



Centre Universitaire Nour Bachir d'El-Bayadh  
Institut des Sciences de la nature et de la vie  
Département de Science Agronomique



3<sup>ième</sup> année Production Végétale

# COURS AGRO-PEDOLOGIE ET FERTILISATION



**Dr BOUKHOBZA Lalia**  
Maître Conférence classe B.  
Département de Science Agronomique  
[lalia.bkh@gmail.com](mailto:lalia.bkh@gmail.com)

# Table des matières

Objectifs généraux du module "Agro-pédologie et fertilisation"

Introduction

## Partie I : Agro-pédologie.

### Chapitre 1 : L'eau dans le sol

**Objectifs**

**1 - Introduction**

**2- Les phases du sol**

**3- Relations entre les trois phases du sol**

3.1 -Relation entre la phase solide et la phase liquide

3.2 -Relation entre la phase solide et la phase gazeuse

3.3 -Relation entre la phase liquide et la phase gazeuse

3.4 -Influence sur la croissance des plantes

**4 - Mesure des volumes occupés par les différentes phases du sol**

**6- Les formes de l'eau dans le sol**

**7- Les trois forces s'exerçant sur l'eau du sol :**

**8-Les forces de rétention de l'eau par le sol**

**8- Les états de l'eau dans le sol**

**9- Le potentiel de l'eau dans le sol**

**10- Les mouvements de l'eau dans le sol**

**11 -Bilan de l'eau dans le sol.**

### Chapitre 2 : Caractérisation des propriétés physiques, chimiques et biologiques d'un sol

**Objectifs**

**1- Caractérisation des propriétés physico-chimiques et biologiques d'un sol**

1.1- Propriétés physiques du sol

1.2- Propriétés chimiques du sol

1.3- Propriétés biologiques du sol

**2- Le complexe adsorbant des sols**

2.1- Principaux facteurs réglant l'intensité des phénomènes de sorption et d'échange des cations :

2.2- Le mécanisme de l'échange des cations :

2.3 -La sorption et l'échange des anions :

2.4- Les valeurs caractéristiques du complexe adsorbant : CEC et V%

2.5- Les échanges ioniques et nutrition minérale des plantes

2.5.1 -Métabolisme d'absorption des éléments minéraux

2.5.2 -Modalités d'absorption des éléments minéraux

**3- Les éléments nutritifs dans le sol**

3.1 - Nutrition des plantes :

3.2 - Besoins nutritionnels des plantes

**4 - Notions de fertilité d'un sol**

# Agro-pédologie et fertilisation

## Chapitre 3 : Pédogenèse et classification des sols

### Objectifs

#### 1- Pédogenèse et classification

- 1.1- Pédogenèse (développer les facteurs de la pédogenèse)
  - 1.1.1. Nature et état des matériaux parentaux
  - 1.1.2. Microclimat et pédoclimat
    - 1.1.2.1. Précipitations
    - 1.1.2.2. Température moyenne annuelle et températures saisonnières
  - 1.1.3. Position dans le relief
    - 1.2.3.1 En positions de plateaux
    - 1.2.3.2 Haut et milieu de versants
    - 1.2.3.3 Bas de versants et fonds de vallons
  - 1.2.4. Végétation et activité biologique
  - 1.2.5. Activités humaines
  - 1.2.6. Durée
- 1.2- Classification des sols agricoles en Algérie
- 1.3- Introduction à la cartographie et à la mise en valeur des sols
  - 1.3.1- La cartographie des sols :
  - 1.3.2- La mise en valeur des sols :
- 1.4- Définition d'une carte pédologique
- 1.5- Lecture et exploitation d'une carte pédologique.

#### 2- Introduction à la mise en valeur des sols (cas des sols d'Algérie)

## Partie II : Fertilisation

### Chapitre 1 : Les amendements

### Objectifs

### Introduction

#### 1- Amendements minéraux

- 1.1. Amendements calciques
  - 1.1.1. Mode d'action
  - 1.1.2. Les différents effets des amendements
  - 1.1.3. Les principaux amendements calciques :
    - a- les produits naturels
    - b- Les chaux
    - c- les calcaires broyés
    - d- les produits mixtes
  - 1.1.4. Estimation des besoins de bases

#### 2- Les amendements humifères

- 2.1- Définition.
- 2.2- Formes d'humus
- 2.3- Propriétés chimiques et physiques de l'humus.

#### 1- Bilan humique.

- 3.1- Les diverses sources d'humus.
- 3.2- Autres sources d'humus

## Chapitre 2 : La fumure minérale (les engrains simples et composés)

### Objectifs

- 1- Définition des engrais.
- 2- Classification des différents engrais
  - 2.1- Les engrais simples.
  - 2.2- Les engrais composés.
    - 2.2.1- Définition.
    - 2.2.2- Les différentes catégories d'engrais composés.
    - 2.2.3- Caractéristiques et rôle des engrais composés.
    - 2.2.4- Rôle des engrais composés.
    - 2.2.5- Les formes d'engrais.
    - 2.2.6- Appréciation et choix d'un engrais composé.

## Chapitre 4 : Les lois et la pratique de la fertilisation minérale

### 1- Les différentes lois de la fertilisation minérale.

1. Loi de Liebig (Loi du Minimum)
2. Loi de Mitscherlich (Loi de l'Addition)
3. Loi de Raunkiaer (Loi de la Quantité Maximale)
4. Loi de la Dilution (Loi de Sénescence Précoce)
5. Loi de la Fixation Biologique de l'Azote (FBN)

### 2- La fumure dans la pratique : règles générales.

## Références bibliographiques

# Agro-pédologie et fertilisation

## Objectifs généraux du module "Agro-pédologie et fertilisation"

Ce module vise à fournir aux étudiants les connaissances fondamentales et appliquées sur les sols agricoles et leur fertilisation afin d'optimiser la production végétale tout en garantissant la durabilité des ressources pédologiques. À l'issue de ce cours, les étudiants seront capables de :

- Identifier les différentes phases du sol et leurs interactions.
- Analyser les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol et leur influence sur la croissance des plantes.
- Expliquez les différentes formes et mouvements de l'eau dans le sol.
- Évaluer l'impact de l'eau sur la disponibilité des nutriments et la croissance végétale.
- Appliquer les notions de bilan hydrique pour une gestion rationnelle de l'irrigation.
- Appréhender les processus de formation et de classification des sols
- Évaluer et améliorer la fertilité des sols
- Maîtriser les principes et techniques de fertilisation minérale et organique.
- Connaître les différents types d'amendements et leur impact sur la structure et la productivité du sol.
- Appliquer les lois de la fertilisation minérale pour un apport raisonné des engrains.

## Introduction

Le sol est un élément fondamental de l'écosystème terrestre, jouant un rôle clé dans la production agricole et le maintien de la biodiversité. Son étude a évolué au fil du temps, donnant naissance à une discipline spécifique : la pédologie. Cette dernière a été fondée en 1877 par le géologue russe Vassili Dokoutchaïev, qui a étudié les sols d'Ukraine et a posé les bases scientifiques de cette nouvelle approche. La pédologie est ainsi définie comme la science qui analyse la formation, l'évolution, les propriétés, la classification et la répartition des sols. Elle repose sur un ensemble de disciplines connexes, telles que l'agronomie, la géologie, l'hydrologie, la botanique, la physique et la chimie, mais ne constitue pas une simple branche de ces domaines : elle possède son propre cadre théorique et méthodologique.

Dans le cadre de l'agriculture, une approche plus spécifique est développée : l'agro-pédologie. Cette discipline vise à caractériser les propriétés du sol afin d'améliorer sa fertilité et d'optimiser sa gestion. Elle permet de raisonner l'apport en éléments fertilisants et de déterminer les cultures les mieux adaptées aux conditions pédoclimatiques locales, garantissant ainsi la durabilité des systèmes agricoles et la pérennité des cultures.

Le sol, en tant que support de la vie végétale, peut être défini de différentes manières selon le contexte d'étude. D'un point de vue traditionnel, il est perçu comme un milieu naturel indispensable à la croissance des plantes. En pédologie, cependant, son étude est plus approfondie : elle prend en compte les facteurs de formation du sol ainsi que les caractéristiques qui en découlent. Les agronomes, quant à eux, considèrent

## Agro-pédologie et fertilisation

souvent la partie arable du sol – homogénéisée par le labour et exploitée par les racines – comme l'élément clé de la production agricole. Toutefois, les pédologues insistent sur le fait que cette couche superficielle ne constitue qu'une fraction de l'ensemble du sol, qui présente une organisation plus complexe influençant directement son potentiel agronomique.

Ainsi, l'agro-pédologie et la fertilisation sont des disciplines essentielles pour comprendre et optimiser la gestion des sols agricoles. Ce cours vise à approfondir ces notions en explorant les relations entre la nature des sols, leur fertilité et les pratiques de gestion adaptées à un développement agricole durable.

## Partie I : Agro-pédologie.

### Chapitre 1 : L'eau dans le sol

#### Objectifs :

- Comprendre l'importance de l'eau dans le sol et son rôle dans la croissance des plantes.
- Identifier et analyser les différentes phases du sol et leurs interactions.
- Déterminer les formes de l'eau dans le sol et les forces qui influencent sa rétention et son mouvement.
- Étudier le bilan hydrique du sol et ses implications pour la gestion de l'irrigation.

## 1 - Introduction

#### • Rappel :

Pour les agronomes, le sol est avant tout « la couche superficielle occupée par les racines et susceptible d'assurer le développement des végétaux ». Le sol est aussi un milieu abritant des organismes vivants et de la matière organique (environ 2 tonnes de matière vivante à l'hectare pour des horizons superficiels de sols fertiles, sans compter une masse équivalente de vers de terre).

Dans ce chapitre, nous considérons le sol uniquement sous l'angle de ses propriétés physiques et de son rôle en tant que réservoir d'eau pour les plantes.

## 2- Les phases du sol

Le sol est un milieu **triphasique** selon 4 fractions :: il contient en proportions variables **une phase solide** (argiles, limons, sables, matière organique, cailloux, concrétions variées), **une phase liquide** (eau, substances dissoutes), et **une phase gazeuse** (oxygène, azote, gaz carbonique ...).

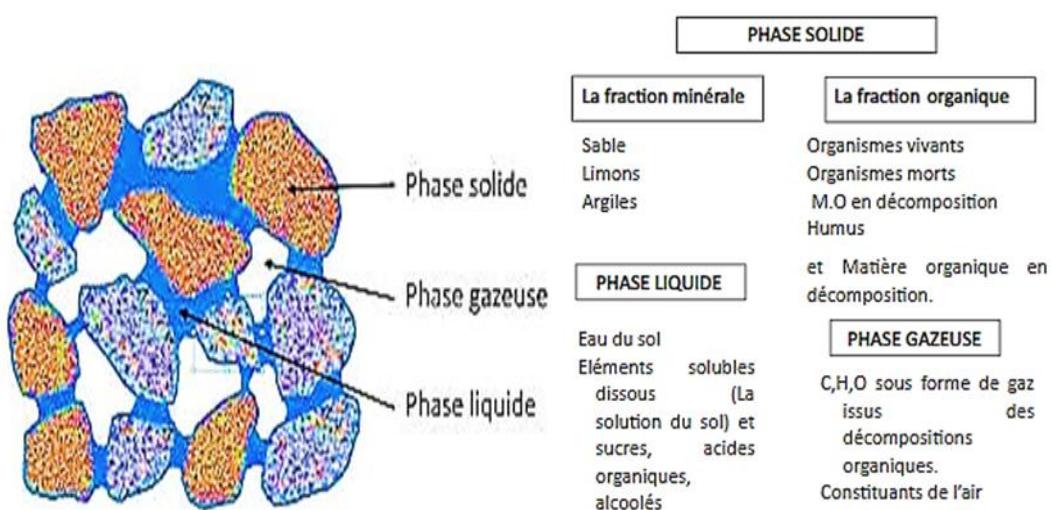
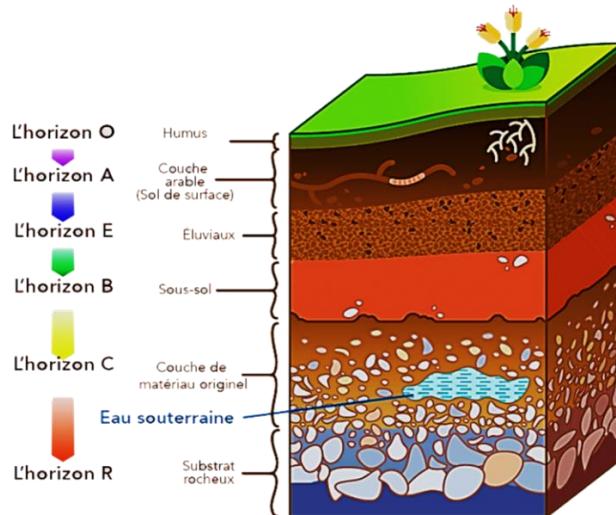


Figure 01 : Les phases du sol

# Agro-pédologie et fertilisation

C'est aussi un milieu poreux organisé et complexe dans lequel on distingue de multiples niveaux d'organisation (Fig. 1) : **des niveaux macroscopiques** (couches superposées ou horizons définis par les pédologues) et **des niveaux microscopiques** (structure lamellaire des minéraux argileux). Entre ces niveaux d'assemblage, qui vont de quelques mètres parfois (épaisseur exceptionnelle d'un horizon) jusqu'au nanomètre (les espaces entre les feuillets d'une argile), existent **des vides (pores)** dont la géométrie est complexe et les dimensions extrêmement variées.



La géométrie de ces pores varie aussi du fait des variations de volume liées à l'état hydrique du sol, d'autant plus importantes que le sol est riche en argile et que ces dernières présentent des propriétés de gonflement-retrait, d'où les fentes de retrait visibles dans un sol argileux asséché. Le sol est donc à la fois un milieu divisé par la présence de ces vides à différentes échelles, potentiellement déformable et partiellement continu par la présence de sa fraction solide.

## 3- Relations entre les trois phases du sol

Les relations entre les trois phases du sol sont intimement liées et jouent un rôle clé dans la disponibilité de l'eau et de l'oxygène pour les plantes, ainsi que dans la régulation des processus biogéochimiques dans le sol. Une compréhension approfondie de ces interactions est cruciale pour une gestion appropriée des sols en agriculture. En effet, voici quelques-unes des relations clés entre ces trois phases :

### 3.1 -Relation entre la phase solide et la phase liquide :

- La phase solide du sol est constituée de particules minérales (comme le sable, le limon et l'argile) ainsi que de matière organique.
- Les particules solides du sol retiennent l'eau dans les espaces entre elles grâce à des forces *d'adhésion* et de *cohésion*. C'est ce que l'on appelle la **capacité de rétention d'eau du sol**.
- L'eau dans la phase liquide est retenue autour des particules solides du sol, formant un film mince, et elle est disponible pour les plantes.

# Agro-pédologie et fertilisation

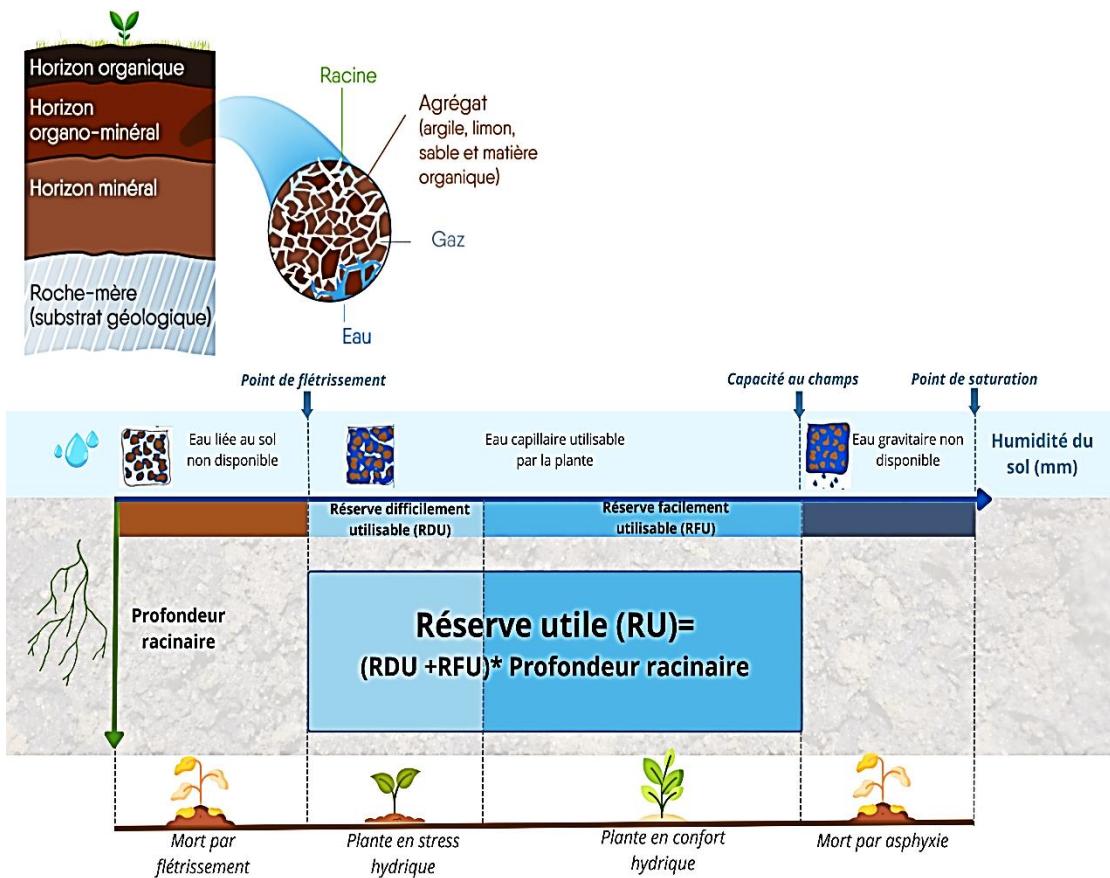


Figure 02 : Relations entre les trois phases du sol

## 3.2 -Relation entre la phase solide et la phase gazeuse :

- L'espace entre les particules solides du sol est rempli d'air, créant ainsi la phase gazeuse.
- L'air dans le sol est essentiel pour fournir de l'oxygène aux racines des plantes et permettre la respiration des micro-organismes du sol.
- La porosité du sol, c'est-à-dire la quantité d'espace vide entre les particules solides, influence la capacité du sol à stocker de l'air et d'autres gaz.

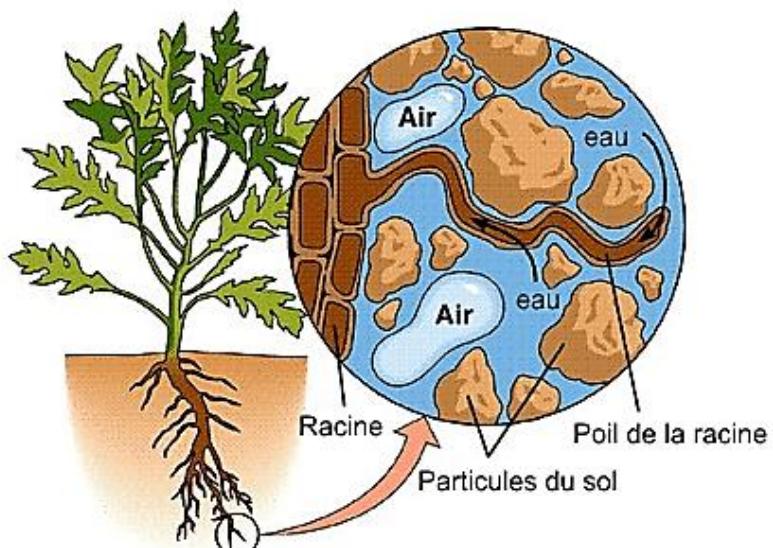


Figure 03 : Relation entre la phase solide et la phase gazeuse

## 3.3 -Relation entre la phase liquide et la phase gazeuse :

- Les pores du sol, qui contiennent de l'air, peuvent également contenir de l'eau sous forme liquide.
- L'air dans le sol peut être saturé d'humidité à un certain point, créant ainsi une condition où l'eau occupe tous les espaces d'air disponibles. Cette saturation est liée à la capacité de rétention d'eau du sol.
- L'aération du sol, qui consiste en l'échange d'air entre la phase gazeuse et la phase liquide, est essentielle pour prévenir l'asphyxions des racines des plantes due à un excès d'eau dans le sol.

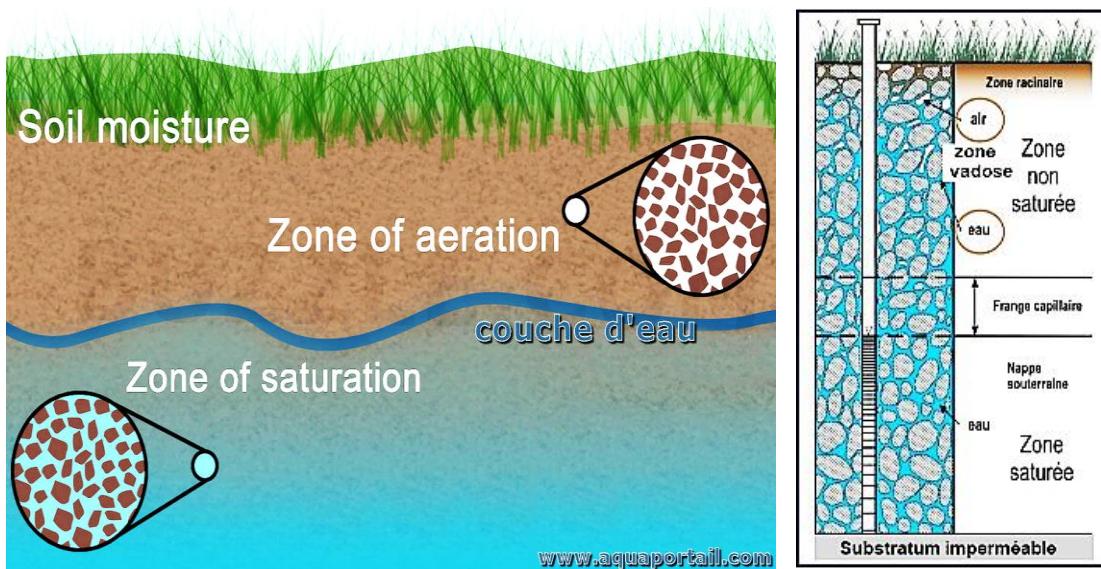


Figure 04 : Relation entre la phase liquide et la phase gazeuse

## 3.4 -Influence sur la croissance des plantes :

- La disponibilité d'eau dans la phase liquide est indisponible pour les plantes, car c'est à partir de cette phase qu'elles absorbent l'eau et les nutriments.
- L'air dans la phase gazeuse fournit l'oxygène nécessaire aux racines pour la respiration.
- La texture du sol (proportion de sable, de limon et d'argile) et la structure du sol influencent la répartition de l'eau et de l'air, ce qui à son tour affecte la croissance des plantes.

### Constituants d'un sol:

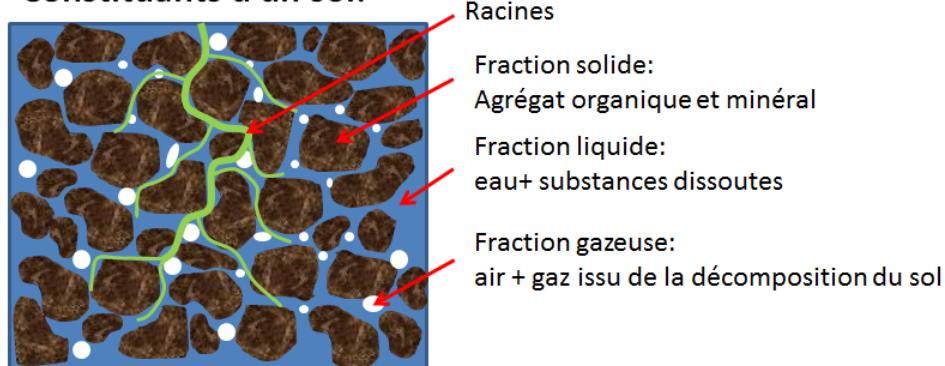
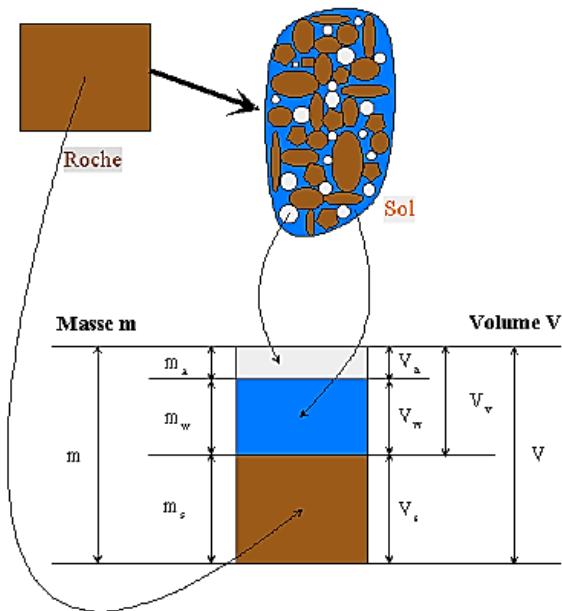


Figure 05 : Influence des trois phases du sol sur la croissance des plantes

## 4 - Mesure des volumes occupés par les différentes phases du sol

La mesure des volumes occupés par les différentes phases du sol, notamment la phase solide (minéraux, matière organique), la phase liquide (eau) et la phase gazeuse (air), est importante en agriculture en effet, on définit les volumes et les masses du modèle élémentaire de sol comme il était démonté dans la figures ci-dessous :



**m** : masse totale du sol  
**V** : volume total du sol  
**ma** : masse de l'air  
**Va** : volume de l'air  
**mw** : masse de l'eau  
**Vw** : volume de l'eau  
**ms** : masse des grains  
**Vs** : volume des particules solides

Les différentes masses volumiques ont les définitions suivantes :

$\rho$	(masse volumique du sol en $\text{Mg/m}^3$ )	$= \frac{m}{V}$
$\rho_s$	(masse volumique des particules solides en $\text{Mg/m}^3$ )	$= \frac{m_s}{V_s}$
$\rho_d$	(masse volumique du sol sec en $\text{Mg/m}^3$ ) (2 phases seulement : solide + air)	$= \frac{m_s}{V}$
$\rho_w$	(masse volumique de l'eau en $\text{Mg/m}^3$ )	$= \frac{m_w}{V_w}$
$\rho_{sat}$	(masse volumique du sol saturé en $\text{Mg/m}^3$ ) (2 phases seulement : solide + eau)	$= \frac{m_s + m_w (\text{solsaturé})}{V}$
$\rho'$	(poids volumique du sol déjaugé)	$= \rho - \rho_w$

Pour les problèmes de fondation  $\rho_w = 1 \text{ Mg/m}^3$ , par contre pour les essais de laboratoire on prend la valeur exacte qui dépend de la température

La masse de l'air est négligée et prise égale à 0.

# Agro-pédologie et fertilisation

Pour obtenir **les forces volumiques**, nous multiplions les masses par l'accélération de la pesanteur  $g = 9,81 \text{m/s}^2$  pour ce qui nous concerne  $\gamma = \rho g$ .

Pour simplifier les calculs on prendra généralement  $g = 10 \text{m/s}^2$ . On exprimera les **forces volumiques** en **kN/m<sup>3</sup>**.

Enfin **les densités** sont les rapports d'une masse volumique rapportée à celle de l'eau

$$G = \rho / \rho_w, \text{ elles s'expriment donc sans unité.}$$

Les paramètres d'état d'un sol définissent les différents rapports dans lesquels se trouvent les différentes phases d'un sol à un instant donné.

**L'indice des vides e, la porosité n, le volume spécifique v, la teneur en eau massique w, la teneur en eau volumique θ et le degré de saturation Sr** sont des paramètres sans dimension.

$$e \quad (\text{indice des vides}) = \frac{V_v}{V_s}$$

$$n \quad (\text{porosité}) = \frac{V_v}{V}$$

$$v \quad (\text{volume spécifique}) = \frac{V}{V_s} \times 100$$

$$w \quad (\text{teneur en eau massique}) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

$$\theta \quad (\text{teneur en eau volumique}) = \frac{V_w}{V} \times 100 \quad (\text{hydrogéologie})$$

$$S_r \quad (\text{degré de saturation}) = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

**L'indice des vides** peut être **supérieur** à **1**, par contre **la porosité** est toujours **inférieure** à **1**.

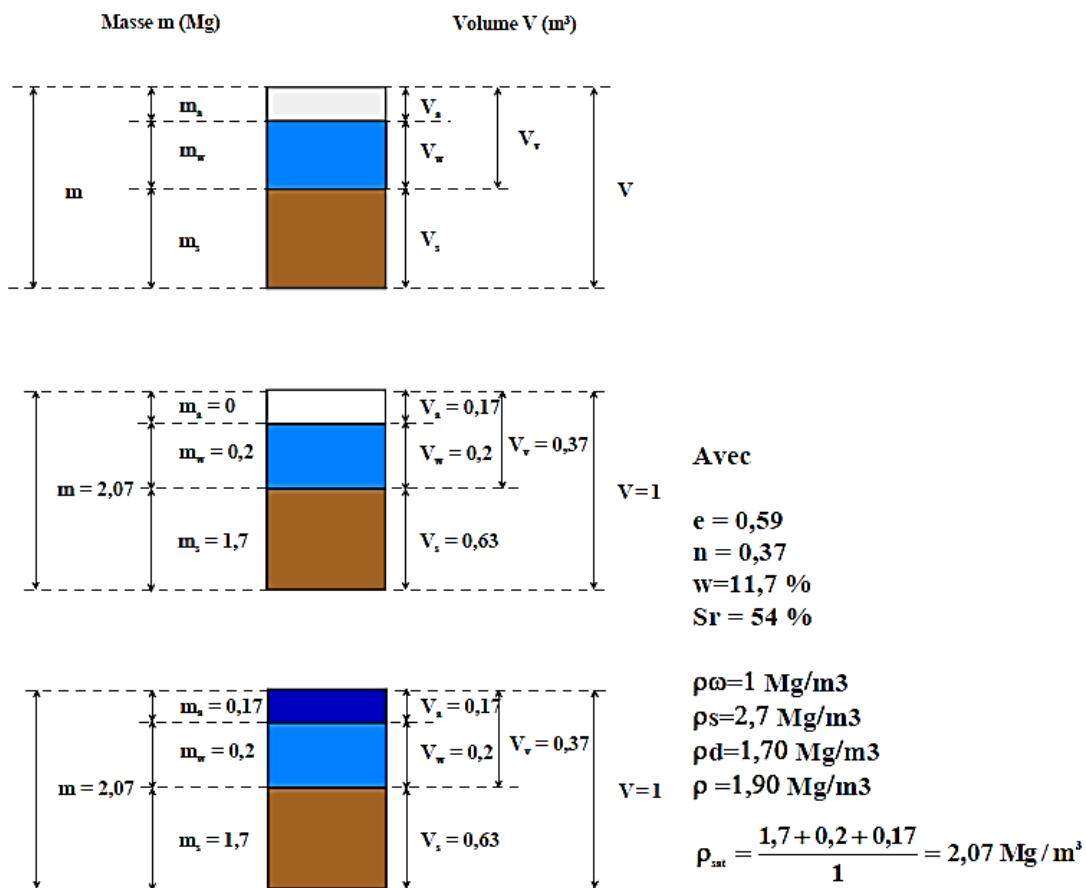
**La teneur en eau** peut être **supérieure** à **1**, **le degré de saturation** est **compris** entre **0 (sol sec)** et **100% (sol saturé)**

**Les masses volumiques** et **les paramètres sans dimension** ne sont pas *indépendants*. En négligeant **la masse de l'air** et en prenant pour la masse **volumique de l'eau  $\rho_w = 1 \text{ Mg/m}^3$** .

# Agro-pédologie et fertilisation

Il reste en général 3 paramètres indépendants. Tout paramètre s'exprimera en fonction des 3 autres, ou de 2 autres si le sol est saturé.

Il est important, mais facile, de connaître rapidement les relations existant entre les différents paramètres. Pour les établir, on utilise le schéma de sol précédent sur lequel on remplit toutes les cases. Un exemple de calcul des différents paramètres est indiqué ci-dessous



## 6- Les formes de l'eau dans le sol

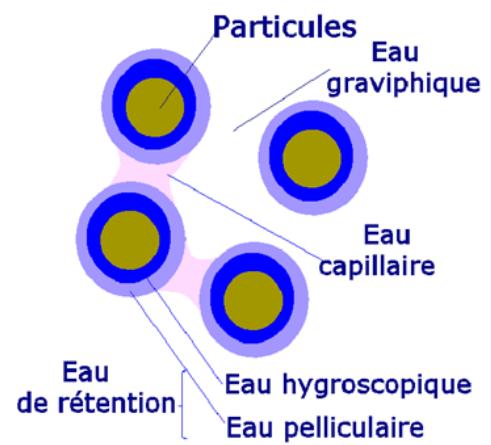
L'eau dans le sol peut se présenter sous plusieurs formes, en fonction de la façon dont elle est retenue et distribuée dans le milieu poreux du sol. Les principales formes de l'eau dans le sol sont :

### 1. Eau de gravité :

- L'eau gravitationnelle est celle qui s'infiltra dans le sol en réponse à la **force de gravité**. Elle remplit les **pores les plus gros** et occupe les espaces entre les particules du sol. Cette eau est soumise à la gravité et a tendance à s'écouler vers **le bas**, ce qui peut entraîner le drainage du sol. Cette eau peut finir par atteindre la nappe phréatique et peut être extraite par des techniques simples.

### 2. Eau capillaire :

- L'eau capillaire est celle qui est retenue dans les pores étroits du sol en raison des forces capillaires, telles que *l'adhésion* de l'eau aux surfaces solides et *la cohésion* entre les molécules d'eau. Cette eau peut s'élever dans les pores étroits contre la gravité, grâce à ces forces capillaires. Elle est essentielle pour l'approvisionnement en eau des plantes, car elle est accessible aux racines. Autrement dit, Elle est retenue dans les pores du sol par les forces de capillarité dues à la tension superficielle qui se développe à l'interface eau-air. Elle est soumise à l'action de la pesanteur et elle transmet les pressions.



### 3. Eau hygroscopique :

- L'eau hygroscopique est l'eau qui est fortement adsorbée à la surface des particules du sol, généralement par des *forces d'adhésion*. Elle provient de l'humidité de l'atmosphère en contact avec les particules et forme autour d'elles une pellicule adhésive dont l'épaisseur varie suivant la nature et la surface spécifique du minéral d'une part, la tension de vapeur d'autre part. Cette eau est tellement étroitement attachée aux particules du sol qu'elle n'est pas disponible pour les plantes. Elle est souvent considérée comme de l'eau "non disponible".

### 4. L'eau pelliculaire

Entoure les particules de sol et leur eau hygroscopique. Elle est soumise à des forces d'attraction moléculaires de la part de la couche d'eau hygroscopique qui diminuent rapidement quand on s'éloigne de la particule. Le jeu des forces moléculaires entre particules voisines peut permettre à cette eau de se déplacer sous forme liquide.

Les eaux hygroscopique et pelliculaire sont en quelque sorte une eau liée dont les propriétés physiques sont bien différentes de celles de l'eau libre à la même température.

Elle a une forte viscosité, ne transmet pas les pressions hydrostatiques et ne se déplace pas sous l'effet de la pesanteur. Ses propriétés sont, de plus, fortement influencées par les cations présents dans l'eau libre et qui, attirés par l'eau liée, pénètrent en elle, et forment le complexe d'adsorption dont l'étude est fort instructive pour expliquer le comportement des sols argileux. On estime souvent à 0.1mm la distance à la surface de la particule à partir de laquelle les forces d'attraction moléculaire deviennent négligeables, la fraction hygroscopique ne peut être extraite que par un vide poussé ou par dessiccation. La fraction pelliculaire peut être extraite par centrifugation poussée.

# Agro-pédologie et fertilisation

Alors que la teneur en eau hygroscopique est très faible (de l'ordre de 0.2 à 0.5 %) pour des sables, elle peut atteindre pour les argiles, ayant une forte surface spécifique (montmorillonite), 15 à 20 %. De même la teneur en eau pelliculaire des sables ne sera que de quelques pourcents, alors que celle des argiles peut atteindre 40 à 45 % (LAREAL.1975).

## 5. L'eau de constitution

- Qui fait partie de la constitution chimique des masses minérales présentes dans la phase solide du sol.

## 6. L'eau en phase vapeur

- D'une manière générale un sol non saturé a l'atmosphère de ses pores saturés en vapeur sauf si une circulation importante d'air est possible.

La proportion de ces différentes formes d'eau dans le sol dépend de facteurs tels que la texture du sol, la porosité, la structure du sol, la teneur en eau actuelle et les conditions environnementales. La capacité du sol à retenir et à libérer de l'eau sous différentes formes est indispensable pour la croissance des plantes et la gestion de l'eau en agriculture.

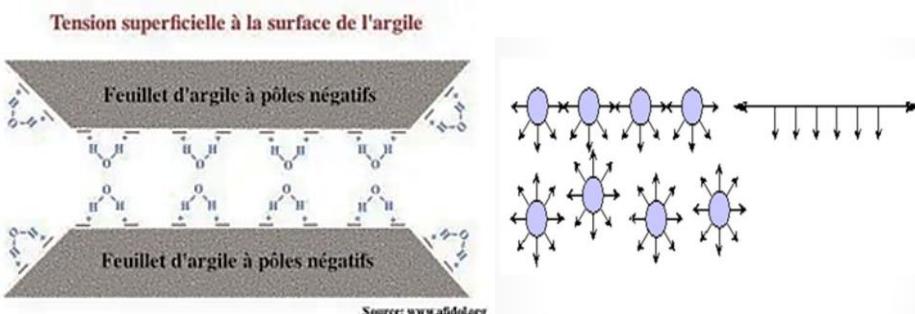
## 7- Les trois forces s'exerçant sur l'eau du sol :

### 1. Gravité :

- La force de gravité attire l'eau vers le bas, ce qui provoque le drainage de l'eau dans le sol. C'est cette force qui permet à l'eau de s'infiltrer dans le sol lorsque vous l'arrosez ou lorsque la pluie tombe. Elle détermine également la direction du mouvement de l'eau dans le profil du sol, en la faisant descendre vers les couches inférieures du sol.

### 2. Tension superficielle :

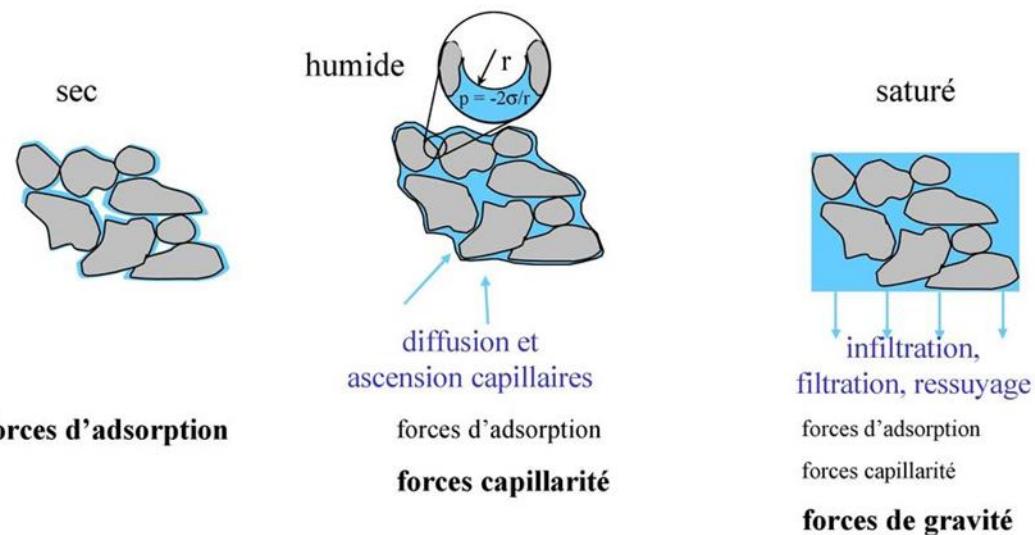
- La tension superficielle est une force qui se manifeste à l'interface entre **l'eau et l'air**. Elle est responsable de la formation de **minces films d'eau** autour des **particules de sol** et des **pores du sol**. Cette tension superficielle permet à l'eau de rester sous forme de **gouttelettes dans les pores du sol**, même contre la force de gravité, car elle crée une surface "adhésive" autour des particules du sol.



### 3. Forces capillaires :

- Les forces capillaires sont des forces *d'attraction* entre les molécules d'eau et les surfaces solides, telles que les *particules de sol* et *les parois des pores*. Ces forces attirent l'eau vers le haut à l'intérieur des pores étroits du sol, contre la gravité. Plus les pores sont étroits, plus les forces capillaires sont efficaces pour maintenir l'eau dans le sol. Les forces capillaires sont responsables de l'ascension capillaire de l'eau dans le sol, ce qui est crucial pour l'approvisionnement en eau des plantes.

D'une manière générale, la gravité draine l'eau vers le bas, la tension superficielle permet à l'eau de rester sous forme de gouttelettes dans les pores, et les forces capillaires attirent l'eau vers le haut à l'intérieur des pores étroits du sol. Ces forces travaillent ensemble pour influencer le mouvement, la rétention et la disponibilité de l'eau dans le sol, ce qui est crucial pour la croissance des plantes en agriculture.

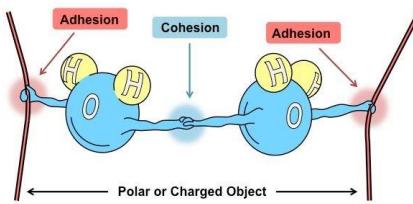


### 8-Les forces de rétention de l'eau par le sol

Les forces de rétention de l'eau par le sol sont essentielles pour comprendre comment l'eau est retenue à l'intérieur du sol et est disponible pour les plantes. Ces forces sont principalement liées aux interactions entre les molécules d'eau, les particules du sol et les parois des pores. Les forces de rétention de l'eau par le sol comprennent :

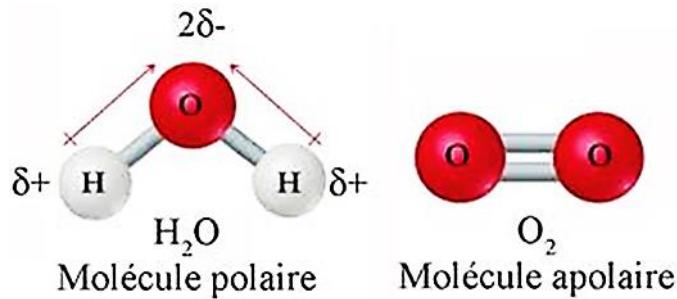
- 1. Force d'adhésion** : L'adhésion est la force d'attraction entre *les molécules d'eau* et *les surfaces solides* du sol. Les particules du sol, comme les argiles et les colloïdes, ont des charges électriques qui attirent les molécules d'eau chargées positivement (les ions hydrogène). Cela permet au sol de retenir l'eau même contre la gravité.

# Agro-pédologie et fertilisation



## 2. Force de cohésion :

La cohésion est la force d'attraction entre *les molécules d'eau elles-mêmes*. Les molécules d'eau sont **polarisées**, ce qui les rend attirées les unes vers les autres. Cette force aide à maintenir l'eau sous forme de **film mince** autour des particules solides du sol.

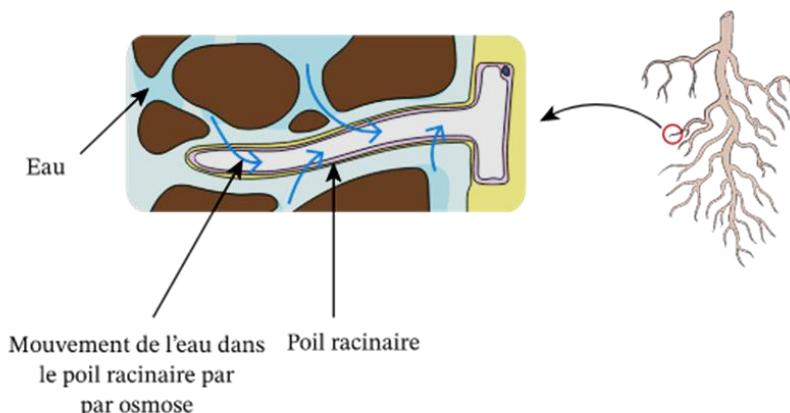


## 3. Force de la tension superficielle :

L'eau a une **tension superficielle**, ce qui signifie que les molécules d'eau à la surface sont plus fortement attirées vers l'intérieur que vers l'extérieur. Cette force permet à l'eau de s'élever dans les petits pores du sol contre la gravité, ce qui est essentiel pour l'ascension de l'eau dans les plantes (capillarité).

## 4. Force de pression osmotique :

Les différences de concentration en ions dissous entre le sol et l'eau peuvent créer des forces osmotiques. Ces forces peuvent influencer la diffusion de l'eau entre le sol et les racines des plantes, affectant ainsi la disponibilité de l'eau pour les plantes. En effet, la pression osmotique est une force résultant de la **concentration des solutés dissous** dans l'eau du sol. Les solutés, tels que les ions minéraux, créent une pression qui *attire l'eau vers eux*. Cette force contribue à la rétention de l'eau dans **la zone racinaire des plantes**.



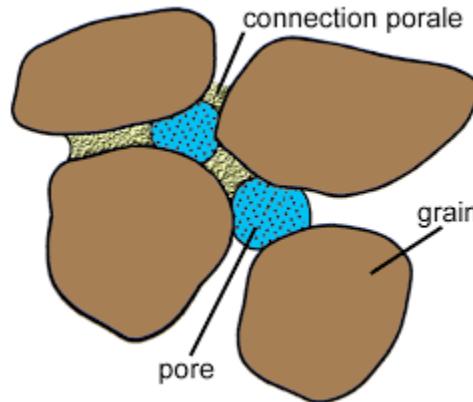
## 5. Force de la matrice capillaire :

La matrice capillaire fait référence aux forces de rétention exercées par **les pores du sol**, en particulier **les pores plus petits**, tels que ceux présents dans les

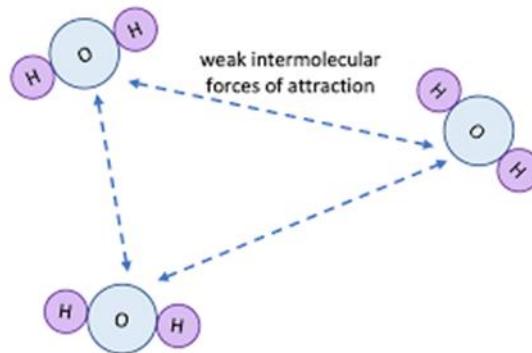
# Agro-pédologie et fertilisation

argiles et les limons. Ces pores capillaires ont tendance à piéger l'eau en raison de l'adhésion et de la cohésion, ce qui empêche l'eau de s'écouler rapidement à travers le sol.

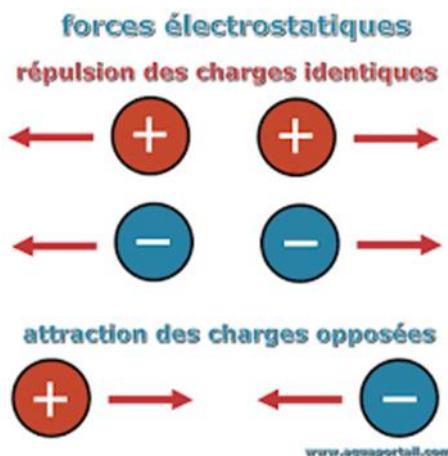
**6. Force de la pression de porosité :** La pression de porosité est la force exercée par les parois des pores du sol sur l'eau contenue à l'intérieur. Cette pression contribue également à la rétention de l'eau, en particulier dans les pores plus gros du sol.



**7. Forces de van der Waals :** Les forces de van der Waals sont des forces d'attraction faibles qui se produisent entre les molécules non polaires. Bien que ces forces soient relativement faibles, elles peuvent également contribuer à la rétention de l'eau dans les pores du sol.



**8. Forces électrostatiques :** Les particules de sol peuvent avoir des charges électriques, positives ou négatives, en fonction de leur composition et de leur pH. Les forces électrostatiques peuvent attirer ou repousser les ions chargés dans l'eau. Par conséquent, les forces électrostatiques peuvent influencer la rétention des ions dans le sol et, par extension, la rétention de l'eau.



**La combinaison de ces forces de rétention de l'eau varie en fonction des propriétés du sol, telles que la texture, la structure, la teneur en matière organique et la composition chimique. Dans l'ensemble, ces forces de rétention de l'eau interagissent pour maintenir l'eau dans le sol, ce qui est essentiel pour l'approvisionnement en eau des plantes et la disponibilité de l'eau pour les processus biologiques et agricoles.**

## 8- Les états de l'eau dans le sol

L'eau dans le sol peut se trouver dans différents états, en fonction de sa répartition dans les pores du sol et de la disponibilité pour les plantes. Les principaux états de l'eau dans le sol sont les suivants :

### 1. Eau gravitaire ou libre :

- L'eau gravitaire est celle qui s'écoule librement sous l'influence de la gravité. Elle remplit les plus gros pores du sol et s'accumule dans la zone saturée, située sous le niveau de la nappe phréatique.
- Cette eau n'est généralement pas accessible aux plantes, car elle se trouve à des profondeurs importantes.

### 2. Eau capillaire :

- L'eau capillaire se trouve dans les pores plus petits du sol, tels que ceux présents dans les argiles et les limons.
- Cette eau est maintenue dans le sol en raison de forces de capillarité. Elle est accessible aux plantes et constitue une source d'humidité disponible pour l'absorption par les racines.

### 3. Eau hygroscopique :

- L'eau hygroscopique est celle qui est fortement adsorbée à la surface des particules de sol et des colloïdes. Elle est retenue très fermement par le sol.
- Cette eau n'est pas disponible pour les plantes en raison de son adhérence étroite aux particules du sol.

### 4. Eau de rétention (ou eau de tension):

- L'eau de rétention est l'eau qui reste dans le sol après que l'eau gravitaire a été éliminée sous l'effet de la gravité.
- Elle est retenue dans les pores du sol en raison des forces d'adhésion et de cohésion et elle est disponible pour les plantes, car elle remplit les espaces entre les particules du sol et est accessible aux racines.

# Agro-pédologie et fertilisation

La disponibilité de ces différents états de l'eau dans le sol dépend de facteurs tels que la texture du sol, la teneur en matière organique, la porosité du sol et la capacité du sol à retenir l'eau. Les plantes puisent principalement de l'eau de **la zone capillaire**, tandis que **l'eau gravitaire** et **l'eau hygroscopique** sont **moins accessibles pour leur usage**. Une bonne gestion de l'eau dans l'agriculture et la gestion des ressources en eau prend en compte ces différents états de l'eau dans le sol pour optimiser l'irrigation et la croissance des cultures.

## 9- Le potentiel de l'eau dans le sol

Le potentiel de l'eau dans le sol, également appelé **potentiel hydrique**, est **une mesure de l'énergie potentielle de l'eau dans le sol par rapport à une référence**.

Il est souvent utilisé pour décrire la disponibilité de l'eau pour les plantes et les processus de mouvement de l'eau dans le sol. Le potentiel hydrique prend en compte diverses forces qui influencent le comportement de l'eau dans le sol, notamment la gravité, la pression, l'adhésion, la cohésion, la tension superficielle et la pression osmotique.

Le potentiel hydrique est généralement exprimé **en unités de pression**, telles que les **bars, les pascals (Pa)** ou **les kilopascals (kPa)**, et il est mesuré par rapport au potentiel hydrique de référence, qui est généralement défini comme étant **nul dans le sol saturé à la pression atmosphérique**. Voici quelques composants du potentiel hydrique dans le sol :

1. **Potentiel gravitaire ( $\Psi_g$ )** : Il mesure l'influence de la gravité sur l'eau dans le sol. Le potentiel gravitaire est **négatif** et **diminue** avec **la profondeur** dans le sol.
2. **Potentiel de pression ( $\Psi_p$ )** : Il quantifie l'effet de **la pression de l'eau** dans les **pores** du sol. Il peut **être positif (pression)** ou **négatif (tension)** en fonction des conditions. En général, il est **positif** dans **les racines** et **négatif** dans la zone du sol où l'eau est **aspirée par les plantes**.
3. **Potentiel osmotique ( $\Psi_s$ )** : Il mesure l'effet de la concentration en solutés dissous dans l'eau du sol. Plus la **concentration en solutés** est **élevée**, plus le **potentiel osmotique** est **négatif**.
4. **Potentiel matriciel ( $\Psi_m$ )** : Il résulte des forces **d'adhésion** et de **cohésion** entre **l'eau** et **les particules** du sol. Il peut être **positif** ou **négatif** en fonction de la disponibilité de l'eau pour les plantes.
5. **Potentiel total ( $\Psi_t$ )** : Il est **la somme** de tous **les composants du potentiel hydrique**. C'est une mesure globale de l'énergie de l'eau dans le sol.

Le potentiel hydrique est essentiel pour comprendre comment l'eau se déplace dans le sol, comment elle est absorbée par les racines des plantes et comment elle est disponible pour les processus biologiques. Les plantes absorbent activement l'eau du sol en réduisant le potentiel hydrique dans leurs racines par des mécanismes tels que la transpiration et l'absorption des nutriments. Une compréhension approfondie du potentiel hydrique dans le sol est décisive pour la gestion de l'irrigation, l'optimisation de la croissance des cultures et la conservation de l'eau dans l'agriculture et la gestion des ressources en eau.

## 10- Les mouvements de l'eau dans le sol

Les mouvements de l'eau dans le sol sont le résultat de divers processus physiques et hydrauliques qui régissent la circulation de l'eau dans l'environnement souterrain. Comprendre ces mouvements est essentiel pour la gestion de l'eau, l'agriculture, la protection de l'environnement et d'autres domaines connexes. Voici les principaux processus de mouvement de l'eau dans le sol :

### 1. Infiltration :

- L'infiltration est le processus par lequel l'eau pénètre dans le sol depuis la surface. Cela se produit généralement lorsque la pluie tombe ou lorsqu'on irrigue des terres agricoles.
- La vitesse d'infiltration dépend de la texture du sol, de sa structure, de sa pente et de la capacité de rétention d'eau du sol. Les sols sableux permettent une infiltration rapide, tandis que les sols argileux ont une infiltration plus lente.

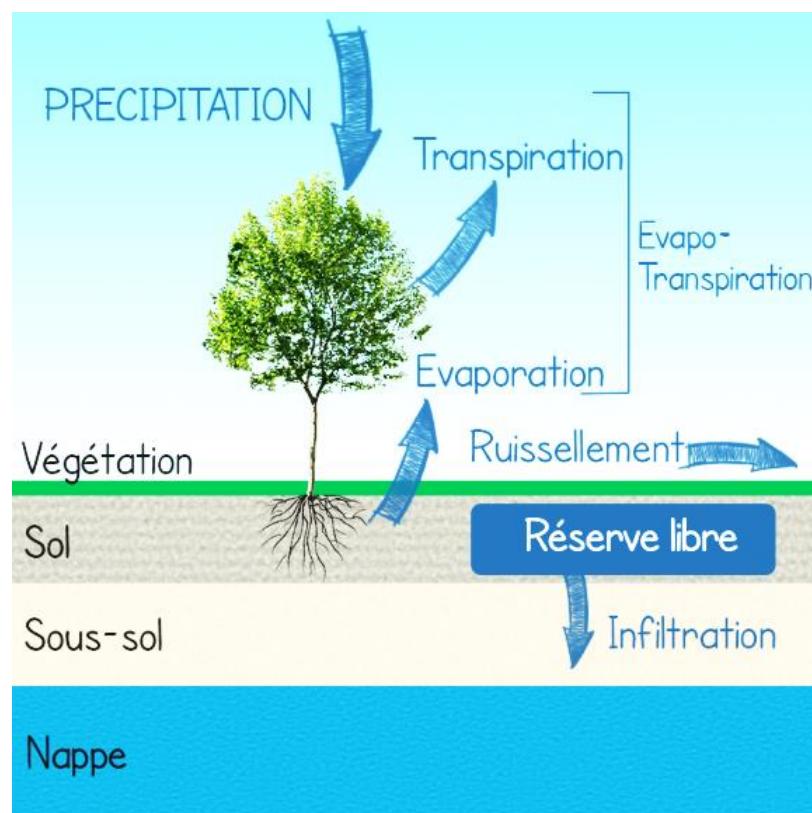


Figure 06 : Les mouvements de l'eau dans le sol

### 2. Percolation :

- La percolation est le mouvement vertical de l'eau à travers les différentes couches du sol. L'eau s'infiltra dans le sol supérieur, puis s'écoule vers le bas à travers les couches sous-jacentes.
- La percolation dépend de la perméabilité des couches de sol et peut être influencée par des barrières imperméables, comme des couches d'argile ou de roche.

### 3. Drainage :

- Le drainage se réfère à l'évacuation de l'excès d'eau du sol vers des canaux de drainage ou des cours d'eau. Il est utilisé pour contrôler le niveau de la nappe phréatique et empêcher les inondations.

# Agro-pédologie et fertilisation

- Les systèmes de drainage agricole sont conçus pour éliminer l'excès d'eau des champs cultivés.

## 4. Rétention :

- Une partie de l'eau qui pénètre dans le sol est retenue par les particules du sol. Cette eau est disponible pour les plantes et est essentielle pour leur croissance. La quantité d'eau retenue dépend de la capacité de rétention en eau du sol, qui varie en fonction de sa texture.

## 5. Remontée capillaire :

- La remontée capillaire est le processus par lequel l'eau est attirée vers le haut à travers les petits pores du sol (capillaires) en raison de forces de cohésion et d'adhésion.
- Ce phénomène est responsable de l'humidification de la zone racinaire des plantes et de la montée de l'eau dans les arbres (ascension de la sève).

## 6. Évaporation :

- L'eau présente dans le sol peut remonter à la surface et s'évaporer dans l'atmosphère, en particulier par temps chaud et sec.
- L'évaporation est un processus par lequel l'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux. L'évapotranspiration est un processus connexe qui comprend à la fois l'évaporation du sol et la transpiration des plantes.

## 7. Transpiration végétale :

- Les plantes absorbent l'eau du sol par leurs racines et la libèrent ensuite dans l'atmosphère par un processus appelé transpiration. Cela contribue à la circulation de l'eau dans l'écosystème, car l'eau est transportée des racines à travers la plante jusqu'aux feuilles, où elle s'évapore.

## 8. Écoulement souterrain :

- L'écoulement souterrain se produit lorsque l'eau se déplace horizontalement à travers des couches de sol ou des formations géologiques perméables, formant ainsi des nappes phréatiques.
- L'eau souterraine peut alimenter des sources, des puits et des cours d'eau.

## 11 -Bilan de l'eau dans le sol.

Le bilan de l'eau dans le sol se réfère à la quantité totale d'eau présente dans le sol à un moment donné. Il prend en compte les précipitations, l'infiltration, le ruissellement, l'évaporation, la transpiration et le stockage d'eau dans le sol. Le bilan de l'eau dans le sol détermine la disponibilité en eau pour les plantes dans un environnement donné. Il fait référence à l'équilibre entre les entrées et les sorties d'eau dans la zone racinaire du sol, ce qui a un impact direct sur la disponibilité de l'eau pour les plantes.

Les besoins en eau des plantes varient en fonction de plusieurs facteurs, notamment le type de plante, les conditions environnementales, le stade de croissance et la saison. Les plantes absorbent de l'eau par leurs

# Agro-pédologie et fertilisation

racines pour diverses fonctions vitales, notamment la photosynthèse, le transport des nutriments et le maintien de leur structure.

Le bilan de l'eau dans le sol détermine la disponibilité d'eau pour les plantes, tandis que les besoins en eau des plantes déterminent combien d'eau les plantes doivent recevoir pour croître de manière optimale. Pour maintenir une croissance saine des plantes, il est essentiel de surveiller ce bilan de l'eau. Voici les principaux éléments à prendre en compte :

## 1. Les entrées d'eau :

- **Précipitations** : Les précipitations, sous forme de pluie ou de neige, sont l'une des principales sources d'eau pour le sol. Elles représentent une entrée d'eau naturelle.
- **Irrigation** : L'irrigation artificielle est souvent nécessaire dans les zones où les précipitations ne sont pas suffisantes pour répondre aux besoins en eau des cultures. L'eau d'irrigation est une entrée contrôlée d'eau dans le sol.
- **Eau de remontée capillaire** : La remontée capillaire de l'eau à partir de la nappe phréatique ou de couches d'eau souterraine peut également être une source d'entrée d'eau dans le sol.

## 2. Les sorties d'eau :

- **Évapotranspiration** : L'évapotranspiration est la perte d'eau due à l'évaporation du sol et à la transpiration des plantes. C'est l'une des sorties d'eau les plus importantes dans le bilan de l'eau du sol.
- **Drainage** : Le drainage représente l'eau qui quitte la zone racinaire du sol et s'écoule vers les cours d'eau ou les nappes phréatiques. Il est nécessaire pour éviter la saturation du sol et les problèmes d'engorgement.
- **Absorption par les plantes** : L'eau est absorbée par les racines des plantes pour la croissance et le développement. Le volume d'eau absorbé dépend des besoins spécifiques de chaque culture.
- **Pertes par ruissellement** : Dans les cas de fortes précipitations ou d'irrigation excessive, l'eau peut ruisseler à la surface du sol plutôt que de s'infiltrer, entraînant des pertes.

## **11.2 Bilan de l'eau dans le sol :**

Le bilan de l'eau dans le sol est la différence entre les entrées et les sorties d'eau. Un bilan positif indique que l'eau est disponible en quantité suffisante pour répondre aux besoins des plantes, tandis qu'un bilan négatif signifie que l'eau est insuffisante et que des mesures d'irrigation supplémentaires peuvent être nécessaires.

**Il est essentiel de maintenir un bilan de l'eau équilibré pour assurer une croissance saine des plantes. Une gestion efficace de l'irrigation, en tenant compte des besoins en eau spécifiques de chaque culture, de la texture du sol et des conditions météorologiques, est essentielle pour optimiser la production agricole tout en préservant les ressources en eau. Une surveillance continue du bilan de l'eau dans le sol permet de prendre des décisions éclairées en matière d'irrigation et de gestion de l'eau.**

## Chapitre 2 : Caractérisation des propriétés physiques, chimiques et biologiques d'un sol

### Objectifs :

- Acquérir les connaissances fondamentales sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.
- Comprendre le rôle du complexe adsorbant et les mécanismes d'échange des cations et des anions.
- Analyser la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol et leur impact sur la nutrition des plantes.
- Évaluer la fertilité des sols en fonction de leurs caractéristiques.

### Introduction

La caractérisation des propriétés physiques, chimiques et biologiques d'un sol est essentielle pour comprendre sa qualité, son potentiel agricole, et pour prendre des décisions éclairées en matière de gestion des terres et de l'environnement. Voici comment chaque aspect peut être caractérisé :

### 1- Caractérisation des propriétés physico-chimiques et biologiques d'un sol

#### 1.1- Propriétés physiques du sol :

- **Texture du sol** : La texture du sol décrit la proportion relative de sable, de limon et d'argile dans le sol. Elle peut être déterminée en utilisant des méthodes telles que l'analyse ***granulométrique***, qui sépare les particules du sol en fonction de leur taille.
- **Structure du sol** : La structure du sol se rapporte à la manière dont les particules du sol sont organisées en agrégats. Elle peut être observée visuellement et évaluée en fonction de caractéristiques telles que ***la taille*** et ***la stabilité*** des agrégats.
- **Porosité du sol** : La porosité du sol concerne ***la proportion d'espace vide (pores)*** dans le sol. Elle peut être déterminée en mesurant ***la capacité de rétention d'eau du sol*** et en utilisant des méthodes de ***perméabilité***.
- **Densité apparente** : La densité apparente est ***la masse du sol*** par unité de ***volume***. Elle est souvent mesurée pour évaluer la compaction du sol et son aptitude à la croissance des racines.

#### 1.2- Propriétés chimiques du sol :

- **pH du sol** : Le pH mesure l'acidité ou la basicité du sol. Il est important car il influence la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes. Le pH peut être mesuré à l'aide d'un pH-mètre.

# Agro-pédologie et fertilisation

- **Teneur en matière organique** : La teneur en matière organique du sol est un indicateur de la quantité de matière organique décomposée présente dans le sol. Elle peut être évaluée par la méthode de la perte au feu ou de la matière organique totale.
- **Capacité d'échange cationique (CEC)** : La CEC est une mesure de la capacité du sol à retenir et à échanger des cations (ions positifs) tels que les nutriments essentiels pour les plantes (calcium, magnésium, potassium, etc.).
- **Concentration en éléments nutritifs** : Les niveaux de nutriments essentiels pour les plantes, tels que l'azote, le phosphore et le potassium, sont souvent analysés dans le sol pour évaluer la fertilité du sol.
- **Salinité** : La salinité du sol mesure la concentration en sels solubles dans le sol. Une salinité excessive peut être néfaste pour les plantes.

## 1.3- Propriétés biologiques du sol :

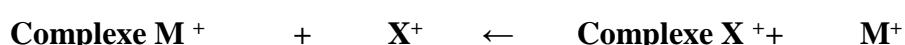
- **Activité microbienne** : L'activité microbienne du sol est liée à la présence et à l'activité de bactéries, de champignons et d'autres micro-organismes. Elle peut être évaluée par des tests microbiologiques.
- **Biodiversité du sol** : La biodiversité du sol se réfère à la variété des organismes vivant dans le sol, y compris les vers de terre, les insectes, les nématodes et autres. Elle peut être évaluée par des études de terrain et de laboratoire.
- **Décomposition de la matière organique** : La vitesse de décomposition de la matière organique dans le sol est un indicateur clé de sa santé. Elle peut être évaluée en mesurant la décomposition de la matière organique ajoutée au sol.

La caractérisation complète du sol implique souvent l'utilisation de méthodes de laboratoire spécialisées et d'échantillonnage sur le terrain. Ces informations sont essentielles pour déterminer la qualité du sol, sa capacité à soutenir la croissance des cultures, et pour développer des stratégies de gestion appropriées pour l'agriculture, la foresterie et la conservation de l'environnement.

## 2- Le complexe adsorbant des sols

Le sol possède la propriété de retenir diverses substances. En effet, les cations et les anions peuvent être retenus par le **complexe adsorbant du sol**, c'est à dire l'ensemble des colloïdes ( substances humiques, argile, sesquioxides,...) dotés de charges négatives ou positives.

Les ions y seront retenus sous **forme échangeable**. En d'autres termes, si on traite un sol par une solution contenant des ions différents de ceux retenus par le sol, il y aura échange entre les ions du complexe adsorbant et ceux de la solution :



# Agro-pédologie et fertilisation

- L'absorption ionique dans le sol peut être considérée comme réversible :

**les ions échangeables du complexe adsorbant sont en équilibre avec la solution du sol** : toute modification de la composition de la solution du sol provoque un changement de cet équilibre par échange : certains ions du complexe passent en solution (désorption) et sont remplacés par d'autres ions, qui étaient auparavant en solution (adsorption).

Le pouvoir adsorbant est la propriété que possède le complexe adsorbant du sol, de retenir à sa surface des ions provenant de la solution du sol. Cette définition est illustrée dans le schéma ci-dessous :

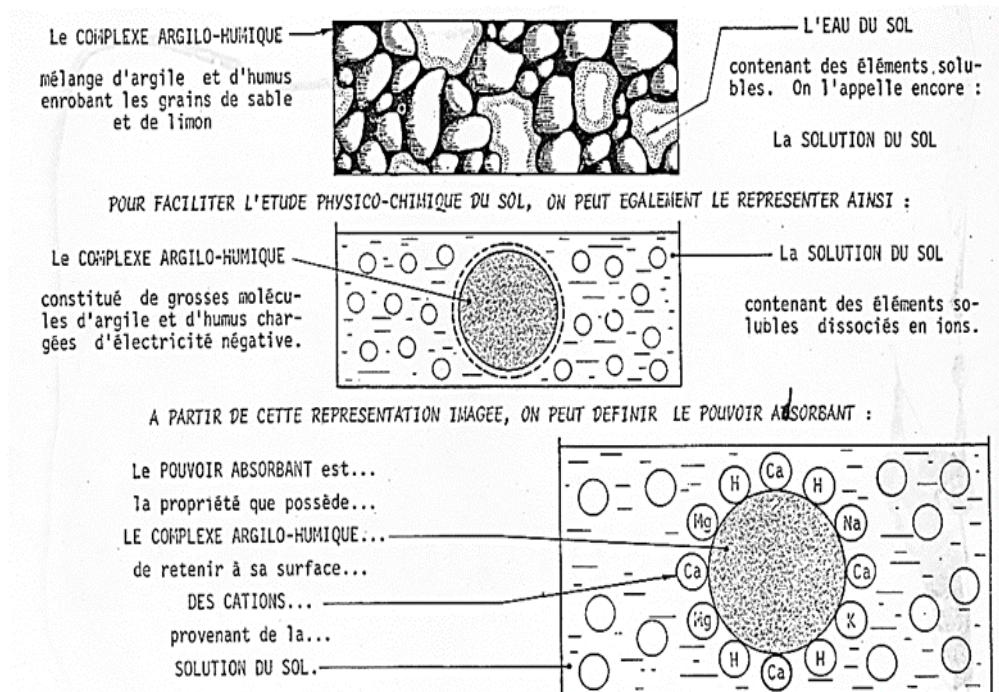


Figure 07 : Le complexe adsorbant du sol

## 2.1- Principaux facteurs réglant l'intensité des phénomènes de sorption et d'échange des cations :

### a) la nature des colloïdes :

Le tableau suivant donne la capacité de sorption des principaux colloïdes négatifs à PH 7 :

Kaolinite	3 à 15 meq / 100 g
Halloysite	5 à 50 meq / 100 g
Montmorillonite	80 à 150 meq / 100 g
Illite	10 à 40 meq / 100 g
Chlorite	10 à 40 meq / 100 g
Vermiculite	100 à 150 meq / 100 g
Matière organique	100 à 450 meq / 100 g

Mais, **pour un même colloïde, les valeurs de CEC dépendent du PH** : l'augmentation des valeurs de PH se traduit généralement, pour les colloïdes négatifs, par une augmentation des charges négatives. Inversement, l'acidification du sol se traduit par une diminution de la sorption cationique.

## b) La nature des ions :

**La fixation des ions suit un ordre préférentiel** : les cations habituellement fixés sur le complexe sont :

- les ions  $H^+$
- les cations métalliques, parmi lesquels :
- certains sont fixés en quantité importante :  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $K^+$ ,...
- d'autres en quantité généralement plus limitée :
  - ♣ L'ion ammonium  $NH_4^+$
  - ♣ Les oligo-éléments :  $Mn^{++}$ ,  $Zn^{++}$ ,  $Cu^{++}$ ,...
  - ♣ Le fer  $Fe^{++}$  ou  $Fe^{+++}$
  - ♣ L'aluminium  $Al^{+++}$

**L'intensité avec laquelle ces ions sont retenus est en général la suivant :**

- **ANIONS:**  $SO_4^{2-}$  >  $F^-$  >  $NO_3^-$  >  $Cl^-$  >  $Br^-$  >...
- **CATIONS :**  $Li^+$  <  $Na^+$  <  $Mg^{++}$  <  $Ca^{++}$  <  $Ba^{++}$  <  $Al^{+++}$  <  $H^+$

Un cation est donc déplaçable par tous ceux qui sont situés à sa droite. Mais cet ordre de préférence (*cations à égales concentrations dans la solution du sol*) est différent pour chaque type d'argile et pour l'humus.

### Par exemple :

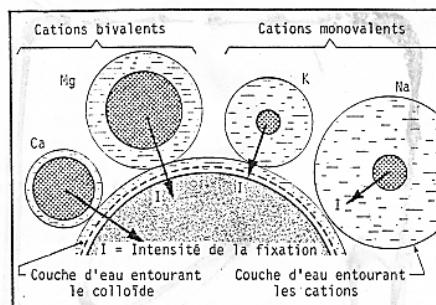
Kaolinite       $Na^+ < H^+ < K^+ < Mg^{++} < Ca^{++} < Ba^{++}$   
 Montmorillonite       $Na^+ < K^+ < H^+ < Mg^{++} < Ca^{++} < Ba^{++}$   
 Mica       $Na^+ < Mg^{++} < Ca^{++} < K^+ < H^+ < Ba^{++}$   
 Acides humiques       $Na^+ < K^+ < Mg^{++} < Ca^{++} < Ba^{++}$

Cet ordre préférentiel de fixation, d'une grande importance pédologique, peut s'expliquer ainsi :

#### ✓ l'intensité de fixation dépend de la valence et de l'hydratation des ions :

Les ions bivalents  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$  sont plus énergiquement retenus que les ions monovalents  $K^+$ ,  $Na^+$ ,...

Les ions faiblement hydratés ( $Mg^{++}$  et surtout  $Ca^{++}$ ), c'est à dire entourés d'une faible couche d'eau (voir figure ci-dessous)) sont mieux fixés que les ions fortement hydratés ( $K^+$  et  $Na^+$ )



L'INTENSITÉ DE FIXATION DES CATIONS dépend de leur valence et de leur hydratation.

- Les ions bivalents, Ca et Mg, sont plus énergiquement fixés que les monovalents.
- Plus les cations sont entourés d'une couche d'eau importante, moins ils peuvent s'approcher des colloïdes. Pour cette raison, le sodium, bien qu'étant un ion flocculant, assure la flocculation la moins stable.

# Agro-pédologie et fertilisation

La fixation des cations : valence et degré d'hydratation (tiré de Soltner D. ,1992)

- ✓ pour chaque ions, il existe un équilibre entre la quantité de cet ion fixée sur le complexe adsorbant et la concentration de cet ion dans la solution du sol.

## 2.2- Le mécanisme de l'échange des cations :

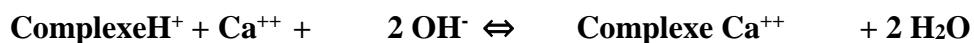
### a) Deux exemples d'échange de cations :

#### 1- *Le remplacement des ions H<sup>+</sup> par des cations Ca<sup>++</sup> :*

Lorsque l'on introduit de la chaux dans un sol, ses molécules se dissocient :



La concentration d'ions Ca<sup>++</sup> augmente dans la solution du sol et cette concentration se communique au complexe, par exemple un complexe argilo-humique abondamment garni d'ions H<sup>+</sup> : un cation Ca<sup>++</sup> prend la place de deux ions H<sup>+</sup>, qui se combinent aux anions OH<sup>-</sup> apportés par la chaux pour former de l'eau :



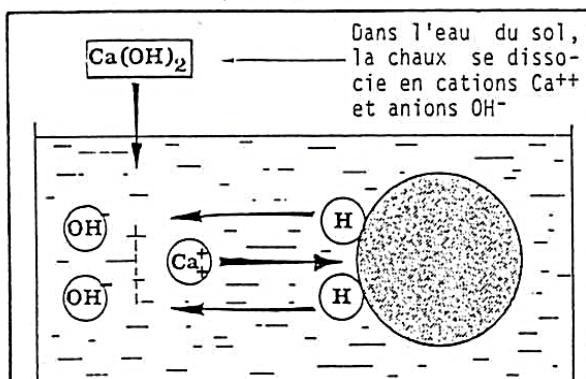
#### 2- *L'échange de cations Ca<sup>++</sup> contre des cations K<sup>+</sup> :*

Si dans ce sol enrichi en calcium par le chaulage, on introduit du chlorure de potassium ( KCl, engrais potassique ), ce sel se dissout, puis se dissocie en anions Cl<sup>-</sup> et cations K<sup>+</sup>. Ces derniers, augmentant la concentration en ions K<sup>+</sup> de la solution, provoquent un échange avec le complexe : ils prennent sur celui-ci la place d'ions Ca<sup>++</sup>, à raison de 2 K<sup>+</sup> pour 1 Ca<sup>++</sup>. Ces cations Ca<sup>++</sup> remis en solution forment, avec les anions Cl<sup>-</sup> du CaCl<sub>2</sub>, sel soluble qui peut être lessivé : cet apport d'engrais potassique a provoqué une décalcification du sol : *c'est l'action décalcifiante des engrais potassiques* ( voir figure ci-dessous).

# Agro-pédologie et fertilisation

## DEUX EXEMPLES D'ÉCHANGE D'IONS ENTRE LE COMPLEXE ET LA SOLUTION DU SOL

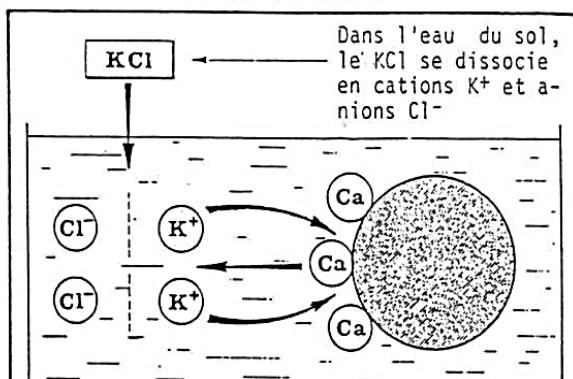
### I - Remplacement d'ions $H^+$ par des cations $Ca^{++}$



Un cation  $Ca^{++}$  prend, sur le complexe, la place de 2 ions  $H^+$ , qui s'associent aux ions  $OH^-$  pour former de l'eau.

Cette NEUTRALISATION D'IONS  $H^+$  fait baisser l'acidité du sol : les amendements calcaires permettent donc de lutter contre l'acidité du sol.

### II - Echange de cations $Ca^{++}$ contre des cations $K^+$



Deux cations  $K^+$  prennent, sur le complexe, la place d'un cation  $Ca^{++}$ , qui s'associe aux anions  $Cl^-$  pour former  $CaCl_2$ , sel soluble, donc exposé au lessivage :

Le chlorure de potassium, et tous les engrains potassiques, ont une ACTION DECALCIFIANTE. Il sera nécessaire de recharger régulièrement le sol en Ca.

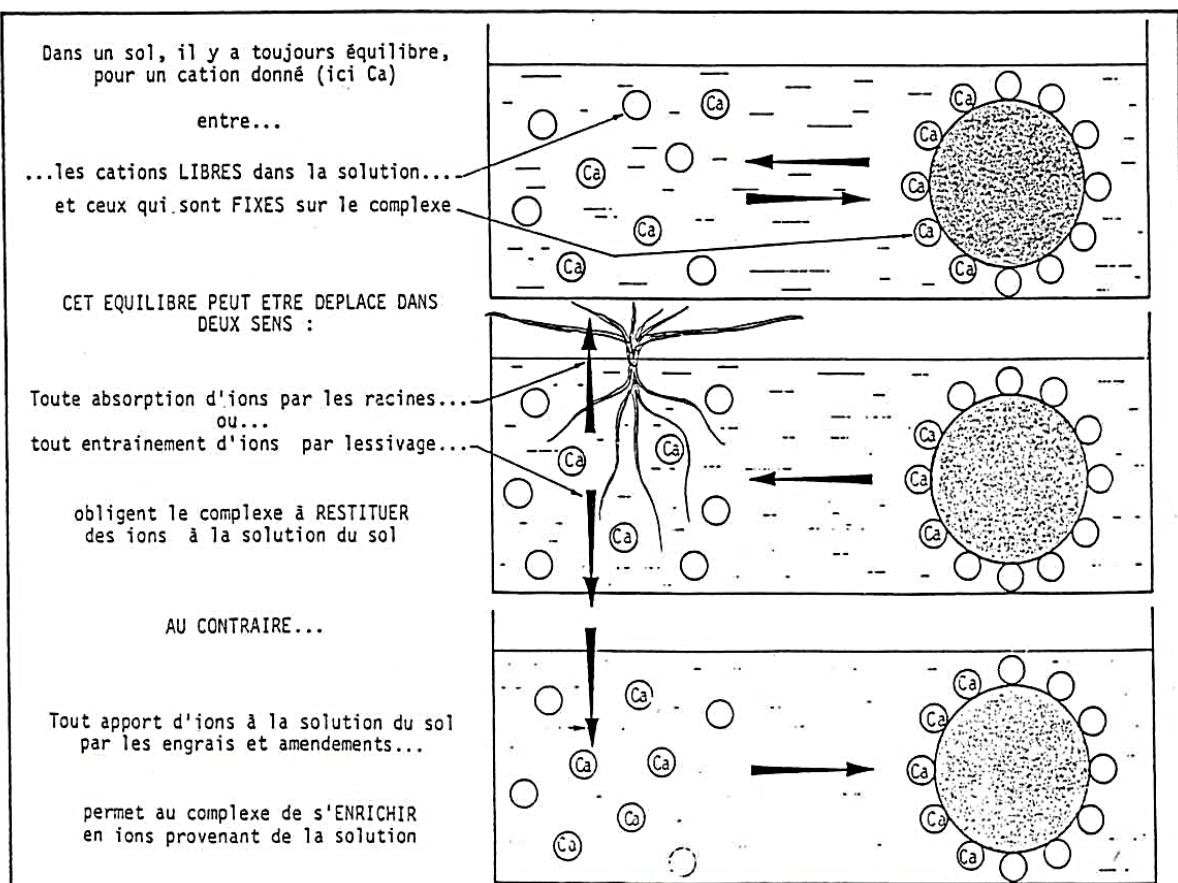
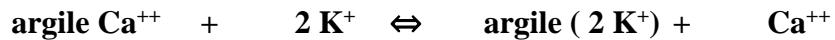


Figure 08 : Deux exemples d'échanges entre le complexe adsorbant et la solution du sol (tiré de Soltner D. ,1992)

## b) Mécanisme d'échange : recherche d'un équilibre entre complexe et solution du sol :

Supposons la présence simultanée des ions  $K^+$  et  $Ca^{++}$  dans le système : argile- solution du sol. Nous avons l'équation d'équilibre :



Avec :

$$k = \frac{\text{Argile } Ca^{++} \times (K^+)}{\text{Argile } K^+ \times (Ca^{++})}$$

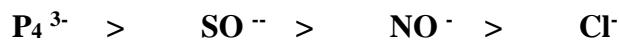
**k = constante d'équilibre qui dépend de la nature des colloïdes, de la nature des ions,...**

### 2.4-La sorption et l'échange des anions :

Dans les eaux de drainage, on trouve beaucoup d'anions  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , ...

Apparemment donc ces ions ne sont pas retenus par le pouvoir adsorbant du sol. De fait, chacun sait que les nitrates sont très facilement perdus par lessivage.

Pourtant, les anions  $P_4^{3-}$  sont très bien retenus. Certains anions peuvent donc être fixés, et leur énergie de fixation serait la suivante, par ordre décroissant :



Plusieurs mécanismes expliquent cette fixation (voir figure) :

- la fixation sur les hydroxydes de fer et d'aluminium, colloïdes positifs liés à l'argile, en échange contre des ions  $OH^-$ ,
- fixation sur quelques valences positives des argiles, en échange contre des ions  $OH^-$ , ou sur des liaisons de bordure ( $Al^{+++}$ ),
- fixation sur l'argile ou l'humus par l'intermédiaire d'ions  $Ca^{++}$  (ponts calciques).

# Agro-pédologie et fertilisation

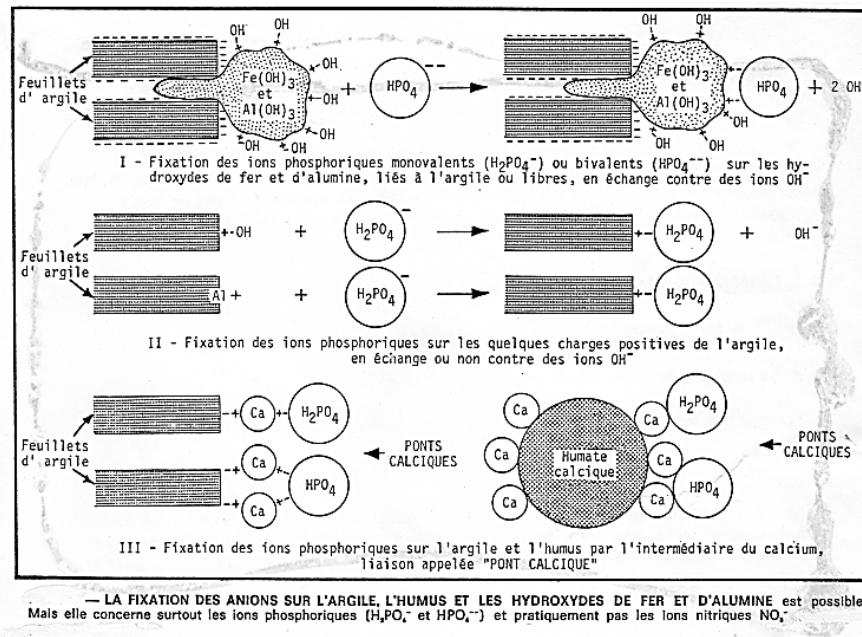


Figure 09 : Les modes de fixation des anions (tiré de Soltner D. ,1992)

## 2.6- Les valeurs caractéristiques du complexe adsorbant : CEC et V%

### 1. La capacité d'échange cationique (T ou CEC) :

La capacité totale d'échange ou capacité d'échange de cations est la quantité maximale de cations qu'un sol peut adsorber (pour 100 g de matière sèche).

Autrement dit, cette mesure représente **le total des charges négatives** du sol disponibles pour la fixation :

- ✓ des ions  $H^+$  et  $Al^{+++}$ ,
- ✓ des cations appelés bases échangeables :  $Ca^{++}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{++}$  (l'ion  $NH_4^+$  peut être présent aussi, mais étant très minoritaire, il n'est pas pris en compte).

On l'exprime en **milliéquivalents (meq) pour 100 g de matière sèche**. L'équivalent d'un corps étant le rapport masse atomique (en g) / valence de ce corps. Le milliéquivalent en est le millième.

**Exemple :** Un sol qui a une CEC de 20 meq pourrait retenir :

- en  $Ca^{++}$  :  $20 \text{ meq} * 40/2 = 400 \text{ mg de Ca / 100 g de sol ,}$
- en  $Na^+$  :  $20 \text{ meq} * 23/1 = 460 \text{ mg de Na / 100 g de sol.}$

### 2. La somme des bases échangeables (S) :

Il s'agit de la **somme des quantités de cations basiques échangeables**, fixés sur le complexe à un moment donné. On l'exprime également en meq pour 100 g de matière sèche. La **différence T-S** représente donc la **quantité d'ions  $H^+$  et  $Al^{+++}$  fixés**. Cette différence peut encore être appelée *insaturation*.

$$T = S + Al^{+++} + H^+$$

## 3. Le taux de saturation ( V% ou S/T ) :

Le taux de saturation est le rapport somme des bases échangeables / CEC,  
Exprimé en %.

Ce taux est variable d'un sol à l'autre, et, pour un même sol d'une année à l'autre. En effet toute cause capable d'apporter ou au contraire d'enlever des bases échangeables au complexe le fait varier.

Ce taux dépend :

- ✓ de la richesse chimique de la roche mère,
- ✓ de la fréquence et de l'importance des apports de cations (surtout Ca lors des amendements calcaires,...),
- ✓ de l'importance du lessivage, donc du climat, et de la perméabilité du sol.

- Les sols calcaires ont souvent un taux de saturation supérieur à 80 %.
- Les sols sableux peuvent être pauvres en bases et avoir un taux de saturation inférieur à 20 %.

Le taux de saturation du complexe absorbant est un *précieux indicateur pédologique et agronomique quant à la richesse chimique du sol. Toutefois, il faut se garder d'établir une équivalence automatique entre taux de saturation et niveau trophique* : cette attitude semble critiquable car le niveau trophique ( ou plus largement la fertilité ) d'un sol dépend de beaucoup d'autres facteurs tels que la teneur en argile, la structure, l'aération, le PH, la profondeur prospectable par les racines, la réserve utile en eau, les teneurs en N P K ,...

Selon la valeur du taux de saturation, on peut ajouter un adjectif au nom du sol :

Taux de saturation S/ T	Adjectif
100 %	saturé
95 %	quasi-saturé
80 %	méso-saturé
50 %	oligo-saturé
30 %	désaturé
15 %	hyper-désaturé
0 %	

En résumé, **Le complexe adsorbant, par son pouvoir adsorbant,**

- met en réserve les éléments nutritifs qui, sans lui, seraient perdus par lessivage, en les échangeant principalement contre les ions  $\text{Ca}^{++}$ , faciles à déplacer,
- libère ces éléments pour les racines, en les échangeant notamment contre les ions  $\text{H}^+$  formés continuellement par l'activité biologique (microbes et racines) élaborant de l'acide carbonique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ),
- régularise la composition de la solution du sol, milieu de vie des racines et des microbes.

**Ce mécanisme de régulation concerne, outre la teneur en bases échangeables, mais aussi la teneur en  $\text{Al}^{+++}$  et en  $\text{H}^+$ , ions responsables de l'acidité des sols**

## 2.7- Les échanges ioniques et nutrition minérale des plantes

### 2.5.1 -Métabolisme d'absorption des éléments minéraux

Les plantes, pour la plupart, tirent du sol l'eau et les sels minéraux qui leur sont nécessaires. Il y a un contact étroit entre le sol et les racines, cependant seule une partie de la racine est capable d'absorber l'eau et les ions. Elles constituent l'interface entre la plante et le sol. L'absorption des éléments minéraux se fait en deux étapes :

- **L'adsorption** étape de fixation superficielle, passive et réversible pendant laquelle, l'élément adsorbé peut être désorbé. La racine exprime un pouvoir adsorbant par lequel elle peut échanger ses cations avec la solution du sol c'est la capacité d'échange cationique racinaire (C.E.C.R.)
- **L'absorption** (au sens strict) qui suit la première étape et peut être active ou passive, selon les ions.

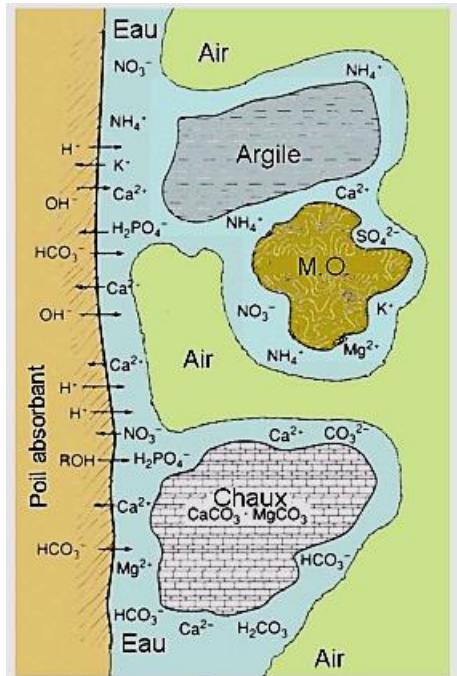
### 2.5.2 -Modalités d'absorption des éléments minéraux

L'absorption des éléments minéraux par les plantes implique plusieurs modalités et mécanismes pour prélever ces nutriments essentiels du sol. Voici les principales modalités d'absorption des éléments minéraux par les plantes :

1. **MASS FLOW** : Le mass flow est le mouvement de l'eau du sol et des nutriments en solution vers les racines. Une différence de pression entre la solution du sol et l'intérieur de la plante est créée par la perte d'eau par l'évaporation au niveau des feuilles. Cette différence de pression permet le passage de l'eau du sol et des nutriments qu'elle contient vers l'intérieur de la plante par les poils absorbants. Le N, Mg, Ca et Mo sont absorbés surtout par mass flow.

# Agro-pédologie et fertilisation

2. **Absorption par diffusion** : Certains éléments minéraux, tels que l'eau ( $H_2O$ ) et l'oxygène ( $O_2$ ), sont absorbés par les plantes par simple diffusion à travers les membranes cellulaires des cellules racinaires. La diffusion est un processus passif qui se produit en fonction des gradients de concentration, c'est-à-dire que les nutriments se déplacent des zones de concentration élevée vers les zones de concentration faible dans les cellules racinaires. Il implique surtout les ions ayant une énergie ionique élevée comme le P, le K, le Mn et le Zn.
3. **Absorption active ou l'interception** : L'interception est le contact direct entre les racines et les ions moins solubles retenus par charges électriques du complexe argilo-humique. La majorité des éléments minéraux, tels que les ions nitrate ( $NO_3^-$ ), phosphate ( $PO_4^{3-}$ ), potassium ( $K^+$ ), calcium ( $Ca^{2+}$ ), et magnésium ( $Mg^{2+}$ ), sont absorbés activement par les plantes. Ce processus actif nécessite de l'énergie, généralement fournie sous forme d'ATP (adénosine triphosphate). Les plantes utilisent des protéines de transport spécifiques dans les membranes cellulaires des cellules racinaires pour faciliter l'entrée de ces ions nutritifs. Ce processus est important pour l'absorption Cu et du Fe.
4. **Co-transport** : Le co-transport est un mécanisme important d'absorption active. Les plantes utilisent des co-transporteurs pour transporter simultanément un ion nutritif et un ion d'un autre type à travers la membrane cellulaire. Par exemple, le co-transporteur de nitrate (NRT1) facilite l'entrée des ions nitrate ( $NO_3^-$ ) en utilisant le potentiel électrochimique généré par la pompe à protons de la membrane cellulaire.
5. **Pompe à protons** : Les cellules racinaires possèdent une pompe à protons ( $H^+-ATPase$ ) qui utilise de l'ATP pour pomper activement des ions hydrogène ( $H^+$ ) hors des cellules. Cela crée un gradient de pH acide à la surface des cellules racinaires, ce qui favorise l'absorption de certains éléments minéraux, tels que le fer ( $Fe^{3+}$ ), qui sont plus disponibles à des pH acides.
6. **Sélectivité ionique** : Les cellules racinaires ont la capacité de sélectionner sélectivement les ions nutritifs en fonction des besoins de la plante. Elles peuvent réguler l'expression des protéines de transport en réponse aux niveaux de nutriments dans le sol pour maximiser l'absorption des nutriments nécessaires.
7. **Mychorhizes et symbiose** : Les plantes peuvent former des associations symbiotiques avec des champignons mycorhiziens qui augmentent leur capacité d'absorption des éléments minéraux, en



# Agro-pédologie et fertilisation

particulier du phosphore. Les mycorhizes augmentent la surface d'absorption racinaire et facilitent l'acquisition de nutriments du sol.

*l'absorption des éléments minéraux par les plantes est un processus complexe qui combine des mécanismes de diffusion passive et d'absorption active, ainsi que des interactions avec les symbiotes bénéfiques pour maximiser l'acquisition des nutriments essentiels du sol. Ces mécanismes permettent aux plantes de maintenir leur nutrition minérale et de soutenir leur croissance et leur développement.*

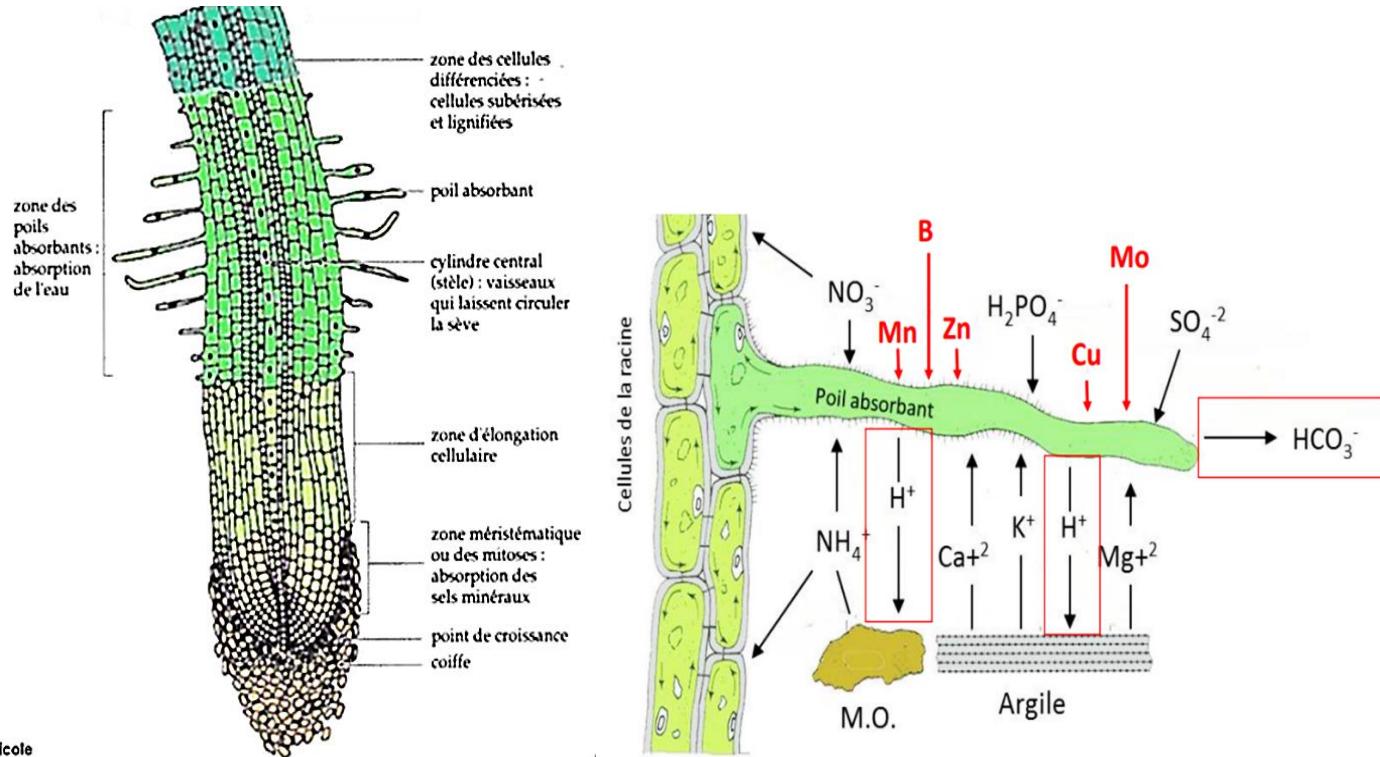


Figure 10 : Absorption des éléments nutritifs par les poils absorbants

## 3- Les éléments nutritifs dans le sol

### 3.1 - Nutrition des plantes :

La nutrition végétale est l'ensemble des processus qui permettent aux végétaux d'absorber dans le milieu ambiant et d'assimiler les éléments nutritifs nécessaires à leurs différentes fonctions physiologiques : croissance, développement, reproduction...

#### Quels sont les besoins des végétaux ?

Pour se développer, une plante a besoin d'eau, de lumière, d'oxygène, de carbone mais également d'éléments minéraux présents en plus ou moins grande quantité dans le sol.

**Tous les éléments nutritifs que la plante utilise proviennent du sol ou de l'air ou de l'eau**

# Agro-pédologie et fertilisation

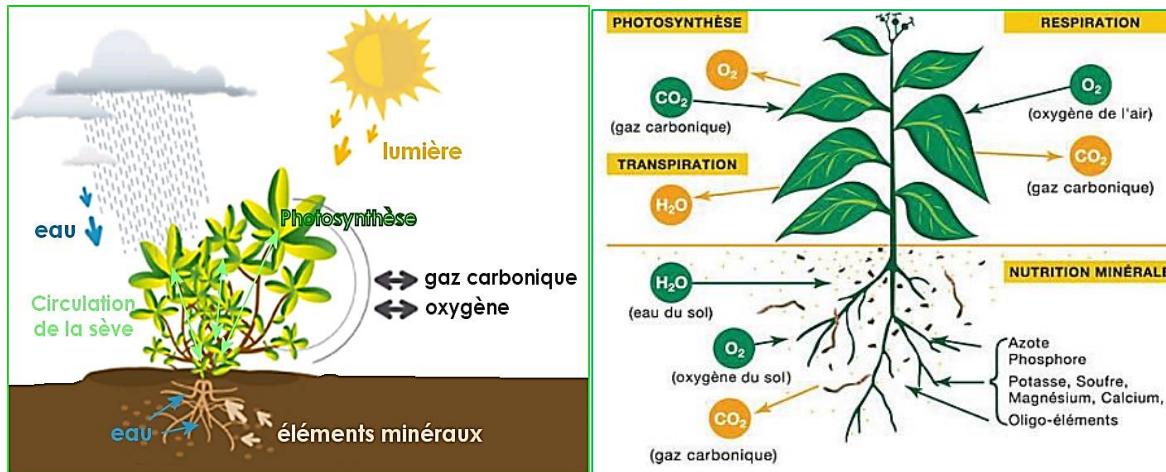


Figure 11 : Nutrition des plantes

- ✓ **De l'atmosphère** : Le carbone et l'oxygène Une partie du soufre (SO<sub>2</sub>)
- ✓ **Du sol** : L'hydrogène L'azote Les éléments minéraux (P, K, Ca, Mg, la plus grande partie du S) Les oligo-éléments.
- ✓ **Le carbone et l'oxygène** représentent à eux 2 plus de + de 88% de la MS d'un végétal Ils sont puisés dans l'atmosphère via le processus de la photosynthèse
- ✓ **L'eau** Puisé via les racines

## 3.2 - Besoins nutritionnels des plantes

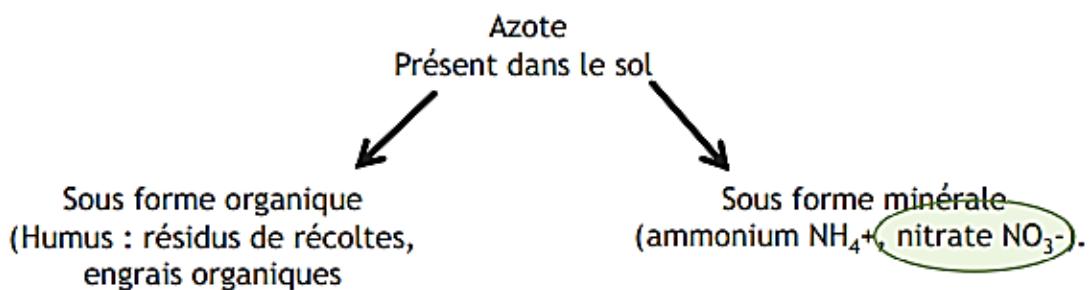
Les éléments nutritifs nécessaires aux plantes sont généralement classés en deux catégories principales : les éléments majeurs (ou macronutriments) et les oligo-éléments (ou micronutriments).

### ➤ Éléments Majeurs :

Dans le monde végétal, on distingue **9 éléments principaux indispensables** à la plante. Ces éléments sont le Carbone (C), l'Hydrogène (H), l'Oxygène (O), l'Azote (N), le Phosphore (P), le Potassium (K) mais également le Calcium (Ca), le Magnésium (Mg) et le Soufre (S) qui sont souvent classés comme éléments secondaires aussi importants.

Les trois premiers (C,H,O) sont apportés directement par le dioxyde de carbone et l'eau, on ne doit dès lors pas se préoccuper de leur apport excepté dans les serres où on peut les facteurs de croissance.

1. **Azote (N)** : L'azote est essentiel à la synthèse des protéines, de l'ADN, de l'ARN et des chlorophylles. Il favorise la croissance des tiges et des feuilles.



Forme assimilable par les plantes (sauf légumineuse)

**N.B :** L'azote sous forme d'ions nitrate, est très soluble et peu retenu par le sol = risque de pollution.

### ⊕ Les principaux signes de carences en azote :

- Une Chlorose apparaît tout d'abord sur les plus anciennes feuilles et très vite sur les plus jeunes. Les feuilles deviennent vert-jaunâtre suivit d'une couleur orangée qui s'ajoute à la chlorose. Finalement on observe la chute des feuilles. L'excès d'humidité est une des causes principales de la disparition de l'azote.
- Croissance de l'arbre sera très faible, voir stoppée.



Figure 12 : Les principaux signes de carences en azote

### ⊕ Cycle de l'azote

# Agro-pédologie et fertilisation

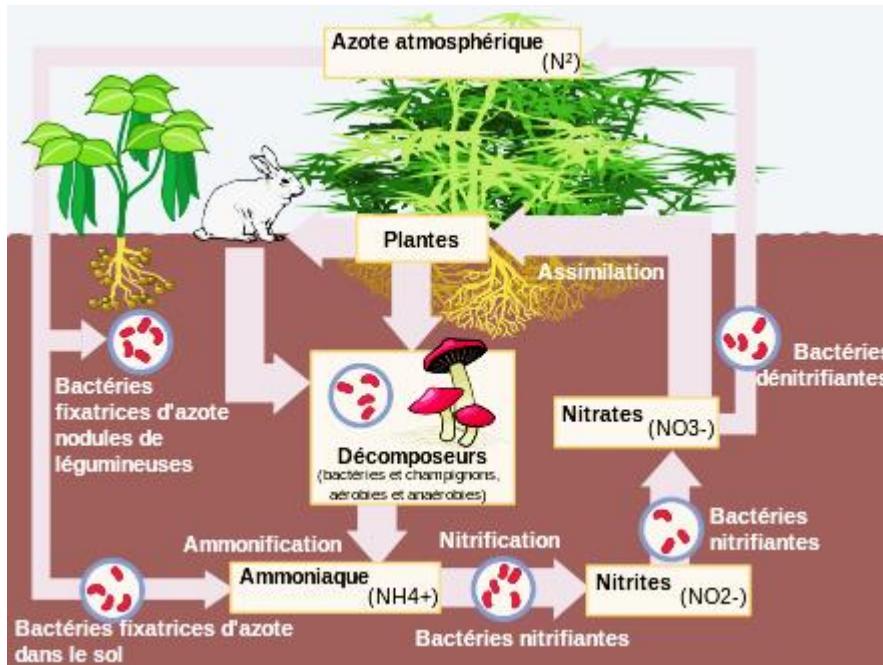
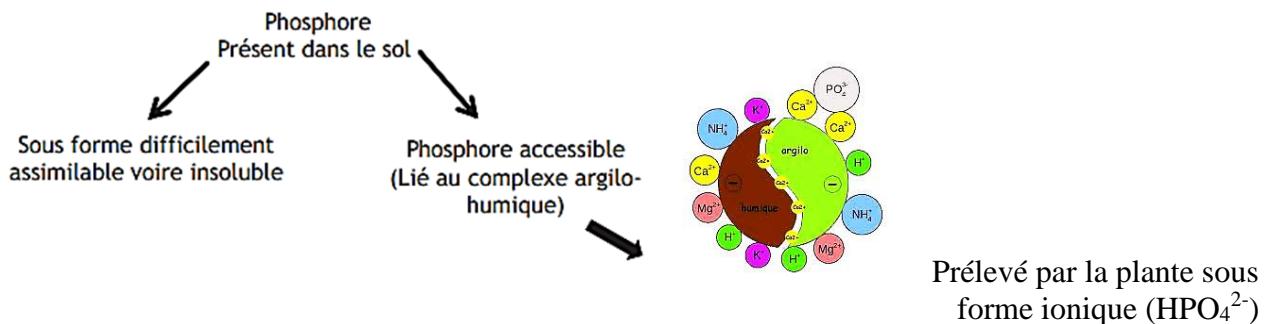


Figure 13 : Cycle de l'azote

2. **Phosphore (P)** : Élément indispensable à la photosynthèse et essentiel pour la floraison, la nouaison, la précocité, le grossissement des fruits et la maturation des graines. On le retrouve dans les acides nucléiques, les chloroplastes et les protéines du noyau. Il est présent dans les molécules énergétiques que sont l'ATP (adénosine triphosphate) et l'ADP (adénosine diphosphate).. Il est également impliqué dans la floraison et la formation des racines.



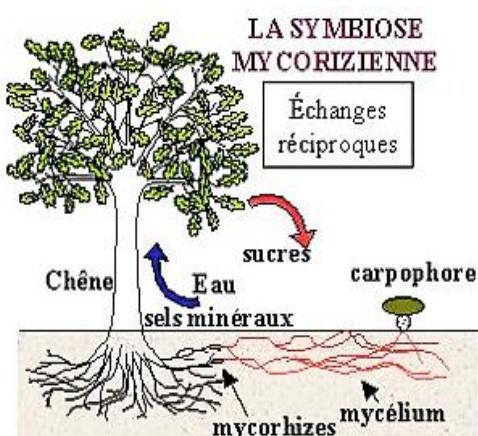
**N.B :** Phosphore est un élément peu mobile dans le sol. Nécessité de le placer précisément là où les racines le prélèvent.

**Les mycorhizes** : association symbiotique entre des champignons et les racines des plantes. Dans le cas du **phosphore** :

- Le champignon secrète des enzymes capables d'absorber le phosphore fixé par le sol •En contrepartie, la plante fournit au champignon les sucres provenant de la photosynthèse

## Les principaux signes de carences en phosphore :

- la plante reste petite et raide. La pointe des feuilles se colore en vert foncé ou en pourpre, la floraison est retardée voire nulle, et les fruits sont rares, de petit calibre et acides et les bourgeons ont tendance à se dessécher.
- La face inférieure des feuilles présente une nervure pourpre.





Feuillage de guava



Feuille de colza

Figure 14 : Les principaux signes de carences en phosphore

## ✚ Cycle de Phosphore

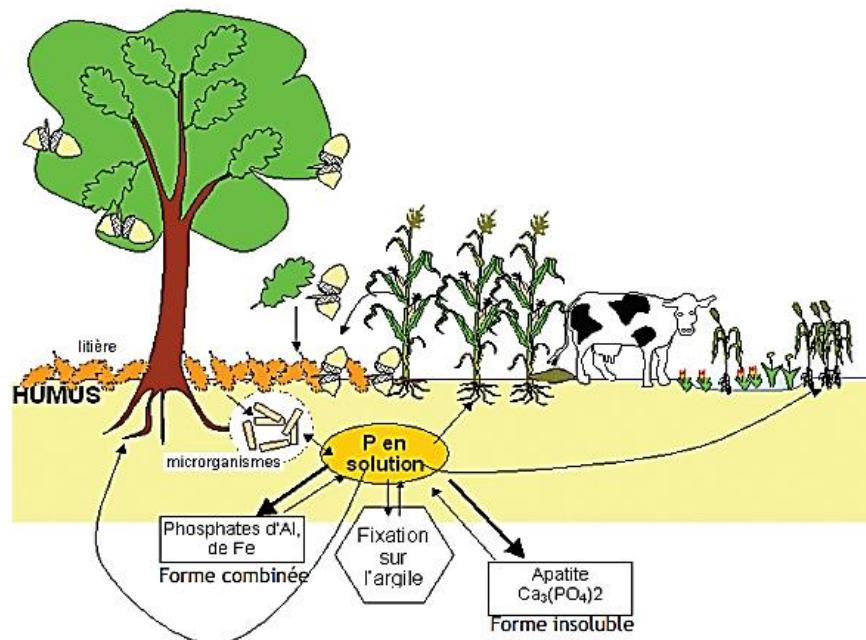
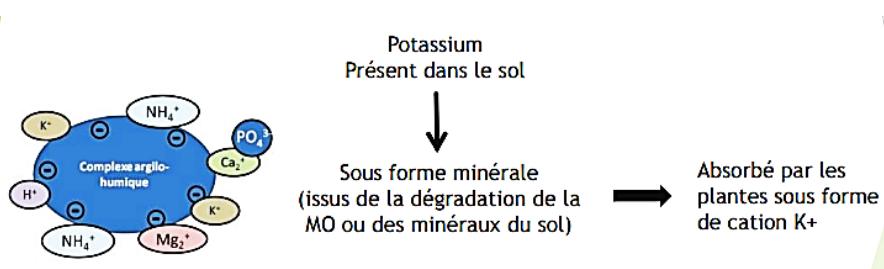


Figure 15 : Cycle de Phosphore

3. **Potassium (K)** : Le potassium est nécessaire à la régulation de l'ouverture et de la fermeture des stomates (structures qui permettent aux plantes de respirer), à la synthèse des glucides et à la régulation de la pression osmotique. Il joue un rôle important dans l'absorption des cations, empêche la plante de faner, dans la régulation de l'économie en eau de la plante.



**NB :** Potassium parfois très présent dans le sol mais sous une forme non disponible pour les plantes car fortement lié au complexe argilohumique

# Agro-pédologie et fertilisation

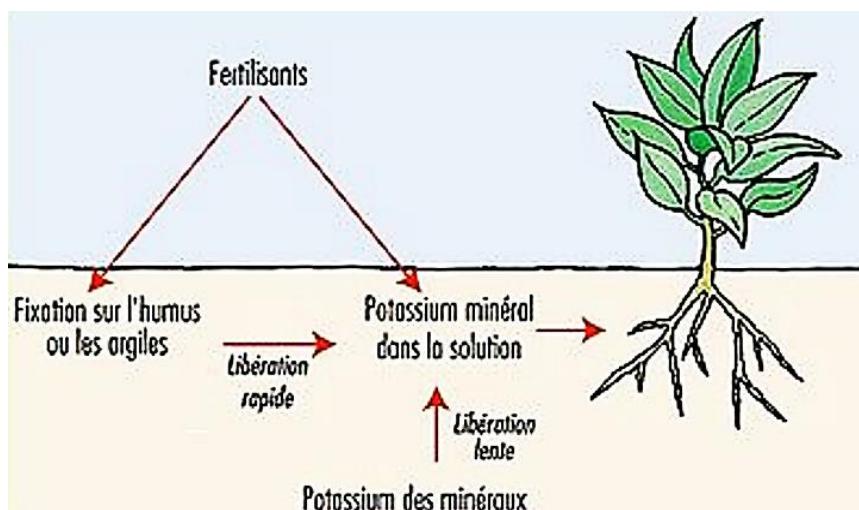
## ✚ Les principaux signes de carences en Potassium :

- Une carence en potassium se traduit par un développement retardé, le port des plantes devient mou, la bordure des feuilles varie du jaune au brun, le limbe se couvre de taches brunes. Chez les fruitiers, les feuilles les plus anciennes se crispent.
- Les fruits se conservent mal.



**Figure 16 : Les principaux signes de carences en Potassium**

## ✚ Cycle de Potassium



**Figure 18 : Cycle de Potassium**

4. **Le calcium :** joue un rôle primordial au niveau des parois cellulaires. En cimentant les parois cellulaires, les unes aux autres, le calcium assure leur cohésion. Il intervient dans la perméabilité de la membrane en facilitant le transport de certaines substances et en bloquant celui d'autres substances. Le calcium intervient également dans l'elongation des racines.

## ✚ Les principaux signes de carences en calcium :

- ✓ Une carence en calcium se manifeste tout d'abord sur les grandes feuilles les plus âgées. La carence en calcium se reconnaît à l'apparition de taches brunes jaunâtres souvent entourées d'un bord brun prononcé, et c'est la croissance qui est inhibée.



**Figure 19 : Les principaux signes de carences en calcium**

5. **Le magnésium** : joue un rôle important dans la photosynthèse car il est l'atome central de la chlorophylle, il est l'activateur de nombreuses enzymes dont deux enzymes critiques à savoir la ribulosebiphosphate carboxylase (RuBisCO) et la phosphoenolpyruvate carboxylase (PEPC). Une carence en magnésium se traduit généralement par une chlorose des nervures principales des feuilles âgées.



**Figure 20 : Les principaux signes de carences en magnésium**

6. **Le soufre** : est un élément constitutif des acides aminés que sont la cystine, la cystéine et la méthionine. Chez les légumineuses, le soufre intervient dans la formation des nodules nécessaire à la fixation de l'azote atmosphérique. Le soufre permet aux plantes de résister aux pathologies. Il intervient dans la croissance des végétaux et dans la formation des fruits. En cas de carence en soufre, les feuilles des plantes prennent une couleur vert-pâle.

### ➤ Les micronutriments ou oligoéléments :

Quoique présents en faible quantités, les micronutriments ou oligoélément n'en demeurent pas moins indispensables. A leur nombre, on retrouve : le chlore, le cuivre, le bore, le molybdène, le fer, le manganèse, le zinc et le nickel.

## Agro-pédologie et fertilisation

- Fer (Fe) :** Le fer est indispensable pour la production de la chlorophylle. Il est l'élément indispensable à la production des cytochromes (pigments) et de la nitrogénase (enzyme). Il est également nécessaire à la respiration cellulaire. Le sol devient déficient en fer si le pH n'est pas compris entre 5 et 6,5. Les excès de calcium, de phosphore et de cuivre sont également des facteurs bloquants, de même que l'humidité et le froid. Une carence en fer se traduit par une chlorose ou un brunissement du pétiole des feuilles, alors que les nervures demeurent vertes.



Figure 21 : Les principaux signes de carences en fer

- Cuivre (Cu) :** Le cuivre est un cofacteur d'enzymes impliquées dans divers processus métaboliques, y compris la photosynthèse et la formation des pigments. Le cuivre est l'activateur et le constituant des enzymes liées aux réactions d'oxydoréductions dans les cellules végétales. Le brunissement des pointes des feuilles et la chlorose sont généralement les symptômes d'une carence en cuivre.



Figure 22 : Les principaux signes de carences en Cuivre

- Zinc (Zn) :** Le zinc est l'activateur de nombreuses enzymes. Cet oligoélément intervient dans la synthèse de la chlorophylle. Le zinc est nécessaire à la synthèse de l'auxine, une hormone végétale, et à la croissance des racines. Il est également impliqué dans la régulation des processus métaboliques. Une carence en zinc se manifeste généralement par une chlorose et un retard de croissance.



Figure 23 : Les principaux signes de carences en Zinc

## Agro-pédologie et fertilisation

4. **Manganèse (Mn)** : Le manganèse agit comme cofacteur d'enzymes impliquées dans la décomposition de l'eau lors de la photosynthèse et dans la formation de chloroplastes.
5. **Molybdène (Mo)** : Cet élément intervient dans la métabolisation de l'azote et la réduction des nitrates. Le molybdène est nécessaire à la fixation de l'azote atmosphérique par certaines bactéries symbiotiques des racines, ce qui permet aux plantes de bénéficier de l'azote atmosphérique. Les plants n'ont besoin que de quantités infimes de molybdènes (moins de 50 grammes par hectare). Les carences en molybdènes ne s'observent généralement que sur des sols très acides. La chute des vieilles feuilles associée à un retard de croissance est un symptôme de carence en molybdène.
6. **Bore (B)** : Le bore est impliqué dans la formation et la stabilisation des parois cellulaires, la régulation de la croissance cellulaire et la pollinisation. Cet oligoélément intervient dans le transport des hydrates de carbone produits lors de la photosynthèse. Il joue également un rôle dans la régulation des processus métaboliques, comme l'utilisation de calcium, la synthèse des acides nucléiques et assure l'intégrité de la membrane plasmique.
7. **Chlore (Cl)** : Le chlore est nécessaire à l'osmose et à l'équilibre ionique au niveau des cellules végétales. Il joue également un rôle dans les processus photosynthétiques. Des taches nécrotiques blanches sur les bordures des feuilles peuvent témoigner d'une carence en chlore.
8. **Nickel (Ni)** : Ce minéral est le constituant essentiel d'enzymes impliquées dans l'absorption de l'azote. Les plantes souffrant d'une carence en azote présentent des nécroses sur les pointes de leurs feuilles.

### *Principaux rôles des oligo-éléments dans la plante*

	Zn	B	Mn	Cu	Fe	Mo
<b>Photosynthèse</b>						
<b>Croissance</b>						
<b>Fertilité (pollinisation)</b>						
<b>Synthèse des protéines</b>						
<b>Synthèse de la lignine</b>						
<b>Synthèse des glucides</b>						
<b>Fixation de l'azote</b>						
<b>Réductions des nitrates</b>						
<b>Respiration</b>						
<b>Migration des sucres</b>						

### ➤ Interactions entre éléments minéraux

# Agro-pédologie et fertilisation

Ces éléments majeurs et oligo-éléments doivent être présents en quantités appropriées dans le sol pour assurer une croissance saine des plantes. La disponibilité de ces éléments nutritifs dans le sol dépend de nombreux facteurs, tels que le pH du sol, la texture du sol, la matière organique, et les processus de fixation et de libération des éléments nutritifs par les micro-organismes du sol.

Il existe entre les éléments minéraux des interactions qui font que l'action de l'un est modifiée par la présence d'un autre. On parle de synergie entre deux éléments quand l'effet de l'un est amplifié par la présence de l'autre. On parle d'antagonisme quand l'effet de l'un est atténué par la présence de l'autre. Le nitrate  $\text{NO}_3^-$  facilite par exemple l'absorption du potassium  $\text{K}^+$ . En revanche, une absorption importante de potassium  $\text{K}^+$  entrave l'absorption de magnésium  $\text{Mg}^{2+}$ . Les antagonismes  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  sont également bien connus.

## 4 - Notions de fertilité d'un sol

La fertilité des sols dans un milieu donné est leur capacité de production végétale. Cette capacité se traduit par les rendements les plus élevés. Elle se décline en trois composantes essentielles :

- ✓ une composante chimique qui correspond à l'aptitude du sol à fournir des éléments nutritifs en quantités suffisantes à l'élaboration du rendement ;
- ✓ une composante physique liée à la création et au maintien d'un état physique adapté au système de culture ;
- ✓ une composante biologique consécutive de l'influence des êtres vivants utiles ou non à la production végétale.

La fertilité d'un sol est un concept complexe qui englobe la capacité d'un sol à fournir aux plantes les éléments nutritifs, l'eau, l'oxygène et un environnement favorable à leur croissance et à leur développement. Voici quelques éléments clés qui influencent la fertilité d'un sol :

1. **Éléments nutritifs** : Les sols fertiles contiennent des niveaux adéquats d'éléments nutritifs essentiels tels que l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K) ainsi que d'autres oligo-éléments comme le fer, le zinc, le cuivre, le manganèse, le molybdène et le bore. Ces éléments sont nécessaires à la croissance des plantes et sont souvent fournis par la matière organique décomposée, les minéraux du sol et les amendements.
2. **pH du sol** : La plupart des plantes prospèrent dans un sol légèrement acide à neutre (pH entre 6 et 7). Un pH inapproprié peut affecter la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes.
3. **Matériaux organiques** : La matière organique, telle que le compost, le fumier et les résidus de culture décomposés, est essentielle pour améliorer la fertilité du sol. Elle contribue à améliorer la structure du sol, à retenir l'humidité et à fournir des éléments nutritifs essentiels aux plantes.

## Agro-pédologie et fertilisation

4. **Texture du sol** : La texture du sol, qui peut être argileuse, limoneuse ou sablonneuse, affecte la capacité du sol à retenir l'eau et les éléments nutritifs. Un sol équilibré en termes de texture est généralement considéré comme fertile.
5. **Micro-organismes du sol** : Les bactéries, les champignons et d'autres micro-organismes du sol jouent un rôle crucial dans la fertilité du sol. Ils décomposent la matière organique, fixent l'azote atmosphérique et favorisent la formation d'humus, ce qui améliore la fertilité.
6. **Drainage** : Un bon drainage est important pour éviter l'engorgement des racines des plantes. Les sols bien drainés permettent aux racines d'accéder à l'oxygène, ce qui est essentiel pour la respiration des plantes.
7. **Gestion du sol** : Les pratiques de gestion du sol, telles que la rotation des cultures, la couverture végétale, la réduction de l'érosion et l'ajout d'amendements, influencent la fertilité du sol. Une gestion appropriée peut améliorer la fertilité et la durabilité du sol.
8. **Analyses du sol** : Les analyses de sol en laboratoire sont couramment utilisées pour évaluer la fertilité d'un sol. Ces analyses fournissent des informations sur la teneur en éléments nutritifs, le pH et d'autres caractéristiques du sol, ce qui permet aux agriculteurs et aux jardiniers d'ajuster leurs pratiques de gestion.
9. **Climat et environnement** : Les conditions climatiques et environnementales locales, telles que la pluviométrie, la température et la biodiversité, peuvent également influencer la fertilité du sol.
10. L'acidification progressive des sols sous l'influence des processus naturels, de la production des plantes et des pratiques culturales amène à gérer également le statut acido-basique des sols. L'usage d'amendements minéraux basiques permet de maintenir le pH à un niveau compatible avec une biodisponibilité satisfaisante des éléments minéraux et un état optimal de la composante physique de la fertilité.

La fertilité d'un sol peut varier considérablement d'une région à l'autre et dépend souvent des pratiques de gestion. Une gestion appropriée du sol, y compris l'apport d'amendements, la conservation de la matière organique et la mise en œuvre de pratiques agricoles durables, est essentielle pour maintenir et améliorer la fertilité du sol. Une utilisation judicieuse des ressources naturelles contribue à assurer la productivité à long terme des terres agricoles et à préserver l'environnement.

Ainsi, gérer la fertilité des sols, c'est mettre en place des systèmes de cultures qui conservent plus longtemps la fertilité des sols en combinant l'utilisation judicieuse des engrains minéraux et organiques, accompagnée de l'emploi des amendements locaux (phosphates naturels, gypse, dolomie, etc.) afin d'améliorer la santé des sols et accroître l'efficacité des engrains.. C'est aussi utiliser des techniques pour protéger ses sols des phénomènes qui entraînent leur appauvrissement.

## Chapitre 3 : Pédogenèse et classification des sols

### Objectifs :

- 1- Identifier les facteurs et processus de la formation des sols (pédogenèse).
- 2- Comprendre la classification des sols agricoles en Algérie et leur répartition.
- 3- Introduire les bases de la cartographie des sols et son rôle dans leur mise en valeur.
- 4- Apprendre à lire et exploiter une carte pédologique pour une gestion rationnelle des sols.

### 1- Pédogenèse et classification

La pédogenèse désigne l'ensemble des processus physiques, chimiques et biologiques qui conduisent à la formation et à l'évolution des sols. Elle est influencée par de nombreux facteurs, notamment le climat, la nature de la roche-mère, le relief, la végétation, les activités humaines ainsi que le temps. Ce processus complexe aboutit à la différenciation des horizons pédologiques et à la constitution de sols aux propriétés distinctes.

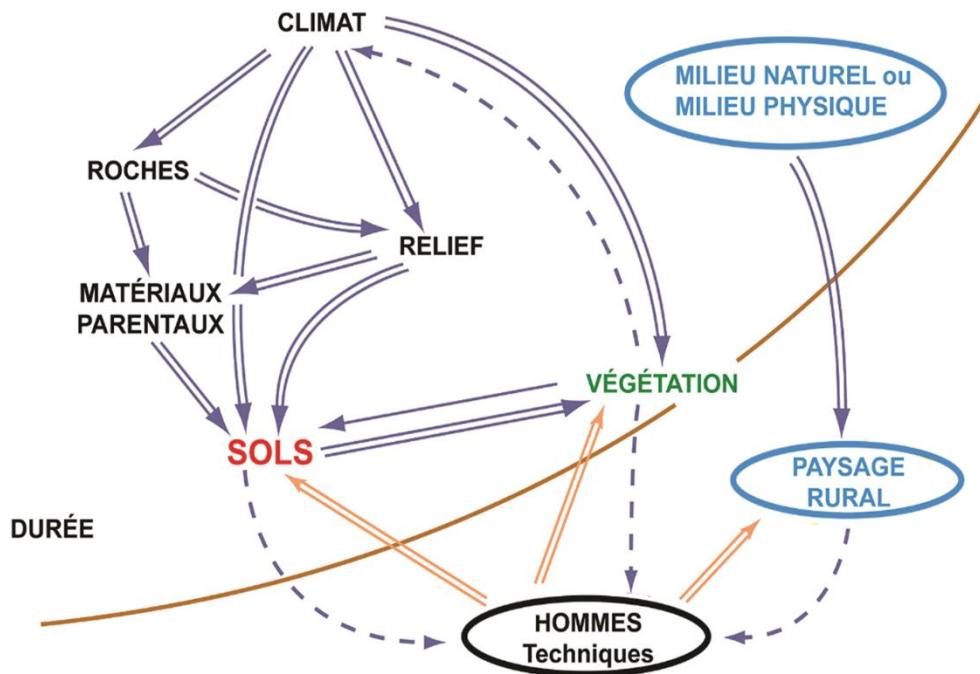
La classification des sols, quant à elle, vise à regrouper et organiser les types de sols en fonction de leurs caractéristiques physiques, chimiques et morphologiques. Elle permet d'établir une nomenclature commune et de faciliter la compréhension des propriétés pédologiques pour diverses applications telles que l'agriculture, la gestion des ressources naturelles, et l'aménagement du territoire. Plusieurs systèmes de classification existent à travers le monde, tels que la classification française (CPSC), le système WRB (World Reference Base for Soil Resources) adopté par la FAO, et le système américain USDA Soil Taxonomy.

L'étude conjointe de la pédogenèse et de la classification des sols est essentielle pour évaluer la fertilité, la gestion durable des sols et leur conservation face aux défis environnementaux actuels. Elle constitue également une base fondamentale pour comprendre les interactions entre les sols et les écosystèmes, et pour orienter les pratiques agricoles adaptées aux conditions pédologiques locales.

#### 1.1- Pédogenèse (développer les facteurs de la pédogenèse)

La pédogenèse est le processus de formation et de développement des sols, qui résulte de l'interaction complexe de divers facteurs géologiques, climatiques, biologiques et anthropiques.

Classiquement on décompte **six grands facteurs** de la **formation des sols**, quel que soit le climat sous lequel ils se sont développés. La figure 24 présente ces différents facteurs de la pédogenèse mais également leurs interrelations. En effet, par exemple, l'existence des **matériaux parentaux (roche mère)** dépend étroitement de la combinaison de la **nature des roches** et de la position dans le **relief** ; les sols ont un impact important sur la **végétation** mais cette dernière a, en retour, une influence sur les sols via la forme **d'humus**. Dernier exemple : s'il est évident que le **climat** général détermine fortement la végétation, celle-ci, en retour, a une influence sur le climat local (*mésoclimat* plus frais et humide dans une zone forestière).



**Figure 24. Schéma simplifié des relations entre les sols et les différents facteurs de pédogenèse.**

*La ligne brune sépare les phénomènes qui caractérisent le « milieu naturel » et tout ce qui a trait aux actions humaines aboutissant à la création du « paysage rural ». [Source : © Denis Baize]*

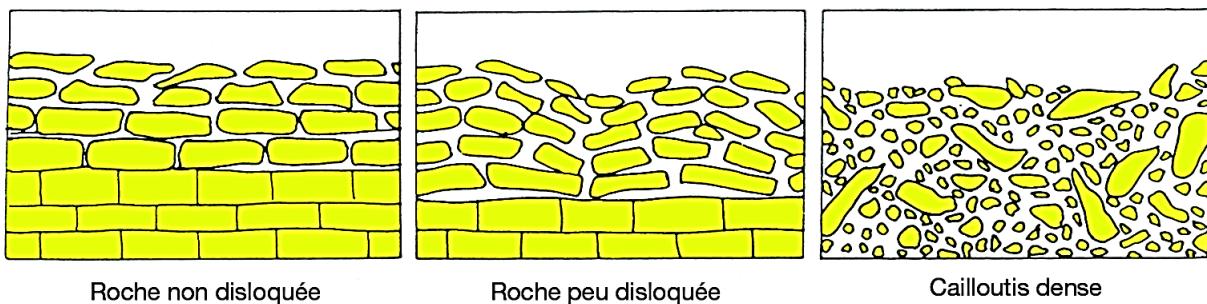
### 1.1.1. Nature et état des matériaux parentaux

Les matériaux parentaux sont les formations géologiques peu ou non altérées, effectivement observées sous le sol, au fond d'une fosse pédologique. Les caractéristiques importantes du matériau parental, qui influenceront la composition et la structure du sol, sont :

- sa granulométrie (cailloutis, argile lourde, sédiment sableux, limon éolien) ;
- la granulométrie du résidu de décarbonatation dans le cas des matériaux parentaux carbonatés ;
- le caractère plus ou moins altérable des minéraux primaires (par exemple le quartz est inaltérable tandis que le mica noir, la biotite, est rapidement altérable) ;
- la nature minéralogique des minéraux argileux hérités ou néoformés (kaolinite, illite, smectites...) ;
- la nature pétrographique du matériau parental et les caractéristiques physico-chimiques qui en découlent. Par exemple, les sols de craie héritent d'une composition extrêmement calcaire qui perdure très longtemps ;
- sa géochimie fine : par exemple, les sols développés à partir de « roches vertes » (péridotites, serpentinites), très riches en chrome et nickel, sont eux-mêmes très riches en ces deux métaux.

En ce qui concerne le rôle de l'état d'un matériau sous-jacent, nous prendrons l'exemple des calcaires durs. Il est clair que les différents états de dislocation d'une même roche dure (Figure 25) ont une influence majeure sur les capacités d'enracinement des plantes pérennes comme les arbres forestiers ou la vigne. Il en va de même en ce qui concerne les plantes annuelles (blé, colza) qui peuvent trouver un peu (ou beaucoup) de terre interstitielle entre les pierres, terre susceptible de fournir un peu d'eau en période sèche. Ainsi, une

végétation pourra s'installer plus facilement sur un cailloutis dense que sur une roche non disloquée, et le sol s'y formera plus vite.



**Figure 25.** Trois états possibles d'un même calcaire dur, vus en coupe. [Source : © Denis Baize]

## 1.1.2. Microclimat et pédo climat

Le climat général (grandes zones climatiques du globe) est plus ou moins modifié par les conditions locales où chaque sol se situe (relief, position topographique, exposition) : c'est le microclimat. Ce dernier est modifié par certaines propriétés intrinsèques du sol lui-même (par exemple sa couleur de surface, la présence de niveaux imperméables générant un engorgement durable). On peut ainsi définir le climat interne du sol ou pédo climat.

### 1.1.2.1. Précipitations

Le flux potentiellement percolant (susceptible de percoler verticalement) est défini comme le flux d'entrée (précipitations) moins le flux évapotranspiré (évaporation directe du sol + transpiration de la végétation). En climat tempéré, le flux potentiellement percolant est positif car les précipitations sont très supérieures à l'évapotranspiration. Plus ces flux d'eau sont importants et plus il y a de transferts de matières (solutions, particules argileuses), verticaux ou latéraux.

Le flux potentiellement percolant est plus ou moins modifié selon la position topographique. Par exemple, les bas de versants sont susceptibles de recevoir des eaux de ruissellement venant de plus haut.

La neige joue un rôle particulier :

- elle occasionne un retard à l'écoulement (la précipitation va s'écouler bien après sa chute) et elle provoque l'engorgement du sol par l'eau au moment de sa fonte ;
- elle constitue un manteau isolant protégeant le sol du gel à condition d'être tombée avant la baisse de la température.

### 1.1.2.2. Température moyenne annuelle et températures saisonnières

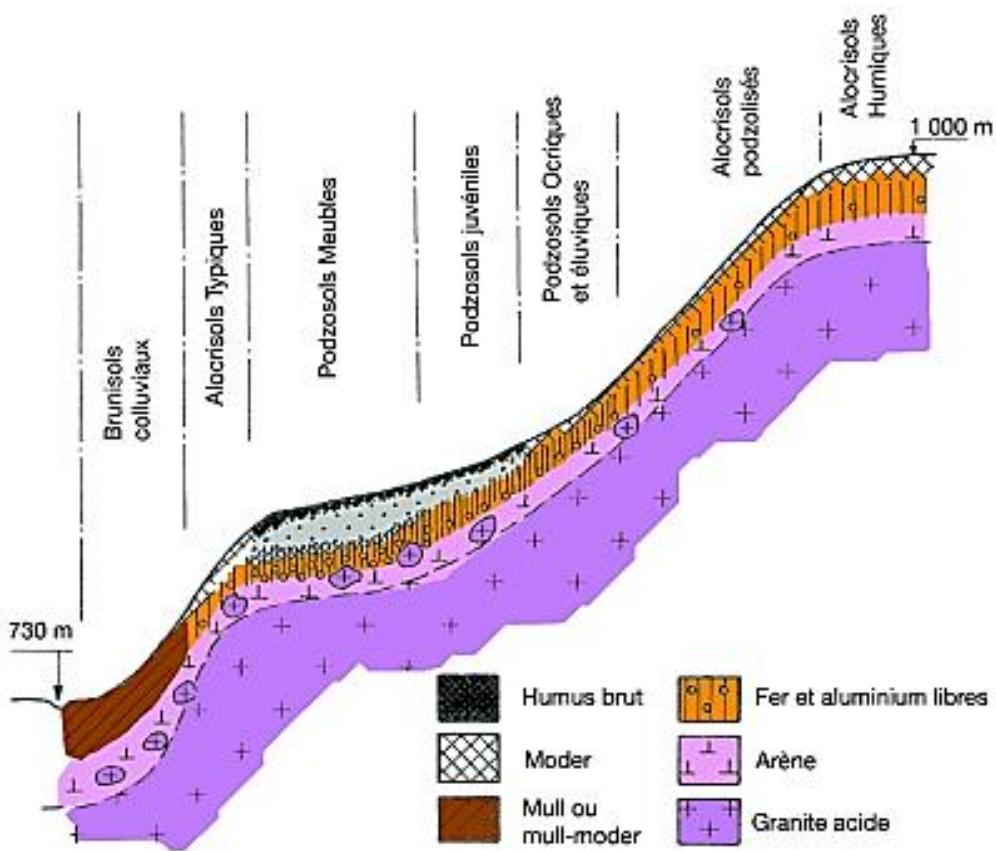
Plus la température est élevée, plus les réactions chimiques et biochimiques sont rapides (altération des minéraux primaires, activité biologique, minéralisation des matières organiques) ; en revanche ce sont les eaux froides qui dissolvent le mieux le calcaire car, toutes choses égales par ailleurs, les eaux froides dissolvent

# Agro-pédologie et fertilisation

plus de CO<sub>2</sub> que les eaux chaudes. Inversement le gel prolongé ou permanent a des effets mécaniques (désagrégation, cryoturbation) mais ralentit ou stoppe toute activité biologique et toutes les altérations.

## 1.1.3. Position dans le relief

Le fonctionnement du sol (donc, à long terme, son évolution générale) dépend de sa position dans le relief. C'est le cas, notamment, de l'orientation plutôt verticale ou plutôt latérale des flux d'eau et de matières déplacées. La forme des versants est dépendante de la nature plus ou moins dure et de la succession des roches sous-jacentes. En conséquence, des sols différents se succèdent sur ces versants en fonction uniquement de leur position (*toposéquence* de sols ou chaîne de sols – Figure 26) ou également en fonction de la variation des roches (*topolithoséquence* de sols).



## 1.2.3.1 En positions de plateaux

Sur les plateaux, la dynamique de l'eau et des transferts est plutôt **verticale**. Il y a donc peu ou pas d'érosion. Cependant, rares sont les plateaux qui ne présentent pas du tout de relief et il n'y a pas besoin de beaucoup de pente pour que ruissellement et érosion se développent.

# Agro-pédologie et fertilisation

C'est ce qui se passe quand les horizons de surface présentent des agrégats très fragiles en conséquence d'une granulométrie limoneuse et d'une faible teneur en matières organiques. La fermeture de la surface du sol peut intervenir sous l'impact des gouttes de pluie. Il se forme alors une mince croûte (0,5 à 5 mm) finement litée, plus ou moins continue. Cette **croûte de battance** fait obstacle à l'infiltration de l'eau dans le sol. Il en résulte la formation de flaques d'eau et, souvent, du ruissellement dans la parcelle, stade initial de l'érosion hydrique.

## 1.2.3.2 Haut et milieu de versants

En haut de versants, il y a pertes d'eau et de matières dissoutes ou en suspension sans compensation. La tendance est à des sols secs et minces (car érodés). Au milieu des versants, les pertes d'eau et de matières dissoutes vers le bas sont compensées par des apports depuis le haut, d'où un bilan équilibré. Les expositions sud (adrets) sont chaudes et plus sèches (la végétation y est plutôt thermophile, voire xérophile) ; les expositions nord (ubacs) sont plutôt froides.

## 1.2.3.3 Bas de versants et fonds de vallons

En bas de versants et dans les fonds de vallons, les flux d'eaux sont très supérieurs aux précipitations, ce qui génère des engorgements plus ou moins prolongés voire permanents ou quasi permanents (tourbières). Il y a également accumulations de matières solides déplacées (colluvions) et formation ou présence de matériaux parentaux spécifiques (alluvions fluviatiles, alluvions lacustres). Dans ces situations, on observe donc généralement des sols épais, voire sur-épais (colluviaux).

Les bas de versants et les fonds de vallons correspondent à des zones d'accumulations de produits dissous plus haut sur le versant qui précipitent (oxydes de fer et de manganèse, bicarbonate de calcium sous forme de calcaire) ou se fixent sur le complexe adsorbant (sols saturés en calcium – cas des brunisols de la figure 27).

La valeur de la pente d'un terrain, combinée à son exposition, déterminent la plus ou moins grande quantité de rayonnement solaire apportée au sol et à la végétation. C'est pour cette raison que les vignobles les plus réputés, tels le vignoble barséquanais de Champagne ou celui de Chablis, privilégiennent les expositions sud-est et sud et les pentes assez fortes ou fortes. C'est dans ces conditions que le rayonnement solaire est maximum car parvenant perpendiculairement au terrain (Figure 27).

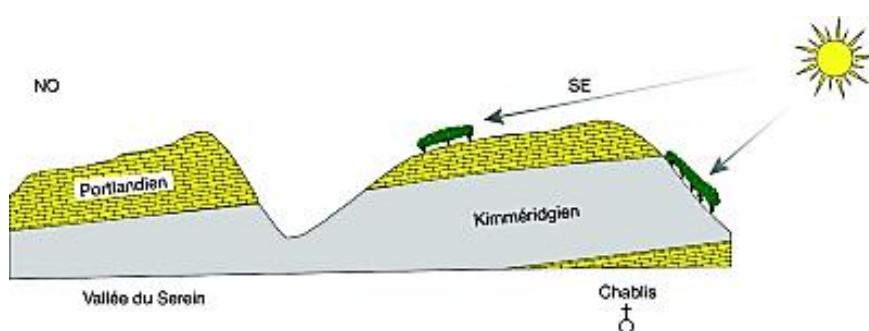
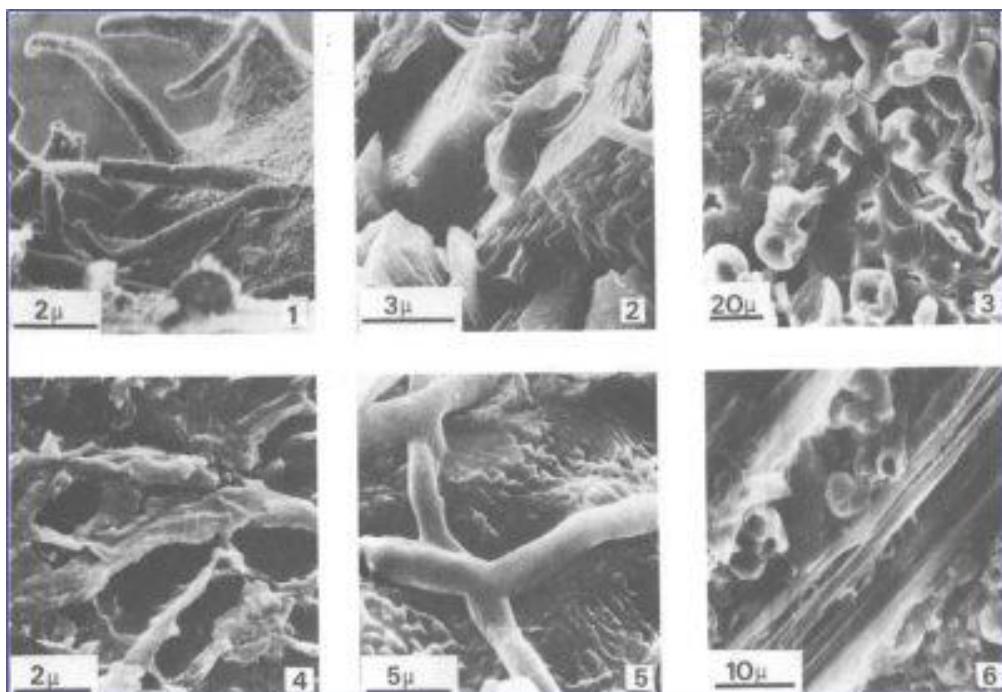


Figure 27. Exposition des versants et

angle d'incidence du rayonnement solaire. Cas du vignoble de Chablis. [Source : © Denis Baize]

## 1.2.4. Végétation et activité biologique

La microflore pionnière est constituée de bactéries, d'algues, d'hyphes de champignons ou de lichens. Grâce à son adhérence aux surfaces des roches et des minéraux, et à des biofilms bactériens, elle initie les premières altérations dont les figures sont visibles au microscope électronique. La pénétration des hyphes a comme premier effet une désagrégation ou une microdivision des minéraux, par exemple en se développant entre les paquets de feuillets des micas. Les phénomènes de dissolution apparaissent ensuite, localisés à des microsites au contact entre les êtres vivants et les minéraux (Figure 28).



**Figure 28. Interactions entre êtres vivants et minéraux.**

1 : *Umbilicaria cylindrica* (lichen foliacé) sur mica. 2 : algues (ou cyanobactéries) à l'intérieur d'une quartzite. 3 : colonie d'algues sur plagioclase altéré. 4 : hyphes de champignons. 5 : hyphes de *Rhizocarpon* (un lichen) sur feldspath. 6 : pénétration de *Rhizocarpon* dans des micas. [Source : © Denis Baize]

L'altération du matériau parental se fait également sous l'action des racines. En effet, dans la rhizosphère (volume de sol directement sous l'influence des exsudats et des bactéries et ectomycorhizes associées), des acides organiques et le CO<sub>2</sub> dégagés sont susceptibles d'altérer certains minéraux et de dissoudre le calcaire.

La faune (micro, méso et macrofaune) est également adaptée à la nature du sol. Elle joue elle aussi un rôle majeur dans la formation du sol :

- par la décomposition des débris végétaux en petites molécules ;
- par l'absorption des nutriments (P, K, Ca, Mg), ou d'éléments en traces potentiellement polluants au niveau des racines ;
- par la formation des agrégats à structure grumeleuse de certains horizons de surface humifères par la réorganisation des turricules de lombrics.

# Agro-pédologie et fertilisation

En retour, le sol a une influence importante sur les êtres vivants qu'il héberge. En particulier, la végétation naturelle spontanée est étroitement dépendante de certaines propriétés de ce sol : acidité, engorgements, sécheresse relative, richesse en calcium échangeable, en azote, en calcaire fin dit « actif ». C'est pourquoi l'on observe, en fonction de la nature du sol, des espèces et associations végétales dites acidiphiles, hygrophiles, xérophiles, calcicoles, nitrophiles, calcaricoles ou calcarotolérantes.

Les parties aériennes des plantes qui retombent à la surface du sol peuvent être « acidifiantes » ou riches en azote (dites « améliorantes »). Au bout d'un temps long (siècles, millénaires) un équilibre se crée entre le sol, la végétation spontanée et le climat.

## 1.2.5. Activités humaines

Depuis le Néolithique, avec le développement de l'agriculture, l'Homme a un impact sur la nature et le fonctionnement des sols. Cet impact va croissant sous l'influence de moyens techniques toujours plus puissants et perturbateurs et à cause de la nécessité de produire davantage pour nourrir une population toujours plus nombreuse.

- **Action sur la végétation :** l'Homme perturbe directement la végétation, notamment sa diversité, en installant volontairement :
  - des plantations forestières monospécifiques (douglas, sapins de Noël, peupliers) ;
  - des monocultures (blé, orge, maïs, , pommiers, vigne) ;
  - des prairies “naturelles” (où les animaux d'élevage broutent sélectivement) ;
  - des prairies semées ;
  - ... ou bien il laisse se développer des friches...
  - Dans les forêts qui nous semblent naturelles, il privilégie certaines espèces aux dépens d'autres, élimine certaines strates de végétation...
- **Actions chimiques :** apports volontaires de fertilisants, d'oligoéléments, d'amendements organiques (fumiers, lisiers, composts, boues d'épuration), de calcium (chaulage) d'où la remontée du pH et la resaturation du sol principalement par des ions calcium ; apports involontaires de polluants minéraux ou organiques.
- Apports répétés de matières organiques ou minérales (sels contenus dans les eaux d'irrigation) qui s'accumulent.
- **Actions « hydriques » :** drainage, assainissement (tuyaux enterrés, réseaux de fossés), abaissement du niveau de la nappe (marais, tourbières), inondation de rizières, irrigations. Ces interventions humaines modifient totalement le régime hydrique naturel initial.
- **Actions mécaniques agricoles :**
  - Labours ;
  - Compactage superficiel ou profond (Figure 29) ;

## Agro-pédologie et fertilisation

- Sous-solages : travail du sol ayant pour objet de l'ameublir en profondeur sans remonter d'éléments en surface ;
  - Défoncements : labours très profonds (40 cm à 1 m) réalisés exceptionnellement pour disloquer des horizons profonds indurés ou des roches dures situées en profondeur et améliorer ainsi l'enracinement de la vigne ou d'arbres fruitiers et forestiers.
  - Création de planches et billons, c'est-à-dire de bandes de terrain allongées, surélevées pour éviter un excès d'eau superficiel. La planche diffère du billon, en ce que le centre de la planche n'est pas bombé et qu'elle est plus large.
  - Ces actions mécaniques ont pour conséquences l'homogénéisation de l'horizon labouré et parfois le mélange d'horizons.
- **Autres actions mécaniques (travaux publics)** : restructuration de pentes fortes en terrasses ou terrassettes (ceci dès l'Antiquité), décapages, goudronnages.
  - Déplacements de matériaux terreux pour la construction de sols urbains reconstitués, réaménagement d'anciennes carrières ou gravières.



**Figure 29. Orniérage occasionné par un débardage en milieu forestier.**

Les horizons profonds peuvent être affectés par un compactage irréversible. [Source : © Jacques Ranger]

### 1.2.6. Durée

Le temps est un acteur majeur, à ne pas oublier, de la formation des sols. Celle-ci est toujours lente et nécessite des milliers ou des dizaines de milliers d'années pour générer quelques décimètres de sol.

Certaines évolutions récentes sont plus rapides (sur certains matériaux favorables) et peuvent affecter la partie supérieure du sol sur quelques décimètres. Par exemple, à partir d'un sol déjà très acidifié, une *néopodzolisation* peut seulement demander un siècle pour s'exprimer nettement sur une quinzaine de centimètres.

*Le croisement des 6 facteurs de pédogenèse, notamment la grande variété des matériaux parentaux, explique la très grande diversité des sols que l'on peut observer d'un point à un autre : épaisseur,*

# Agro-pédologie et fertilisation

*couleurs, texture, contraste granulométrique, pH, composition minéralogique, richesse en matières organiques, etc. Cela explique aussi leur variabilité dans l'espace qui peut être très rapide (décamétrique).*

*L'homme est de plus en plus un facteur important de modification (aspects et fonctionnements = « artificialisation ») voire de destruction totale des sols.*

*Les sols constituent un patrimoine non renouvelable à l'échelle de temps des humains. Tout sol détruit totalement ou partiellement est une perte irréversible de patrimoine.*

## 1.2- Classification des sols agricoles en Algérie

L'Algérie, en raison de sa vaste superficie et de sa diversité climatique et géologique, présente une grande variété de types de sols. Cette hétérogénéité pédologique résulte des contrastes entre les régions méditerranéennes du nord, les hautes plaines semi-arides et le désert saharien au sud. La classification des sols en Algérie repose principalement sur les systèmes internationaux tels que la classification WRB (World Reference Base for Soil Resources) et le système américain USDA Soil Taxonomy, tout en prenant en compte les spécificités locales.

### 1.2.1- Les sols des régions sahariennes

La formation des sols dans cette région est entièrement dominée par les conditions climatiques où le vent joue un rôle prépondérant. Deux grands types de sols éoliens se distinguent :

- **Sols éoliens d'ablation sans « terre fine »**

Ces sols se caractérisent par l'absence de terre fine, ce qui ne dépend pas de la roche mère. L'enlèvement de toutes les particules suffisamment fines par le vent ne laisse sur place que des cailloux plus ou moins grossiers, formant ce que l'on appelle à tort un « reg ». La roche mère joue un rôle secondaire, intervenant uniquement pour différencier le produit final : sol calcaire, siliceux ou gypseux.

- **Sols éoliens d'accumulation**

Ces sols sont formés par l'accumulation de particules entraînées par le vent dans les zones abritées, formant des dépôts de sable variés : rehboub, nebka, dunes, jusqu'aux grands ergs. Ces accumulations peuvent grimper le long des versants montagneux. La roche mère n'a qu'un rôle secondaire dans leur genèse.

### 1.2.2- Les sols des régions semi-arides

Il n'existe pas de définition précise de la semi-aridité. Pour la pédologie, on passe de la zone aride à la zone semi-aride lorsque la végétation, entretenue par une pluviométrie encore faible (200 à 500 mm/an), devient suffisante pour freiner l'action du vent.

Les sols de cette région sont marqués par un équilibre entre le vent et la pluie. Les roches mères sont généralement calcaires, formant :

## Agro-pédologie et fertilisation

- **Sols calciques** : Présentent un horizon différencié peu épais, saturé en ions Ca avec un pH compris entre 7 et 8. Ils contiennent une proportion appréciable de matière organique (0,3 à 1 %).
- **Sols gypseux et sols d'éboulis** : Caractérisés par leur bonne perméabilité, mais une faible capacité de rétention en eau.
- **Sols en équilibre non calcaires** : Rares en Algérie, ils se trouvent principalement à Aflou et sur des formations basaltiques de l'Oranie occidentale.

### 1.2.3- Les sols des régions telliennes humides

Ces sols sont définis par leur formation liée à l'entraînement de substances en profondeur sous l'action des eaux d'infiltration. On distingue :

- **Sols calcaires** : Accumulation de calcaire en surface, souvent favorisée par l'action des végétaux.
- **Sols décalcifiés** : Accumulation du calcaire dans les horizons sous-jacents sous forme de nodules. Ils sont répandus en Algérie et se forment surtout à partir de roches argileuses.
- **Sols non-calcaires** : Incluent les sols insaturés et les sols podzoliques, ces derniers étant très acides et associés aux régions où la pluviométrie dépasse 500 mm/an.
- **Terres rouges méditerranéennes** : Sols fortement rubéfiés, rencontrés sur les terrasses alluviales et parfois mélangés à des affleurements de roches mères.

### 1.2.4- Les sols azonaux (locaux)

Ces sols se développent sous l'influence de facteurs locaux et comprennent :

- **Sols salins (solontchak)** : Très présents dans le Tell algérien et les Hautes Plaines, ils se forment par remontée capillaire d'eau salée.
- **Sols à encroûtement** : Caractérisés par une croûte calcaire, gypseuse ou saline en surface ou à une certaine profondeur.

## 1.3- Introduction à la cartographie et à la mise en valeur des sols

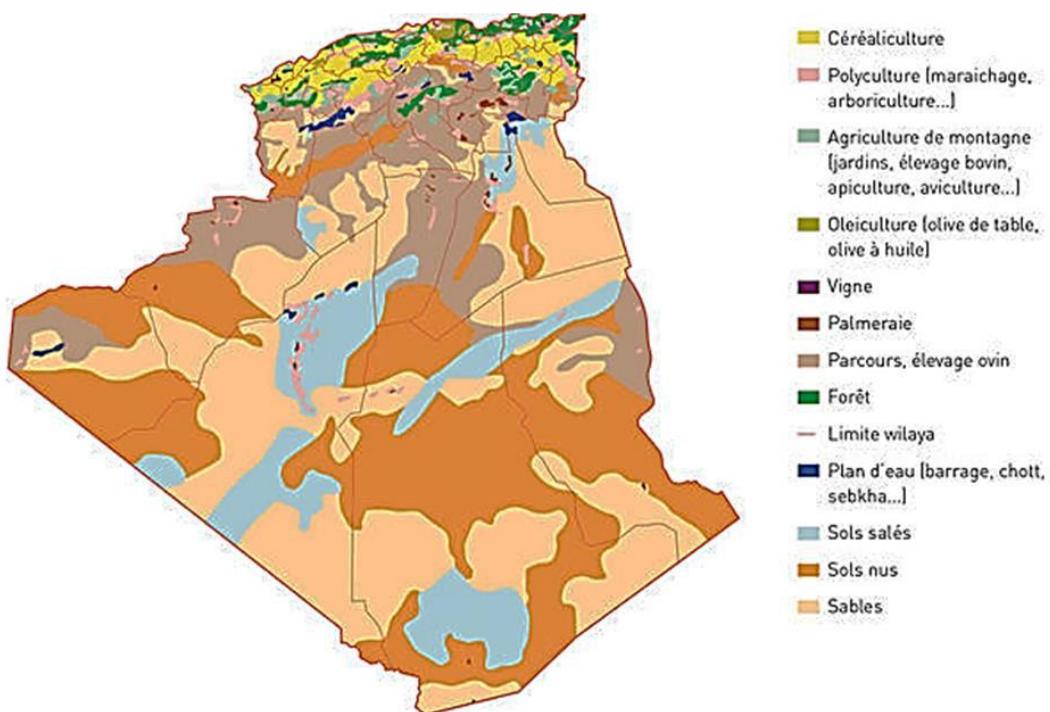
La classification des sols que nous venons d'exposer tire sa simplicité et sa logique du souci de cartographie qui a présidé à son élaboration. On sait que la cartographie des sols a longtemps été discutée, morphologistes et chimistes s'opposant. Ces derniers ont toujours considéré que les cartes des sols ne pouvaient être que d'inutiles copies des cartes géologiques, montrant simplement les rapports étroits entre sols et roches mères, mais incapables d'aider en quoi que ce soit à résoudre les problèmes pratiques et théoriques.

En réalité, aussi bien pour l'agronome que pour le géographe, la carte des sols d'Algérie apporte une contribution très importante pour l'étude de ce pays. Parente de la carte géologique, elle reflète évidemment les liaisons entre sols et roches mères (un peu comme la carte pluviométrique de l'Algérie par Gaußen reflète

# Agro-pédologie et fertilisation

les liaisons entre pluies et reliefs), mais elle fait surtout apparaître nettement la disposition zonale des sols algériens :

- Sols éoliens formés dans les régions désertiques
- Sols stables formés dans la zone semi-aride
- Sols lessivés formés dans la zone tellienne humide



**Carte 01 : Cartographie de répartition spatiale des cultures en fonction de type de sol en Algérie**

## 1.3.1- La cartographie des sols :

La cartographie des sols est le processus de représentation graphique des différents types de sols présents dans une région donnée. Elle repose sur des études géologiques, pédologiques et topographiques qui permettent de déterminer la composition, la texture, la structure et d'autres caractéristiques des sols.

## 1.3.2- La mise en valeur des sols :

La mise en valeur des sols consiste à utiliser de manière optimale les terres pour répondre aux besoins humains tout en préservant leur qualité et leur durabilité à long terme. Cela inclut des pratiques agricoles durables, la gestion forestière, la préservation des zones humides, la prévention de l'érosion, la réhabilitation des terres dégradées, etc. La mise en valeur des sols vise à maximiser les bénéfices économiques, sociaux et environnementaux tout en minimisant les impacts négatifs sur les sols et l'écosystème.

## 1.4- Définition d'une carte pédologique

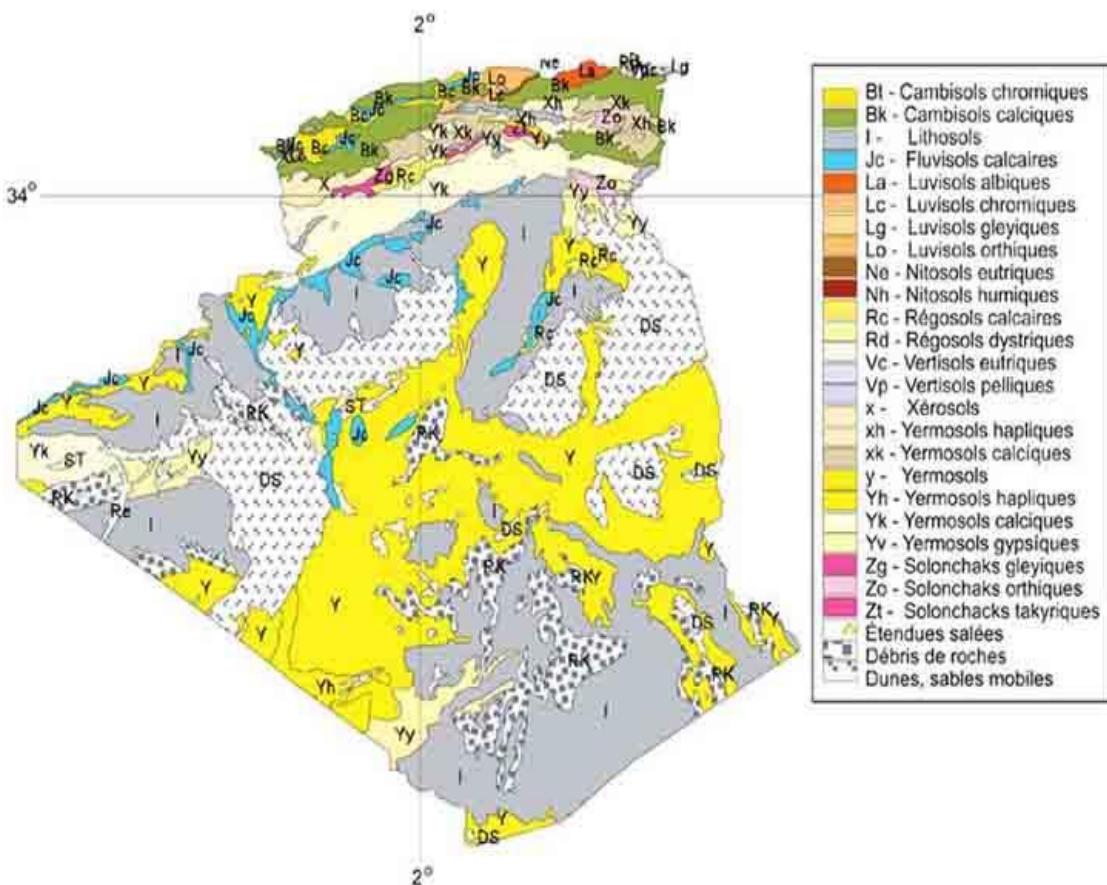
Une carte pédologique est une représentation graphique d'une région géographique spécifique qui identifie et classe les différents types de sols présents dans cette région en fonction de leurs caractéristiques

## Agro-pédologie et fertilisation

pédologiques. Ces cartes fournissent des informations détaillées sur la répartition spatiale des sols, y compris leur texture, leur structure, leur composition chimique, leur pH, leur teneur en matière organique, leur perméabilité, leur capacité de rétention d'eau, et d'autres caractéristiques importantes.

Les cartes pédologiques sont élaborées à partir d'études approfondies du sol, généralement réalisées sur le terrain par des pédologues et des géologues du sol. Ces experts collectent des échantillons de sol, effectuent des analyses en laboratoire et rassemblent des données topographiques pour établir une image précise des types de sols et de leurs propriétés dans la région étudiée. Ces informations sont ensuite cartographiées pour créer une représentation visuelle des différents types de sols et de leur distribution sur le terrain.

Autrement dit, la carte pédologique constitue une base de données des sols. Elle fournit en même temps des informations graphiques comme les limites des plages et des informations sémantiques représentées par des chiffres et qualificatifs. Ses objectifs et applications sont aussi nombreux que variés et dépendent de la précision avec laquelle elle est réalisée. Ceux-ci peuvent être la connaissance du milieu naturel, la recherche scientifique, les aménagements agricoles et la protection des sols (Legros, 1996).



Echelle : 1:5 millions.

Carte 02 : Carte des sols dominants de l'Algérie - Source : DSMW-FAO-UNESCO.

## 1.4.1- Lecture et exploitation d'une carte pédologique

La lecture d'une carte pédologique implique la compréhension des informations présentées sur la carte, notamment les différents types de sols, leurs caractéristiques et leur distribution spatiale. Voici les étapes pour lire une carte pédologique :

### 1. Identification des légendes et symboles

- Consultez la légende pour comprendre la signification des couleurs, symboles, et codes utilisés.
- Chaque teinte correspond généralement à une unité de sol, et les symboles peuvent représenter des caractéristiques spécifiques comme le drainage, la texture ou la salinité.

### 2. Analyse des unités pédologiques

- Repérez les différentes unités de sol représentées par des couleurs ou des trames distinctes.
- Consultez la légende pour connaître les caractéristiques principales de chaque type de sol (composition, texture, profondeur, etc.).

### 3. Topographie et position des sols

- Examinez les variations topographiques indiquées sur la carte (courbes de niveau, reliefs).
- Les sols peuvent varier selon leur position sur une pente (sommet, versant, bas de pente).

### 4. Facteurs édaphiques

Vérifiez les informations suivantes :

- **Texture** : proportion de sable, limon et argile.
- **Structure** : organisation des particules de sol (grumeleuse, massive).
- **Profondeur** : évaluation de la couche arable et des horizons pédologiques.
- **Drainage** : capacité du sol à évacuer l'eau.
- **pH** : acidité ou alcalinité du sol.
- **Présence de sels ou calcaire**.

### 5. Interprétation des aptitudes agronomiques

- Déterminez les cultures adaptées à chaque type de sol.
- Identifiez les contraintes éventuelles : faible fertilité, risque d'érosion, mauvais drainage, etc.

### 6. Lecture des annotations

- Les cartes pédologiques peuvent comporter des annotations complémentaires sur les particularités locales, les horizons profonds, ou les conditions de gestion des sols.

# Agro-pédologie et fertilisation

## 7. Croisement avec d'autres informations

- Pour une interprétation complète, croisez les données pédologiques avec des informations climatiques, géologiques et agricoles.

*La lecture d'une carte pédologique demande une compréhension des symboles, des couleurs et des informations fournies dans la légende, ainsi qu'une analyse attentive de la distribution spatiale des types de sols pour prendre des décisions éclairées en matière d'utilisation des terres et de gestion des ressources.*

### 1.5- Introduction à la mise en valeur des sols (cas des sols d'Algérie)

L'utilisation de cartes pédologiques à grandes échelles est indispensable pour la mise en valeur des sols agricoles en Algérie. Les sols algériens présentent une grande diversité en raison de la géologie variée et du climat contrasté du pays, ce qui nécessite une approche précise pour optimiser leur utilisation agricole. Voici comment ces cartes peuvent être utilisées spécifiquement pour la mise en valeur des sols agricoles en Algérie :

1. **Sélection des cultures appropriées** : Les cartes pédologiques permettent d'identifier les types de sols présents dans une région agricole donnée en Algérie. Cette connaissance est essentielle pour choisir les cultures les plus adaptées à chaque type de sol. Par exemple, les sols sablonneux peuvent être plus appropriés pour les cultures de légumes, tandis que les sols argileux peuvent être favorables aux céréales. En utilisant les informations des cartes, les agriculteurs peuvent maximiser les rendements et la qualité des récoltes.
2. **Gestion des intrants** : Les cartes pédologiques indiquent également la fertilité des sols, leur teneur en éléments nutritifs et leur pH. Cette information est précieuse pour ajuster les pratiques de fertilisation en fonction des besoins spécifiques des sols. Cela permet de réduire les coûts liés à l'utilisation d'enfrais et de minimiser les risques de pollution environnementale.
3. **Planification de l'irrigation** : En Algérie, où l'eau est une ressource précieuse, la planification de l'irrigation est cruciale pour l'agriculture. Les cartes pédologiques peuvent aider à déterminer les zones où l'irrigation est nécessaire en raison de la faible rétention d'eau du sol. Elles permettent également d'optimiser l'efficacité de l'irrigation en évitant le gaspillage d'eau.
4. **Prévention de l'érosion** : Les sols agricoles en Algérie sont parfois soumis à des risques d'érosion, en particulier dans les zones montagneuses. Les cartes pédologiques identifient les zones sensibles à l'érosion, ce qui permet de mettre en place des pratiques de conservation du sol, telles que la plantation d'arbres ou la construction de terrasses.
5. **Rotation des cultures** : En planifiant la rotation des cultures en fonction des types de sols, les agriculteurs peuvent prévenir l'appauvrissement du sol et la diminution de la qualité des récoltes. Les cartes pédologiques aident à concevoir des schémas de rotation efficaces.

## Agro-pédologie et fertilisation

6. **Optimisation de l'utilisation des terres** : Les cartes pédologiques permettent de maximiser l'utilisation des terres agricoles en Algérie en identifiant les zones les plus productives et en évitant une exploitation inappropriée des sols fragiles.
7. **Développement agricole durable** : L'utilisation de cartes pédologiques à grandes échelles favorise le développement agricole durable en Algérie en minimisant les impacts environnementaux négatifs tout en améliorant la productivité et la rentabilité des exploitations agricoles.

En conclusion, l'utilisation de cartes pédologiques à grandes échelles est un outil précieux pour optimiser la mise en valeur des sols agricoles en Algérie. Elle permet aux agriculteurs et aux planificateurs agricoles de prendre des décisions éclairées, de maximiser les rendements, de réduire les coûts et de préserver la durabilité des sols dans un contexte climatique et géologique diversifié.

## Partie II : Fertilisation

### Objectifs :

- 1- Comprendre le rôle des modifications dans l'amélioration des propriétés du sol.
- 2- Différencier les amendements minéraux (notamment calciques) et leurs effets sur le sol.
- 3- Analyser l'importance des amendements humifères et leur impact sur la structure et la fertilité du sol.
- 4- Étudier les diverses sources d'humus et leur contribution à l'équilibre du sol.

### Introduction

La production végétale, en tant que pilier de notre alimentation et de notre économie, est confrontée à divers problèmes qui entravent son efficacité. Parmi ces problèmes, on peut citer l'appauvrissement des sols, la dégradation de la fertilité due à une utilisation intensive, la perte de nutriments essentiels, la pollution environnementale et le défi constant de nourrir une population mondiale croissante. Face à ces enjeux, l'agriculture moderne doit s'efforcer de maintenir et d'accroître les rendements tout en préservant la santé des sols et de l'environnement.

L'amélioration de la fertilité des sols en agriculture repose principalement sur l'application d'amendements et d'engrais. Ces substances jouent un rôle vital en fournissant aux plantes les éléments nutritifs essentiels, en corrigeant le pH du sol et en améliorant sa structure. Les amendements, qu'ils soient organiques (compost, fumier) ou minéraux (calcaire, gypse), enrichissent le sol en matière organique, favorisent l'agrégation des particules du sol, et améliorent la rétention d'eau. Cette matière organique renforce également la biodiversité microbienne du sol, contribuant ainsi à la santé des plantes.

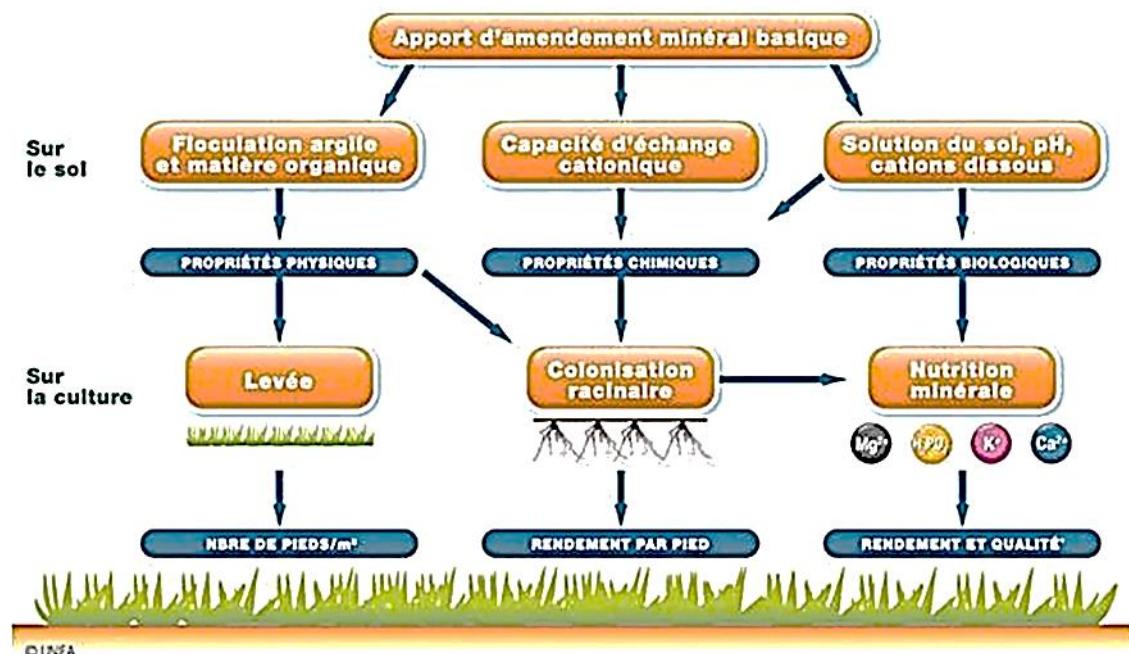
En outre, l'application d'amendements calcaires permet de corriger le pH du sol, assurant ainsi des conditions de croissance optimales pour les cultures. Parallèlement, les engrains minéraux fournissent aux plantes les nutriments nécessaires à leur croissance, tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Une gestion judicieuse de l'utilisation des engrains et des amendements peut également prévenir la dégradation des sols, comme l'érosion et la perte de nutriments.

## Chapitre 1 : Les amendements

Les amendements sont destinés à préserver ou à améliorer la structure des sols, à régulariser le pH et à favoriser une activité biologique propice à la croissance des plantes. Il y a deux sortes d'amendements : les amendements minéraux, qui apportent du calcium et/ou du magnésium et les amendements organiques qui enrichissent le sol en matière organique et dont certains fournissent aussi un grand nombre d'éléments minéraux destinées à entretenir ou à enrichir le stock d'humus du sol.

### 1- Amendements minéraux

On distingue deux catégories d'amendements minéraux : les amendements calciques et/ou magnésiens et les amendements engrais. Ces derniers sont des produits qui, en plus de leur action neutralisante, fournissent aux cultures au moins un autre élément que le calcium ou le magnésium. Ils sont nombreux et leurs dosages sont très variables. Les amendements minéraux les plus utilisés sont les amendements calciques et/ou magnésiens.



Les amendements basiques n'agissent pas directement sur la production des cultures. Ces effets dépendent du climat, de l'état initial du sol et des techniques culturales.

Figure 30 : Impact des amendements minéraux sur les caractéristiques des sols

### 3- Amendements calciques

Un amendement calcaire, également appelés amendement à base de chaux, est un apport que l'on fait au sol afin de modifier ses propriétés et de les rendre plus favorables aux cultures. Il est par définition riche en calcium et a pour principal objectif de redresser le pH d'un sol acide, le pH idéal pour un sol de potager étant situé un peu en dessous de la neutralité (environ 6,5). **Ils sont constitués :**

- d'un anion portant des charges négatives capable de s'associer avec les  $H^+$  pour les neutraliser (propriétés basiques). Parmi ces anions on peut citer  $O^{2-}$  constitutif de la chaux vive  $CaO$ ,  $HO^-$  anion

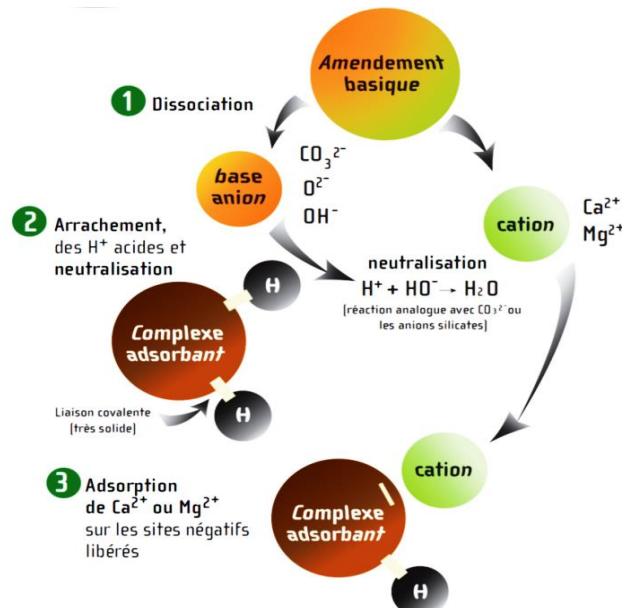
# Agro-pédologie et fertilisation

de la chaux éteinte  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  anion du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) ou de magnésium ( $\text{MgCO}_3$ ).

- **d'un cation** portant des charges positives et pouvant s'adsorber sur les sites négatifs du complexe adsorbant. Parmi ces cations,  $\text{Ca}^{2+}$  (calcium),  $\text{Mg}^{2+}$  (magnésium) sont les plus courants.

## • Mode d'action :

Seules les bases issues de l'amendement basique peuvent "arracher" et neutraliser les  $\text{H}^+$  acides fixés sur le complexe. Le pH du sol augmente. Les sites négatifs, libérés par les  $\text{H}^+$ , peuvent alors accueillir les cations  $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$  apportés par l'amendement. L'efficacité d'un amendement basique tient à l'action de sa base, l'anion  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$  ou silicate. Le cation  $\text{Ca}^{++}$  ou  $\text{Mg}^{++}$  ne fait qu'accompagner



Dans le cas du **carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ )**, une fois attaqué par les acides du sol :

Ce schéma montre les bénéfices d'un apport d'amendement minéral basique sur l'amélioration des **propriétés physiques, chimiques et biologiques** (ainsi que leurs interactions) sur le développement des plantes et l'installation du potentiel de la culture.

- **Le cation  $\text{Ca}^{++}$**  agira sur la structure,
- **L'anion  $\text{CO}_3^{2-}$** , agira sur le pH du sol et le taux de saturation de la CEC avec tous les bénéfices présentés dans ce schéma de synthèse...

# Agro-pédologie et fertilisation

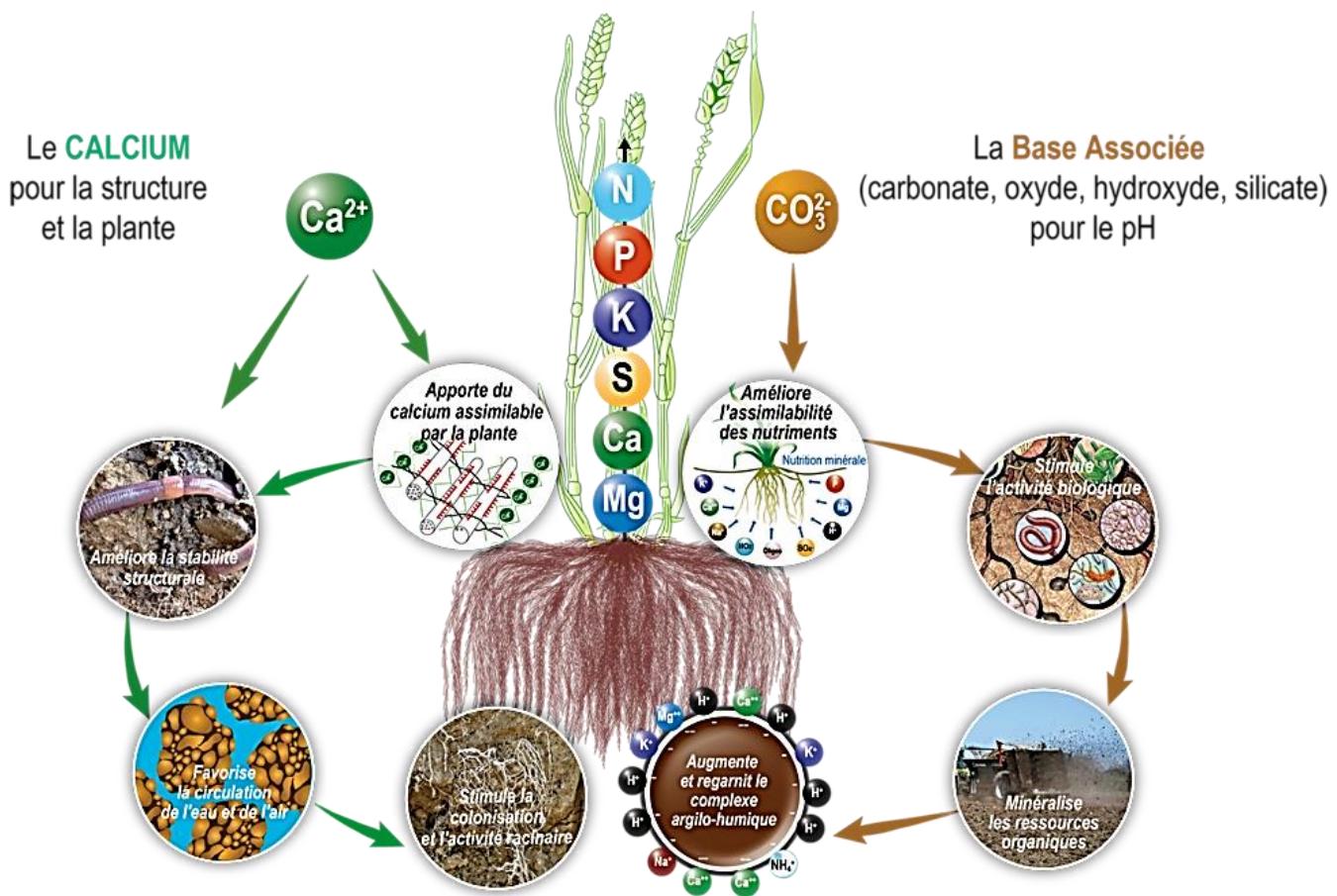
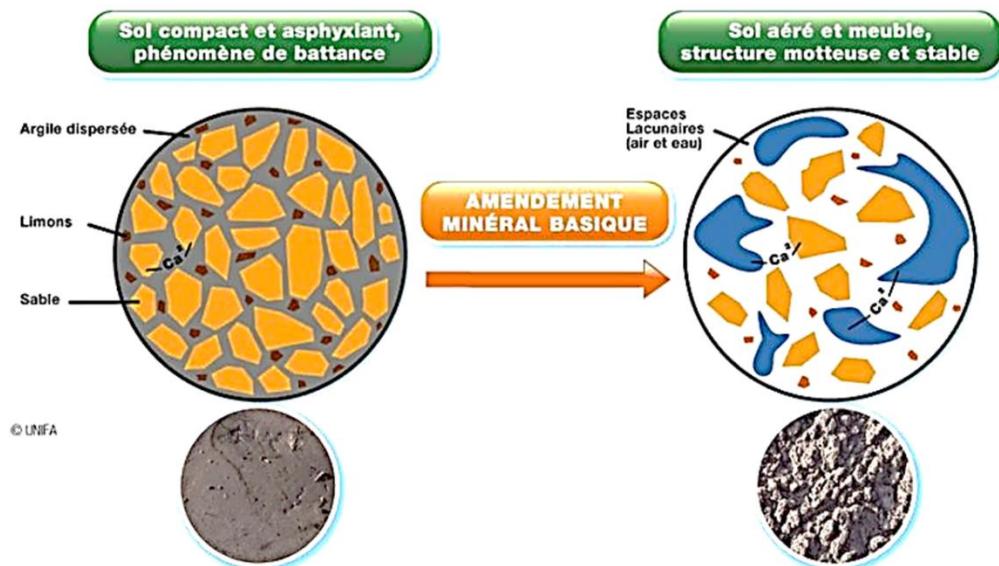


Figure 31 : Impact des amendements calciques sur les caractéristiques des sols

- **Les différents effets des amendements**

Plus généralement, l'amendement calcaire a un rôle :

- **Effet sur la fertilité Physique :** Il a une action sur les propriétés physiques du sol d'où il permet d'obtenir un sol plus meuble et améliore sa stabilité structurale.



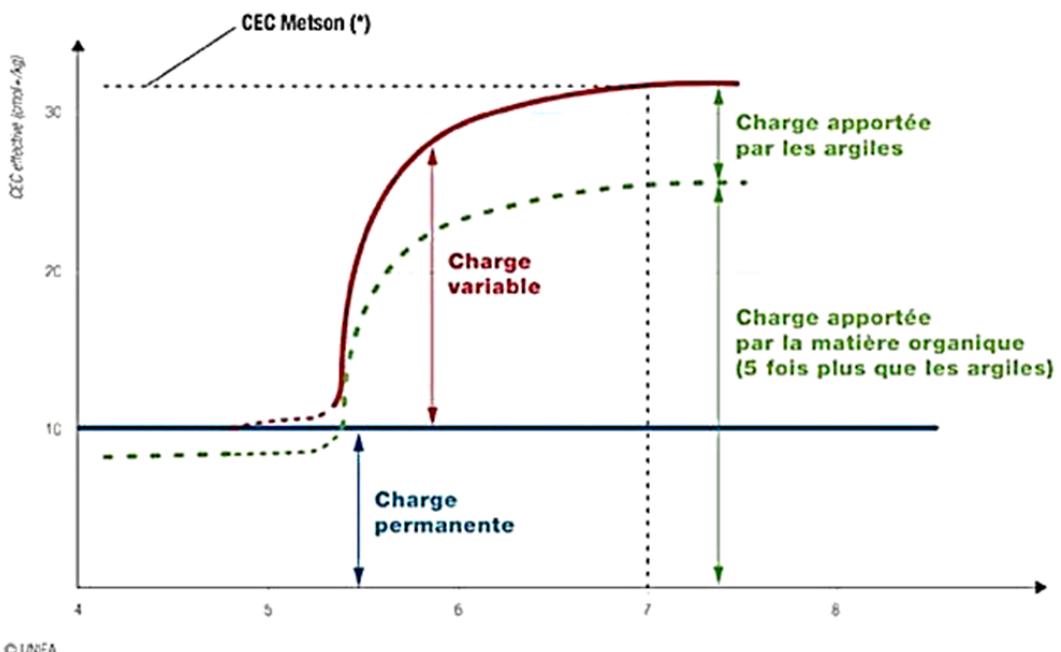
FORMATION AMB - Mis

Figure 32 : Effet des amendements calciques sur la fertilité Physique

## Agro-pédologie et fertilisation

- **Effet sur la fertilité chimique** : il régularise le pH et favorise les échanges d'ions nécessaires à l'assimilation des éléments nutritifs par les végétaux. Ces effets peuvent être traduits principalement par

## **L'Action sur la CEC effective ;**



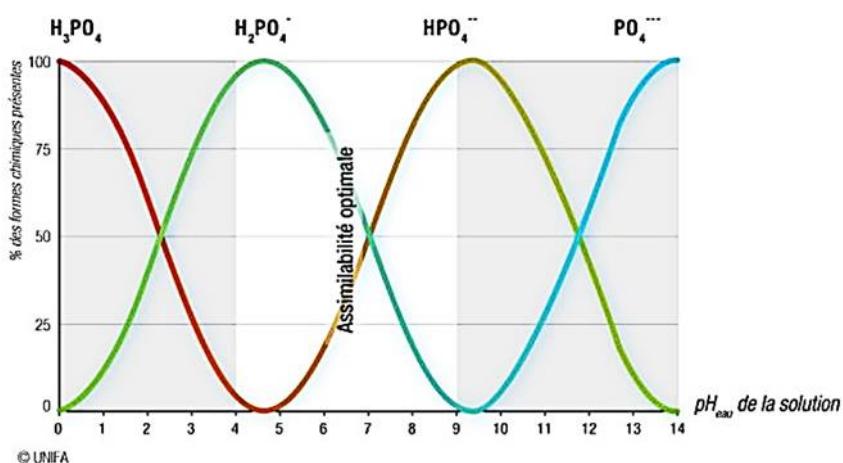
L'augmentation du pH du sol permet d'augmenter la CEC effective (au pH du sol). La CEC effective peut doubler entre pH 5 et pH 7.

La CEC Metson (à pH 7) ne varie pas. Elle rend compte de la quantité de charges à un pH fixé par convention à 7.

Source : Tessier, INRA Versailles

## FORMATION AMB

## la Biodisponibilité du phosphore

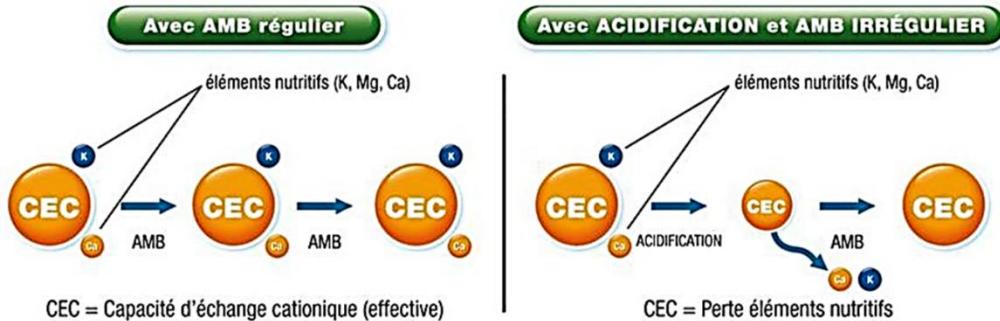


Le pH influe très fortement sur la forme chimique et la biodisponibilité du phosphore

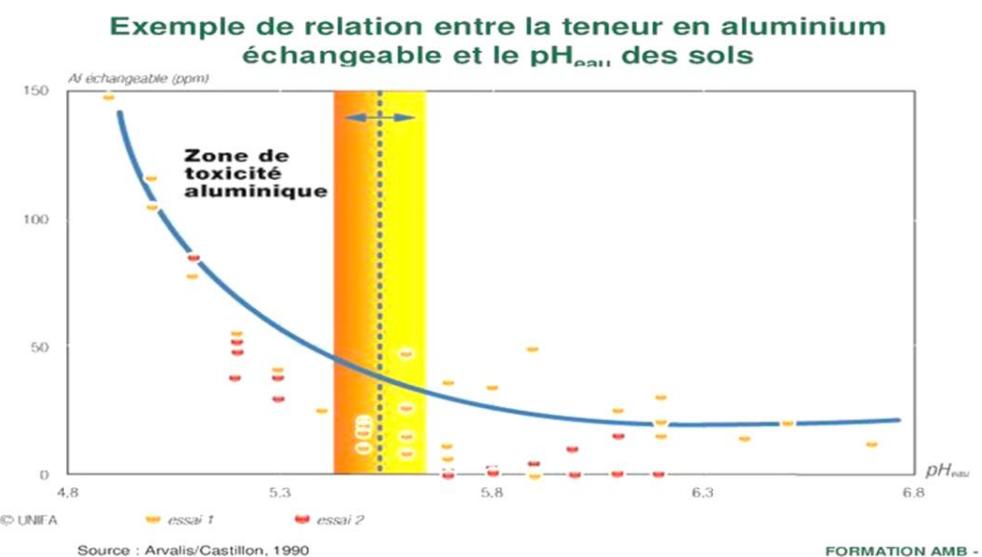
## La Biodisponibilité du potassium

# Agro-pédologie et fertilisation

- L'acidification des sols diminue la CEC effective, et la production de H<sup>+</sup> chasse progressivement du calcium et du potassium, lesquels deviennent sujets à lixiviation.
- L'apport d'amendement permet de conserver du potassium échangeable (adsorbé sur le Complexe Argilo Humique)



## et la Suppression de la toxicité aluminique.



- **Effet sur la fertilité Biologique** : les bactéries acidifient naturellement le sol par leur activité, mais si cette acidité n'est pas neutralisée, l'activité microbienne en est perturbée. L'amendement calcaire, en régularisant le pH, favorise la vie du sol indispensable à un bon équilibre.

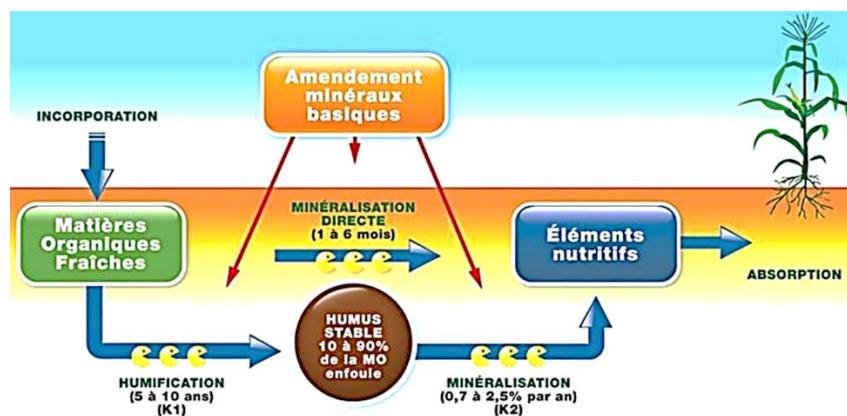


Figure 33 : Effet des amendements calciques sur la fertilité Biologique

# Agro-pédologie et fertilisation

## • Les principaux amendements calciques :

Les amendements calcaires peuvent être classés d'après leur origine et les traitements qu'ils ont subis.

### e- les produits naturels :

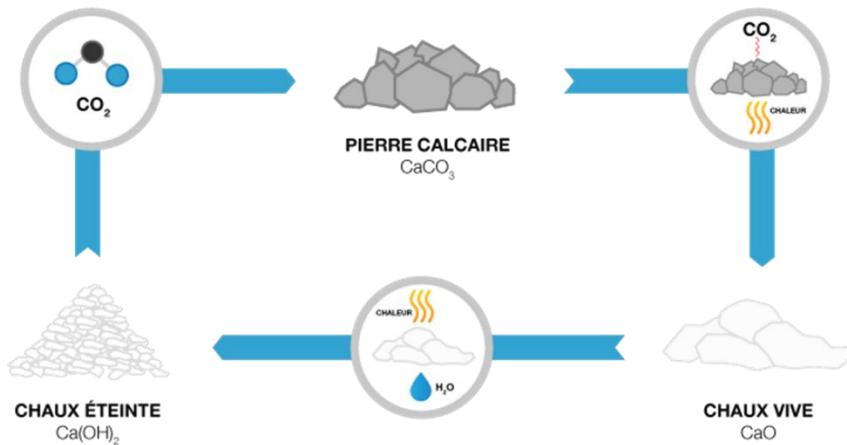
Il s'agit des produits qui sont extraits et immédiatement utilisables. Nous pouvons donner comme exemples :

- les marnes : (الطين الجيري) qui sont des roches tendres composées essentiellement de calcaire et d'argile. Elles dosent en moyenne 15 à 30% de CaO. exposées à l'air, les marnes se délitent (se divisent en petits fragments) et peuvent alors s'épandre facilement.
- les craies et les faluns : roches calcaires tendres qui se désagrègent au moment de l'extraction et peuvent ainsi être utilisées directement (35 à 50% de CaO).
- les dépôts marins : ce sont des sables mélangés à des débris de coquilles ( 15 à 30% de CaO) qui sont recueillis sur certaines plages

*Les amendements d'origine naturelle sont en général assez pauvres en CaO ; ils doivent donc s'utiliser à dose assez forte et ils sont surtout intéressants au voisinage des lieux d'extraction.*

### f- Les chaux :

Le terme « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire, notamment la chaux vive et la chaux éteinte. Elles résultent de la calcination, dans les fours à chaux à 100-110°C, de roches calcaires. Le cycle de la chaux consiste à cuire le calcaire pour former la chaux vive (CaO). La chaux éteinte ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) peut alors être produite en ajoutant de l'eau à la chaux vive. La chaux est un amendement à action rapide.



### g- les calcaires broyés :

Ils résultent du broyage de roches calcaires. il diffèrent par :

- **Leur teneur en CaO** (45 à 55% en général)
- **Leur granulométrie** : il existe plusieurs types de calcaires broyés, A, B, C, D, E, F, qui correspond à des dimensions normalisées. le type A correspond au broyage le plus fin ( $\phi < 0,08\text{mm}$ ), le type F correspond aux calcaires plus grossièrement broyés, appelés encore calcaires concassés (grains supérieurs à 5mm)

# Agro-pédologie et fertilisation

- **leur solubilité carbonique** : solubilité d'un échantillon dans l'eau chargée de gaz carbonique, elle caractérise la rapidité d'action de l'amendement considéré. Elle dépend essentiellement de la fonesse de la mouture et de la dureté du calcaire utilisé

## h- les produits mixtes :

Il s'agit de mélanges de chaux et de calcaires broyés, en proportion variable. Ils dosent en moyenne 60 à 70% de CaO et ils agissent rapidement par le produit cuit et plus lentement par le produit cru

Tableau 14. Propriétés de différents amendements calciques.

Nom commercial	Teneur en chaux			Teneurs en éléments annexes	Action
	Formule chimique	Teneur (%)	Effet neutralisant <sup>1</sup> (référence pour l'effet chaulant, exprimé en équivalents CaO, %)		
Chaux Calcaire moulu Carbonate de calcium	CaCO <sub>3</sub>	> 90	50		lente
Chaux d'algues marines	CaCO <sub>3</sub> MgCO <sub>3</sub>	75-80 10	50	2-3 % Mg	lente
Dolomie	CaCO <sub>3</sub> MgCO <sub>3</sub>	50-60 40	45-50	12 % Mg	lente
Chaux éteinte	Ca(OH) <sub>2</sub>		55		rapide
Chaux vive	CaO	75-90	75-90		rapide
Chaux vive-chaux magnésienne	CaO MgO	60 25	95	15 % Mg	rapide
Chaux d'Aarberg (écumes de sucrerie) <sup>2</sup>	CaCO <sub>3</sub>	54	30	30 % H <sub>2</sub> O; 1,1 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ; 0,6 % Mg; 0,3 % N	moyenne
Engrais calcique, sous-produit de l'extraction de gravier	CaCO <sub>3</sub>	Variable selon provenance et charge		Teneur en éléments nutritifs faible	lente

<sup>1</sup> Valeur neutralisante déterminée par calcul = Teneur en % x (CaCO<sub>3</sub> x 0,56 + MgCO<sub>3</sub> x 0,67 + CaO x 1,0 + MgO x 1,39).

<sup>2</sup> Sous-produit de la transformation de la betterave sucrière, considéré comme engrais de recyclage.

## • Estimation des besoins de bases :

**Cas général** : les besoins de bases (chaulage) se raisonnent à partir de plusieurs indicateurs du statut acido-basique du sol.

### ➤ Description des principaux indicateurs retenus :

indicateur	Description	Avantages	Limites	Explications agronomiques
pH eau	Mesure l'acidité d'une suspension de terre dans l'eau (rapport terre/eau normalisé)	Mesure simple peu onéreuse Nombreuses références agronomiques	Fortes variations dans l'année (plus élevé en hiver que l'été) <sup>(1)</sup> et variations spatiales	Plus le pH est bas, plus la concentration en ions H <sup>+</sup> et en aluminium dans la solution du sol est élevée (risque de toxicité)
CEC Metson	Capacité d'Echange en Cations, extraction à pH 7 par l'acéate d'ammonium	Méthode universelle de référence	Sur sols sableux forte variation	Mesure la charge négative potentielle du sol (pH = 7)

# Agro-pédologie et fertilisation

S/T ou taux de saturation	$\frac{(Ca + Mg + K + Na) \times 100}{CECMetson}$ <sup>(2)</sup>	Corréle avec le pH eau, un des estimateurs du besoin en « chaux »	Entretien l'idée fausse de l'effet basique de ces 4 cations	Mesure la part potentielle (pH = 7) occupée par les cations
Ca/T ou taux de saturation en calcium	$\frac{Ca \times 100}{CECMetson}$ <sup>(2)</sup>	Idem, mais limité au calcium	Idem, ci-dessus	Mesure la part occupée par le calcium
Aluminium échangeable	Mesure conventionnelle de l'aluminium échangeable du complexe absorbant	Un des indicateurs de la toxicité aluminique	Ne permet pas de quantifier le besoin en « chaux »	En équilibre avec les ions aluminium en solution, dont certains sont toxiques pour les plantes

<sup>(1)</sup> Variations dépendant de l'activité biologique, des précipitations, de la fertilisation...

<sup>(2)</sup> Cations et CEC exprimés en meq/100g ou Cmol<sup>+</sup>/kg

## ➤ Interprétation des indicateurs à partir de valeurs moyennes

Domaine	Très acide	Acide	Peu acide	Neutre
pH eau	5,5	5,8	6,5	7,2
S/CEC (%)	55	70	100	> 100
Ca/CEC (%)	45	55	85	> 100
Complexe absorbant	Ions aluminium dominants	Ca, Mg et K dominants Al surtout complexé	Saturé par Ca, K et Mg Aluminium complexé et précipité	
Solution du sol	Aluminium abondant (toxicité +)	Peu d'aluminium (toxicité -)	Absence d'aluminium, Ca variable, pas de toxicité	

## ➤ Estimation des besoins de bases

La valeur neutralisante d'un amendement mesure son action neutralisante. C'est un nombre, exprimé en kg de CaO, suivant le même principe que pour les éléments majeurs des engrains. Par convention, on considère qu'une unité neutralisante correspond à l'action de 1 kg de CaO. On peut ainsi comparer l'action de plusieurs amendements et calculer les quantités à apporter.

**Par exemple**, si la valeur neutralisante d'un amendement est de 45, il faudra en apporter  $100/45 \times 100 \approx 220$  kg pour obtenir la même action neutralisante qu'avec 100 kg de CaO. De même, on devra utiliser  $100/30 \times 100 \approx 330$  kg d'un amendement calcique dont la valeur neutralisante est de 30.

**Remarque :** On effectue le même type de calcul pour les amendements apportant du magnésium. Dans ce cas, on considère que la valeur neutralisante d'un kg de MgO est égale à 1,4 fois la valeur neutralisante d'un kg de CaO.

### ⊕ Cas général

- Eléments pris en compte pour le calcul du redressement :
- pH eau = 5.8

# Agro-pédologie et fertilisation

- CEC Metson = 12 cmol<sup>+</sup>/kg
- S /CEC = 68 %
- Profondeur du sol = 30 cm, absence de cailloux, soit un poids de terre fine estimé à 3700 tonnes/ha
- Objectifs de l'apport d'amendement :
  - Atteindre un pH de 6.3 optimum pour une céréale,
  - Soit le S/CEC souhaitable de 90 % (pH eau et S/CEC sont très bien corrélés)
- Besoin de bases (BDB) :

$$BDB = CEC \times (S/CEC \text{ opti} - S/CEC \text{ analyse}) \times 0.28 \times \text{Pds de terre fine}$$

Pour cet exemple : BDB arrondi = 2750 unités de valeur neutralisante/ha

Cet apport pourra être fractionné en 2 fois, en apportant un amendement basique calcique (et magnésien en cas de déficit en magnésie).

## Cas particulier des sols sableux

- Estimation du redressement :

Si la CEC est inférieure à 5, on considère que les rapports des éléments sur la CEC deviennent peu significatifs.

En conséquence, le calcul du Besoin de Bases (BDB) ne s'effectue plus à partir du [S/CEC] mais à partir du pH, suivant la formule suivante :

$$BDB = a \times \text{Mat.Org} + b \times (6.0 - \text{pH analyse}) - c$$

(Pour un pH optimum de 6 : a=28.7 ; b =1410 ; c =830)

- Stratégie de fertilisation :

- Les risques de toxicité aluminique sont élevés jusqu'au pH de 5.
- Si le pH < 6.0, on prévoit un redressement (BDB) plus entretien.
- Si le pH est entre 6 et 6.2, on ne prévoit qu'un entretien tous les 2 à 3 ans.
- Pour ces terres légères, la dose d'entretien se situe autour de 350 à 500 unités maximum de valeur neutralisante.

## Cas particulier des prairies permanentes

**Stratégie d'apport :** source groupe chaulage du COMIFER

- Si pH < 5.5, il est nécessaire de lever les risques importants de toxicité aluminique.

L'apport de redressement se justifie pour amener le pH au delà de 5.5 et par rapport à la composition de la flore à moyen terme.

- Si pH compris entre 5.5 et 6.3, l'entretien du pH sera justifié pour le maintien de la composition floristique, la pérennité de la prairie, la productivité en lien avec l'augmentation de l'azote absorbé, l'effet sur les légumineuses.

- Au delà de 6.3, la surveillance du pH reste d'actualité en particulier en cas de forte fertilisation azotée.

**Remarque :** les valeurs indiquées ci-dessus se réfèrent à un pH eau moyen sur l'horizon 0/10 cm.

# Agro-pédologie et fertilisation

**La solubilité carbonique traduit la rapidité d'action de l'amendement qui dépend de la finesse du broyage et de l'origine du calcaire (tendre ou non). Une solubilité supérieure à 50% correspond à une action rapide, inférieure à 20%, l'action est lente. Entre ces deux valeurs, l'action est dite moyennement rapide.**

La qualité de finesse est appréciée par tamisage. Trois catégories sont ainsi distinguées :

- **produit pulvérisé** : 80% du produit passent à 0,315 mm et 99% à 1 mm ;
- **produit broyé** : 80 % du produit passent à 4 mm ;
- **produit concassé ou brut** : plus de 20% sont supérieurs à 4 mm. Pour les produits des classes 1 et 2, la finesse de mouture est caractérisée par le diamètre du tamis au travers duquel passent 80 % du produit

## ➤ Estimation de la dose à apporter

Elle dépend de 3 facteurs :

- du **pH initial**, mais même si le pH est bas (inférieur à 6), il ne faut pas apporter une dose risquant de la remonter trop brutalement, car il peut y avoir des accidents (blocage d'oligo- éléments en particulier). il ne faut pas remonter le pH de plus de 0,8 à 1 unité lors d'un seul apport
- du **pH recherché** : le pH optimum des sols en général se situe entre 6,5 et 7,2. il n'est pas nécessaire de remonter un sol acide jusqu'à la neutralité
- du **pouvoir tampon du sol** ; en sol argileux ou en sol humifère, il faut apporter des doses plus fortes qu'en sol sableux pour une même remontée du pH.

On peut distinguer les doses de redressement et les doses d'entretien :

Les apports de redressement permettent de remonter le pH, on conseille pour remonter le pH d'environ 1 unité :

- ✓ 1,5 à 3t de CaO en sols sableux
- ✓ 3 à 5t de CaO en terres argileuses ou humifères

Les apports d'entretien permettent de maintenir le pH au niveau souhaité, ils sont destinés à compenser les pertes. On conseille souvent :

- ✓ en sol sableux environ 1tonne de CaO tous les 3ans
- ✓ en sol argileux environ 2,5 tonnes de CaO tous les 5ans

Les apports doivent être plus réduits mais plus fréquents en sols sableux car il n'est pas possible de faire des réserves dans le sol et, un apport réduit provoque une variation non négligeable du pH qui peut avoir

# Agro-pédologie et fertilisation

des conséquences néfastes. Au contraire, les sols argileux stockent une plus grande quantité de calcium sans modification notable du pH.

Les apports modérés mais plus fréquents sont toujours préférables ; ils évitent les modifications brutales du sol

## ➤ Le moment de l'apport

Il dépend essentiellement de la nature des cultures de la rotation : il faut apporter l'amendement avant les cultures qui se développent le mieux au pH assez élevés. Par exemple un apport après le blé, avant le semis de l'orge ou de la prairie temporaire à base de légumineuses, donnera de bons résultats.

Dans des cas où le sol est libre pendant une longue période, il est possible de faire un apport de fin d'été ou d'automne. Il faut éviter d'apporter les amendements calciques avant la pomme de terre par exemple

### a- la pratique de l'apport

- 1- Il faut, apporter les amendements calciques quelques mois avant la mise en place de la culture ;
- 2- il est conseillé de faire un enfouissement en deux temps : un pseudo-labour mélange l'amendement avec les couches superficielles du sol, puis un labour assure un enfouissement plus complet ;
- 3- il faut éviter de faire coïncider l'apport d'amendements calciques avec un apport du fumier ou d'engrais ammoniacal, le calcium risque de déplacer l'ammoniac et de provoquer sa volatilisation, donc une perte d'azote
- 4- de même, la chaux risque de provoquer la rétrogradation des engrains phosphatés solubles : il faut éviter donc de mettre ces deux éléments en contact

**ex :** luzerne sol pH=7 à 8, orge-betterave sucrière sol à pH 6,3 à 8 ;blé sol à pH 6 à 7,5 ;pomme de terre sol à pH 5 à 7 ; seigle sol à pH 4,5 à 6.

## ➤ le choix de l'amendement

Sur le plan technique, le choix de l'amendement dépend essentiellement de la nature du sol.

En sol sableux, les amendements à action lente (marnes, calcaires broyés) sont préférables car ils modifient moins brutalement le sol et les risques de pertes sont plus faible. Par contre, en terres lourdes les amendements plus actifs (chaux ou calcaires très finement pulvérisés) permettront d'obtenir plus rapidement les améliorations souhaitées.

En définitive, l'aspect économique du choix est plus important que l'aspect technique. il faut utiliser l'amendement qui fournit le kilogramme de CaO épandu au meilleur prix.

## • Les amendements humifères

La fertilisation est le processus consistant à apporter, à un milieu de culture, tel que le sol, les éléments minéraux nécessaires au développement de la plante. Ces éléments peuvent être de deux types, les engrains et les amendements. L'amendement organique nourrit la terre, l'engrais organique nourrit la terre et développe la flore microbienne du sol et l'engrais organo-minéral nourrit la terre, les micro-organismes et apporte les éléments minéraux nécessaires au développement des plantes

### 1- Définition.

Les amendements humifères sont des substances organiques qui sont ajoutées au sol pour améliorer sa qualité et sa fertilité. Ils sont riches en matière organique décomposée, ce qui les distingue des autres types d'amendements du sol. L'humus est la forme stabilisée de la matière organique du sol, résultant de la décomposition de matières végétales et animales par des micro-organismes du sol. Les amendements humifères sont conçus pour augmenter la teneur en humus du sol, ce qui a de nombreux avantages pour la santé des sols et la croissance des plantes

### 2- Formes d'humus

Selon que l'humus a été formé dans un sol aéré ou plutôt asphyxiant (en raison par exemple d'une saturation totale en eau ou d'une compaction répétée), on peut classer les humus en deux catégories.

#### Humus formés en aérobiose :

➤ **la réfléchir** Il est formé en général dans les meilleures conditions de fertilité. Les environnements sont des variables disparates et les propriétés en fonction de la végétation et le sol et les conditions climatiques. Les caractéristiques générales communes consistent à haute activité biologique, avec la présence de vers de terre, arthropodes et une microfaune qui voit la prévalence des champignons dans un milieu acide, les bactéries et les actinomycètes dans un environnement neutre ou basique. Une autre propriété commune est l'absence de litière en raison de un'umificazione rapide et complète, et l'incorporation de la substance organique dans la formation de la fraction minérale de complexes argilo-humique avec plus ou moins stable. La minéralisation est conditionnée par le taux de saturation de base. Il existe deux types de Mull:

✓ **la forêt Mull** Il est formé dans les sols non calcaires, mais avec un bon en fourni football. La végétation se compose de forêts de feuillus. La réaction est acide (pH 5.5 à 6.5), le rapport C / N et le taux moyen-élevé de saturation en base moyenne élevée, de l'ordre de 60%. La minéralisation est assez rapide et type de structure grumeleuse.

## Agro-pédologie et fertilisation

- ✓ **la calcic Mull** Il est formé dans les sols calcaires, soumis à des variations saisonnières de l'humidité et à la végétation représentée principalement par des espèces herbacées. La réaction est neutre ou alcalin (pH 7 ou plus), le rapport C / N équilibré (10), le taux de saturation en bases très élevées (90-100%). La structure est bosselé et très stable pour la haute fourni en calcium et en magnésium et la minéralisation lente en raison de la stabilité des complexes argilo-humique. A ce type de substance organique, il peut également remonter à la terres agricoles.
- **Le moder**, Il est formé sur les sols forestiers des forêts mixtes dans un environnement froid et humide, avec la litière persistante, mais avec la formation de complexes argilo-humique faibles. La réaction est fortement acide, le rapport C / N légèrement élevée (environ 10 à 20) et le taux de saturation en bases très faibles. La structure est bosselé mais instable. Parmi les organismes vivants prévalent arthropodes et champignons.
- **Le mor**, formes dans les sols forestiers conifère landes et forêts de résineux ou dans un environnement froid et humide, avec persistance litière. Il a une réaction fortement acide, le rapport C / N élevé (environ 30), très faible taux de saturation de la base. La structure est fibreuse. L'activité biologique est modeste et organismes sont principalement représentés par acariens, collemboles et les champignons. Tant le humification est minéralisation sont assez lents. La structure fibreuse est dans les horizons superficiels plus.

### Humus formés en anaérobiose :

- **La tourbe**, Il évolue dans des environnements marais dans des conditions de submersion permanentes. Les propriétés chimiques varient en fonction des caractéristiques de l'eau. Il se gazon neutre, pH 7-7,5, le rapport moyen C / N élevé, de haute bases de taux de saturation, et la tourbe acide, avec un pH inférieur à 4, le rapport C / N très élevé, le taux de saturation en bases très faibles. En général, le 'humification est lente et incomplète, alors que la minéralisation Il est un retard de croissance, il est donc une substance organique hypo. L'activité biologique est modeste et se fonde sur bactéries anaérobiose. la structure Il est fibreuse.
- **L'anmoor**, Elle évolue en forêt soumise à des périodes de stagnation des sols. Les propriétés chimiques sont variables et généralement le rapport C / N est modérément élevé. L'humification est lente mais complète, la minéralisation retard de croissance. L'activité biologique est basée sur une pédofaune saisonnière et les bactéries. Ceux-ci alternent entre une aérobiose et une microflore anaérobiose en fonction des conditions d'humidité.

## 3- Propriétés chimiques et physiques de l'humus.

Les caractéristiques chimiques et structurelles de l'humus sont à la base de la propriété fondamentale d'importance pour déterminer les propriétés du sol, avec des reflets sur sa fertilité.

### 2. propriétés colloïdales

Le poids moléculaire élevé et la densité des groupes fonctionnels acides sont responsables des propriétés colloïdales de l'humus. Les actes d'humus comme un colloïde hydrophile, électronégatif aux valeurs ordinaires de pH dans le sol. Son état physique normal est de colloïde floculée, en particulier dans les sols à réaction légèrement acide à légèrement alcalin ( $\text{pH} < 8,5$ ).

### 3. Acidité, l'échange et la chélation

Les propriétés acides sont dues aux groupes carboxyle et des groupes phénoliques. Être des acides faibles, la dissociation augmente avec le pH: à des valeurs normales sont les groupes carboxyle être différenciés, alors que des valeurs de pH élevées aussi dissocier les groupes hydroxyle de phénols. La formation de charges négatives dues à la dissociation de l'acide, en plus d'attribuer des caractéristiques d'humus d'un électronégatif colloïdal, est à l'origine des propriétés chimiques :

- **la capacité d'échange cationique :** Les charges négatives sont neutralisées par 'adsorption cations (ions  $\text{H}^+$  et au $3+$ ) Dans les sols très acides, des cations métalliques (Californie $^{2+}$ ,  $\text{mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , etc.). Au moyen de l'humus d'échange d'ions conserve bases de change les préservant d'être emporté et en déposant progressivement. Cette propriété revêt une importance considérable dans le cas de l'humus, puisque le SCC est en moyenne beaucoup plus élevé que celui des minéraux argileux (3-400 mEq 100 g). La capacité d'échange augmente avec la pH la relation qui lie celui-ci le degré de dissociation de l'acide humique.

- **Tampon d'alimentation :** En vertu des propriétés acides faibles de l'humus et la présence de bases d'échange adsorbé sur sa surface (dans des conditions normales de pH), l'humus a un pouvoir tampon élevé contre les variations de pH:

-dans le premier cas, en présence de les acides, les bases et les échanges Sorties adsorbe des ions hydrogène réduisant ainsi son activité dans la solution en circulation; dans le second cas, en présence de bases, des cations de métal adsorbe et libère des ions hydrogène qui neutralisent des ions hydroxyde.

Grâce à ces propriétés, la capacité de mise en mémoire tampon vers l'acidification augmente avec l'augmentation du pH, tandis que vers l'alcalinisation augmente avec la diminution du pH. Dans les terres réaction neutre ou légèrement acide, la capacité de mise en mémoire tampon se manifeste par une plus grande intensité à la fois vers l'acidification à la fois vers l'alcalinisation, opposant efficacement aux changements vers des réactions anormales. Au contraire, dans les sols acides et

# Agro-pédologie et fertilisation

alcalins, cette propriété représente une condition défavorable, par opposition aux interventions correctives.

- **Chélation :** Merci à la présence de groupes carboxyle adjacents ou carboxyle et des groupes hydroxyle adjacents, l'humus a des propriétés de chélation à l'égard des oligo-éléments (fer, cuivre, zinc, etc.) en tant que forme des liaisons organo-métalliques qui les préservent dall'insolubilizzazione.

## 4. L'interaction avec les éléments nutritifs

L'humus est donc l'un des outils de base de l'événement le pouvoir absorbant du sol, d'une grande importance en particulier dans les contextes suivants :

- les éléments très mobiles, qui tombent par la facilité avec érosion (Azote et soufre), elles sont retenues par le sol grâce à l'incorporation dans l'humus, qui, dans des conditions de flocculation est non mobile ;
- les éléments facilement soumis à une insolubilisation ou de la fixation (phosphore et potassium), sont conservés par rétrogradation grâce à l'incorporation dans l'humus, ce qui les libère progressivement sous une forme soluble. Cette propriété est essentielle dans les sols calcaires et dans les sols acides.
- En ce qui concerne les interactions entre le potassium et les métaux alcalino-terreux (calcium et magnésium), de l'humus aide à réguler les antagonismes qui sont exercées entre ces éléments au moyen d'adsorption sélective. Le calcium et le magnésium et potassium, d'une part, d'autre part, exercent un antagonisme mutuel qui se manifeste dans l'absorption radical des phénomènes possibles de carence. Etant donné que l'humus adsorbe une plus grande mesure que le calcium et le magnésium, on abaisse la teneur de la solution en circulation favorisant l'absorption radical de potassium. A l'inverse, dans le cas d'un équipement de haute potassium sur l'adsorption elle est adressée principalement vers cette dernière, ce qui limite la compétition d'absorption radical contre le calcium et le magnésium.

## 5. Interaction avec des composés organiques de synthèse

Une propriété chimique d'une importance fondamentale sous l'aspect écologique est la capacité à adsorber les molécules organiques différentes, chimiquement et biologiquement active, et en inactivant immobilizzandole. Cette action est importante car elle limite ou réduit l'ensemble impact environnemental des différents pesticides, en particulier certaines catégories de herbicide, en évitant le ruissellement et, en même temps, la manifestation d'effets résiduels dus à la persistance dans le sol.

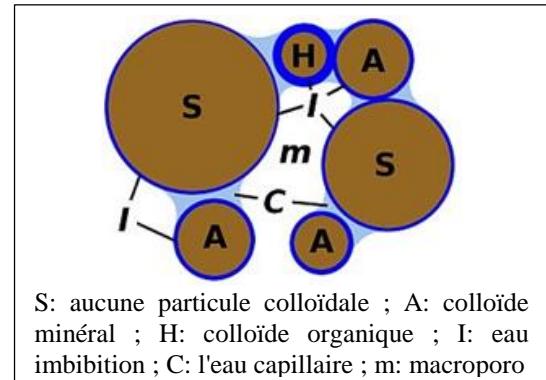
## 6. Interaction avec les composants minéraux

L'humus interagit avec les composants minéraux du sol formant des complexes organo-minéraux. Dans les sols acides forment des complexes d'humus avec les hydroxydes de fer et d'aluminium, et électropositifs colloïdes hydrophobes, la stabilisation de l'état de flocculation.

Plus important encore, le but de la formation de la structure du sol Il est la formation *complexes humo-argile*: Humus agit comme ciment liant les agrégats primaires (formés par des minéraux argileux) de manière à former des agrégats de structure secondaire d'une taille de l'ordre de 1 à 3 mm.

## 7. Amélioration la rétention d'eau

Comme l'humus de colloïde hydrophile à la propriété intrinsèque de la liaison des molécules d'eau sur sa surface, absorbant une quantité égale à 20 fois son propre poids. En conséquence, l'humus a une capacité de rétention d'eau importante, supérieure à celle des colloïdes du sol minéral.



## ❖ RÔLE AGRONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL DE L'HUMUS

Sur la base des propriétés physiques et chimiques décrites ci-dessus, l'humus sont attribuées des fonctions importantes qui, en cas de bonnes commodités, confèrent au sol des caractéristiques physiques, propriétés chimiques et mécaniques très différentes par rapport aux sols avec des équipements rares. La plupart de ces caractéristiques doivent être interprétés comme positifs, mais excessive dans les allocations d'humus comportent des effets secondaires indésirables.

### ❖ Les effets positifs sur les propriétés physico-mécaniques sont essentiellement liés à

- ✓ la formation d'une structure stable et le type glomérulaire. Un sol avec une bonne structure, avec d'autres conditions étant égales par ailleurs, a une relation équilibrée entre l'humidité et l'aération, il est perméable, doux.
- ✓ La capacité élevée d'humus d'imbibition, donne également le sol une plus grande capacité de rétention d'eau.
- ✓ En fin de compte le bien fourni en humus se traduit par de meilleures conditions de vie des plantes et des micro-organismes et, en même temps, les conditions mécaniques qui réduisent les coûts de traitement et de l'irrigation.

### ❖ Non moins important sont les réflexions sur les propriétés chimiques du sol.

- ✓ L'avantage le plus évident d'une haute teneur en humus est la grande quantité d'éléments nutritifs en vertu de l'absorption biologique élevée et la capacité d'échange cationique, les facteurs qui préservent les nutriments par lessivage.

## Agro-pédologie et fertilisation

- ✓ cependant, à ne pas négliger le rôle de l'humus dans l'ajustement des antagonismes entre les nutriments, le ralentissement des phénomènes de fixation et de rétrogradation minérale contre le phosphore et le potassium, la préservation des oligo-éléments de dall'insolubilizzazione.
- ✓ Dans les sols en réaction normale, neutre ou légèrement acide, de l'humus la forte capacité de mise en mémoire tampon se manifeste dans ses meilleures expressions opposées aux causes des variations anormales du pH. Ceci est crucial pour stabiliser au fil du temps les conditions de solubilité favorables à l'absorption des nutriments.
- ✓ En fin de compte le bien fourni en humus se traduit par des conditions optimales de nutrition pour les plantes, grâce à l'équipement riche en nutriments et une dynamique plus équilibrée qui sont établies entre la phase solide, phase liquide et des systèmes racinaires.

### **Sous l'aspect biologique,**

Il convient de mentionner l'activité la plus intense des micro-organismes, qui sont impliqués dans les étapes clés des cycles biogéochimiques des éléments nutritifs. Un sol bien doué de substance organique et avec une relation équilibrée entre la minéralisation et humification se produit biologiquement très actif avec des avantages incontestables sur *chiffre d'affaires* des éléments. Les colloïdes organiques représentent également les sites préférentiels pour le règlement des colonies bactériennes.

### **Sous l'aspect environnemental**

Est l'humus d'action antiérosive fondamentale, étant donné que la formation de complexes humo-argile permet une plus grande résistance à l'érosion surface (exercée par le vent et le ruissellement) et lavage. L'importance de ce rôle est telle que les sols forestiers montagnes et de collines touchées par feu et déboisement incontrôlées auxquels ils font face dans une érosion quelques années et hydrogéologique. Non moins important est le rôle joué par l'équipement élevé en humus dans la préservation de la pollution des aquifères par adsorption et l'inactivation de substances toxiques potentiels d'action (synthèse de composés organiques, métaux lourds).

## 2. Bilan humique.

Le bilan humique est une mesure de l'évolution de la matière organique dans le sol sur une période donnée. Il permet de déterminer si la quantité d'humus (matière organique décomposée) dans le sol augmente, diminue ou reste stable. Un bilan humique positif indique que la quantité d'humus augmente dans le sol, ce qui est bénéfique pour la fertilité du sol, tandis qu'un bilan négatif signifie une perte d'humus, ce qui peut entraîner une dégradation de la qualité du sol.

## Voici comment calculer le bilan humique :

### 1. Mesure de la matière organique initiale :

Pour calculer le bilan humique, vous devez d'abord mesurer la quantité de matière organique présente dans le sol au début de la période d'observation. Cela peut être fait en prélevant des échantillons de sol à différentes profondeurs et en les analysants en laboratoire pour déterminer la teneur en matière organique. Cette mesure servira de point de référence pour le calcul.

### 2. Mesure de la matière organique à la fin de la période :

À la fin de la période d'observation, généralement après un an ou plusieurs années, vous prélevez à nouveau des échantillons de sol aux mêmes endroits et à la même profondeur que lors de la première mesure. Vous analysez ensuite ces échantillons en laboratoire pour déterminer la teneur en matière organique à la fin de la période.

#### 3.1. Calcul du bilan humique :

Le bilan humique se calcule en soustrayant la quantité de matière organique à la fin de la période de la quantité initiale. La formule est la suivante :

**Bilan Humique = Matière Organique à la Fin de la Période - Matière Organique au Début de la Période**

- Si le résultat est positif, cela signifie qu'il y a eu une augmentation nette de la matière organique dans le sol, ce qui est un signe positif pour la santé du sol.
- Si le résultat est négatif, cela indique une perte nette de matière organique dans le sol, ce qui peut être préoccupant car cela peut entraîner une dégradation de la fertilité du sol.

#### 3. Interprétation du bilan humique :

Un bilan humique positif est souhaitable car il signifie que le sol gagne en matière organique, ce qui améliore sa fertilité, sa rétention d'eau et sa structure. Un bilan négatif peut indiquer une dégradation du sol, et des mesures doivent être prises pour enrayer cette perte, telles que l'ajout de matières organiques sous forme de compost, de fumier ou d'amendements organiques.

**Le bilan humique est un outil important pour surveiller la santé du sol et prendre des décisions de gestion appropriées pour maintenir ou améliorer la fertilité et la qualité du sol.**

## 3.2. Les diverses sources d'humus.

Les diverses sources d'humus, ou amendements humifères, sont des matériaux riches en matière organique décomposable qui sont ajoutés au sol pour améliorer sa fertilité, sa structure et sa capacité de rétention d'eau. Voici une description de quelques-unes des principales sources d'humus :

1. **Compost** : Le compost est l'une des sources les plus courantes d'humus. Il est produit à partir de la décomposition contrôlée de matières organiques telles que les déchets de cuisine, les feuilles mortes, les débris de jardin, les résidus de culture, et d'autres déchets organiques. Le compost est riche en humus et en nutriments, ce qui en fait un excellent amendement pour améliorer la fertilité du sol.
2. **Fumier** : Le fumier animal, tel que le fumier de vache, de cheval, de poulet, etc., est une source d'humus riche en matière organique. Il contient également des éléments nutritifs essentiels pour les plantes, tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Le fumier est souvent utilisé pour enrichir les sols agricoles.
3. **Résidus de culture** : Les résidus de culture, tels que les pailles, les tiges de plantes et les feuilles, sont une source naturelle d'humus. Ils sont généralement laissés sur le sol après la récolte et se décomposent progressivement, ajoutant de la matière organique au sol.

## 3.3. Autres sources d'humus :

En plus des sources traditionnelles d'humus, d'autres matériaux peuvent également être utilisés comme amendements humifères, notamment :

1. **Déchets de jardin** : Les débris de jardin, tels que les tontes de gazon, les tailles d'arbustes et les mauvaises herbes, peuvent être compostés ou incorporés directement dans le sol pour augmenter la matière organique.
2. **Résidus de cuisine** : Les déchets de cuisine, tels que les épluchures de légumes, les coquilles d'œufs et le marc de café, peuvent être compostés pour produire un amendement riche en humus.
3. **Algues marines** : Dans les régions côtières, les algues marines peuvent être collectées et utilisées comme amendement organique. Elles sont riches en matière organique et en éléments nutritifs, ce qui en fait un bon choix pour améliorer les sols.
4. **Résidus de bois** : Les copeaux de bois, la sciure et d'autres résidus de bois décomposables peuvent être utilisés comme amendements organiques, bien que leur décomposition soit plus lente que celle d'autres matières organiques.
5. **Tourbe** : La tourbe est un amendement organique couramment utilisé pour améliorer la rétention en eau et la structure du sol. Cependant, son utilisation est controversée en raison de ses impacts environnementaux.
6. **Déchets verts municipaux** : Certains centres de recyclage acceptent les déchets verts municipaux, tels que les feuilles et les branches, pour les transformer en compost municipal qui peut être utilisé pour enrichir les sols.

## Chapitre 2 : La fumure minérale (les engrais simples et composés)

### Objectifs :

1. définir les engrais et leur rôle dans la fertilisation des sols.
2. Classifier les engrais selon leur composition et leur mode d'action.
3. Analyser les caractéristiques et l'efficacité des engrais simples et composés.
4. Comprendre les critères de choix et d'application des engrais pour une fertilisation optimale.

### 1- Définition des engrais.

Les engrais sont des substances ou des mélanges de substances destinés à fournir des éléments nutritifs aux plantes afin de favoriser leur croissance et leur développement. Ils sont utilisés en agriculture pour compenser les carences en nutriments du sol et pour améliorer la productivité des cultures. Les engrais peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leur composition et de leur origine.

### 2- Classification des différents engrais

#### 1. Engrais minéraux ou chimiques :

- **Engrais azotés** : Ils fournissent de l'azote aux plantes, favorisant la croissance des feuilles. Exemples : urée, nitrate d'ammonium.
- **Engrais phosphatés** : Ils contiennent du phosphore, essentiel à la formation des racines et des fruits. Exemples : superphosphate, phosphate diammonique.
- **Engrais potassiques** : Ils apportent du potassium, important pour le développement des fleurs et des fruits. Exemples : chlorure de potassium, sulfate de potassium.

#### 2. Engrais simples et composés :

- **Engrais simples** : Contiennent un seul nutriment majeur (azote, phosphore, potassium).
- **Engrais composés** : Contiennent plusieurs nutriments en proportions définies.

#### 3. Engrais à libération lente et rapide :

- **Engrais à libération rapide** : Les nutriments sont rapidement disponibles pour les plantes.
- **Engrais à libération lente** : Les nutriments sont libérés progressivement sur une période prolongée.

#### 4. Engrais foliaires :

- Appliqués directement sur les feuilles des plantes pour une absorption rapide des nutriments.

#### 5. Engrais liquides et solides :

- **Engrais liquides** : Dissous dans l'eau pour une application facile.
- **Engrais solides** : Sous forme de granulés, poudres ou cristaux.

### 2.1. Les engrais simples.

# Agro-pédologie et fertilisation

Les engrains simples sont des fertilisants qui contiennent un seul nutriment majeur essentiel pour la croissance des plantes. Ils sont classés en fonction du nutriment prédominant qu'ils fournissent, à savoir l'azote, le phosphore ou le potassium. Voici une expansion détaillée sur trois types d'engrais simples :

## 1. Engrais à base d'azote (N) :

- **Urée (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>)** : L'urée est l'un des engrais azotés les plus couramment utilisés. C'est une forme d'azote soluble dans l'eau. Lorsqu'elle est appliquée au sol, l'urée est convertie en ammoniac par des enzymes présentes dans le sol, fournissant ainsi de l'azote aux plantes. Cet engrais favorise principalement la croissance des feuilles, la formation de protéines et le développement global des plantes.
- **Nitrate d'ammonium (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>)** : Ce composé azoté fournit de l'azote sous forme d'ammonium et de nitrate. Il est soluble dans l'eau et offre une source rapide d'azote pour les plantes. Le nitrate d'ammonium est souvent utilisé lorsque des effets rapides sont nécessaires, par exemple, pour stimuler la croissance végétative au début de la saison de croissance.

## 2. Engrais à base de phosphore (P) :

- **Superphosphate** : Le superphosphate est un engrais phosphaté couramment utilisé. Il est produit par le traitement du phosphate de roche avec de l'acide sulfurique. Cela rend le phosphore plus soluble dans l'eau et donc plus accessible aux plantes. Le phosphore est essentiel à la croissance des racines, à la floraison et à la fructification des plantes. Le superphosphate est souvent utilisé dans les sols où le phosphore est déficient.

## 3. Engrais à base de potassium (K) :

- **Chlorure de potassium (KCl)** : Le chlorure de potassium est un engrais potassique qui fournit du potassium, un élément essentiel pour le développement des fruits, des tubercules et la résistance aux maladies. Il est soluble dans l'eau et fournit une source rapide de potassium. Cependant, son utilisation peut être limitée dans les sols salins en raison de la présence de l'ion chlorure.
- **Sulfate de potassium (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)** : C'est une alternative au chlorure de potassium, particulièrement adaptée pour les cultures sensibles au chlorure. Le sulfate de potassium fournit également du soufre, un élément nécessaire à la synthèse des protéines. Il est soluble dans l'eau et fournit une libération relativement rapide de potassium.

## 2.2. Les engrais composés.

### 2.2.1. Définition.

Les engrais composés sont des mélanges d'éléments nutritifs essentiels nécessaires à la croissance des plantes. Contrairement aux engrais simples qui fournissent un seul nutriment majeur, les engrais composés contiennent une combinaison équilibrée d'azote (N), de phosphore (P), et de potassium (K), souvent sous la forme de NPK. Ces engrais sont conçus pour répondre aux besoins nutritionnels globaux des plantes tout au long de leur cycle de vie.

## 2.2.2. Les différentes catégories d'engrais composés.

### 1. Engrais complet NPK :

- **Composition :** Les engrais complets NPK sont définis par trois chiffres indiquant la proportion respective d'azote, de phosphore et de potassium dans le mélange. Par exemple, un engrais 10-20-10 contient 10% d'azote, 20% de phosphore et 10% de potassium.
- **Utilisation :** Ces engrais sont adaptés à une variété de cultures et de sols. Ils sont souvent utilisés au moment de la plantation ou pendant la phase de croissance active pour assurer un approvisionnement équilibré en nutriments.

### 2. Engrais binaire :

- **Composition :** Les engrais binaires contiennent deux des trois nutriments majeurs. Par exemple, un engrais 15-15-0 contient 15% d'azote et 15% de phosphore, sans potassium.
- **Utilisation :** Ces engrais sont adaptés aux situations où le sol a déjà un niveau adéquat de l'élément exclu. Par exemple, si le sol est naturellement riche en potassium, un engrais binaire sans potassium peut être utilisé.

### 3. Engrais ternaire ou complexes :

- **Composition :** Les engrais ternaires contiennent des proportions significatives des trois nutriments principaux (azote, phosphore, potassium). Par exemple, un engrais 20-10-10 contient 20% d'azote, 10% de phosphore et 10% de potassium.
- **Utilisation :** Ces engrais sont polyvalents et peuvent être utilisés pour de nombreuses cultures. Ils sont particulièrement utiles lorsque les niveaux de tous les trois nutriments sont faibles dans le sol.

### 4. Engrais spécialisé :

- **Composition :** Certains engrais composés sont formulés pour répondre aux besoins spécifiques de certaines cultures ou phases de croissance. Par exemple, un engrais 5-30-5 peut être conçu pour favoriser la floraison et la formation de fruits.
- **Utilisation :** Ces engrais sont adaptés aux cultures qui ont des besoins nutritionnels spécifiques à certaines étapes de leur développement.

## 2.2.3. Caractéristiques et rôle des engrais composés.

1. **Composition équilibrée :** Les engrais composés contiennent une combinaison équilibrée des principaux nutriments nécessaires à la croissance des plantes, à savoir l'azote (N), le phosphore (P), et le potassium (K). Cela permet de fournir aux plantes une alimentation complète et équilibrée.

## Agro-pédologie et fertilisation

2. **NPK** : La plupart des engrains composés sont étiquetés avec les chiffres NPK, qui indiquent la proportion respective d'azote, de phosphore et de potassium dans le mélange. Cette information aide les agriculteurs à choisir l'engrais adapté aux besoins spécifiques de leurs cultures.
3. **Libération progressive** : Certains engrains composés sont formulés pour une libération progressive des nutriments, ce qui signifie que les plantes peuvent bénéficier d'une alimentation continue sur une période de temps plutôt que d'une libération immédiate. Cela contribue à éviter une application excessive d'engrais et à réduire les risques de lessivage des nutriments.
4. **Adaptabilité** : Les engrains composés peuvent être adaptés à différents types de sols et à une variété de cultures. Ils offrent une solution polyvalente pour répondre aux besoins nutritionnels des plantes dans des conditions diverses.

### 2.2.4. Rôle des engrains composés.

1. **Fournir des nutriments essentiels** : Les engrains composés fournissent aux plantes les nutriments essentiels nécessaires à leur croissance. L'azote favorise le développement des feuilles, le phosphore contribue à la formation des racines et des fleurs, tandis que le potassium est crucial pour la floraison et la production de fruits.
2. **Optimiser la productivité** : En assurant un approvisionnement équilibré en nutriments, les engrains composés contribuent à maximiser le rendement des cultures. Une nutrition adéquate favorise une croissance saine, une meilleure résistance aux maladies et une productivité accrue.
3. **Compenser les carences du sol** : Les engrains composés peuvent être utilisés pour compenser les carences spécifiques en nutriments présentes dans le sol. En ajustant la formulation de l'engrais en fonction des besoins du sol, les agriculteurs peuvent améliorer la fertilité du sol et la qualité des récoltes.
4. **Faciliter l'application** : Les engrains composés sont souvent disponibles sous différentes formes, telles que granulés, poudres ou liquides, ce qui facilite leur application. Certains sont également conçus pour être utilisés avec des méthodes spécifiques, comme la fertilisation foliaire.
5. **Réduire les risques environnementaux** : En utilisant des engrains composés équilibrés et en suivant les recommandations d'application, les agriculteurs peuvent réduire les risques de pollution de l'eau par lessivage excessif de nutriments. Cela contribue à une gestion plus durable des ressources agricoles.

## 3. Les formes d'engrais.

Le choix du mode d'application dépend de plusieurs facteurs, notamment la méthode d'irrigation utilisée, les pratiques agricoles spécifiques, la topographie du terrain, la disponibilité d'équipements agricoles, et les préférences de l'agriculteur. Il est important de suivre les recommandations du fabricant et les conseils agronomiques pour garantir une application précise et efficace de l'engrais.

# Agro-pédologie et fertilisation

Les spécifications du mode d'application dépendent du type d'engrais, de sa formulation, de la culture ciblée et des équipements agricoles disponibles. Voici une description générale des caractéristiques de chaque forme d'engrais :

## 1. Granulés :

- **Composition :** Les granulés sont des petites billes solides d'engrais. Ils peuvent être composés d'une variété de matériaux, y compris des formes minérales ou organiques.
- **Avantages :** Les granulés sont faciles à manipuler, à stocker et à appliquer mécaniquement. Ils permettent un contrôle précis de la quantité d'engrais appliquée.

## 2. Poudres :

- **Composition :** Les poudres sont des formulations d'engrais sous forme de fines particules.
- **Avantages :** Les poudres peuvent être utilisées dans des applications d'engrais foliaires ou pour des cultures nécessitant une application au sol fine et homogène. Elles sont souvent solubles dans l'eau, facilitant l'application liquide.

## 3. Liquides :

- **Composition :** Les engrais liquides sont dissous dans l'eau, créant une solution nutritive.
- **Avantages :** Les engrais liquides permettent une absorption rapide par les plantes et sont souvent utilisés dans les systèmes d'irrigation. Ils sont adaptés aux applications foliaires et peuvent être ajustés pour répondre aux besoins spécifiques des cultures.

## 4. Enrobage :

- **Composition :** Certains granulés d'engrais peuvent être enrobés d'une couche protectrice pour une libération plus lente des nutriments.
- **Avantages :** L'enrobage peut prolonger la libération des nutriments dans le sol, offrant ainsi une alimentation continue aux plantes sur une période prolongée.

## 5. Solubles dans l'eau :

- **Composition :** Certains engrais sont formulés pour être entièrement solubles dans l'eau.
- **Avantages :** Les engrais solubles dans l'eau sont faciles à appliquer par irrigation, fournissant rapidement des nutriments aux plantes.

## 4. Appréciation et choix d'un engrais composé.

L'appréciation et le choix d'un engrais composé dépendent de plusieurs facteurs, notamment les besoins spécifiques de la culture, les caractéristiques du sol, les objectifs agronomiques et les conditions climatiques. Voici quelques étapes et critères à prendre en compte lors de l'appréciation et du choix d'un engrais composé :

1. **Analyse du sol :** Effectuez une analyse du sol pour déterminer les niveaux de nutriments déjà présents. Cela aidera à identifier les carences spécifiques et à orienter le choix de l'engrais composé.

## Agro-pédologie et fertilisation

2. **Cultures cultivées** : Les besoins en nutriments varient d'une culture à l'autre. Sélectionnez un engrais composé qui correspond aux exigences spécifiques de la culture que vous cultivez. Certains engrais sont formulés pour des cultures particulières, tandis que d'autres conviennent à un large éventail de plantes.
3. **Formulation NPK** : Les chiffres NPK sur l'emballage de l'engrais indiquent la proportion d'azote (N), de phosphore (P), et de potassium (K). Choisissez une formulation en fonction des besoins de la culture à différentes phases de croissance. Par exemple, une culture en phase de floraison peut bénéficier d'une formulation avec une concentration plus élevée de phosphore.
4. **Besoins saisonniers** : Adaptez l'engrais aux besoins saisonniers de la culture. Les cultures peuvent avoir des exigences nutritionnelles différentes à différentes périodes de l'année. Par exemple, un engrais riche en azote peut être plus approprié au début de la saison de croissance pour favoriser le développement des feuilles.
5. **Type de sol** : Considérez la nature du sol, notamment sa texture, sa structure et son pH. Certains sols peuvent retenir ou libérer les nutriments différemment, influençant ainsi le choix de l'engrais.
6. **Mode d'application** : Certains engrais sont disponibles sous forme de granulés, de poudres ou de liquides. Choisissez le mode d'application qui convient le mieux à vos pratiques agricoles et aux équipements disponibles.
7. **Coût** : Comparez les coûts des différentes options d'engrais, mais ne faites pas du coût le seul critère de choix. L'efficacité et la satisfaction des besoins de la culture sont également des facteurs importants.
8. **Recommandations locales** : Consultez des experts agricoles locaux, des services de vulgarisation agricole, ou des coopératives pour obtenir des conseils spécifiques à votre région. Ils peuvent fournir des recommandations basées sur l'expérience locale et les résultats d'analyses de sol.
9. **Engrais durable** : Si possible, choisissez des engrais composés qui contribuent à des pratiques agricoles durables, minimisant les impacts environnementaux tout en soutenant une croissance saine des plantes.

## Chapitre 4 : Les lois et la pratique de la fertilisation minérale

### Objectifs :

1. Découvrez les lois fondamentales de la fertilisation minérale et leur application en agronomie.
2. Comprendre les principes du raisonnement de la fumure minérale et leurs implications pour la productivité des cultures.
3. Appliquer des règles générales de fertilisation adaptées aux besoins des plantes et aux caractéristiques du sol.

### 1- Les différentes lois de la fertilisation minérale.

La fertilisation minérale est un processus essentiel en agriculture pour fournir aux plantes les éléments nutritifs nécessaires à leur croissance et à leur développement. Il existe plusieurs lois et principes qui guident la fertilisation minérale. Voici quelques-unes des lois les plus importantes dans ce domaine :

#### 4.1. Loi de Liebig (Loi du Minimum) :

- Formulée par le chimiste allemand Justus von Liebig, cette loi stipule que la croissance des plantes est limitée par l'élément nutritif présent en quantité la plus faible par rapport aux besoins de la plante. En d'autres termes, même si tous les autres éléments nutritifs sont abondants, la croissance de la plante sera limitée par la quantité minimale de l'élément nutritif le plus rare.
- **Exemple :** une carence en soufre a un impact sur l'absorption et la valorisation de l'azote dont l'efficacité diminue.

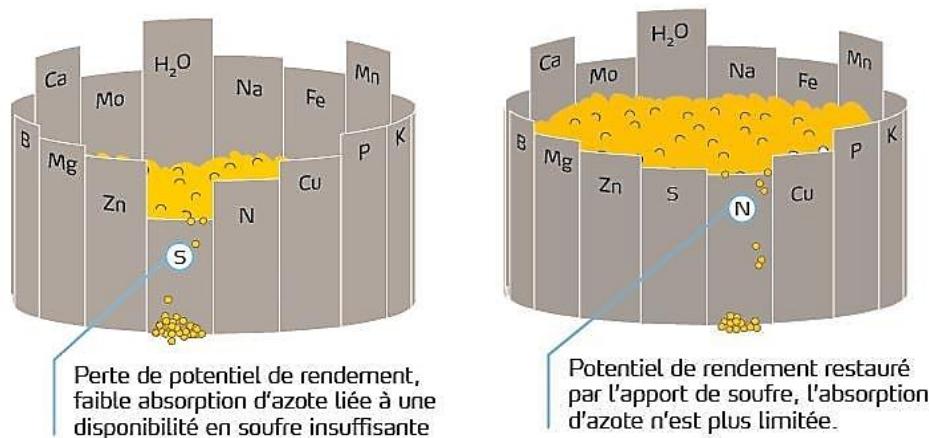


Figure 34 : Loi de Liebig (Loi du Minimum)

## 4.2. Loi de Mitscherlich (Loi de l'Addition) :

- Cette loi indique que l'effet d'un élément nutritif sur la croissance des plantes est additif. Cela signifie que la croissance végétale dépend de la somme des concentrations de chaque élément nutritif présent dans le sol. Lorsqu'un élément nutritif est en déficit, il peut limiter la croissance même si les autres éléments sont présents en excès.
- Les augmentations de rendement obtenues par application de doses croissantes d'un élément fertilisant sont de plus en plus faibles au fur et à mesure que les doses apportées augmentent (loi de Mitscherlich). La recherche du rendement maximum n'est pas économiquement justifiée : les coûts occasionnés pour obtenir le dernier kilo d'herbe seront beaucoup plus importants que la valeur de ce kilo d'herbe !

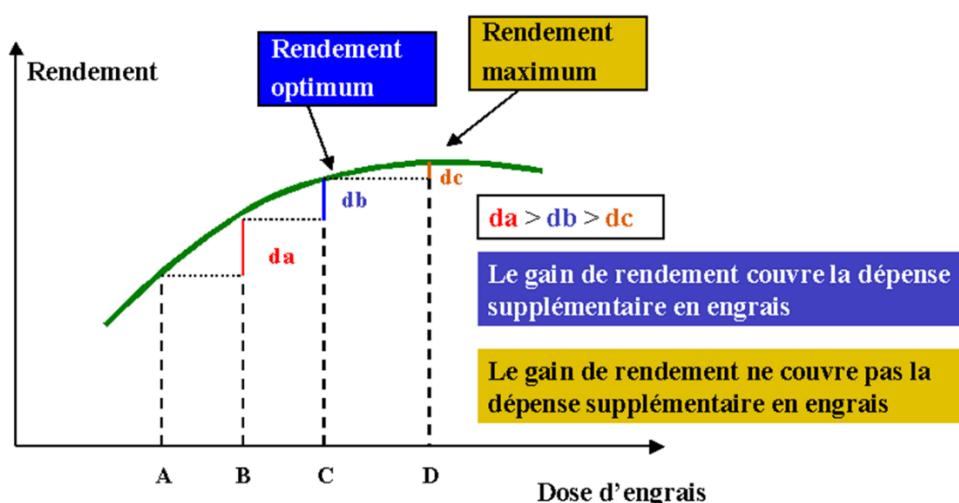


Figure 35 : Représentation de la loi de Mitscherlich (knoden, 2007)

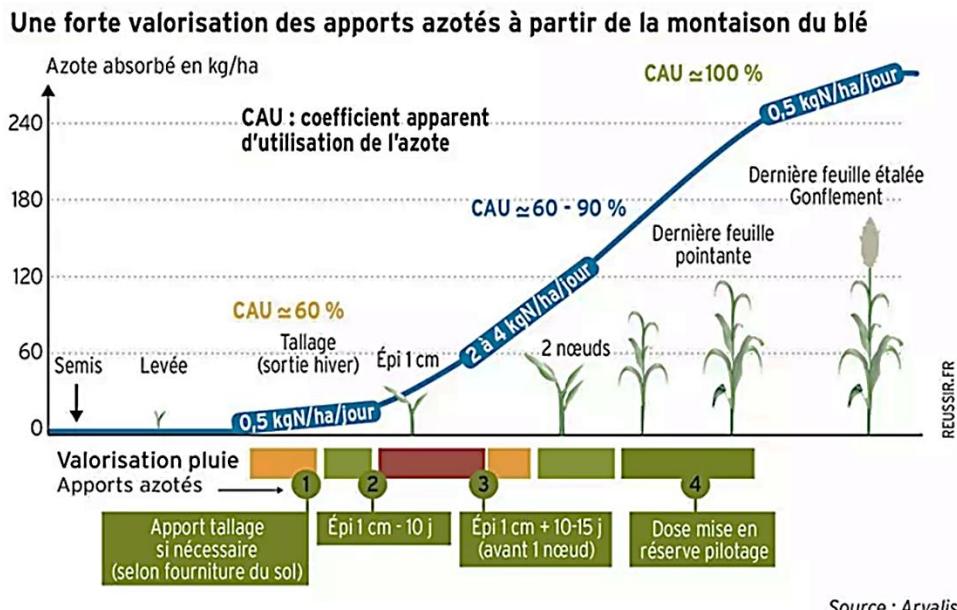
## 1.3. Loi de Raunkiaer (Loi de la Quantité Maximale) :

- Cette loi stipule que la croissance des plantes dépend de la quantité maximale d'élément nutritif disponible dans le sol, plutôt que de la concentration. En d'autres termes, il ne suffit pas d'avoir des niveaux suffisants d'éléments nutritifs, mais il faut également que ces éléments soient accessibles aux racines des plantes.

## 1.4. Loi de la Dilution (Loi de Sénescence Précoce) :

- Cette loi suggère que, dans une culture à rendement élevé, la concentration en éléments nutritifs dans les tissus végétaux diminue à mesure que la biomasse augmente. Cela signifie que les plantes cultivées intensivement peuvent nécessiter une fertilisation supplémentaire pour maintenir des niveaux adéquats de nutriments.

## Agro-pédologie et fertilisation



**Figure 36 : Loi de la Dilution applique durant le cycle d'un blé.**

## 1.5. Loi de la Fixation Biologique de l'Azote (FBN) :

- Cette loi fait référence à la capacité de certaines plantes et bactéries symbiotiques de fixer l'azote atmosphérique dans le sol et de le rendre disponible pour d'autres plantes. Cela réduit la dépendance à l'égard des engrains azotés synthétiques.

Il est important de noter que la fertilisation minérale doit être effectuée de manière équilibrée, en tenant compte des besoins spécifiques de chaque culture, des caractéristiques du sol et des pratiques agricoles durables pour éviter la pollution environnementale et maximiser les rendements agricoles.

## 2. La fumure dans la pratique : règles générales.

La fumure, ou l'application d'engrais ou d'amendements au sol pour fournir des éléments nutritifs aux plantes, est une pratique essentielle en agriculture. Voici quelques règles générales à suivre lors de la fumure dans la pratique :

1. **Analyse du sol** : Avant d'appliquer des engrais, il est essentiel de réaliser une analyse du sol pour déterminer les niveaux actuels d'éléments nutritifs dans le sol. Cette analyse permet de mieux comprendre les besoins spécifiques de la culture et d'éviter une sur-fertilisation ou une sous-fertilisation.
  2. **Choix des engrais** : Sélectionnez les engrais en fonction des besoins spécifiques de la culture en termes d'éléments nutritifs. Les engrais sont généralement classés en fonction de leur teneur en azote (N), en phosphore (P), et en potassium (K), mais peuvent contenir d'autres micronutriments essentiels comme le calcium, le magnésium, et le soufre.

## Agro-pédologie et fertilisation

3. **Doses recommandées** : Suivez les recommandations en matière de doses d'engrais en fonction des résultats de l'analyse du sol et des exigences de la culture. Évitez la sur-fertilisation, car cela peut entraîner une pollution de l'environnement et des coûts inutiles. Une sous-fertilisation peut réduire les rendements.
4. **Épandage uniforme** : Assurez-vous de répartir les engrais de manière uniforme sur la zone de culture. Cela peut être fait à l'aide d'équipements d'épandage appropriés pour garantir une distribution homogène des nutriments.
5. **Timing approprié** : Appliquez les engrais au moment opportun pour répondre aux besoins de la culture. Par exemple, certains éléments nutritifs, comme l'azote, peuvent être appliqués en plusieurs doses tout au long de la saison de croissance pour répondre aux besoins de la plante à différents stades de développement.
6. **Interaction avec d'autres pratiques culturelles** : Prenez en compte les autres pratiques culturelles telles que l'irrigation, la gestion des mauvaises herbes et des parasites, et l'optimisation de la densité de plantation, car elles peuvent influencer les besoins en éléments nutritifs de la culture.
7. **Utilisation d'amendements organiques** : Les amendements organiques tels que le compost ou le fumier peuvent améliorer la structure du sol, sa capacité à retenir l'eau et la disponibilité des éléments nutritifs. Ils sont souvent utilisés en combinaison avec des engrais minéraux pour favoriser une nutrition équilibrée des plantes.
8. **Suivi et ajustement** : Surveillez la santé des plantes et les niveaux d'éléments nutritifs tout au long de la saison de croissance. Si des carences ou des excès sont observés, ajustez la fumure en conséquence pour corriger les déséquilibres.
9. **Durabilité** : Optez pour des pratiques de fumure durables qui minimisent les impacts environnementaux, comme la pollution de l'eau ou la perte d'éléments nutritifs par lessivage. Utilisez des techniques telles que la fertilisation localisée ou la couverture du sol pour réduire ces risques.

*En respectant ces règles générales, les agriculteurs peuvent optimiser l'efficacité de leur fumure, améliorer les rendements des cultures et minimiser les impacts environnementaux négatifs.*

## Références bibliographiques

- Baize, D. et Chrétien, J., 1994** - Les couvertures pédologiques de la plate-forme sinémurienne en Bourgogne. Particularités morphologiques et pédogéochimiques. *Étude et Gestion des Sols*, 1, 2, pp. 7-27.
- Baize, D., 2012** - Les « terres d'Aubues » de Basse Bourgogne : nouvelle synthèse et bilan de matières à très long terme. *Étude et Gestion des Sols*, 19, 3-4, pp. 139-161.
- Baize, D., 2021** - *Naissance et évolution des sols. La pédogenèse expliquée simplement*. Versailles : Éditions Quae, 160 p.
- Benchetrit M., 1956** – Les sols d'Algérie. In: *Revue de géographie alpine*, tome 44, n°4, 1956. pp. 749-761; doi : <https://doi.org/10.3406/rga.1956.1790>.
- Bornand, M., 1978** - Altération des matériaux fluvioglaciaires, genèse et évolution des sols sur terrasses quaternaires dans la moyenne vallée du Rhône. Thèse, Université de Montpellier 2, 329 p.
- Dejou J, Morizet J., 1996** - Introduction à la science du sol. Station d'Agronomie, INRA Clermont-Ferrand, 98p.
- Jamagne, M., 2011** - *Grands paysages pédologiques de France*. Versailles : Éditions Quae, 598 p
- Lareal, P., 1975** – Sols de la région lyonnaise : prévision de leur comportement mécanique à l'aide d'essais in situ et en vraie grandeur. Thèse de Doctorat : Génie Civil : Lyon, Université Claude Bernard Lyon. Pp : 245 – 253.
- Legros J.P., 1996** - Cartographie des sols. De l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Presses polytechniques et universitaires romandes, 574 p.
- Robert, M., Berrier, J., Evralde, J., 1983** - Rôle des êtres vivants dans les premiers stades de l'altération des minéraux. Sciences Géologiques. Mémoire 73, pp. 95-103. [https://www.persee.fr/doc/sgeol\\_0302-2684\\_1983\\_act\\_73\\_1\\_2033](https://www.persee.fr/doc/sgeol_0302-2684_1983_act_73_1_2033)
- Soltner, D., 1992** - Les bases de la production végétale Tome 1: Le sol et son amélioration. 19th Edition, Sciences et Techniques Agricoles, Sainte Gemmes sur Loire.