés par les agriculteurs. Mais il peut aussi y avoir des impacts négatifs, qui en cas d'excès d'apport deviennent de véritables pollutions. Ces pollutions peuvent se manifester sur place, on-site, ou à l'aval, off-site, après transport des produits. En règle générale, **les nitrates sont transportés à l'état de sels dissous** par les eaux de ruissellement ou d'infiltration; **les phosphates et les pesticides sont transportés à l'état de molécules ou de cristaux liés aux particules de sol arrachées par l'érosion.**

Impact de l'utilisation des nitrates :

-Les nitrates modifient fortement le cycle de l'azote, notamment le rapport C/N, le degré de décomposition de la matière organique, et par suite la structure des sols et leur capacité de stockage de l'eau.

-En cas de fertilisation mal conduite, il peut y avoir des dégradations locales des sols (acidification, croûte de battance...).

- Les nitrates emportés par les eaux polluent les cours d'eau de surface et les nappes souterraines, ils peuvent causer une eutrophisation plus ou moins grave des rivières, des plans d'eau, des zones côtières, entraînant des dégradations de la biodiversité, des ressources piscicoles et du paysage; ils sont à l'origine de coûts supplémentaires pour le traitement des eaux et peuvent même rendre les eaux impropres à la consommation.

Impact de l'utilisation des phosphates

Les phosphates sont aussi une cause très importante d'eutrophisation lorsque l'érosion a déposé au fond des plans d'eau, naturel ou artificiels, des **sédiments riches en phosphore**, il est très difficile de les éliminer. Du fait que le phosphore est peu soluble il y a un véritable piégeage des phosphates dans ces sédiments, ce qui constitue une menace permanente d'eutrophisation.

Impact de l'utilisation des pesticides

- les zones industrielles ou commerciales
- les réseaux de communication
- les décharges
- les chantiers.

Elle conduit à la **disparition irréversible** d'une partie croissante de la ressource en sol. Elle touche toutes les zones méditerranéennes, en particulier les terres, autrefois agricoles, situées à la périphérie des villes. Malheureusement, l'extension de ces villes se fait au dépend des terres de bonne qualité pour l'agriculture.

A titre d'exemple, au niveau de la région de Meknès, on a pu mettre en évidence une diminution d'environ 1,2% de la zone agricole face à une augmentation des zones de bâtis entre 2001 et 2011. La croissance urbaine s'opère sur des terres de haute qualité agronomique, au sein d'un marché très spéculatif. Pourtant la question de préservation des terres n'est pas une préoccupation première des l'action publique.

L'urbanisation des terres agricoles au Maroc est un problème sérieux qui mérite une attention particulière de la part des pouvoirs publics. La spéculation foncière est un handicap majeur au développement durable et de la sécurité alimentaire de notre pays.

I-F- Pression sur les forêts et parcours

Les ressources forestières et les zones de montagne sont sujettes à une dégradation croissante sous l'effet conjugué de la pression anthropique et des conditions climatiques. Cette pression se manifeste par le défrichement, le surpâturage, les incendies, et les coupes illicites du bois.

II- LES RETOMBEES DE LA DEGRADATION DES SOLS

Les effets de la dégradation des sols sont environnementaux, à la fois locaux (érosion des sols, dégradation de la fertilité et de la structure des sols, pollutions des nappes souterraines) et globaux (appauvrissement de la biodiversité, la

réduction de la capacité des sols à fixer le carbone..) et aussi sociaux (pauvreté, précarité, migration...)

II-A- Menace sur la sécurité alimentaire

Au milieu du XXIème siècle, avec la croissance démographique, la sécurité alimentaire de la population mondiale requerrait de tripler les capacités de production alimentaire. Or, paradoxalement, les surfaces arables sont en continuel déclin.

II-B- Les changements climatiques

Depuis des dizaines d'années, l'homme est à l'origine d'un cercle vicieux ayant de graves conséquences environnementales: la pollution atmosphérique due aux gaz à effet de serre (GES). Ces émissions ont augmenté au cours des 2 dernières centaines d'années, principalement du fait d'activités humaines et en premier lieu de l'essor rapide de l'industrialisation.

La dégradation des terres consécutive à des pratiques agricoles inadaptées a également contribué à cette augmentation. En effet, les sols et la végétation conservent 3 fois le volume de carbone présent dans l'atmosphère de notre planète. Le défrichage et la dégradation sont tels que ces importants puits de carbone se transforment en une source majeure d'émissions de gaz à effet de serre. Au total, 43% des émissions de CO₂ proviennent de terres défrichées au profit de l'agriculture, des terres cultivées et de celles où se pratique l'alternance des cultures. En retour, Le phénomène d'effet de serre favorise la dégradation des terres.

II-C- Dégradation des sols et pauvreté

Les populations rurales pauvres n'ayant que le sol pour subvenir a leurs besoins (de chauffage, d'alimentation), l'exploitent, souvent le surexploitent. Il en résulte une perte de fertilité des sols, une érosion de ceux-ci, et de manière ultime, des sols deviennent stériles. D'où une migration vers les zones urbaines dans l'espoir de trouver en ville des conditions d'existence meilleures où la paupérisation et la

précarisation s'amplifient, où les flux de nuisances (déchets..) sont de plus en plus chargés.

II-D- Dégradation des sols et biodiversité

La dégradation des sols est la cause principale de la perte de diversité biologique: elle s'accompagne en effet d'une perte de la capacité des sols à être l'habitat d'une diversité d'espèces...

II-E- La désertification

A l'issue de la conférence des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (Signée en 1994), le processus de désertification a été défini comme étant <<la dégradation des terres dans les milieux arides, semi arides et subhumides secs du fait de la conjugaison de plusieurs facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines>>. Cette terminologie a vu le jour lors des grandes sécheresses de la fin des années 1970: elle est donc liée aux événements climatiques extrêmes. .

Au Maroc, les facteurs qui favorisent le déclenchement et l'accentuation de la désertification résident en une aridité du climat qui concerne près de 93% du territoire national dont les terres provenaient. S'ajoute aujourd'hui, à cette contrainte naturelle, la dégradation continue du couvert végétal constamment sollicité pour la satisfaction des besoins des populations en terres de culture, en bois et en ressources fourragères pour le cheptel. Ces 2 facteurs engendrent la pauvreté et fragilité des sols dues, essentiellement, à leur faible teneur en matières organique et à des utilisations incompatibles avec le principe de leur conservation et une pression démographique de plus en plus forte.

En retour, les modifications de la végétation et la dégradation des sols ont des effets sur le climat: en effet, un sol mis à nu accroît l'évapotranspiration. De plus l'augmentation des superficies dégradées a un impact sur la mise en suspension d'aérosols qui vont participer aux dérèglements des mécanismes climatiques. Enfin, la baisse de la biomasse et de la matière organique des sols dégradés va limiter la capacité de stockage du carbone dans les sols.

Dans toutes ces régions, la dégradation des terres aggrave la fréquence et l'impact des catastrophes naturelles et donc les effets des événements extrêmes liés aux changements climatiques.

II-F- Entrave au développement durable

La dégradation des sols fragilise les populations pauvres, leur retirant parfois leur dernier moyen de subvenir de manière autonome à leurs besoins, accroissant les risques épidémiques, freinant le développement de bien de régions.

III- MOYENS DE CONSERVATION DES SOLS

III-A- Plans et programmes nationaux

Plusieurs programmes, plans et stratégies relatifs à la conservation des ressources naturelles ont été mis au point. Certains ont une portée sectorielle. D'autres ont une vision horizontale de développement intégré :

- *Plan National de Reboisement*
- *Plan national de lutte contre la désertification*

III-B- TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LA DEGRADATION DES SOLS

III-B-1- Mesures de lutte contre l'érosion hydrique (voir sortie)

III-B-2- Lutte contre l'érosion éolienne

Les méthodes de lutte mécanique : ont pour objectif de fixer le sable mobilisable et d'empêcher les dépôts sableux sur les infrastructures: palissades, mulch et méthodes aérodynamiques. Ces techniques sont le préalable indispensable à la fixation des sables mobiles et des dunes à court et moyen termes.

Les méthodes de lutte biologiques (photoVI.21):consistent à développer une couverture végétale permanente: réenherbement, brise-vent, barrières végétales, ceintures boisées, reboisement.

III-B-3- Lutte contre la salinité des sols

Dans les zones irriguées des régions arides et semi-arides, le drainage agricole a pour but de contrôler ou de prévenir la salinité des sols et la remontée d'une nappe phréatique peu profonde

Au Maroc, seule la plaine du Gharb a été drainée d'une manière respectant les normes de conception des systèmes de drainage

III-B-4- Lutte contre la pollution des sols

La meilleure façon pour lutter contre la pollution des sols par les fertilisants et par les pesticides est une application raisonnée de ces produits, ne dépassant pas les besoins des plantes.

III-B-5- L'agriculture de conservation une alternative pour la conservation des sols

L'agriculture de conservation a pour objectif de conserver, d'améliorer et de mieux utiliser les ressources naturelles liées à la gestion des sols, de l'eau, et de l'activité biologique et dont le but final est la gestion de la fertilité des sols. Elle se définit par :

☐ **l'absence de retournement profond du sol et l'implantation des cultures en semis direct**

☐ **Le maintien d'un couvert végétal permanent (mort ou vivant)**

☐ **l'adoption judicieuse de cultures dans une rotation suffisamment longue.** Cette technique est largement pratiquée en Amérique du Sud et en Australie. Au Maroc, les études expérimentales ont donné des résultats très encourageants mais son application reste très limitée.

Avantages de l'agriculture de conservation:

☐ *Sur le plan de l'Environnement*

✓ **Une limitation de l'érosion des sols :**

- Le taux de recouvrement du sol par les résidus est très élevé en semis direct, ce qui correspond à un effet protecteur important du couvert végétal et donc à une limitation de l'érosion. D'autre part, le fait de ne plus travailler le sol et d'implanter une couverture végétale ou d'avoir un mulch permet une meilleure stabilité du sol et de limiter sa compaction ou tassement.

- La présence d'un couvert ou d'un mulch limite également le dessèchement de la couche superficielle et protège les fines particules de sols contre l'érosion éolienne.

✓ **Un accroissement de l'activité biologique et de la biodiversité.**

Les techniques de conservation des sols favorisent l'augmentation de l'activité biologique au travers de deux phénomènes :

- **La concentration des matières organiques en surface favorise leur décomposition et leur minéralisation par voie biologique** aussi bien par les micro-organismes que par les invertébrés.

- **L'absence de retournement et la réduction du travail du sol minimisent la destruction des micro-habitats.** En effet, il a été montré que le non labour fait développer la population des vers de terre qui jouent un rôle très important dans la dégradation et la migration des matières organiques, le drainage au travers des galeries et le maintien d'un état structural favorable. Les galeries des vers de terres autorisent aussi la percolation de l'eau en profondeur et limite le ruissellement en surface. L'absence ou la réduction forte du travail du sol permettent non seulement le développement de la micro et la macrofaune du sol mais également le retour et/ou le maintien d'oiseaux sauvages prédateurs des lombrics.

✓ **Une contribution à la réduction de l'effet de serre**

Les avantages de l'agriculture de conservation en matière d'effet de serre se situent à deux niveaux :

- La diminution de la dépense énergétique mise dans le système car l'agriculture de conservation est fondée sur un moindre travail mécanique du sol, et donc une moindre puissance mise en jeu.

- Le stockage du carbone dans les sols au travers des matières organiques.

✓ **Une amélioration de la protection et qualité de l'eau**

Par réduction de l'érosion, l'agriculture de conservation peut contribuer à limiter la pollution des eaux de surface, lessivage de nitrates ou fuites de produits phytosanitaires dans le milieu.

□ **Sur le plan de l'Agronomie**

Ces techniques apportent des gains sur le plan agronomique se situant au niveau des matières organiques, la structure du sol, la fertilisation, la pression parasitaire, le rendement. Les contraintes de ces techniques se situent notamment dans l'application de ce nouveau concept de gestion de la fertilité des sols.

L'agriculture de conservation permet :

✓ **un enrichissement des matières organiques des sols** en raison d'une réduction des pertes par minéralisation du stock initial due au travail du sol et de la présence d'un mulch,

✓ **Une amélioration de la structure du sol et de sa stabilité structurale** qui dépend à la fois de la réduction du travail du sol, de la quantité d'humus présente et de l'activité biologique, qui elle varie selon les apports de matières organiques fraîches au sol. Ceci a pour conséquence d'améliorer la résistance du sol au tassement et à l'érosion et de limiter la battance.

✓ **Une amélioration des rendements des cultures** notamment dans les zones semi-arides. Ces changements sont attribués à une qualité de sol meilleure (stabilité structurale, richesse en matière organique, l'approvisionnement du sol en éléments nutritifs ...) et à un stockage plus important d'eau dans le sol sous ce système ce qui assure une production plus stable et réduit les risques des aléas climatiques.

✓ **Une réduction d'une façon plus importante des coûts de production** par réduction de consommation de carburant, de main d'œuvre et d'investissement en machines

✓ **Du fait du non labour, L'incidence des plantes adventives est plus importante** surtout pendant les premières années. La stratégie de lutte doit inclure la rotation et des cultures compétitives. Par ailleurs, le maintien des résidus à la surface du sol le rend plus froid et plus humide et **engendre plus de maladies** surtout pour les racines. Mais avec le temps, les qualités physiques, chimiques et biologiques du sol s'améliorent le rendant un milieu défavorable au développement des maladies.

L'agriculture de conservation est perçue comme une alternative viable dans le contexte méditerranéen où elle pourrait constituer une réponse aux défis de la rareté et des dégradations des ressources naturelles et à l'instabilité des productions

pluviales. Le développement et la durabilité des systèmes à base d'agriculture de conservation sont hautement dépendants des conditions locales ; l'implication de l'ensemble des acteurs concernés (agriculteurs, état, chercheurs, société civile...) et leur capacité à générer et à partager le savoir nécessaire pour développer, adapter, corriger et améliorer les systèmes sont fondamentales. Par ailleurs, le fonctionnement des systèmes à base d'agriculture de conservation et leurs impacts à long terme ne sont pas connus; ils méritent plus d'investigations à l'avenir.

