

## Polycopié

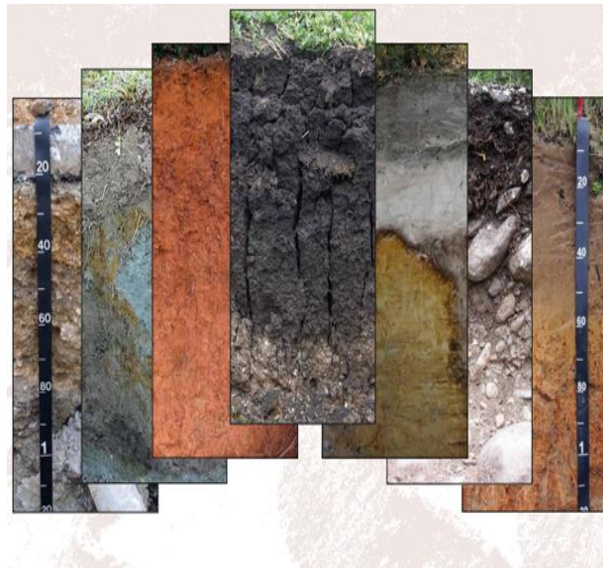
# Agro-Pédologie et Fertilisation

Licence Académique : Production Végétale

Filière : Sciences Agronomiques

Elaboré par : D<sup>r</sup> Benouadah Salima

Spécialité : Protection de l'Agroenvironnement et Sciences du Sol



Année universitaire : 2022-2023

# Table des matières

## Préambule

## Liste des abréviations

## Liste des tableaux

## Partie 1 : Agro-pédologie

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

I.1. Rôle de l'eau dans le sol	1
I.2. Relations entre les trois phases du sol	3
I.3. Mesure des volumes occupés par les différentes phases du sol	7
I.4. Les formes de l'eau dans le sol	11
I.5. Les forces de rétention de l'eau par le sol/ Le potentiel de l'eau dans le sol	12
I.6. Les états de l'eau dans le sol	14
I.7. Le mouvement de l'eau dans le sol	15
I.8. Bilan hydrique du sol	16
I.9. Les besoins en eau des plantes	18
I.10. Adaptation des plantes aux besoins en eau	18

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

II.1. Les échanges ioniques et nutrition minérale des plantes	20
II.1.1. Les propriétés physicochimiques du sol	20
II.1.2. La capacité d'échange cationique	23
II.1.3. La formation du complexe argilo-humique et le mécanisme d'échange d'ions au niveau du sol	24
II.2. Les éléments nutritifs dans le sol	32
II.2.1. Notions de fertilité du sol	32
II.2.2. Nutrition des plantes	32
II.2.3. Les éléments majeurs (N, P, K) et les oligo-éléments	35
II.3. Pédogénèse et classification	39
II.3.1. Pédogénèse	39
II.3.1.1. Les facteurs physicochimiques de la pédogénèse	41

II.3.1.2. Les stades de formation du sol	41
II.3.1.3. Complexe argilo-humique	44
II.3.2. Classification des sols	45
II.4. Introduction à la cartographie et à la mise en valeur des sols	50
II.4.1. La carte pédologique	50
II.4.2. Lecture d'une carte pédologique	51
II.4.3. Introduction à la mise en valeur des sols (cas des sols algériens)	52
<b>Partie 2 : Fertilisation</b>	
Introduction	54
<b>Chapitre I : Les amendements calcaires</b>	
I.1. Définition	55
I.2. Types	55
I.3. Critères d'appréciation des amendements calcaires	56
I.4. Evaluer les besoins en chaulage	57
<b>Chapitre II : les amendements humifères</b>	
II.1. Définition	58
II.2. Propriétés de l'humus	58
II.3. Bilan humique	60
II.4. Les diverses sources d'humus	61
II.5. Autres sources d'humus	61
<b>Chapitre III : La fumure minérale (les engrais simples et composés)</b>	
III.1. Définition et classification des différents engrais	66
III.2. Intérêt des engrais	66
III.3. Eléments nutritifs nécessaires à la croissance de la plante	66
III.4. Carence en éléments minéraux	66
III.5. Les engrais minéraux simples	69
III.5.1. Engrais azotés	69
III.5.2. Engrais phosphatés	72
III.5.3. Engrais potassiques	74
III.6. Les engrais composés	76
III.6.1. Définition	76
III.6.2. Les principaux engrais composés existants en Algérie	77
III.6.3. Appréciation et choix d'un engrais composé	79

<b>Chapitre IV : Les lois et la pratique de la fertilisation minérale</b>	
IV.1. Les différentes lois de la fertilisation minérale	80
IV.2. La fumure dans la pratique : règles générales	80
IV.3. Méthode d'application des engrais	81
<b>Références bibliographiques</b>	84
<b>Annexes</b>	87

## **Préambule**

L'Agro-pédologie et Fertilisation est un domaine clairement multidisciplinaire impliquant la physiologie et la biologie des plantes, la biologie, la chimie et la fertilité du sol, l'agriculture, pour ne citer que quelques-uns. Chacun des domaines contributifs apporte son propre vocabulaire spécial et les normes de nomenclature et les difficultés considérables de communication. Il est destiné aux étudiants de la troisième année Licence académique (L3) ; Spécialité : Production Végétale, ainsi qu'à tous ceux qui dans d'autres disciplines, s'intéressent à cette science tel que la science du sol, amélioration des végétaux, protection des végétaux, fertilisation, irrigation...

## 1- Description pédagogique de la matière

<b>Matière</b>	Agro-Pédologie et Fertilisation
<b>Niveau</b>	Licence Académique
<b>Spécialité</b>	Production Végétale
<b>Coefficient</b>	2
<b>Crédit</b>	4
<b>Semestre</b>	5
<b>Unité d'Enseignement</b>	Unité d'Enseignement Fondamentale (UEF)
<b>Mode d'enseignement</b>	Cours (Conférence) + Travaux Pratiques (TP)
<b>Volume horaire hebdomadaire</b>	3h

## 2- Identification de la matière dans l'unité

<b>Intitulé de la matière : Agro-Pédologie et Fertilisation</b>	
<b>Établissement :</b> Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem	<b>Faculté :</b> Sciences de la Nature et de la Vie
<b>Domaine :</b> Sciences de la Nature et de la Vie	<b>Filière :</b> Sciences Agronomiques
<b>Spécialité :</b> Production Végétale	<b>Niveau :</b> Licence Académique
<b>Semestre 5</b>	<b>Année universitaire :</b> 2022-2023

## 3- Identité de la matière

<b>Intitulé de la matière :</b> Agro-Pédologie et Fertilisation	<b>UE :</b> Unité d'Enseignement Fondamentale
<b>Crédit :</b> 4	<b>Coefficient :</b> 2
<b>Volume horaire hebdomadaire :</b> 3h/semaine	
<b>Cours :</b> 1h30	<b>TP/Sortie :</b> 1h30
<b>Nombre de groupe :</b> Un seul groupe (18 étudiants)	

#### 4- Responsable pédagogique de la matière « Agro-Pédologie et Fertilisation »

<b>Nom et Prénom :</b> M <sup>me</sup> Benouadah Salima	<b>Grade :</b> Maitre-Assistant Grade B	
<b>Spécialité :</b> Protection de l'Agroenvironnement et Sciences du Sol	<b>Adresse email :</b> -Personnelle -Professionnelle	<a href="mailto:similyes2014@gmail.com">similyes2014@gmail.com</a> <a href="mailto:salima.benouadah@univ-mosta.dz">salima.benouadah@univ-mosta.dz</a>

#### 5- La charge horaire nécessaire afin d'atteindre les compétences en terme de S/SF/SE traduit dans des cours/TP

<p><b>Volume horaire global (VHG)= 150h</b></p> <p>Sachant que :</p> <p>1 crédit= 25h de charge de travail par semestre</p> <p>Le crédit de l'UEF= 4</p> <p>Donc : le VHG= 4 X 25h= 100h</p>
--

#### 6- Volume horaire de la matière par rapport aux nombres de compétences inscrites dans la matière

45h représente le travail en présentiel, qui est réparti en cours/TP:

❖ 15 semaines (1semestre) x 3h = 45h (≈40% du VHG).

55h représentent le travail réalisé par l'étudiant :

❖ 100h- 45h = 55 (≈60% du VHG).

#### 7- Volume horaire nécessaire pour atteindre les compétences en cours/TP

<b>Cours : 1h30/ semaine</b>	<b>TP : 1h30/ semaine</b>
<b>3h /semaine</b>	
<b>Cours : 22h30/semestre</b>	<b>TP : 22h30/semestre</b>
<b>Volume horaire nécessaire pour atteindre les compétences en cours/TP= 45h</b>	

## 8- Stage

Sortie sur terrain (parcelle agricole ou station expérimentale) :

A/ Afin de connaître comment prélever des échantillons d'un sol et de caractériser ces propriétés physiques, chimiques et biologiques en vue d'orienter sa gestion et d'améliorer sa productivité agricole ;

B/ Afin de savoir comment apporter de la matière organique exogène (amendement organique=fumier, compost, engrais vert) selon les niveaux de la matière organique du sol détectée au paravent en vue d'améliorer son statut organique, sa fertilité physique, chimique et biologique et par conséquent d'augmenter le rendement de culture.

### **But général de ce stage :**

Garantir une agriculture biologique et un développement durable par la protection et la mise en valeur des ressources édaphiques et d'apporter des solutions à une problématique actuelle qui est la perte de fertilité des sols et la diminution de leur capital organique.

- En termes de connaissances (savoirs), apprendre les notions de base permettant l'intégration des techniques de la fertilisation raisonnée dans le domaine de l'amélioration du sol.
- En termes de savoir-faire :

S'entraîner à l'application des fertilisants et s'adapter à les manipuler à doses convenables afin de ne pas perturber la vie du sol.

- En termes de savoir-être, se sensibiliser aux nouvelles techniques de fertilisation et d'améliorations du sol.

## 9- Contenu de la matière

### **Partie I : Agro-pédologie**

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

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

### **Partie II : Fertilisation**

**Chapitre 1 :** Les amendements calcaires

**Chapitre 2 :** Les amendements humifères

**Chapitre 3 :** La fumure minérale

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

## 10- Description de la matière

### ○ Prérequis d'entrée à la matière

Il faut avoir des notions sur la chimie du sol et des notions sur l'agro-pédologie et notamment sur la biologie et physiologie des plantes.

### ○ Objectifs (compétences à atteindre)

#### ✓ Objectif général

Etablir le lien entre la plante, le climat, le sol et sa fertilité.

Le sol intervient par ses aptitudes physiques et ses capacités nutritives et hydriques. De fait, les connaissances concernant la fertilisation édaphique et foliaire est capitale pour les étudiants de l'agronomie.

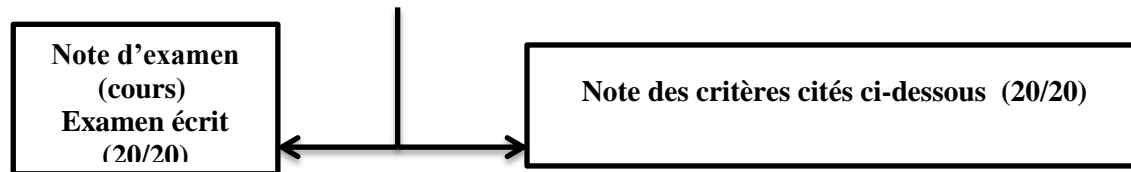
#### ✓ Objectifs spécifiques

- Afin de connaître les éléments de l'agriculture (l'eau et le sol) ;
- Connaître la caractérisation des propriétés physiques, chimiques et biologiques d'un sol ;
- Connaître les éléments nutritifs d'un sol afin de garantir un bon développement et une bonne croissance de la plante ;
- Développer les facteurs de la pédogénèse
- Faire un diagnostic (classification) du sol à travers ces caractéristiques physiques, chimiques et biologiques ;
- Afin de donner une image aussi fidèle que possible de la nature, de la localisation et de la répartition des catégories de sols étudiés ;
- Valorisation des sous-produits afin d'améliorer la fertilité des sols algériens ;
- Estimer les facteurs de dégradation (problèmes) et trouver les moyens d'amélioration (solutions) des terres agricoles ;
- Connaître le rôle des engrais calcaires, organiques et minéraux en agriculture.

## 11- Evaluation de la matière

Cette matière est basée sur le système d'assiduité aux cours et aux travaux pratiques (TP)/ sorties. De ce fait, les étudiants sont évalués comme suit :

$$\text{Moyenne de la matière} = 0,6 * \text{note d'examen} + 0,4 * \text{note de [contrôle continu (TP) + travail personnel (exposé, rapport de stage)]}$$



## 12- Modalités d'évaluation

Critères d'évaluation	Note	Evaluation en %	
<b>Examen</b>	<b>20/20</b>		<b>60%</b>
<b>Tests (1pt/test)</b>	06	<b>Contrôle continu + travail personnel</b>	<b>20 40%</b>
<b>Exposé: contenu- présentation- forme- références- matériels utilisés + exercices d'applications</b>	3,5		
<b>TP (manipulation + compte rendu)/ Sortie (s) + comptes (s) rendu (s)</b>	3,5		
<b>Travail en groupe</b>	02		
<b>Assiduité</b>	03		
<b>Participation</b>	02		
<b>Travaux individuels facultatifs</b>	+1 (à la note d'examen)		

## 13- Travaux individuels facultatifs de la matière réalisés par l'étudiant

2. Faire des exercices présentés sous forme de devoirs dans les séances de cours;
3. Questions ponctuels évaluatifs ;

## 14- Mots/ Concepts clés

Production végétale, sol, climat, chimie du sol, biologie du sol, physiologie de la plante, biologie de la plante, amendements organiques, engrais minéraux.

## Liste de figures

<b>Figure 1 :</b> Désagrégation mécanique des roches	2
<b>Figure 2:</b> La complexité externe et interne du sol	4
<b>Figure 3 :</b> Définition des fractions granulométriques du sol en fonction de la taille des éléments	5
<b>Figure 4 :</b> Structure grumeleuse du sol	6
<b>Figure 5 :</b> Profil cultural avec les principaux horizons	8
<b>Figure 6 :</b> Feuillet d'argile	8
<b>Figure 7 :</b> Les états de l'eau dans le sol	12
<b>Figure 8 :</b> Les forces qui s'exercent sur une molécule d'eau dans le sol	12
<b>Figure 9 :</b> les états de l'eau dans le sol. Une vue schématique	14
<b>Figure 10:</b> Les états de l'eau dans le sol	15
<b>Figure 11 :</b> Mouvement / Le bilan hydrique de l'eau	16
<b>Figure 12 :</b> Evapotranspiration	17
<b>Figure 13:</b> Expérience de mise en évidence des charges des particules d'argiles et d'humus	25
<b>Figure 14:</b> Flocculation des colloïdes argileux	26
<b>Figure 15:</b> Flocculation des colloïdes humiques	26
<b>Figure 16:</b> Flocculation des colloïdes argileux + colloïdes humiques	27
<b>Figure 17:</b> Complexe argilo-humique (pont calcique entre l'argile et l'humus)	29
<b>Figure 18:</b> Pouvoir adsorbant	29
<b>Figure 19:</b> Echange d'ions entre le Complexe Argilo-Humique et la solution du sol	30
<b>Figure 20:</b> Les besoins des végétaux	33
<b>Figure 21:</b> Le rôle des racines dans la nutrition des végétaux	33
<b>Figure 22:</b> La photosynthèse	34
<b>Figure 23:</b> La respiration grâce aux feuilles	34
<b>Figure 24:</b> Coupe d'une tige	35
<b>Figure 25 :</b> La pédogénèse	40
<b>Figure 26:</b> Constitution du sol	42
<b>Figure 27:</b> Les étapes de la pédogénèse	43
<b>Figure 28 :</b> La formation du Complexe Argilo-Humique (CAH)	44
<b>Figure 29:</b> Correction du pH du sol par l'apport de la chaux	55
<b>Figure 30 :</b> Bilan humique selon le modèle de Henin-Dupuis	60

<b>Figure 31:</b> Différents types de fumier	62
<b>Figure 32:</b> Fientes de poulets	62
<b>Figure 33:</b> Les purins	62
<b>Figure 34 :</b> Les engrais verts	63
<b>Figure 35 :</b> Le processus de compostage	63
<b>Figure 36 :</b> Paille	63
<b>Figure 37 :</b> Mulch	64
<b>Figure 38 :</b> Les écumes de sucrerie	64
<b>Figure 39 :</b> Les boues de station d'épuration	64
<b>Figure 40 :</b> Les ordures ménagères	65
<b>Figure 41 :</b> Les écorces concassées	65
<b>Figure 42:</b> Carence en éléments nutritifs	69
<b>Figure 43:</b> Principe de fabrication des engrais azotés	72
<b>Figure 44:</b> Principe de fabrication des engrais phosphatés	74
<b>Figure 45:</b> Principe de fabrication des engrais potassiques	75
<b>Figure 46:</b> Exemple d'étiquetage d'un engrais	77
<b>Figure 47:</b> Engrais composés existants en Algérie	79
<b>Figure 48:</b> Epannage à la volée	81
<b>Figure 49:</b> Enfouissement de l'engrais	82
<b>Figure 50:</b> Application foliaire d'engrais chimiques	82
<b>Figure 51:</b> Localisation d'engrais	83

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1 :</b> Classification simplifiée des sols selon la texture	5
<b>Tableau 2 :</b> Lecture d'une carte pédologique	52

# **Partie I : Agro-pédologie**

## Chapitre I : L'eau dans le sol

« *L'eau est une source de vie* »

### Généralités

D'après **Boumaaza (2021)**, l'étude de l'eau du sol comporte deux aspects fondamentaux:

1/ **Un aspect statique**, qui est la capacité de retenir l'eau du sol en liaison directe avec sa disponibilité pour les plantes.

2/ **Un aspect dynamique** : il s'agit des transferts verticaux ou latéraux de la phase liquide du sol, c'est à dire la circulation de l'eau dans le sol.

### I.1. Rôle de l'eau dans le sol

D'après **Girard (2005)**, l'apport d'eau au sol se fait sous forme de pluie, neige, rosée et brouillard. L'eau joue un rôle très important soit pour le sol lui-même soit pour les plantes qu'il porte.

Selon **Boumaaza (2021)**, la teneur en eau du sol a un impact important sur de nombreux processus biophysiques fondamentaux: les déplacements, les transformations, les ajouts et les pertes de constituants du sol dans un profil de sol. Ces processus déterminent les propriétés chimiques, morphologiques et physiques du sol telles que la variation de texture avec la profondeur.

#### I.1.1. L'eau participe à une désagrégation mécanique des roches

Les variations de température entraînent la dilatation ou la contraction des roches soumises à des variations de volumes incessants, une roche fissure puis éclate. Donc, l'eau est un facteur fondamental de la genèse des sols et leur évolution.

#### I.1.2. L'eau, un agent d'altération chimique

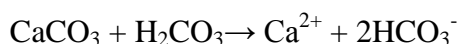
L'altération chimique (Figure 1) est causée par la réaction de l'eau de pluie avec les grains minéraux des roches pour former de nouveaux minéraux (argiles) et des sels solubles. Ces réactions se produisent particulièrement lorsque l'eau est légèrement acide.

##### I.1.2.1. La dissolution

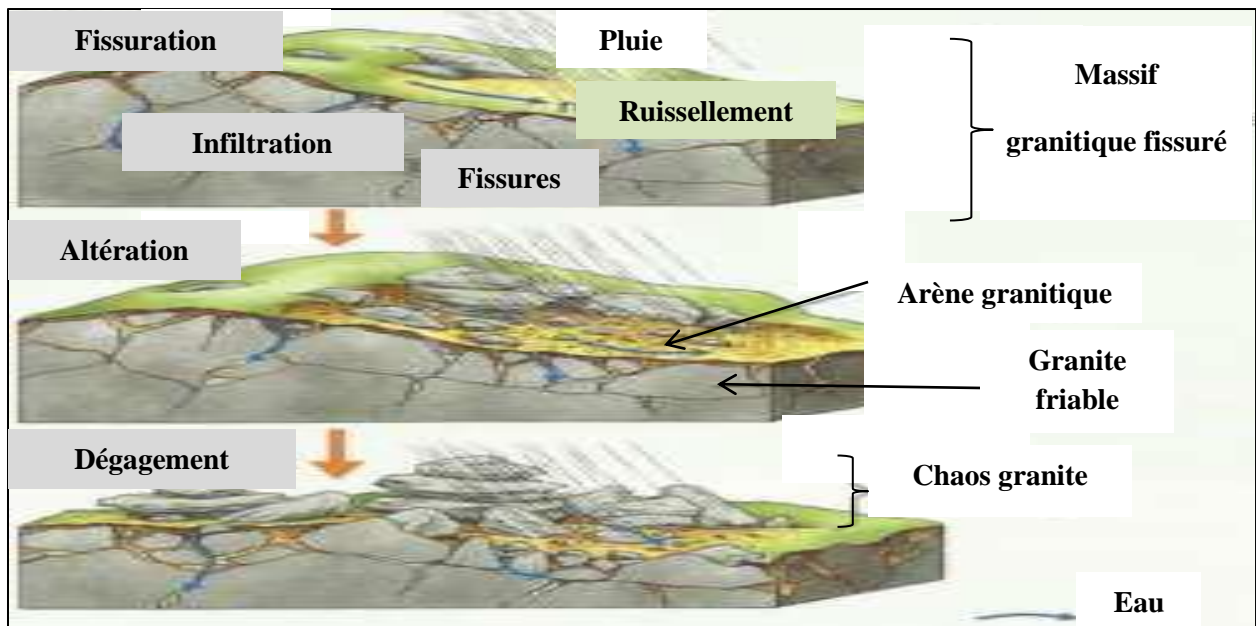
Les réactions de dissolution produisent des ions, mais pas de minéraux, et sont réversibles si le solvant est éliminé. Le gypse est d'autres minéraux qui se dissolvent dans l'eau seule. La dissolution du carbonate comprend les étapes suivantes :



Dioxyde de carbone + eau → acide carbonique



Carbonate de calcium + acide carbonique → calcium + bicarbonate



**Figure 1 : Désagrégation mécanique des roches**

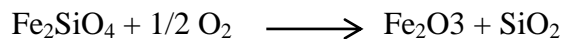
(<https://www.qcm-svt.fr/QCM/publicaffichage.php?niveau=seconde&id=1102>)

### I.1.2.2. Les oxydations / réductions

Les oxydations concernent surtout le fer qui passe de l'état ferreux à l'état ferrique.

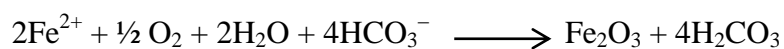
- Exemple pour un minéral d'olivine:

Olivine + oxygène  $\longrightarrow$  oxyde ferrique + silice.



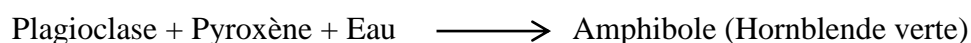
Les réductions sont plus rares : elles se déroulent dans les milieux hydromorphes (saturés d'eau de façon permanente ou périodique) et produisent en particulier du fer ferrique ou fer ferreux soluble.

Le fer et l'oxygène dissous dans l'eau réagissent en présence de bicarbonate pour produire de l'hématite et de l'acide carbonique :



### I.1.2.3. L'hydratation

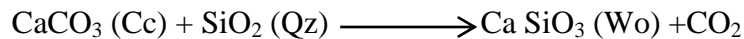
Il s'agit de l'incorporation de molécules d'eau à certains minéraux peu hydratés. Elle produit un gonflement du minéral et donc favorise la destruction de la roche. C'est le cas de la chloritisation ou de la transformation des ferro-magnésiens (pyroxènes, amphiboles) en serpentine, chlorite, épidote (**Boumaaza 2021**).



#### **I.1.2.4. La décarbonatation et carbonatation**

Les réactions avec libération ou ajout de CO<sub>2</sub> sont respectivement appelées décarbonatation et carbonatation. Les réactions de décarbonatation décrivent la décomposition de minéraux carbonatés tels que la calcite et la dolomite.

Un exemple de ce type de réaction est la décarbonatation de la calcite (Cc) en présence de quartz (Qz) pour former la wollastonite (Wo) :

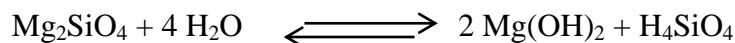


#### **I.1.2.5. L'hydrolyse**

Est une forme d'altération chimique dans laquelle seule une partie d'un minéral est mise en solution. Le reste du minéral est transformé en un nouveau matériau solide, tel qu'un minéral argileux. Elles peuvent être totales lorsque le minéral est détruit en plus petits composés possibles (hydroxydes, ions) ou partielles lorsque la dégradation est incomplète et donne directement des composés argileux.

Le bilan général d'une réaction d'hydrolyse peut s'écrire:

Minéral primaire + Eau  $\longrightarrow$  Minéral secondaire + Solution de lessivage.



#### **I.1.3. Élément constitutif de la plante**

L'eau est un élément constitutif de la plante où la matière végétale contient 60 à 95% d'eau.

#### **I.1.4. Le transport des éléments nutritifs**

Il transporte à la plante par l'intermédiaire de la solution du sol les éléments minéraux essentiels pour sa nourriture.

#### **I.2. Relations entre les trois phases du sol**

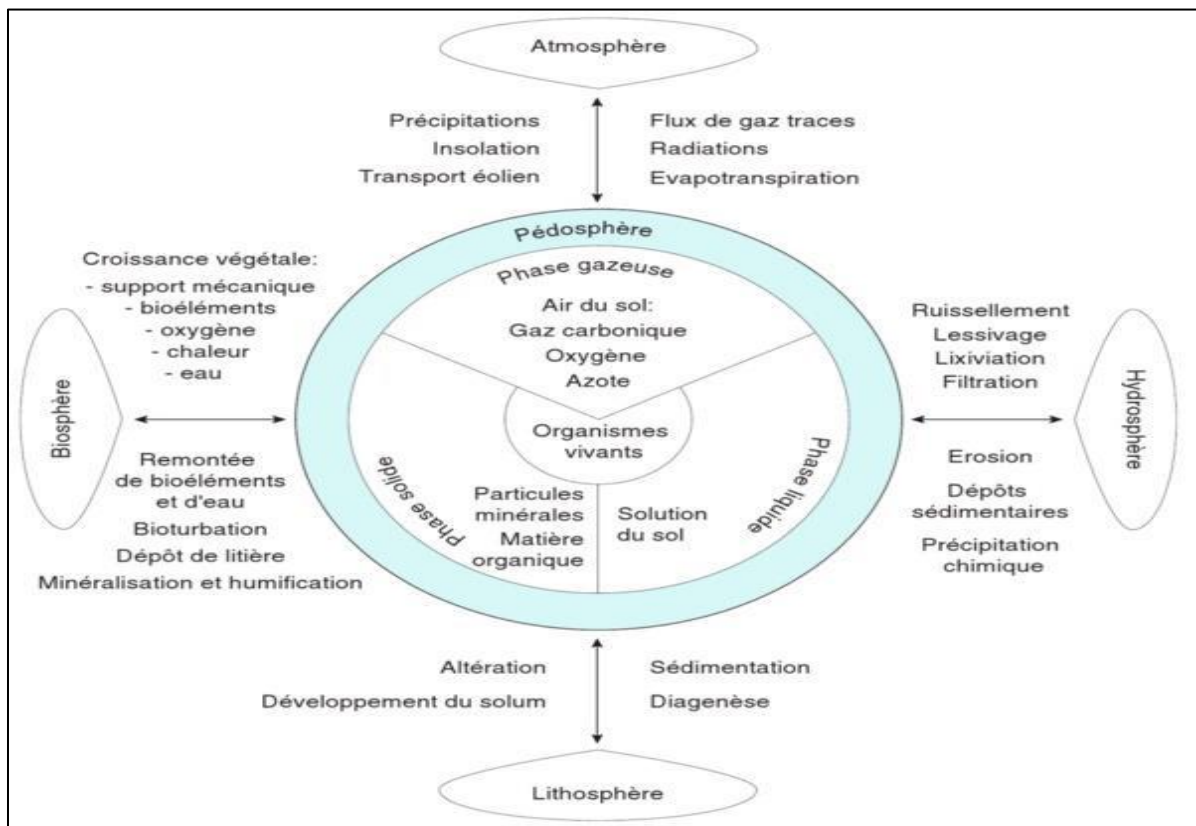
Un volume de sol est constitué d'éléments solides, liquides et gazeux (**Morel 1996**), donc le sol, un milieu tri-phasique, il contient en proportions variables (Figure 2):

- **Une phase solide** : argiles, limons, sables, matière organique, pierres, cailloux, matière minérale ;
- **Une phase liquide** : eau + substances dissoutes ;
- **Une phase gazeuse** : (atmosphère du sol : O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>).

##### **a. La phase solide du sol**

Selon **Gobat *and al.* (2010)**, elle est constituée par une grande part de minéraux et de matière organique dont la teneur tend à décroître avec la profondeur.

- **La fraction minérale provient :**
  - Soit de la désagrégation de la roche-mère ;
  - Soit d'apports liés à des amendements ou à des engrais.
- **La fraction organique issue** des plantes fragmentées puis décomposées dans le sol. Les composés enrichis en carbone et provenant de la décomposition des organismes végétaux et animaux ainsi que l'activité de la microflore du sol, réagissent avec les argiles, ils forment des complexes argilo-humiques qui peuvent avoir des influences multiples sur les propriétés du sol (rétention de l'eau, propriété d'échange en cation, mouillage...).



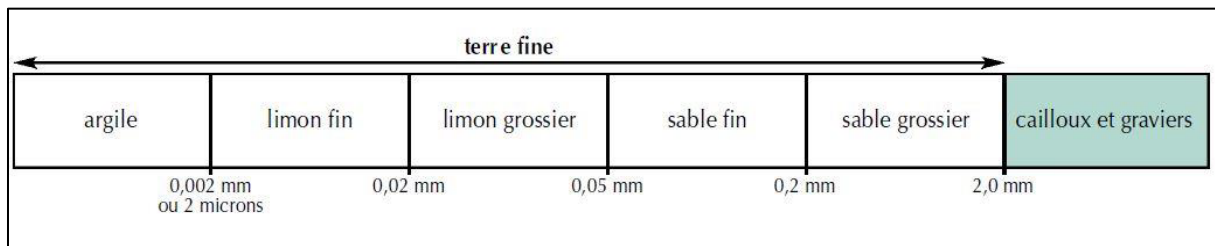
**Figure 2:** La complexité externe et interne du sol (Gobat and al. 2010)

L'assemblage des éléments les plus fines, regroupés sous le nom d'argile forme ce qu'on appelle le *plasma argileux*. L'une de ses propriétés essentielles est son aptitude à retenir l'eau. A côté, on trouve des éléments bien plus volumineux (10 à 1000 fois plus), formés par des limons et des sables : ils forment ce qu'on nomme le *squelette*.

Donc, la phase solide est constituée d'un squelette entouré par une pâte argileuse, le plasma : sorte de ciment entourant des éléments bien plus gros (limons + sables).

Selon Gobat and al. (2010), deux notions fondamentales décrivent la phase solide du sol : texture et structure

- **Texture** : est définie par la proportion des diverses tailles des éléments : grossiers (sables), fins (limons) et très fins (argiles) qui constituent la phase solide du sol et qui définissent sa composition granulométrique (Figure 3).



**Figure 3** : Définition des fractions granulométriques du sol en fonction de la taille des éléments (Morel 1996)

La texture d'un sol est déterminée par la granulométrie des éléments de sa phase solide. Dans un sol, le seuil de 2mm sert à séparer les cailloux et les graviers, d'un diamètre supérieur, de la terre fine, d'un diamètre inférieur. Cette terre fine comporte trois classes texturales (argile, limon et sable), selon leurs proportions, on parle de sols sableux, sols limoneux ou argileux (Tableau 1).

**Tableau 1** : Classification simplifiée des sols selon la texture (Morel 1996).

Type de sol	Argile	Limon	Sable
<b>Sols argileux</b>	≥ 30%	25 - 40%	30 - 45%
<b>Sols limoneux</b>	30 - 40%	≥ 50%	10 - 20%
<b>Sols sableux</b>	1 - 5%	10 - 15%	> 70%
<b>Sols calcaires</b>	≥ 5%		
<b>Sols humifères</b>	15 - 20% de matière organique		

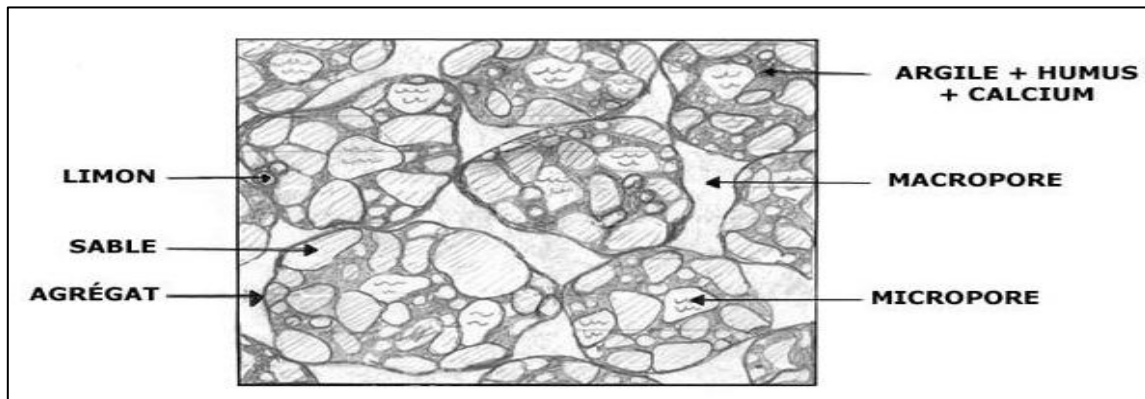
Les argiles se définissent comme matériau textural ou comme minéral.

- Les sols argileux peuvent retenir par adsorption avec une forte énergie des quantités d'eau bien supérieures à celles d'un sol sableux.
- L'humus est capable de retenir environ plus de 10 fois d'eau et des cations que les argiles.

➤ **Structure** : correspond au mode d'assemblage de ces éléments entre eux, c'est-à-dire à leur mode d'agrégation sous l'effet de liaisons physiques ou chimiques à différents échelles (Cedra 1993).

Une bonne structure (structure favorable) permet la pénétration des racines qui se développent dans le sol et un bon déplacement de l'eau et les éléments fertilisants vers les racines.

Structure favorable (=structure idéale ou grumeleuse) : il y a des pores (fissures, lacunes ou interstices) entre les agrégats du sol (Figure 4).



**Figure 4 : Structure grumeleuse du sol**  
(<https://espacepouurlavie.ca/structure-du-sol>)

La structure grumeleuse comporte de nombreux avantages :

- Une bonne rétention de l'eau et des éléments nutritifs;
- Un bon drainage;
- Une bonne aération;
- Un bon développement du système racinaire des végétaux;
- Un travail facile du sol;
- Un réchauffement rapide du sol au printemps;
- Une bonne activité biologique du sol;
- Une bonne résistance à l'érosion et à la compaction.

#### **b. La phase liquide du sol**

D'après **Morel (1996)**, la phase liquide du sol est une solution aqueuse (appelée solution du sol) dont la composition est très riche et variable. Les solutés sont majoritairement des sels minéraux avec des concentrations faibles de l'ordre de  $10^{-5}$  à  $10^{-2}$  mol/l ce qui correspond à des pressions osmotiques de l'ordre de 0,025 à 25 kPa. Certains sont en équilibre dynamique avec la phase solide, ce dernier dépend de plusieurs paramètres qui varient dans le temps (teneur en eau + température) qui influencent sur l'activité biologique et les nombreuses et complexes réactions chimiques impliquées.

La quantité de la solution du sol absorbée par les racines est très dépendante de l'état hydrique du sol et des mouvements de l'eau dans le sol. Par exemple : durant l'hiver, le gel de la phase liquide des sols peut interdire l'absorption racinaire.

La présence contiguë d'eau liquide représente un obstacle au transport des gaz, de l'oxygène en particulier : c'est la raison pour laquelle les sols très hydratés ou saturés en eau :

- Constituent des milieux anaérobies (milieux dépourvus d'oxygène) dans lesquels les racines fonctionnent très mal, sauf adaptation particulière ;
- Certains éléments comme le fer ferreux ou manganèse peuvent passer en solution et devenir toxique pour les plantes ;
- Des changements de pH peuvent intervenir, à savoir son augmentation en milieu réducteur (consommation de protons) et/ou sa diminution lors de la réoxydation (libération de protons) entraînant des modifications des propriétés des argiles, la dissolution/précipitation du fer, avec pour conséquence la formation de zones indurées et imperméables.

### c. La phase gazeuse du sol (l'atmosphère du sol)

Selon **Morel (1996)**, Elle est composée de même gaz que l'atmosphère (azote, oxygène, dioxyde de carbone) et d'autres tel que l'azote nitrique et l'azote ammoniacal dont les proportions varient dans le temps et avec la profondeur. Elle occupe les espaces libres laissés entre les particules solides et qui ne sont pas remplis par la phase liquide.

De multiples facteurs, dont l'activité biologique agisse en effet sur la composition de cette phase (la décomposition de la matière organique du sol et la respiration de la faune du sol).

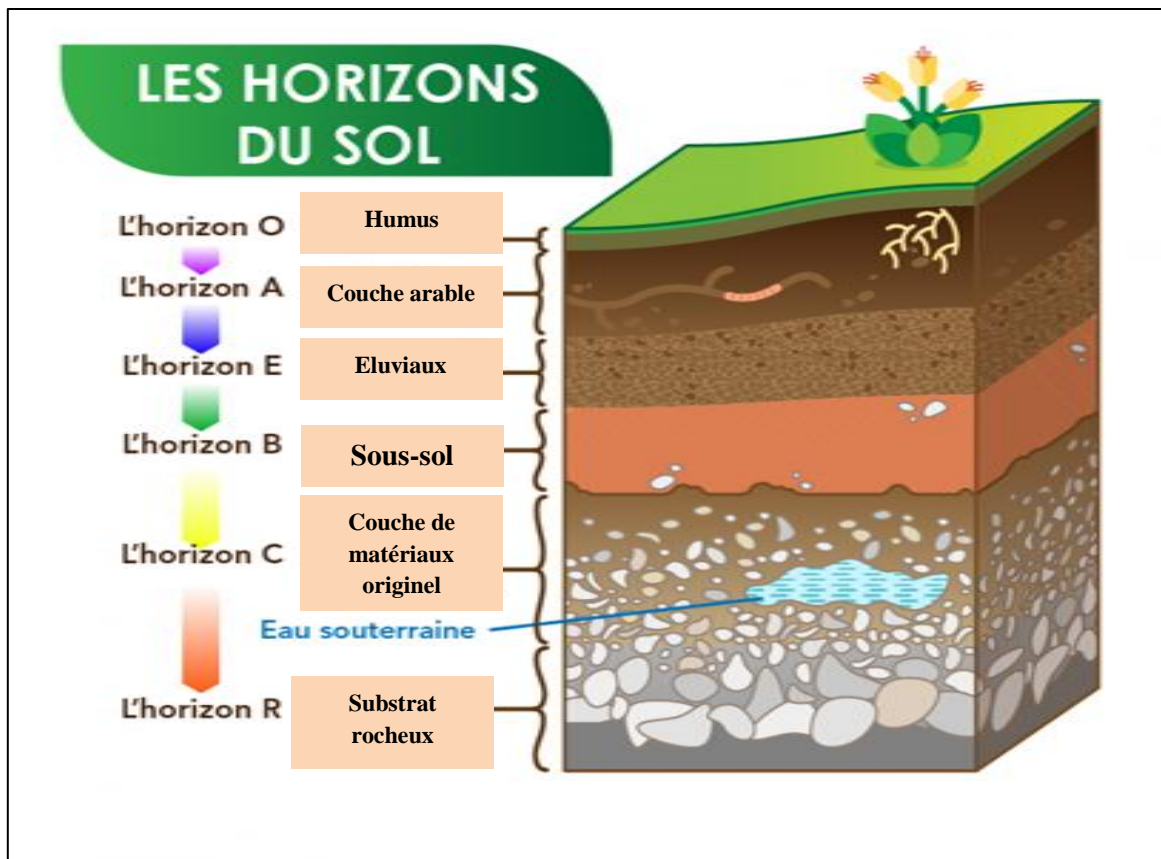
- La teneur en O<sub>2</sub> est généralement proche de celle de l'air :  
(10 à 20% contre 20,9% dans l'atmosphère)
- La concentration en CO<sub>2</sub> est bien plus élevée que l'atmosphère :  
(0,3 à 3% contre 0,04% dans l'atmosphère)
- La teneur en CO<sub>2</sub> augmente avec la profondeur, alors que celle d'O<sub>2</sub> diminue.

Les solutés ioniques les plus courants sont les cations : Ca<sup>++</sup>, H<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et les anions : Cl<sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (**Schwartz and al. 2005**).

### I.3. Mesure des volumes occupés par les différentes phases du sol

D'après **Mathieu and al. (2003)**, le sol est organisé et complexe dans lequel : on distingue de multiples niveaux d'organisations donc le sol, est aussi un milieu poreux :

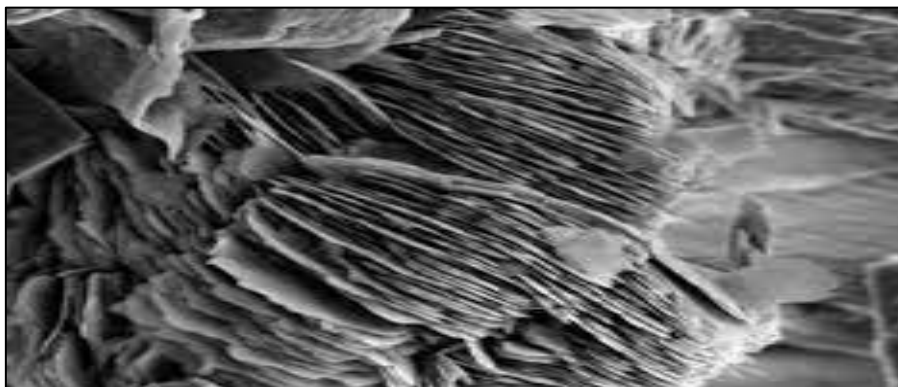
Des niveaux macroscopiques : couches superposées (Figure 5) ou horizons (définis par les pédologues) ;



**Figure 5 :** Profil cultural avec les principaux horizons

(<https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/science-du-sol>)

Des niveaux microscopiques : structure lamellaire des minéraux argileux (Figure 6).



**Figure 6 :** Feuilletés d'argile (Noguera 2010)

Entre ces niveaux d'assemblages, 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, trous, fissures), l'ensemble constitue l'espace poral dont la géométrie est complexe et les dimensions extrêmement variées. L'eau et le gaz occupent cet espace. L'argile confère au sol les propriétés de gonflement-retrait et cela varie au volume lié

à l'état hydrique du sol. D'où on observe les fentes de retrait visibles dans un sol asséché (Noguera 2010).

#### **a. Mesure du volume occupé par la phase liquide**

Selon Mathieu *and al.* (2003), la phase liquide représente l'humidité du sol. Elle est le facteur prioritaire du rendement. La première amélioration à apporter est donc l'irrigation ou le drainage, ou quelquefois les deux. L'humidité du sol est un facteur essentiel du régime d'infiltration, car les forces de succion sont aussi fonction du taux d'humidité du sol.

##### ➤ **Principe**

C'est la perte de poids après séchage à 105°C pendant 24h exprimée en pourcentage (ou en pour mille) par rapport à la terre séchée à l'air %.

##### ➤ **Calculs**

$$H (\%) = [(P1-P2)/P2]*100$$

**P1:** poids humide

**P2:** poids sec

Le taux de la phase liquide (%) = Humidité (%)

Le volume de la phase liquide = volume initial du sol entier X H% /100

#### **b. Mesure du volume occupé par la phase gazeuse**

Selon Mathieu *and al.* (2003), le taux de la phase gazeuse est déterminé par la formule suivante :

Le taux de la phase gazeuse (%) = Porosité (%) – Humidité (%)

Le volume de la phase gazeuse = volume initial du sol entier X (porosité-H%) /100

#### ❖ **Porosité**

##### ➤ **Définition**

La porosité est définie par le volume des vides dans un sol par rapport au volume total. C'est un indice du volume relatif des pores et cette fraction volumique peut varier de:

- 30 à 35 % dans les sols à texture très fine et très tassée,
- à 70 % dans les sols riches en calcium et en humus et à texture équilibrée.

La porosité d'un horizon est essentielle pour tout ce qui concerne la réserve en eau, la circulation des fluides (eau et air) et les possibilités d'enracinement. La valeur de la porosité détermine les principales propriétés des sols telles: la densité apparente, la densité réelle, la perméabilité et la stabilité structurale.

### ➤ Détermination

La porosité totale d'un sol, c'est-à-dire la fraction d'un volume unitaire qui n'est pas occupée par la phase solide permet de caractériser de façon globale et commode d'état physique d'une couche de sol. On sait qu'on la détermine le plus souvent de façon indirecte à partir de mesure de la densité apparente ( $D_a$ ), et la densité réelle ( $D$ ).

$$\text{Porosité (\%)} = 1 - D_a/D$$

#### ❖ Densité apparente

##### ➤ Principe

D'après **Blake and Hartge (1986)**, la détermination de la densité apparente elle-même revient à mesurer le volume apparent occupé par poids connu de matériau sec.

##### ➤ Mode opératoire

La densité apparente est mesurée comme suite : on enfonce un densimètre (cylindre de volume connu) dans notre sol, ensuite tire le cylindre avec le sol que lui contient, après séchage du contenu du cylindre (sol) dans l'étuve pendant 24 heures à 105 °C, on détermine la densité apparente ( $D_a$ ).

$$D_a \text{ (g/cm}^3\text{)} = \text{poids sec/volume du cylindre}$$

#### ❖ La densité réelle

##### ➤ Principe

Selon **Mathieu and al. (2003)**, on effectue la mesure du poids et du volume de la phase solide d'un échantillon sec. La mesure du volume est réalisée par déplacement de liquide (Méthode classique au pycnomètre).

##### ➤ Mode opératoire

La méthode consiste à faire une série de quatre pesées a, b, c, d dont on déduit le poids et le volume de l'échantillon.

a : Le pycnomètre vide ;

b : Le pycnomètre contenant le sol à étudier (environ 15g) ;

c : Le pycnomètre + sol+ eau ;

d : Le pycnomètre rempli d'eau.

On a: Poids = b - a

Volume: (b + d) - (a + c)

d'où

$$D = (b-a)/[(b+d)-(a+c)]$$

### **c. Mesure du volume occupé par la phase solide**

Le taux de la phase solide est calculé selon la formule suivante :

Taux de la phase solide (%) = 1 – porosité (%)

Le volume de la phase gazeuse = volume initial du sol entier X (1-porosité) /100

### **I.4. Les formes de l'eau dans le sol**

D'après **Boumaaza (2021)**, l'eau du sol se présente sous deux formes : l'eau libre et l'eau retenue dans le sol.

Lorsqu'elle est trop présente, elle peut être éliminée par drainage ou par des plantations adaptées.

- L'eau libre est l'eau qui circule librement dans le sol entre les pores grossiers ou plus petits (supérieurs à 10 micromètres).

- L'eau qui est retenue par les constituants du sol occupe les pores moyens et fins (inférieurs à 10 micromètres).

#### **I.4.1. Eau de gravité (libre)**

L'eau qui circule librement dans les grands pores du sol (macro pores), cette eau coule vers le bas sous l'effet de la gravité.

**I.4.2. Eau de rétention** : comprend 3 types (Figure 7) :

##### **a. Eau capillaire**

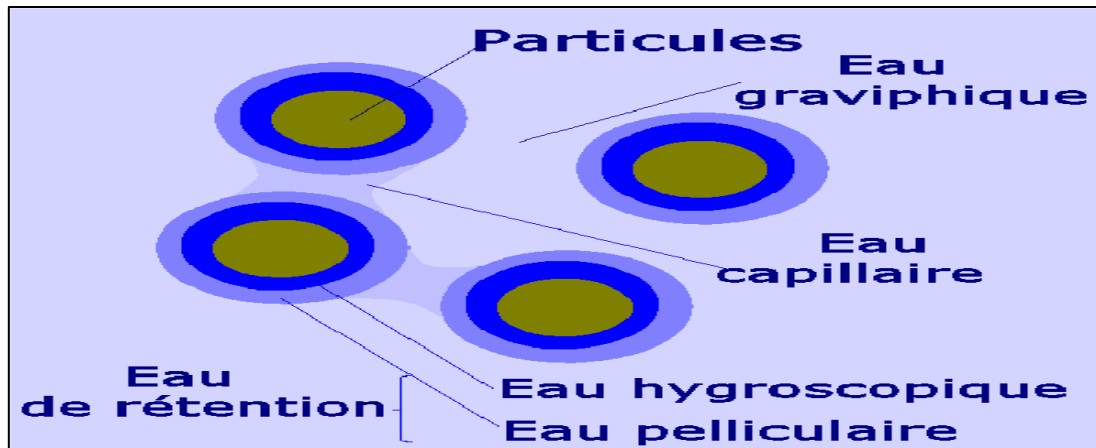
L'eau qui occupe la microposité ; elle est maintenue dans le sol par les forces capillaires, elle peut être absorbée par les plantes.

##### **b. Eau hygroscopique**

Eau très liée aux particules du sol, elle forme une mince couche autour d'elles, elle n'est pas utilisée par les végétaux.

##### **c. Eau pelliculaire**

C'est l'eau qui entoure l'eau hygroscopique.



**Figure 7** : Les états de l'eau dans le sol ([https://www.researchgate.net/figure/Vue-schematique-des-formes-de-leau-dans-le-sol-INPL-Nancy-2016\\_fig1\\_362016997](https://www.researchgate.net/figure/Vue-schematique-des-formes-de-leau-dans-le-sol-INPL-Nancy-2016_fig1_362016997))

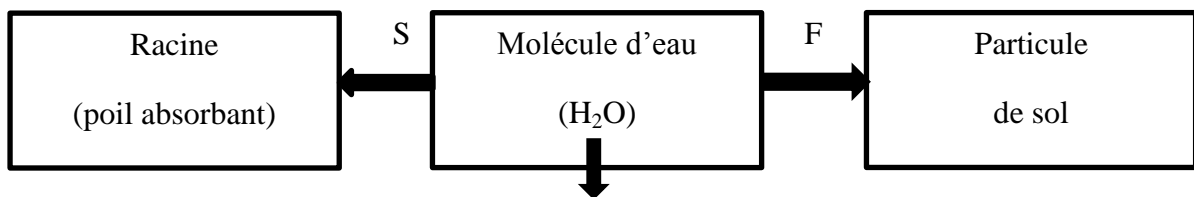
**d. Les forces qui s'exercent sur une molécule d'eau dans le sol**

Les molécules d'eau dans le sol sont soumises à trois forces (Figure 8):

Force de pesanteur (P)

Force d'attraction des particules solides du sol (F)

Force de succion par les racines des plantes (S)



**Figure 8** : Les forces qui s'exercent sur une molécule d'eau dans le sol (<https://dyrassa.com/wp-content/uploads/2022/08/DOC-9-BIOF>)

1/  $F=0$  et  $P>S$  : Eau de gravité

2/  $S>P$  et  $S>F$  : Eau capillaire

3/  $F>P$  et  $F>S$  : Eau hygroscopique

**I.5. Les forces de rétention de l'eau par le sol/ Le potentiel de l'eau dans le sol**

**Selon Foth (1990)**, l'eau de rétention représente l'eau, qui est disponible pour les plantes. Elle est retenue par les constituants du sol (lacunes, interstices, micropores) par deux catégories de forces :

- Forces matricielles : générées par les constituants non solubles du sol ;
- Forces osmotiques : générées par la tension superficielle.

**Force matricielle**

- Due aux liaisons avec la matrice ;

- Cette matrice est constituée par des éléments non solubles du sol, c'est-à-dire une particule du sol est constituée par une matrice, qui est constituée à leur tour par des éléments non solubles et ces éléments exercent une force matricielle, exercée par la matrice.

- L'intensité de ces liaisons matricielles dépend de la granulométrie, c'est-à-dire plus les particules du sol sont petites et plus les forces matricielles sont importantes.

- Les liaisons entre l'eau et les constituants figurés du sol impliquent :

- a. **Une force d'imbibition** (autour des particules du sol) : c'est une force électrostatique des colloïdes qui s'exerce autour des particules du sol pour attirer l'eau dans le sol ;

- b. **Une force capillaire** (entre les particules du sol) : c'est une force qui s'exerce entre les particules du sol dans la microporosité, qui retient aussi l'eau.

- Ces deux forces déterminent le **Potentiel matriciel  $\Psi_m$  (tension du sol)** : il caractérise un état énergétique de l'eau dans le sol, il augmente lorsque la teneur en eau du sol est faible (**Foth 1990**).

#### **A. Forces d'imbibition**

- Ce sont des forces colloïdales, dues à des caractéristiques des substances colloïdales à gonfler en présence d'eau.

- Caractérisée par des attractions électrostatiques exercées entre les charges négatives des colloïdes et les pôles positifs de l'eau.

- Quand le sol se dessèche, la densité des charges augmente encore plus : augmentation de la tension de rétention électrostatique qui augmente le **Potentiel d'adhésion** (**Foth 1990**).

#### **B. Forces capillaires**

- Ce sont des tensions superficielles exercées dans les interstices fins (micropores). Ces tensions ne posent de problème à l'alimentation hydrique.

- Quand le sol se dessèche, les particules du sol se resserrent trop : la tension de rétention augmente, ce qui augmente la tension capillaire et par conséquent le **Potentiel capillaire** (**Foth 1990**).

#### **C. Forces osmotiques**

- Ce sont des attractions exercées par les solutés.
- Ces forces osmotiques qui sont générées par les solutés du sol, vont retenir l'eau dans le sol et cette rétention devient plus faible lorsque le sol est bien irrigué, ce qui diminue les attractions et les forces osmotiques.

- Cependant, quand le sol se dessèche (surtout le sol salin), la tension de

rétenion osmotique peut s'élever à 10 à 20 bars, ce qui augmente le **Potentiel osmotique** (Foth 1990).

*NB : La plante va utiliser l'eau la moins liée (les liaisons osmotiques et capillaires).*

## I.6. Les états de l'eau dans le sol

### I.6.1. L'humidité à la capacité au champ d'un sol

La capacité au champ (Figure 9) est la quantité d'humidité du sol ou la teneur en eau retenue dans le sol après que l'excès d'eau s'est écoulé et que le taux de mouvement vers le bas a sensiblement diminué, ce qui a généralement lieu dans les 2 à 3 jours après une pluie ou une irrigation dans des sols perméables de structure uniforme et texture (Foth 1990).

Lorsque l'irrigation est appliquée au sol, tous les pores du sol se remplissent d'eau. Après le drainage gravitationnel, les gros pores du sol sont remplis d'air et d'eau, tandis que les pores plus petits sont encore pleins d'eau. A ce stade, le sol est dit à capacité au champ. Cette condition d'humidité favorise une meilleure absorption d'eau et de nutriments par les plantes.

### I.6.2. L'humidité au point de flétrissement

Le point de flétrissement (Figure 9), également appelé point de flétrissement permanent, peut être défini comme la quantité d'eau par unité de poids ou par unité de volume du sol, exprimée en pourcentage, qui est retenue si étroitement par le potentiel matriciel du sol que les racines ne peuvent pas absorber cette forme d'eau. La conséquence sur la plante est le flétrissement (Foth, 1990).



**Figure 9** : les états de l'eau dans le sol. Une vue schématique  
(<https://connectedcrops.ca/the-ultimate-guide-to-soil-moisture/>)

### I.6.3. La Réserve utile (RU)

Quantité d'eau contenue dans le sol (Figure 10) que les plantes peuvent utiliser. Elle correspond donc à la quantité d'eau stockée dans un certain volume de sol entre des valeurs d'humidité limites correspondant à la capacité au champ (cc) et au point de flétrissement permanent (fp).

#### I.6.4. La réserve facilement utilisable (RFU)

Quantité d'eau contenue dans le sol que les plantes peuvent utiliser facilement pour leur croissance et sans subir de stress dommageable. La RFU ou réserve facilement utilisable par les plantes est proportionnelle à la RU :  $RFU = k \times RU$ ,  $k$  dépend de la profondeur d'enracinement du peuplement et de l'importance de la demande climatique. Généralement on retient pour  $k$  une valeur voisine de  $2/3$ . La RFU d'un sol est d'autant plus importante que le sol est profond ainsi que l'enracinement, et que les pluies hivernales ont été importantes.

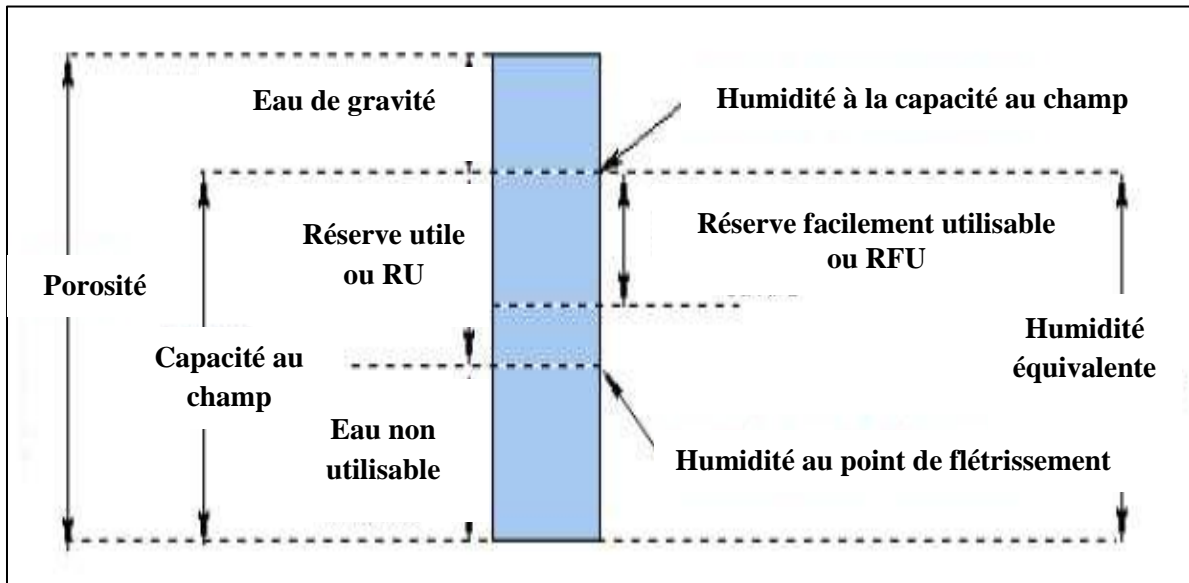


Figure 10: Les états de l'eau dans le sol (Boumaaza 2021)

#### I.7. Le mouvement de l'eau dans le sol

D'après **Beauchamp (2006)**, C'est la façon dont circule l'eau dans le sol pour un climat donné et qui détermine les conditions de vidage et de remplissage de la réserve en eau (Figure 11).

Ainsi lors d'une pluie, la quantité d'eau qui pénètre dans le sol, et va donc remplir la réserve hydrique, et plus importante sur une parcelle plane que sur une parcelle en pente.

Les mouvements de l'eau dans le sol sont liés essentiellement à deux processus :

##### a. Infiltration de l'eau et perméabilité du sol

1. **Infiltration** : au cours d'une pluie, l'eau pénètre dans le sol en profondeur sous l'effet de la pesanteur.

2. **Perméabilité** : la vitesse à laquelle l'eau s'infiltré dépend de la perméabilité. Plus un sol est perméable, plus il sera traversé par l'eau de gravité.

Cette propriété est fonction de la texture et de la structure du sol :

Texture : plus la texture d'un sol est fine, moins il est perméable. La présence de la matière organique augmente la perméabilité des sols.

Structure : l'infiltration est d'autant plus rapide que la macroporosité est élevée.

### 3. Favoriser l'infiltration

Les techniques culturales doivent permettre d'augmenter la perméabilité pour favoriser l'infiltration :

Pour limiter les risques d'excès d'eau et ses effets néfastes sur la structure du sol, la vie biologique du sol et la respiration des racines ;

Pour limiter le ruissellement et ses effets néfastes sur l'érosion et la réserve utile (perte d'eau) ;

Lorsque les sols sont très filtrants (l'eau les traversant rapidement) et la pluviométrie importante, l'eau de drainage peut entraîner en profondeur certains éléments minéraux, ce qui pose un problème de disponibilité de ces éléments pour la plante (faible fertilité).

#### b. Déplacement de l'eau par diffusion capillaire

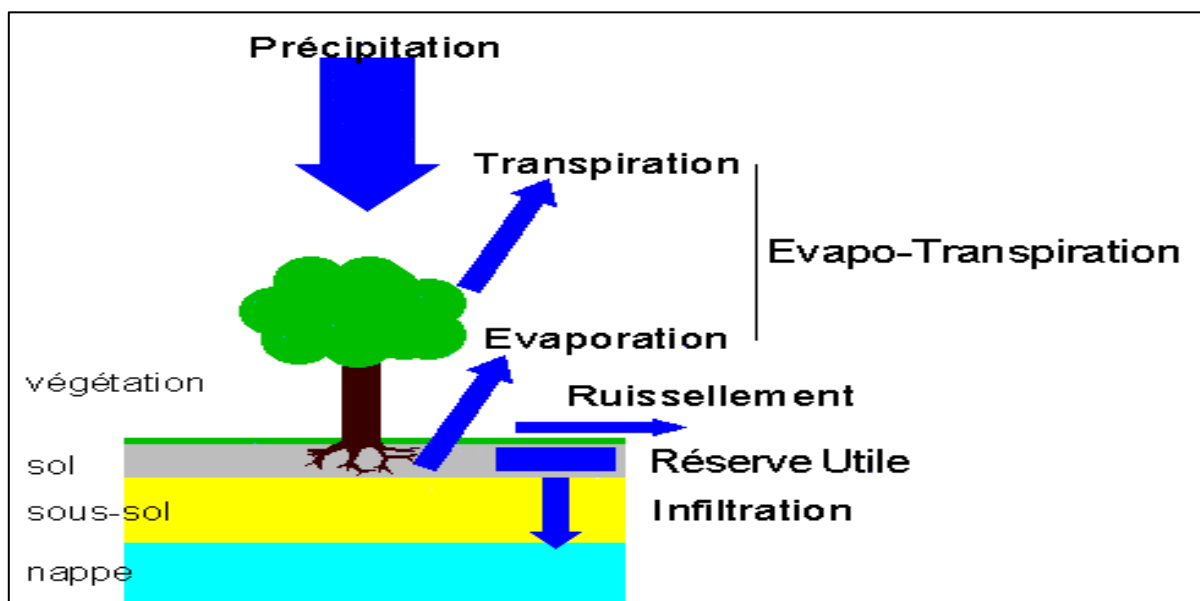
La diffusion est la manière dont se déplace l'eau de rétention dans la microporosité du sol.

Ce phénomène a pour origine les forces capillaires.

### I.8. Bilan hydrique du sol

Selon **Beauchamp (2006)**, le bilan hydrique d'un sol ne peut être appréhendé que dans un système global sol-plante atmosphère. Il est caractérisé par les entrées et les sorties d'eau du système durant une période donnée et par la variation de la teneur en eau à l'intérieur de ce système.

Les variations internes sont directement dépendantes de la réserve hydrique du sol.



**Figure 11** : Mouvement / Le bilan hydrique de l'eau  
(<https://coursgeologie.com/bilan-hydrique-du-sol-126/>)

### a. Les entrées d'eau dans le sol

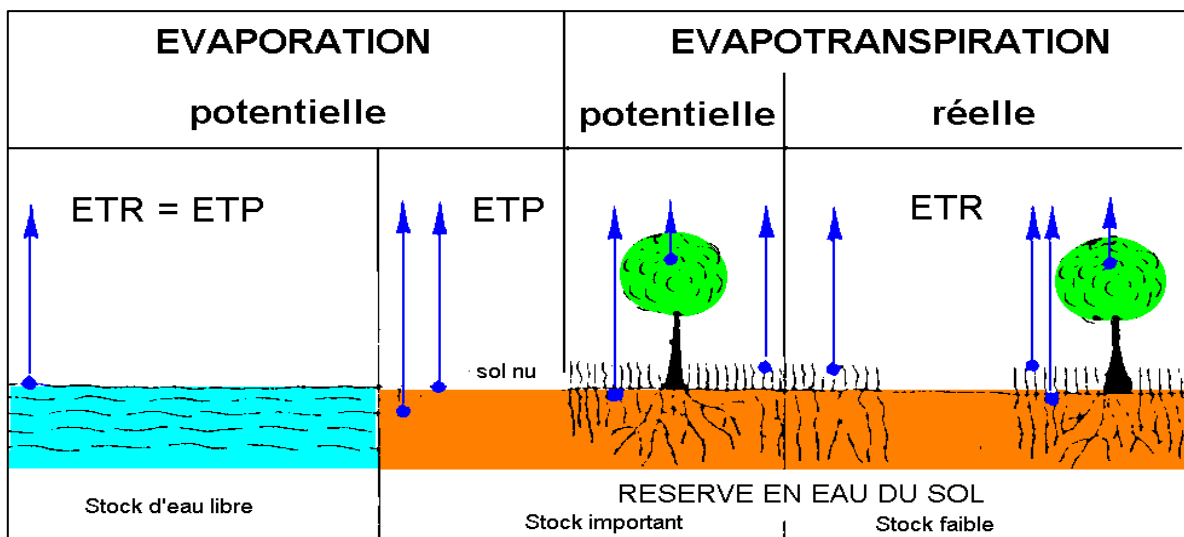
Elles sont représentées essentiellement par :

- **Les précipitations** : sont caractérisées par leurs moyennes mensuelles ou annuelles pour un lieu ou une région données.
- **Les remontées capillaires** : c'est l'ascension capillaire à partir des couches profondes ; elles sont d'autant plus importantes que la période est sèche et que la nappe est proche de la surface.
- **Les irrigations** : les apports sont importants dans les périmètres irrigués des régions arides et semi arides.

### b. Les sorties d'eau dans le sol

- **Le drainage du sol** : c'est la circulation de l'eau en mouvement libre (libre écoulement)
- **Evapotranspiration** : elle comprend la transpiration du végétal (biologique) et l'évaporation propre du sol (physique). Elle est due à l'énergie apportée par les radiations solaires qui intervient sur le changement de l'état de l'eau en le transformant sous forme de vapeur (vaporisation).

On parle d'évapotranspiration potentielle (ETP), lorsque le climat est le seul facteur limitant ; cas d'une surface d'eau libre ou un couvert végétal pour lequel l'eau n'est pas un facteur limitant (Figure 12).



**Figure 12** : Evapotranspiration (<https://coursgeologie.com/bilan-hydrique-du-sol-126/>)

- l'évapotranspiration réelle (ETR) correspond à la perte en eau d'un sol quand l'eau vient à manquer : l'ETR est fonction de l'ETP et de la quantité d'eau présente dans le sol.

Dans la pratique, compte tenu de l'impossibilité de réaliser la saturation de la surface, ce concept est approché par l'évapotranspiration potentielle d'une culture couvrante et bien alimentée en eau que l'on mesure en général sur gazon (ETP gazon).

Lorsque la plante, par son état de développement, constitue aussi un facteur limitant, elle est en régime d'évapotranspiration **maximale (ETM)**.

- **Différents types de bilans**
- **Bilan climatique (Bc) :  $Bc = P - ETP$**

Les grandeurs P (précipitations) et ETP sont exprimées pour la période étudiée.

- **Bilan hydrologique (Bh) :  $Bh = P - Ec - Dr - ETR$**

Il est réalisé à l'échelle d'un bassin versant et repose sur les précipitations (P) la mesure de l'écoulement du bassin considéré qui comprend le ruissellement superficiel (Ec) et le drainage (Dr).

- **Bilan pédoclimatique (Bpc) :  $Bpc = P + Rc - ETR - Ec - Dr - \Delta R$**

Ce bilan tient compte des comportements de l'eau dans le sol ; il est généralement négatif en été. Il permet en particulier de suivre l'évolution du stock d'eau (réserves du sol ( $\Delta R$ )) tout en tenant compte des remontées capillaires (Rc).

### **I.9. Les besoins en eau des plantes**

D'après **Schvartz *and al.* (2005)**, chaque espèce végétale est plus ou moins gourmande en eau. La consommation en eau des plantes est influencée par le climat (soleil, vent, hygrométrie). Elle peut varier fortement d'un jour à l'autre. Des sites météo spécialisés en agriculture, outre la prévision du temps, fort utile, renseignent sur la consommation en eau des plantes sous la rubrique ETP (Evapo Transpiration Potentielle). Les valeurs sont exprimées en mm d'eau (1 mm= 1l par m<sup>2</sup>).

### **I.10. Adaptation des plantes aux besoins en eau**

Selon **Vilain (1997)**, les plantes se sont adaptées aux conditions de disponibilité en eau pour assurer leur survie:

- Fermeture des stomates (structures permettant à la plante de respirer et de transpirer) pendant la journée,
- Réduction du métabolisme dans les régions arides,
- Limitation des surfaces d'échanges (aiguilles à la place des feuilles),
- Perte des feuilles quand les conditions deviennent trop sèches.

### **L'évapotranspiration**

Le sol fournit à la plante l'eau et les éléments minéraux nécessaires à sa croissance et à son développement. L'eau puisée dans le sol, pénètre par les racines et transite dans les vaisseaux

de la plante vers les feuilles. L'eau est le constituant majeur des plantes. Cependant la plus grande partie de cette eau est transpirée par les feuilles, sous forme de vapeur d'eau au moyen de multiples petits orifices (les stomates). C'est la "transpiration".

Dans le même temps, le sol, sous l'effet du rayonnement solaire et du vent laisse aussi échapper de l'eau vers l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau ; ce phénomène est appelé "évaporation".

La transpiration de la plante et l'évaporation de l'eau du sol se déroulent en permanence simultanément. L'addition de ces deux phénomènes qui épuise progressivement la réserve d'eau du sol est dénommée "évapotranspiration".

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

## II.1. Les échanges ioniques et nutrition minérale des plantes

### II.1.1. Les propriétés physicochimiques du sol

#### a. Propriétés physiques

D'après *Schwartz and al. (2005)*, les propriétés physiques comprennent principalement trois groupes de détermination :

##### a-1. Granulométrie

L'analyse granulométrique (**AFNOR X 31-107**) détermine la répartition des particules minérales de la terre fine (fraction inférieure à 2mm) entre l'argile, les limons (fin et grossier) et les sables (fin et grossier). Dans le cas des sols calcaires, il est important de savoir si cette analyse a été réalisée avec ou sans décarbonatation préalable.

##### a-2. Matière organique

Elle est mesurée à partir de la teneur en carbone organique déterminée :

- Soit par la méthode Anne ou Walkley-Black (oxydation par le dichromate de potassium en milieu acide, à chaud ou à froid **NF ISO 14235**).
- Soit par combustion sèche en présence d'oxygène (**NF ISO 10694**).

La quantité de matière organique est ensuite estimée en multipliant la quantité de carbone total par 1,72 ou 2 selon les sols.

**a-3. Autres propriétés physiques** : effectuées selon les méthodes d'analyses suivantes :

- **Caractéristiques hydriques du sol**
- ✓ **Humidité** : par perte de poids après séchage à l'étuve (105°C, 24h) (**Mathieu and al. 2003**) ;
- ✓ **Densité apparente** : par la méthode du cylindre calibré (**Blake and Hartge 1986**) ;
- ✓ **Porosité** : dont le calcul s'est fait à partir de la densité apparente et de la densité réelle (méthode classique au pycnomètre) (**Mathieu and al. 2003**) ;
- ✓ **Perméabilité** : par la loi de Darcy, en se basant sur le coefficient de perméabilité **K** (**Grosbellet 2008**) ;
- ✓ **Rétention en eau** : par séchage à l'étuve (105°C, 24h) et soustraction des masses de sol sec et de sol saturé (**Petard 2003**).

- **Stabilité structurale** : selon la méthode de **Henin (1955)**, en se basant sur l'indice d'instabilité **Is**, afin de suivre son évolution au champ en fonction des conduites culturales et des apports organiques (**Mathieu and al. 2003**).

#### **b. Propriétés chimiques**

Selon **Schwartz and al. (2005)** ; **Dicova (1997)**, elles ont pour but d'évaluer, pour l'horizon travaillé de la parcelle, d'une part les conditions physicochimiques, d'autre part les quantités d'éléments minéraux ou éventuellement polluants, disponibles pour les cultures dans les conditions d'une exploitation agricole.

Elles comportent les déterminations suivantes :

- **Conditions physico-chimiques**

- ✓ **Capacité d'Echange Cationique (CEC)**

**Mesure à pH7 :CEC<sub>7</sub> (AFNOR X 31-130 ; méthode Metson)**

Dans les conditions déterminées de pH (pH=7), les cations de terre sont échangés avec les ions ammonium d'une solution molaire et neutre d'acétate d'ammonium. La quantité d'ions ammonium échangés est ensuite mesurée (le résultat est exprimé en  $\text{cmol.kg}^{-1}$ ).

Cette méthode surestime la CEC effective des sols acides, et sous-estime celle des sols calcaires.

**Mesure au pH du sol : CEC<sub>E</sub> ou CEC effective (AFNOR X 31-130, méthode au chlorure de co-baltihexamine)**

Cette méthode a l'avantage de donner la CEC réelle, au pH du sol en place, qui évolue avec les apports d'amendements basiques pour tendre vers la CEC<sub>7</sub> au fur et à mesure que le pH du sol remonte.

- ✓ **pH<sub>eau</sub> et pH<sub>KCl</sub>**

L'appréciation du pH au laboratoire (**NF ISO 10390**) est obtenue en mesurant le pH d'une suspension de sol dans l'eau déminéralisée (pH<sub>eau</sub>), ou dans une solution normale de chlorure de potassium (pH<sub>KCl</sub>), dans un rapport pondéral terre/solution égal à 1/5. Le chlorure de calcium est parfois utilisé à la place du chlorure de potassium.

Le pH<sub>KCl</sub>, toujours inférieur au pH<sub>eau</sub>, d'une unité de pH au maximum, informe sur le potentiel d'acidité du sol ; en particulier il déplace les ions aluminium du sol, qui peuvent être ainsi déterminés.

En sol sodique, pH<sub>eau</sub> et pH<sub>KCl</sub> sont identiques et voisins de 9.

- ✓ **Conductivité électrique (CE)**

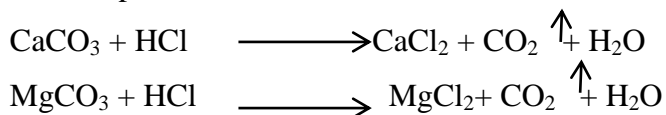
La phase liquide du sol est une solution contenant divers ions qui confèrent au sol une certaine conductivité électrique. Elle dépend également des minéraux et des constituants

organiques qui ont plutôt des propriétés isolantes. D'une façon générale, la conductivité électrique d'un matériau terreux dépend de sa composition, de sa structure, et de sa teneur en eau (**Calvet 2003**).

La détermination de la salinité d'un sol est fondée sur le principe de l'extraction d'un électrolyte dont on mesure la concentration en éléments dissous. Au laboratoire, l'électrolyte est extrait sous vide à partir d'un échantillon de sol préalablement séché à l'air, tamisé à 2 mm et porté à une teneur en eau donnée, celle-ci variant selon le mode de préparation de l'extrait. Une des techniques d'extraction couramment utilisée est l'extrait dilué : le rapport entre la quantité de sol et la quantité d'eau peut varier selon les laboratoires, mais il est en général de 1/5 : la masse d'eau ajoutée est égale à 5 fois la masse de sol (10g), soit un volume d'eau d'environ 50ml (**Montoroi 1997**).

#### ✓ **Calcaire**

**Le calcaire total** du sol (**AF ISO 10693**) est déterminé par attaque d'une quantité connue de terre par l'acide chlorhydrique. La réaction provoquée libère rapidement du dioxyde de carbone provenant de la dissociation des carbonates de calcium et/ou magnésium présents.



La teneur de calcaire total du sol est alors calculée à partir du volume de CO<sub>2</sub> dégagé. Suivant sa nature et son origine, le calcaire est reparti dans les différentes fractions granulométriques. Celui qui est présent dans la fraction inférieure à 20 µm, susceptible de se solubiliser facilement et d'être à l'origine d'une teneur en Ca<sup>+2</sup> élevée dans la solution du sol, correspond au **calcaire actif**. Celui-ci est mesuré globalement au moyen de l'oxalate d'ammonium (**méthode Drouineau-Galet AFNOR X 31-106**).

#### • **Offre alimentaire**

##### ✓ **Azote**

La mesure de l'**azote total (organique et ammoniacal)** est obtenue par une attaque sulfurique à chaud, en présence d'un catalyseur, de la terre fine et sèche. C'est la **méthode Kjeldahl (NF ISO 11261)**.

Les mesures des teneurs d'azote nitrique (N-NO<sub>3</sub>) et ammoniacal (N-NH<sub>4</sub>) sont réalisées par colorimétrie après extraction par une solution saline de KCl normal ou de CaSO<sub>4</sub> à saturation. Ce dosage est habituellement effectué sur un échantillon de terre fraîche, maintenu à une température inférieure à 4°C entre le prélèvement et l'analyse.

✓ **Cations échangeables  $K^+$   $Na^+$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$**

Les teneurs en cations échangeables sont mesurées, après extraction avec une solution d'acétate d'ammonium normale et neutre (**AFNOR X 31-108**), par spectrophotométrie d'émission ou d'absorption.

✓ **Phosphore extractible**

De nombreuses méthodes existent pour extraire le phosphore du sol, susceptible de participer à l'alimentation des cultures : **méthode Dyer (AFNOR X 31-160)**, **méthode Joret-Hebert (AFNOR X 31-161)**, **méthode Olsen (NF ISO 11-263)**...

La connaissance de la biodisponibilité du phosphore du sol peut être améliorée par la mesure du pouvoir fixateur : soit par la méthode Studer, soit par la **méthode Fardeau**.

✓ **Soufre,  $SO_3$  (méthode Scott)**

Quelques laboratoires mesurent le soufre disponible du sol en mettant en œuvre la **méthode Scott**, effectué sur le même échantillon de terre de celui qui est utilisé pour la mesure du reliquat azoté d'hiver. Cette méthode extrait une partie du soufre organique, réputée facilement disponible pour la plante, au moyen d'une solution de phosphate monopotassique  $KH_2PO_4$  0,016 M (**Scott 1981**).

✓ **Oligo-éléments, Fer, Manganèse, Cuivre, Zinc, Bore, Molybdène**

Le fer, le manganèse, le cuivre et le zinc disponible pour les cultures, sont évalués par une extraction à l'acétate d'ammonium avec EDTA (**AFNOR X 31-120**) ou par le DTPA seul (**AFNOR X 31-121**).

Le bore disponible est mesuré par extraction à l'eau bouillante (**AFNOR X 31-122**) et le molybdène par l'oxalate d'ammonium acide à pH 3,3 (**méthode de Griegg**). La mesure du cobalt disponible n'est pas généralement faite.

Toutes ces méthodes de mesure sont sensibles aux variations de disponibilité de ces éléments dans le sol, et mettent bien en évidence la politique d'apport appliquée sur la parcelle.

### **II.1.2. La capacité d'échange cationique**

La capacité des constituants d'un sol à piéger ou libérer les cations dépend du pH de ce sol. Il en résulte que la capacité d'échange cationique d'un sol peut varier dans le temps, en fonction des contraintes qui lui sont appliquées. Cette capacité d'échange, mesurée au pH du sol (capacité d'échange effective, notée  $CEC_E$ ) ou à divers pH standards ( $CEC_7$  mesuré à pH=7), est alors un indicateur pertinent de la qualité et de la fertilité des sols. En terre agricole, notamment lorsque les pratiques d'amendement ne compensent pas, dans la couche exploitée par les racines, les pertes engendrées par la lixiviation et les prélèvements des cultures, se produit une acidification progressive du sol entraînant une baisse de la capacité d'échange

effective. Cette situation n'est pas sans conséquence sur la libération d'impuretés métalliques potentiellement toxiques provenant d'origine diverses : boues d'épuration, produits phytosanitaires, fertilisants organiques (lisiers apportant Cu et Zn) ou minéraux (certains engrais phosphatés contenant du Cd), retombée atmosphériques. Ainsi la prise en compte de la charge variable est-elle essentielle pour comprendre la biodisponibilité pour la plante des éléments minéraux, qu'ils soient nutritifs ou toxiques. Enfin, la charge superficielle des constituants d'un sol est également nécessaire pour comprendre certaines de ces propriétés physiques (compacité, porosité, stabilité des agrégats, rétention en eau) ayant une incidence sur le développement microbien et plus globalement sur l'activité biologique. La prise en compte de la charge variable est donc indispensable pour raisonner la fertilité d'un sol dans toutes ses composantes, chimique, mais aussi physique et biologique (**Bourguignon and Bourguignon 1992 ; Dicova 1997**).

### **II.1.3. La formation du complexe argilo-humique et le mécanisme d'échange d'ions au niveau du sol**

Ce volet va englober les cours suivants :

- ✓ **Les phénomènes d'absorption et d'échange**
- ✓ **La capacité d'échange anionique**
- ✓ **Les conséquences du phénomène d'échange**

Et va être réalisé sous formes de plusieurs expériences et une observation d'un document (Figure 19) (**Kouyaté 2022**).

#### **Constat :**

Les échanges d'ions se font au niveau du sol ?

#### **Problème :**

Comment les échanges d'ions se font-ils au niveau du sol ?

Pour répondre à ce problème, nous allons émettre deux hypothèses

#### **Hypothèses :**

Peut-être que :

Les échanges d'ions se font au niveau du sol grâce à un complexe argilo-humique ;

Les échanges d'ions se font au niveau du sol suivant un autre mécanisme.

#### **Hypothèse I:**

Pour répondre à cette hypothèse, nous allons réaliser deux expériences :

##### **I-1. Présentation des expériences**

Ces expériences ont pour but de mettre en évidence la formation du complexe argilo-humique qui seront en deux volets :

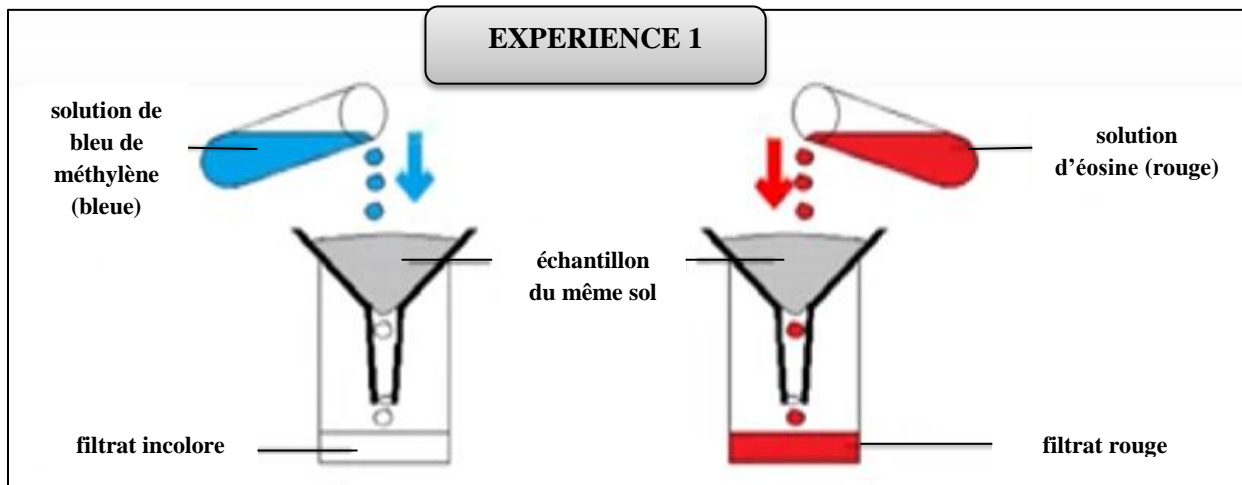
- **Expérience 1**

Dans la première expérience (Figure 13), on verse sur deux échantillons de la même terre placés dans des entonnoirs :

- *Premièrement* du bleu de méthylène qui doit sa couleur à des particules chargées positivement ;
- *Deuxièmement*, nous allons versés sur l'échantillon de terre de l'éosine dont les particules colorées sont chargées négativement.

Remarque: la solution de bleu de méthylène doit sa couleur bleue à la présence de cations.

La solution d'éosine contient quant à elle des anions.



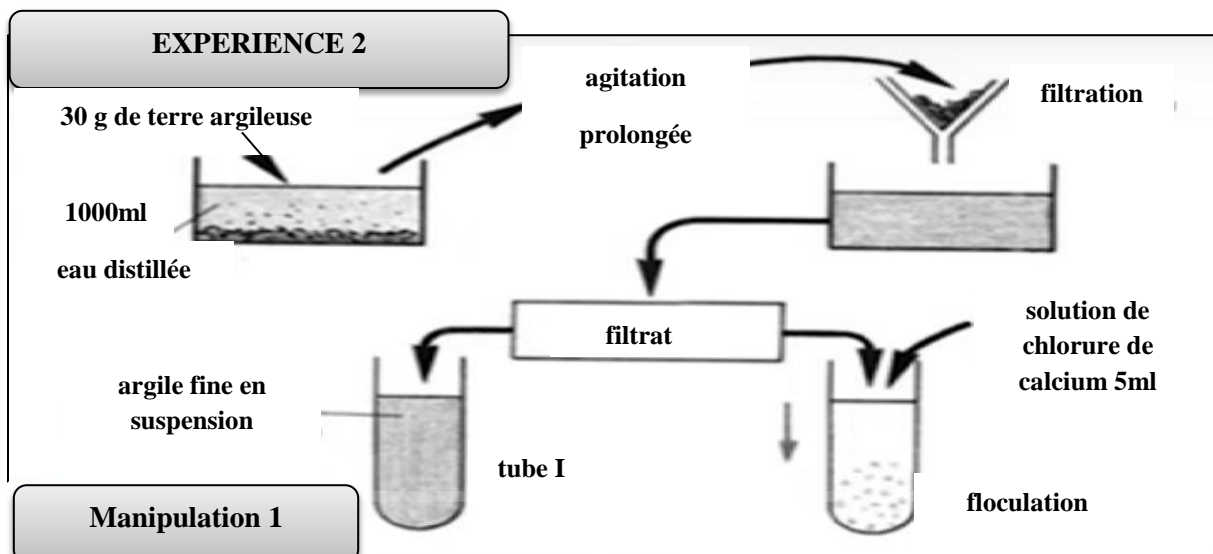
**Figure 13:** Expérience de mise en évidence des charges des particules d'argiles et d'humus (Kouyaté 2022)

- **Expérience 2**

Se fera en 3 manipulations

*Dans la première manipulation* (Figure 14):

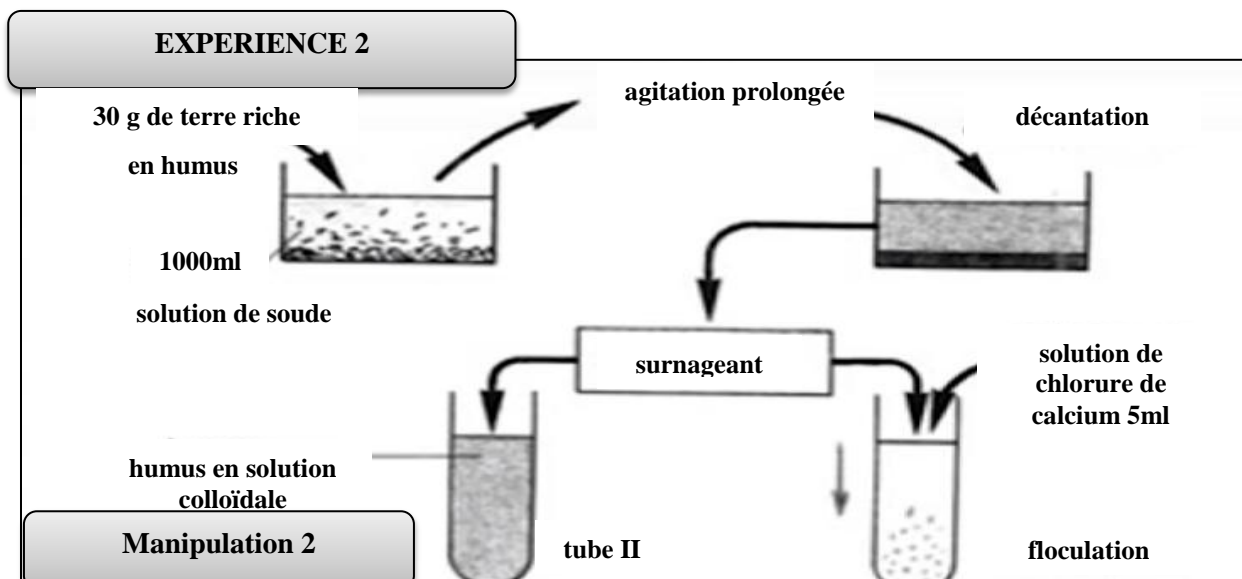
- ✓ Nous avons utilisé un cristalliseur contenant 100ml d'eau distillée et 30g de terre argileuse ;
- ✓ Après agitation pendant 15 minutes, on obtient un mélange homogène, on laisse puis décanter puis on filtre au-dessus d'un cristalliseur ;
- ✓ On verse ensuite une quantité de filtrat dans deux tubes, dans l'un des tubes on ajoute 5ml de la solution de chlorure de calcium et dans le deuxième on n'ajoute rien appelé « tube I ».



**Figure 14:** Flocculation des colloïdes argileux (Kouyaté 2022)

*Pour la deuxième manipulation* (Figure 15) :

- ✓ Nous avons utilisé un cristalliseur contenant 100ml de la solution de soude et 30g de terre riche en humus ;
- ✓ Après agitation prolongée, on laisse le mélange décanter puis on verse le surnageant dans deux tubes à essai ;
- ✓ Dans l'un des tubes, on ajoute 5ml de la solution chlorure de calcium et dans le deuxième appelé « tube II » on n'ajoute rien.

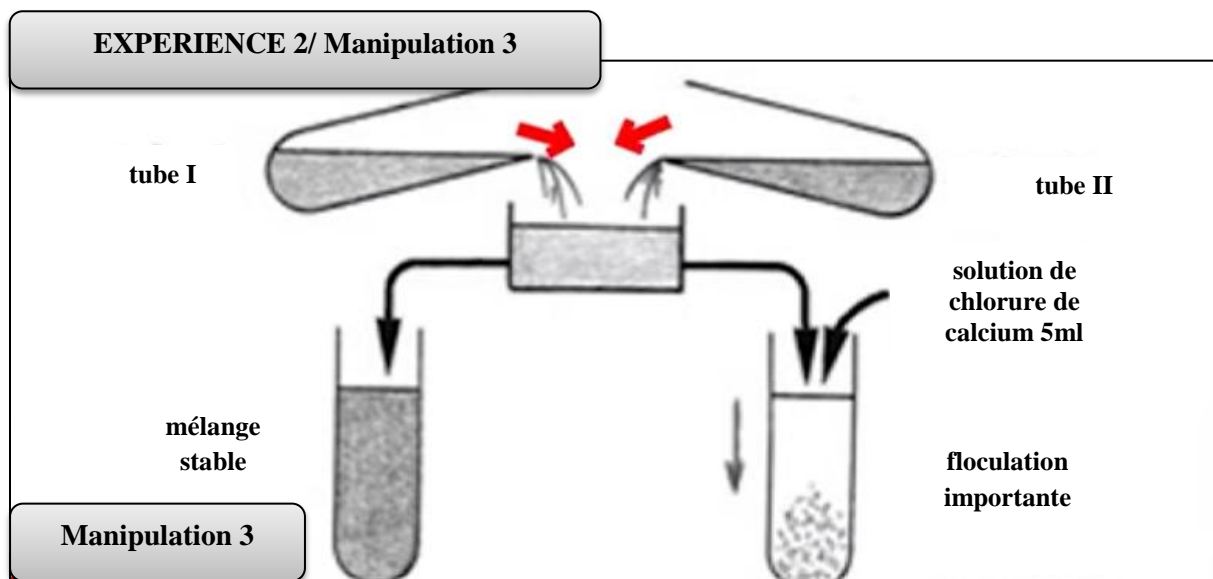


**Figure 15:** Flocculation des colloïdes humiques (Kouyaté 2022)

*Et pour la troisième manipulation* (Figure 16) :

- ✓ On verse les contenus du tube I et II dans un cristalliseur puis, on mélange ;
- ✓ Ensuite on verse une certaine quantité de ce mélange dans deux tubes à essai,

- ✓ Dans l'un de ces deux tubes, on ajoute de la solution de chlorure de calcium et dans l'autre tube, on n'ajoute rien.



**Figure 16:** Floculation des colloïdes argileux + colloïdes humiques (Kouyaté 2022)

### I-2. Résultats

#### **Expérience 1**

- Pour le premier tube : avec le bleu de méthylène (bleue) : le filtrat est décoloré ;
- Pour le deuxième tube : avec le rouge d'éosine (rouge) : le filtrat est coloré

#### **Expérience 2**

- Pour la première manipulation : nous avons une faible quantité de flocons ;
- Pour la deuxième manipulation : nous avons une faible quantité de flocons ;
- Pour la troisième manipulation : nous avons une importante quantité de flocons.

### I-3. Analyses

#### **Expérience 1**

Lorsqu'on verse du bleu de méthylène (couleur bleue) sur l'échantillon de terre argileuse ou humique, on obtient un filtrat de bleu de méthylène décoloré après filtration alors qu'avec le rouge d'éosine (couleur rouge), on obtient un filtrat d'éosine de couleur rouge.

#### **Expérience 2**

- Pour la première manipulation :

Lorsqu'on ajoute 5ml de chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) au filtrat, on obtient une floculation alors que dans le tube I qui n'a pas reçu le  $\text{CaCl}_2$ , l'argile fine reste en suspension.

- Pour la deuxième manipulation :

Lorsqu'on ajoute 5ml de  $\text{CaCl}_2$  au surnageant, on obtient une floculation alors que dans le tube II qui n'a pas reçu de  $\text{CaCl}_2$ , l'humus reste en suspension (solution colloïdale).

- Pour la troisième manipulation :

Lorsqu'on ajoute 5ml de chlorure de calcium à la première moitié du mélange des tubes I et II, on obtient une floculation importante alors que le mélange est stable au niveau de la deuxième moitié à laquelle on n'a pas ajouté de  $\text{CaCl}_2$ .

#### **I-4. Interprétation**

- **Première étape**

Le bleu de méthylène se décolore car ses particules chargées positivement ont été retenus par l'argile ou par l'humus.

L'éosine conserve sa couleur rouge parce que ses particules chargées négativement n'ont pas été retenues par l'argile ou par l'humus.

*La rétention des particules chargées positivement et le passage des particules chargées négativement à travers la terre argileuse ou humique montre que les particules d'argiles ou d'humus sont chargées négativement ou électronégatives.*

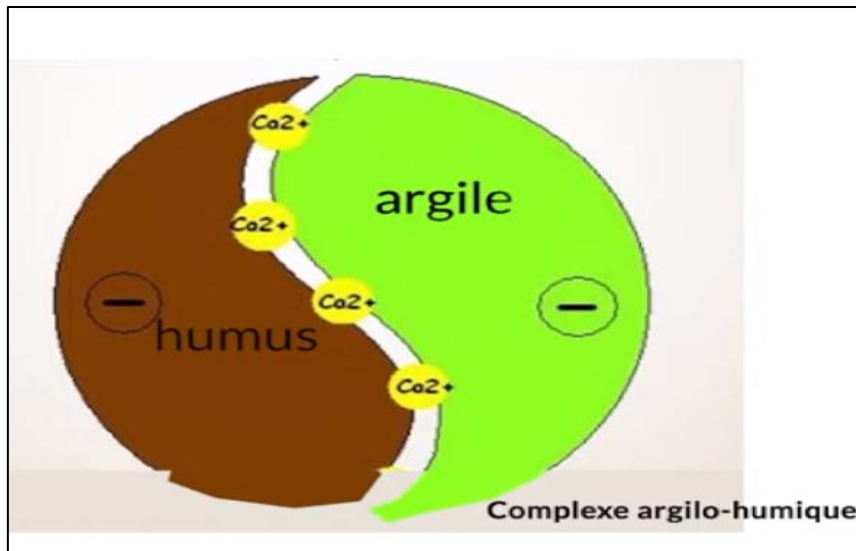
- **Deuxième étape**

L'apparition de flocons dans les deux premières manipulations de l'expérience en présence de  $\text{CaCl}_2$  est due aux ions  $\text{Ca}^{2+}$ . *En effet, les ions  $\text{Ca}^{2+}$  provoquent la floculation des colloïdes argileux ou humiques.*

- **Troisième étape**

La floculation importante dans la manipulation montre que les ions  $\text{Ca}^{2+}$  associent d'une part avec les particules d'argiles et d'autre part avec les particules d'humus.

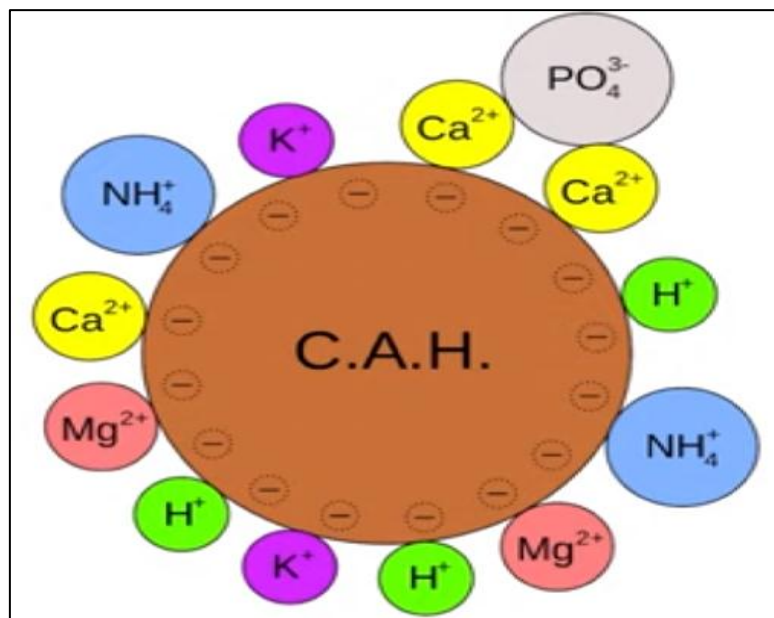
*Cette association est rendue possible par l'intermédiaire des cations  $\text{Ca}^{2+}$  qui forme un pont dit un pont calcique entre l'argile et l'humus, cet ensemble constitue le complexe argilo-humique (Figure 17).*



**Figure 17:** Complexe argilo-humique (pont calcique entre l'argile et l'humus) (Kouyaté 2022)

Dans cette association : argile-humus, les micelles d'humus forment autour de celles de l'argile une enveloppe protectrice.

*Les charges négatives portées par les colloïdes fixent les ions d'une solution du sol tout d'abord les cations puis les anions, donc le complexe argilo-humique peut fixer plusieurs minéraux, c'est le pouvoir adsorbant (Figure 18).*



**Figure 18:** Pouvoir adsorbant (Kouyaté 2022)

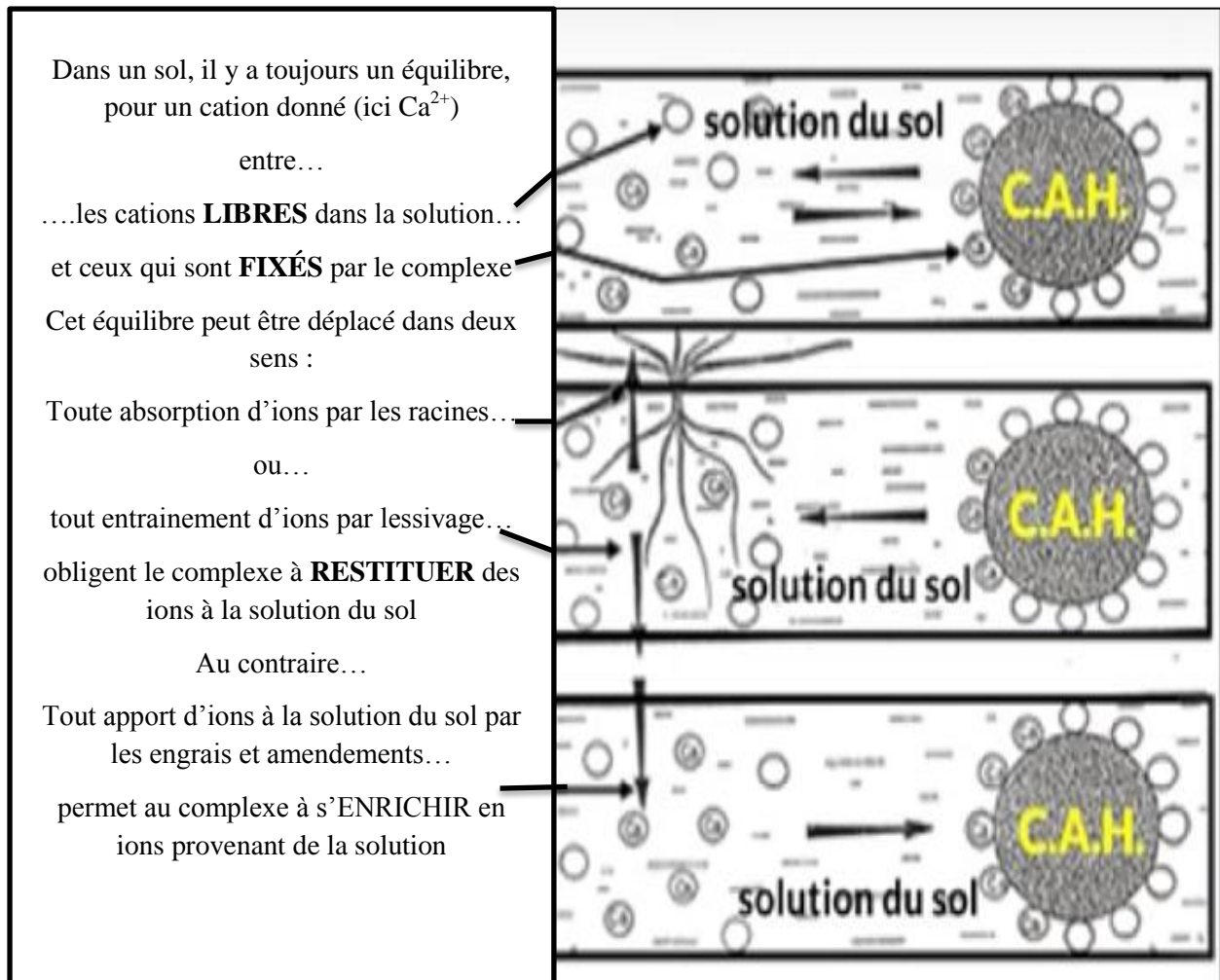
### 1-5. Conclusion

Les échanges des ions se font au niveau du sol grâce au complexe argilo-humique.

Après la vérification de la première hypothèse, nous allons aborder la deuxième hypothèse, pour vérifier cette dernière nous allons observer un document.

### II-1. Observation

On observe un document montrant les échanges ioniques entre le complexe argilo-humique et la solution du sol (Figure 19).



**Figure 19:** Echange d'ions entre le Complexe Argilo-Humique et la solution du sol (Kouyaté 2022)

### II-2. Résultats

- Dans le sol, il y a une présence d'une solution ; complexe argilo-humique et les ions libres ou fixés.
- Existence d'un équilibre entre les ions de la solution du sol et ceux du complexe argilo-humique, cet équilibre peut être déplacé dans les deux sens.

### II-3. Observations

Il y a un échange d'ions entre le complexe argilo-humique et la solution du sol. Lorsque les plantes absorbent les ions de la solution du sol, le complexe argilo-humique libère des ions pour les remplacer.

Lorsqu'on apporte à la solution du sol des ions (apport d'engrais ou d'amendements), le complexe argilo-humique fixe ces ions.

Il existe un équilibre permanent entre les ions de la solution du sol et ceux du complexe argilo-humique.

#### **II-4. Interprétation**

- Dans le sol, le complexe argilo-humique fixe à sa surface des cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ...) provenant de la solution du sol, c'est un complexe adsorbant.
- On désigne par le complexe adsorbant l'ensemble des colloïdes (composés humiques et argileux) dotés de charges négatives et susceptibles de retenir les cations.
- Toute modification de la composition ionique de la solution du sol entraîne un changement de l'équilibre par des échanges.
- Le changement peut survenir lorsque les racines des plantes absorbent les ions ou bien quand les ions sont entraînés par lessivage. Dans ce cas, il y a déficit d'ions dans la solution du sol.
- Le changement peut aussi survenir lorsqu'il y a un apport d'ions à la solution du sol par des engrais ou des amendements. Dans ce cas, il y a un excès d'ions dans la solution du sol. Pour rétablir l'équilibre ionique, le complexe argilo humique fixe des ions.

#### **II-5. Conclusion**

Les échanges d'ions au niveau du sol se font entre le complexe argilo-humique et la solution du sol.

#### **Conclusion générale**

Les échanges d'ions au niveau du sol se font grâce au complexe argilo-humique qui interagit avec la solution du sol.

**Exercice :** Répondre par vrai ou faux

- Le complexe argilo-humique est constitué uniquement d'argile et d'humus (faux).
- Dans le complexe argilo-humique, les micelles d'humus forment une enveloppe autour de l'argile (vrai).
- Les ions  $\text{Cl}^-$  peuvent former des ponts entre les particules d'argile et d'humus (faux).
- Le complexe argilo-humique fixe seulement les cations de la solution du sol (faux).
- Le complexe argilo-humique fixe des ions en cas de déficit dans la solution du sol (vrai), car il fixe des cations puis des anions.

## **II.2. Les éléments nutritifs dans le sol**

### **II.2.1. Notions de fertilité du sol**

Selon la norme **AFNOR X31-006**, la notion de fertilité peut être définie comme suite : « la fertilité est un jugement global de valeur sur la qualité d'un milieu nécessaire à la satisfaction de la production végétale ». La notion de fertilité désigne l'aptitude culturale (**Boiffin and Sébillotte 1982**).

D'après **Dicova (1997)**, les agronomes ont distingués trois composantes essentielles pour la notion de fertilité :

- Une composante chimique : aptitude du sol à fournir des éléments nutritifs disponibles en quantités suffisantes pour l'élaboration du rendement ;
- Une composante physique : plus ou moins grande facilité à créer et/ou maintenir un état physique du sol adapté au système de culture pratiqué.
- Une composante biologique : influence sur les êtres vivants plus ou moins utiles ou nuisibles à la production végétale. Pour ce qui nous concerne, ils influent sur l'état physique du sol et les quantités de nutriments mises à disposition de la plante.

### **II.2.2. 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... (**Dicova 1997**).

#### **a. 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 (N, P, K, Ca, S, Mg, oligo-éléments...) contenus dans la solution du sol sous forme d'ions (Figure 19). Le principal élément nutritif intervenant dans la nutrition végétale est le carbone, tiré du dioxyde de carbone de l'air par la majorité des plantes, grâce au processus de la photosynthèse. Les plantes non chlorophylliennes qui n'utilisent pas la photosynthèse dépendent en général d'autres plantes pour leur nutrition carbonée. C'est le cas des plantes parasites.

La nutrition (Figure 20) fait appel à des processus d'absorption de gaz et de solutions minérales soit directement dans l'eau pour les végétaux et les plantes aquatiques, soit dans le cas des végétaux vasculaires dans la solution nutritive du sol par les racines ou dans l'air par les feuilles (**Schwartz et al. 2005**).

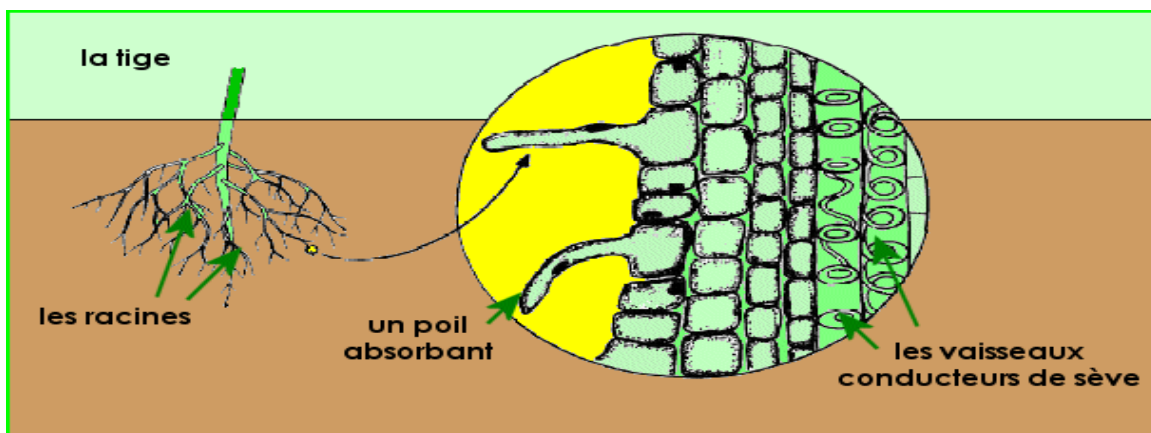


**Figure 20:** Les besoins des végétaux (<https://soutien67.fr/svt/vegetaux/nutrition.htm>)  
Tous les éléments nutritifs que la plante utilise proviennent du sol, de l'air, et de l'eau.

**b. Comment se nourrissent les végétaux ?**

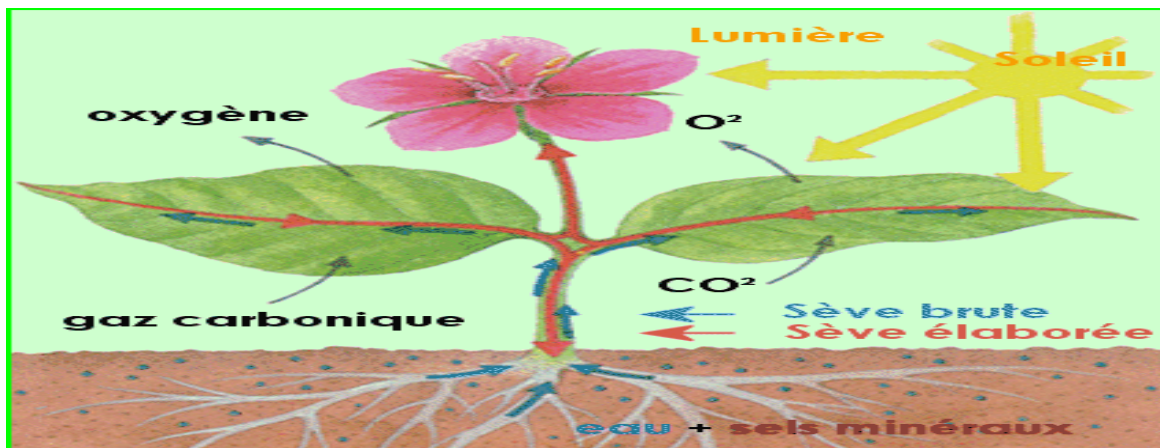
Les racines, la tige et les feuilles sont les organes de nutrition des végétaux vascularisés : ils constituent l'appareil végétatif.

Par les poils absorbants de ses racines (Figure 21), la plante absorbe la solution du sol, c'est-à-dire l'eau et les sels minéraux, qui constituent la sève brute, ou sève minérale.



**Figure 21:** Le rôle des racines dans la nutrition des végétaux  
(<https://soutien67.fr/svt/vegetaux/nutrition.htm>)

Grâce à la lumière, c'est par les feuilles, là où la photosynthèse s'effectue, que la plante reçoit des acides aminés et des sucres qui constituent la sève élaborée (Figure 22).

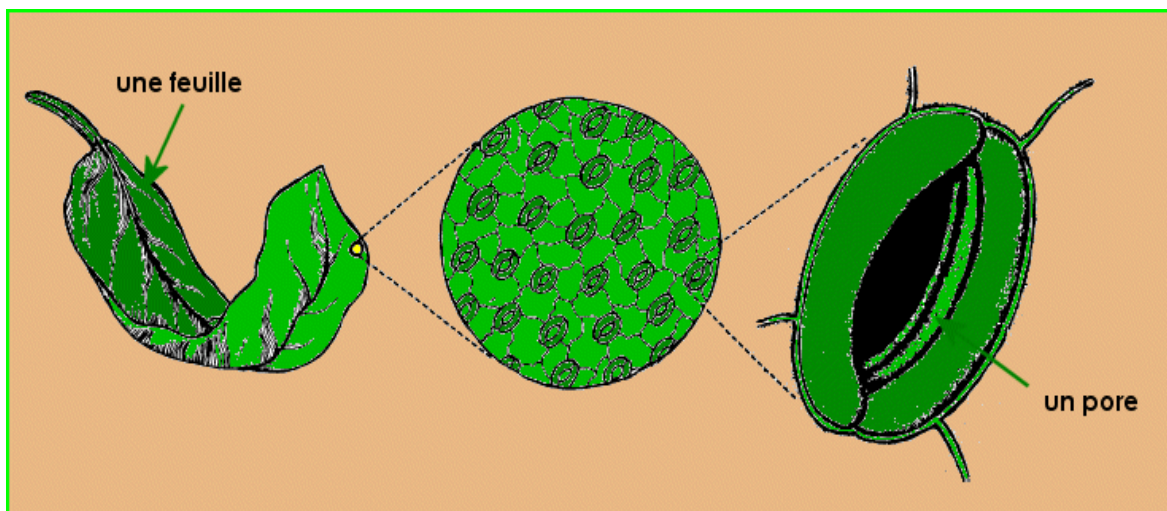


**Figure 22:** La photosynthèse (<https://soutien67.fr/svt/vegetaux/nutrition.htm>)

La photosynthèse est l'ensemble des réactions qui permettent aux plantes vertes, de créer de la matière en utilisant l'énergie lumineuse du soleil, dans les conditions naturelles.

Au cours de ce processus, les feuilles vertes captent du gaz carbonique et rejettent de l'oxygène.

Sous les feuilles, les stomates permettent l'évaporation d'une partie de l'eau absorbée et l'absorption du dioxyde de carbone (Figure 23).

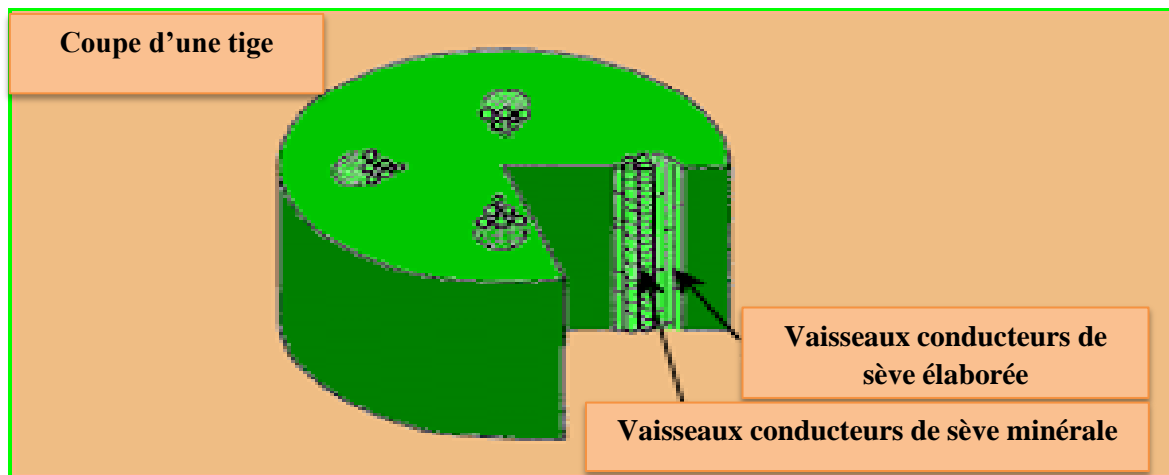


**Figure 23:** La respiration grâce aux feuilles

(<https://soutien67.fr/svt/vegetaux/nutrition.htm>)

Cette perte crée une aspiration de la sève minérale qui monte continuellement des racines et apporte ainsi à la plante l'eau et les sels minéraux indispensables à la plante.

C'est au niveau de la tige que les deux types de sève circulent : la sève brute par le xylème et la sève élaborée par le phloème (Figure 24).



**Figure 24:** Coupe d'une tige

(<https://soutien67.fr/svt/vegetaux/nutrition.htm>)

D'après **Schwartz *and al.* (2005)**, la nutrition végétale comprend :

- La nutrition minérale : prise d'eau et de sels minéraux dans le sol pour constituer la sève minérale (sève brute)
- La nutrition carbonée : prise de gaz carbonique dans l'air et utilisation de la sève minérale pour constituer la sève élaborée à l'aide de la photosynthèse.

D'après **Morel (1996)**, pour ce qui concerne la nutrition minérale des plantes, la notion de fertilité d'un sol correspond à la fertilité avec laquelle, pendant toute la durée de la culture, le système racinaire peut :

- Bénéficier à partir de ce sol, en quantités suffisantes et au moment opportun, des différents facteurs de la croissance végétale : chaleur, eau, éléments minéraux nécessaires à la plante composés organiques favorisant la croissance ;
- Avoir une croissance suffisante pour prospecter des nouvelles zones du sol appauvries par ses propres prélèvements.

Ceci nécessite :

L'existence de différentes sources correspondant, pour chacune d'elle, à un facteur de croissance ;

Le transfert des facteurs de croissance vers les surfaces racinaires ;

Des conditions d'état structural et hydrique favorables à la croissance et à l'activité racinaire.

### **II.2.3. Les éléments majeurs (N, P, K) et les oligo-éléments**

Selon **Dicova (1997)** ; **Schwartz *and al.* (2005)** ; **FERTIAL (2017)**, la grande majorité des plantes exigent 16 éléments nutritifs pour leur développement, provenant de l'air et du sol qui les entourent.

- Les éléments ci-après proviennent :
  - De l'air : Le carbone(C) sous forme de CO<sub>2</sub> (anhydride carbonique) ;
  - De l'eau : L'hydrogène (H) et l'oxygène (O) à l'état d'eau (H<sub>2</sub>O) ;
  - Du sol et des engrais minéraux et organiques :

Des éléments de base (macro éléments) : L'azote (N), le phosphore (P), le potassium(K)

Des éléments secondaires : Le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le soufre (S).

Des oligo-éléments : Le fer (Fe), le manganèse (Mn), le zinc (Zn), le cuivre(Cu), le bore (B), le molybdène (Mo).

➤ **Les macroéléments ou éléments de bases NPK**

• **L'azote (N)**

Selon **Dicova (1997)** ; **Schvartz and al. (2005)** ; **FERTIAL (2017)**, l'azote est un élément majeur pour la fertilisation des végétaux, il est prélevé dans le sol sous forme soit nitrique (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) soit ammoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Il a plusieurs rôles dans le développement de la plante. Il est le moteur de la croissance végétale et contribue au développement végétatif de toutes les parties aériennes de la plante, feuilles, tiges et formation des graines d'où sa contribution à l'amélioration du rendement.

Par ailleurs, c'est en consommant les matières végétales que les animaux herbivores trouvent l'essentiel de l'azote dont ils ont besoin pour leur croissance, l'entretien de leur organisme et le métabolisme pour l'eau.

Mises à part les légumineuses, les plantes s'alimentent à partir de l'azote minéral du sol, essentiellement sous forme de nitrate. Ces nitrates résultent de la minéralisation d'éléments organiques (humus, déjections animales...) ou de l'apport d'engrais minéraux azotés (sulfate d'ammoniaque, ammonitrates, urée, ammoniac anhydre...). Les nitrates, très solubles dans l'eau, peuvent être facilement entraînés en profondeur par les flux successifs d'eau (pluies, orages, irrigation excessive...). En période sèche, si leur localisation n'est pas trop profonde, une partie peut remonter vers les racines, avec l'eau, par capillarité.

Rappelons que, contrairement aux autres plantes, les légumineuses sont capables d'absorber l'azote de l'air (N<sub>2</sub>) grâce à un système racinaire muni de nodosités où se fixent des bactéries ou rhizobium. Le rhizobium fournit la nitrogénase qui effectue la fixation d'azote N<sub>2</sub> dans les nodosités et fournit à la plante plus de 90% de l'azote qu'elle fixe.

Après la mort des plantes, l'azote organique stocké dans les nodosités su système racinaire des légumineuses est restitué au sol en se transformant peu à peu en azote minéral.

- **Le phosphore (P)**

Selon **Dicova (1997)** ; **Schwartz and al. (2005)** ; **FERTIAL (2017)**, le phosphore ( $\text{PO}_4\text{H}^{2-}$ ) est un élément constituant de la matière vivante. Il intervient notamment dans le fonctionnement physiologique des plantes (respiration, photosynthèse...), dans les processus de croissance et de précocité et dans la résistance aux maladies.

Les plantes contiennent de 0,4 à 1 % de phosphore. Le phosphore présent dans la solution du sol est issu de la désorption du pool phosphate-sol, de la minéralisation de la matière organique et de l'apport d'engrais minéraux phosphatés.

C'est dans leur alimentation, notamment fourragère, que les animaux puisent le phosphore indispensable à leur organisme (squelette, processus de la digestion et du métabolisme, fertilité et production du lait par exemple).

- **Le potassium (K)**

Selon **Dicova (1997)** ; **Schwartz and al. (2005)** ; **FERTIAL (2017)**, la matière sèche des végétaux contient de 0,5 à 7% de potassium. Celui-ci se trouve surtout sous forme minérale dissoute dans la solution du sol, sous forme échangeable, dans le complexe argilo-humique. Le potassium favorise la synthèse et le stockage des glucides, réduit la transpiration et participe à la formation des protéines. Une part importante des réserves de potassium du sol, exportée avec les végétaux récoltés, doit être restaurée par apport d'engrais potassiques. Le potassium contenu dans les aliments fourragers contribue au développement et au fonctionnement musculaire des animaux et intervient dans de nombreux systèmes enzymatiques, mais il est rejeté en partie par les urines.

- **Les éléments secondaires**

- **Le calcium (Ca)**

Selon **Dicova (1997)** ; **Schwartz and al. (2005)** ; **FERTIAL (2017)**, le calcium est un aliment des plantes, qui en contiennent de 0,01 à 4,5% (en % de CaO dans la matière sèche), principalement assimilable sous la forme de carbonate de calcium. Le calcium joue un rôle physiologique très important (constituant des parois cellulaires, neutralisant antitoxique, stimulant du système racinaire...). Si les réserves du sol sont en général suffisantes pour satisfaire les besoins des plantes, il peut être indispensable d'apporter du calcium sous la forme d'amendements calcaires : chaux vive agricole, chaux éteinte, craie, marne, calcaire marins...pour corriger le pH du sol et améliorer le fonctionnement du complexe argilo-humique.

- **Le soufre (S)**

Selon **Dicova (1997)** ; **Schwartz and al. (2005)** ; **FERTIAL (2017)**, le soufre intervient dans la synthèse des protéines et dans la composition d'enzymes et de vitamines. Son assimilation par les plantes s'effectue sous la forme de sulfate  $SO_4$  par le système racinaire et, dans une moindre mesure, sous la forme d'anhydride sulfureux atmosphérique ( $SO_2$ ) par leurs stomates.

Les apports complémentaires peuvent être réalisés en épandant soit certains engrais complexes contenant du soufre, soit du sulfate de chaux.

- **Le magnésium (Mg)**

Selon **Dicova (1997)** ; **Schwartz and al. (2005)** ; **FERTIAL (2017)**, le magnésium est un constituant de la chlorophylle des plantes ; il participe au transfert du phosphore vers les graines et à l'élaboration des sucres, protéines et vitamines. Les carences de magnésium se manifestent, selon les végétaux, par des chloroses plus ou moins prononcées et le dessèchement des feuilles les plus âgées.

Le magnésium est apporté soit en combinaison avec des amendements calciques (chaux magnésienne vive, chaux magnésienne éteinte), soit en combinaison avec des engrais minéraux, soit par pulvérisation de solutions (sulfate, oxyde de nitrate de magnésie).

➤ **Les oligo-éléments**

Selon **Dicova (1997)** ; **Schwartz and al. (2005)** ; **FERTIAL (2017)**, il s'agit d'éléments entant en très faible quantité dans la constitution des végétaux. Malgré ces très faibles quantités, ils jouent un rôle important dans la vie végétale et leur disponibilité insuffisante conduit à des carences plus en moins graves.

- **Le bore (B)**: Qui permet un accroissement de la cellulose.
- **Le cuivre (Cu)**: Qui aide à absorber l'azote.
- **Le fer (Fe)**: Sans lequel les plantes ont du mal à synthétiser la chlorophylle.
- **Le molybdène (Mo)**: Qui aide à l'assimilation de la potasse.
- **Le zinc (Zn)**: Qui favorise le développement de la plante.

Remarque : les plantes ont besoin de quantités relativement importantes en éléments de base. L'azote, le phosphore et le potassium sont donc les éléments qu'il faut ajouter le plus souvent aux sols pauvres ou épuisés par des récoltes intensives, et se succédant sans jachère.

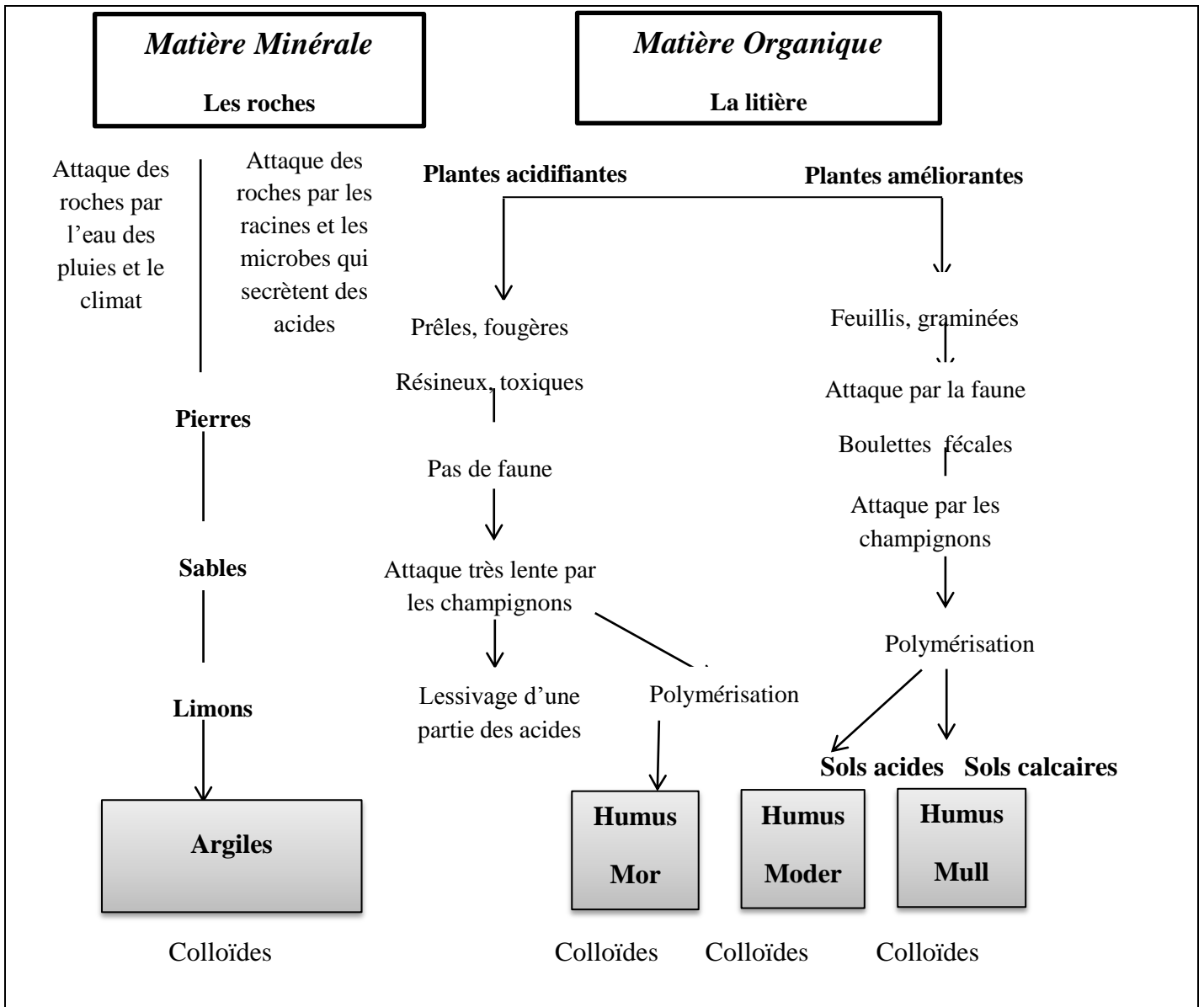
Les éléments secondaires et les oligo-éléments se trouvent habituellement en quantité suffisante dans le sol, et ne devraient être ajoutés qu'en cas de constatation de carence.

## **II.3. Pédogénèse et classification**

### **II.3.1. Pédogénèse**

La Figure 25 nous montre comment se former les sols. Au départ il faut des composés minéraux provenant de la roche mère et formés essentiellement de silice, d'oxygène, d'hydrogène, de fer et d'aluminium, et des composés organiques provenant des cadavres de plantes et d'animaux, la litière. Cette litière est majoritairement formée de carbone, d'oxygène, d'hydrogène et d'azote. Ces composés minéraux et organiques, apparemment incompatibles vont se transformer, sous l'influence de la vie du sol et du climat, en composés colloïdaux, les argiles et les humus qui vont s'unir pour former le complexe argilo-humique (CAH) **(Bourguignon and Bourguignon 1992)**.

Pour former un sol il faut donc ces deux composés : l'un minéral, l'autre organique. Le sol est donc le fruit d'une synergie entre les argiles provenant de la roche mère et les humus provenant des débris organiques. Mais comment argile et humus font-ils pour s'unir ? Pour expliquer cela, il nous faut introduire la notion de colloïdes, petites particules chargées électriquement sur leur pourtour, qui peuvent se disperser et rester en suspension dans un liquide polaire. Or, l'eau est justement un liquide de ce type, c'est-à-dire constitué de molécules dans lesquelles les électrons ont tendance à être plus attirés par le noyau d'oxygène que par les deux noyaux d'hydrogène. Il se crée alors une charge négative vers un bout de la molécule et positive à l'autre bout. Vers ce pôle positif, les colloïdes électronégatifs que sont les argiles et les humus vont être attirés, restant ainsi faiblement liés aux molécules d'eau. On comprend alors que si la formation des sols n'aboutissait qu'à des colloïdes argileux ou humiques, ceux-ci seraient entraînés dans l'eau avec laquelle ils seraient liés **(Bourguignon and Bourguignon 1992)**.



**Figure 25 : La pédogénèse (Bourguignon and Bourguignon 1992)**

Pour pouvoir échapper à l'emprise de l'eau, ces colloïdes doivent s'attacher à d'autres pôles positifs que ceux de l'eau. Or, c'est ce qu'il se passe dans le sol, car l'altération de la roche mère libère des ions positifs, comme le calcium, le magnésium, le fer et l'aluminium qui vont alors servir de pont d'attache entre ces particules chargées négativement que sont les argiles et les humus. Le CAH ainsi formé précipite et résiste alors à l'érosion de l'eau.

Les figures 25 et 28 nous aident à comprendre la formation de ce milieu naturel autonome et complexe qu'est le sol à partir de ces matériaux très cohérents que sont la roche et les débris vivants.

Cela nous amène à parler des facteurs qui participent à l'altération des roches et à la décomposition de la litière. Ces facteurs se séparent en deux grands groupes : les facteurs physico-chimiques et les facteurs biologiques.

#### **II.3.1.1. Les facteurs physicochimiques de la pédogénèse**

- **La température**

D'après **Bourguignon and Bourguignon (1992)**, Toute augmentation de la température de 10°C multiplie la vitesse de réactions chimiques par trois. On comprend alors que les roches soient attaquées plus vite à l'équateur qu'aux pôles. Il en est de même pour la litière, celle-ci se décompose lentement en haut des montagnes et s'accumule en couches épaisses alors que sur le sol des forêts tropicales la litière est très mince du fait de la vitesse de sa décomposition.

- **La pluviométrie**

Plus celle-ci est abondante plus la décomposition des roches et des litières sera rapide, donc la dureté des roches joue un rôle important sur la vitesse de formation des sols.

On peut citer d'autres facteurs tel que le relief ou le type de végétation qui pousse sur un sol agissant sur la formation des sols.

Les racines et les microbes prélèvent dans les roches les éléments dont ils ont besoin à savoir, la potasse, le phosphore, le soufre, le calcium, le magnésium, etc. Par contre, il y a cristallisation de la silice, du fer et de l'aluminium en silicates de fer et d'alumine, qui sont des argiles, par exemple : les Kaolinites, les Smectites, les Chlorites...etc.

Remarque : Les phénomènes qui entraînent la formation des sols se regroupent en trois types : décomposition, migration, accumulation et le résultat de ces phénomènes sera la maturité du sol c'est-à-dire sa constitution en strates, appelés horizons.

Chaque type de sol possède son profil, c'est-à-dire sa succession d'horizons, de la roche mère jusqu'à la surface (Figure 4).

#### **II.3.1.2. Les stades de formation du sol**

Les stades de formation du sol dépendent de l'interaction entre facteurs climatiques et biologiques :

Nous avons plusieurs types de terre : argileuse, sableuse, calcaire, humifère, etc. Cette différence dépend de la nature de la roche mère mais aussi des facteurs que subit la roche mère : l'érosion, facteurs chimiques, facteurs mécaniques...

- a. Description des différentes couches qui constituent le sol**

D'après la Figure 26, le sol est constitué par des couches successives appelées horizons :

Nous avons à la surface : la *végétation* puis la *litière*, l'*humus*, la *couche minérale* qui constituent le *sol* et enfin le *sous-sol*.

## La litière

Il s'agit de matière organique fraîche qui se transforme ensuite en humus (des feuilles mortes, débris de bois, bois mort, excréments, cadavres...), ces milieux particuliers diversifient la surface du sol et peuvent abriter une faune spécialisée.

## L'horizon A

Il est situé juste sous la litière, ou en surface du sol en son absence, c'est un horizon organo-minéral, contient un peu de matière organique humifiée, à laquelle il doit sa couleur sombre (noire, grise ou brune selon le cas).

## L'horizon E

Il est appauvri en constituants tels que les argiles ou le fer. Pour cette raison, il a toujours des teintes plus pales que les horizons qui l'entourent.

## L'horizon B

Il est enrichi en argile, matière organique, aluminium ou fer. Dans les podzols, on les appelle (BP) : lorsqu'ils sont enrichis en matière organique, ils sont noirs (BPh), enrichis en fer, ils ont une teinte rouille (BPs).

## L'horizon C

C'est l'horizon d'altération de la roche mère. La structure est encore très marquée par la géologie, mais les roches commencent à se transformer.

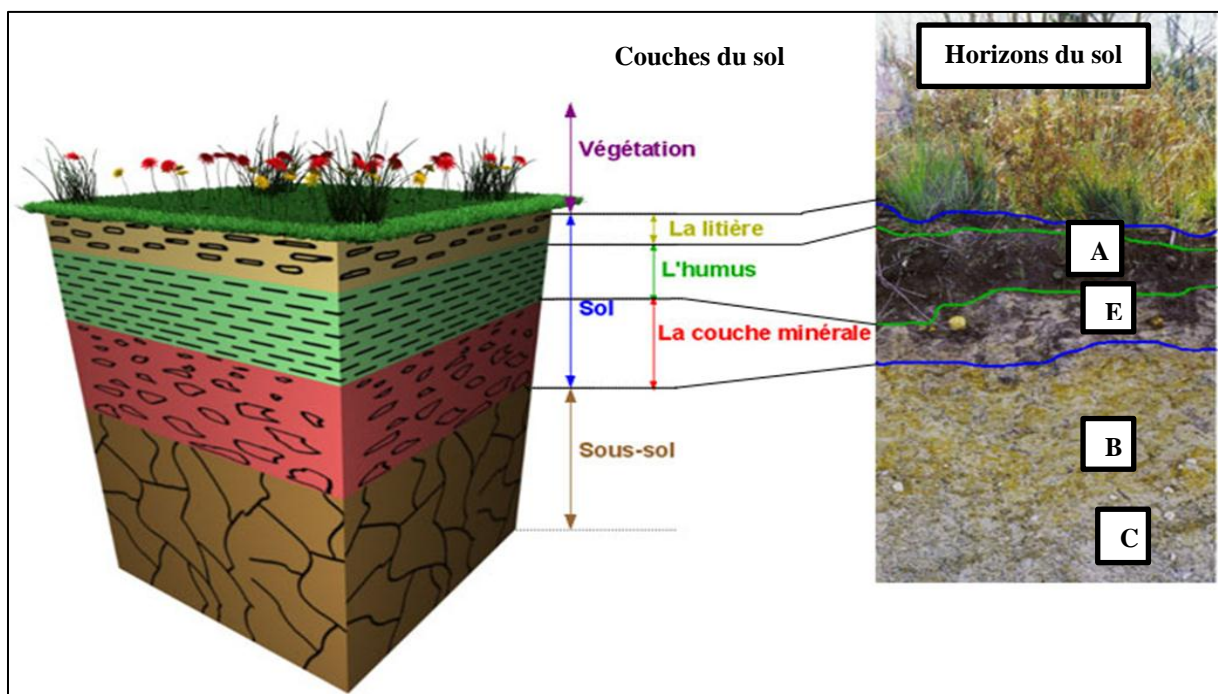


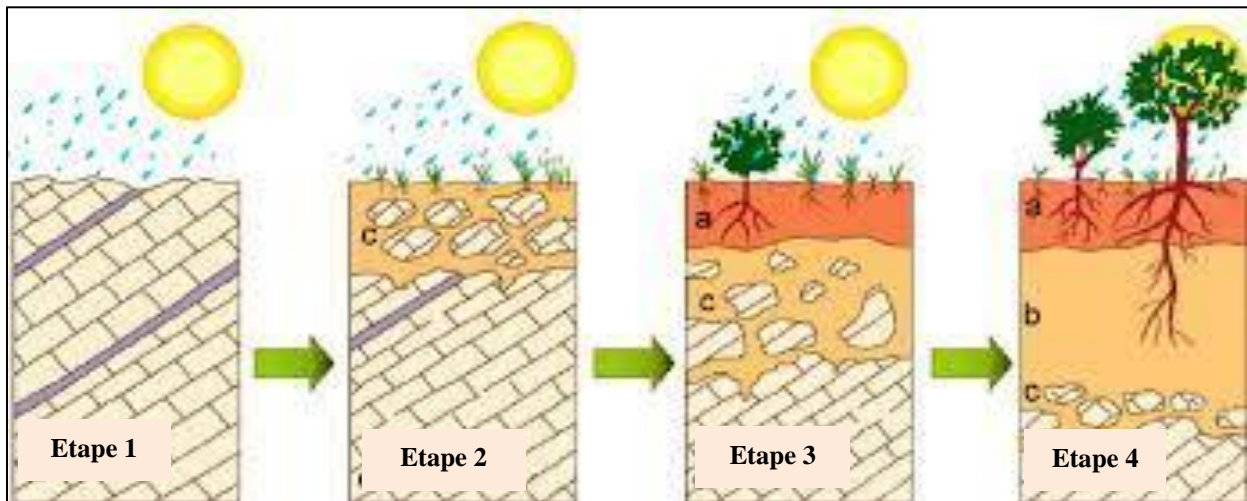
Figure 26: Constitution du sol

(<https://collembolles.fr/biotopes/26-processus-de-formation-des-sols.html>)

## b. Les étapes de la pédogénèse

Selon **Bourguignon and Bourguignon (1992)**, la formation des sols ou pédogénèse (Figure 27) est un phénomène lent et complexe qui fait intervenir des processus physiques, chimiques et biologiques.

Il est conditionné par la nature de la roche mère, l'activité des êtres vivants présents dans le sol et les facteurs climatiques (température, pluviométrie) :



**Figure 27:** Les étapes de la pédogénèse

(<https://collembolles.fr/biotopes/26-processus-de-formation-des-sols.html>)

### **Étape 1**

La roche mère est exposée à la surface. Elle va subir des altérations résultant de différents agents comme l'eau, le vent,...qui vont conduire à sa fragmentation (action mécanique) et à sa dissolution et hydrolyse (action chimique) des eaux de pluies acides.

### **Étape 2**

La surface altérée de la roche mère va être colonisée par les végétaux. Les racines vont s'incruster dans la roche, accélérant ainsi son altération. Lorsque la végétation meurt, elle se pose en surface et se décompose en matière organique : la litière puis l'horizon humifère se forment.

### **Étape 3**

L'altération de la roche est de plus en plus profonde. Les horizons se différencient. L'horizon humifère est de plus en plus profond, ce qui favorise le développement de la végétation.

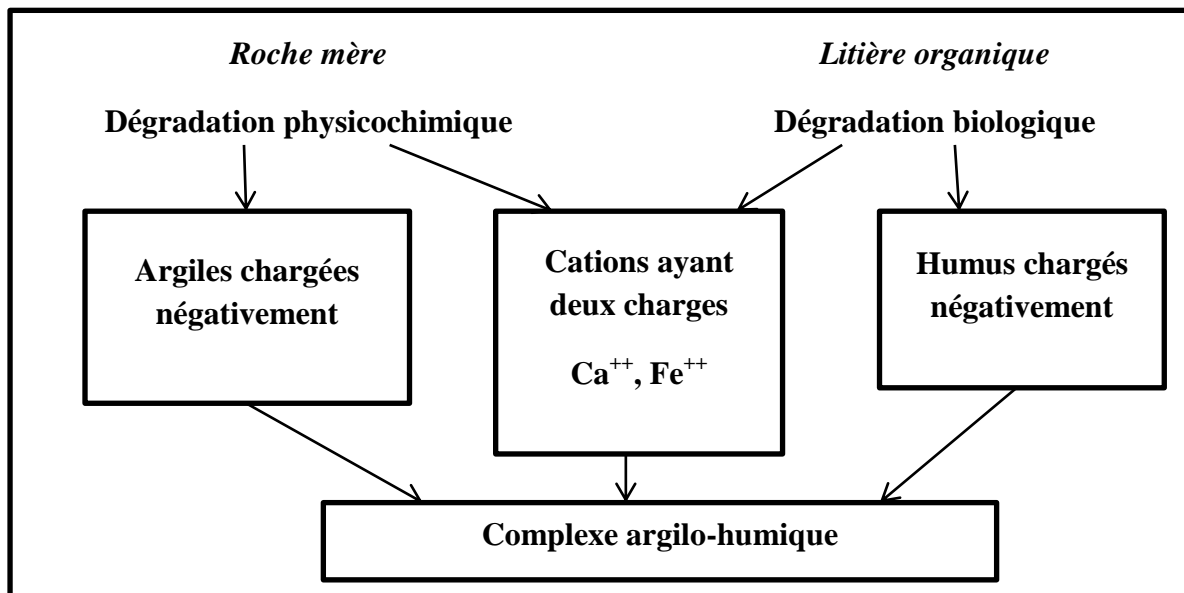
### **Étape 4**

Les eaux de pluies s'infiltrent dans le sol ce qui favorise l'approfondissement de l'horizon humifère.

### II.3.1.3. Complexe argilo-humique

#### a. Définition

Le complexe argilo-humique (CAH), aussi appelé “complexe adsorbant”, est l’ensemble des forces qui retiennent les cations échangeables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ...) sur la surface des constituants minéraux et organiques des sols (Figure 28). Ces cations peuvent s’échanger avec la solution du sol et les plantes et constituent le réservoir de fertilité chimique du sol, c’est ce qu’on appelle la capacité d’échange cationique. Les argiles se lient à l’humus. L’agrégat qui en résulte est appelé complexe argilo-humique (CAH). Le complexe argilo-humique d’un sol est saturé quand tous les ions  $\text{H}^+$  sont remplacés par des cations échangeables tels que  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ; le taux de saturation est plus ou moins élevé selon que le complexe est plus ou moins saturé en cation échangeable (**Bourguignon et Bourguignon 1992**).



**Figure 28** : La formation du Complexe Argilo-Humique (CAH) (**Bourguignon et Bourguignon 1992**)

#### b. Propriétés du complexe argilo-humique

Le complexe argilo-humique est capable de fixer, en raison de sa charge négative, les ions positifs. Aussi, ces ions ne sont pas emportés par les eaux de ruissellement.

L’argile favorise l’humification et ralentit la minéralisation d’humus, ce dernier protéger l’argile et maintien la stabilité structurale du sol. La qualité d’un sol et l’efficacité d’un engrais dépendent donc, en grande partie, de l’état du complexe argilo-humique. La nature et la stabilité des complexes organo-minéraux varient avec les parties en présence:

- 1- Type d'argile, elle intervient par sa taille, l'importance de ses charges négatives et son aptitude à fixer des molécules organiques.
- 2- Type de cation de liaison, en ce qui concerne le type de liaison, cette stabilité dépend de la valence et du rayon ionique du cation. Les cations monovalents donnent généralement des complexes moins stables que les cations polyvalents (il faut au moins un cation bi ou trivalent pour mieux stabiliser le CAH puisque l'argile a une charge négative et le l'humus a une charge négative).
- 3- Type d'humus, la stabilité est variable suivant la nature des composés humiques, plus ces composés sont polycondensés plus la stabilité du complexe est grande.

### **c. Rôles du complexe argilo-humique**

D'après **Soltner (2005)**, quand il est stable, le CAH procure au sol des propriétés toutes favorables à sa fertilité :

- la floculation des colloïdes, argileux et humiques favorise une structure aérée et un stockage hydrique suffisant ;
- la liaison argile-humus freine la minéralisation de la matière organique humifiée, donc la perte de matière organique susceptible de se lier à l'argile ;
- l'argile liée à l'humus est retenue. Elle ne se disperse pas, évitant ainsi le colmatage et la compaction du sol ;
- l'intégration de l'argile et de l'humus dans un même complexe augmente la capacité du sol à retenir les bioéléments indispensables aux plantes.
- le complexe absorbant joue un rôle tampon fondamental pour le maintien d'un pH stable dans les sols.

## **II.3.2. Classification des sols (FAO 2015)**

### **a. Principe**

- La classification des sols est basée sur des caractéristiques de sol définies en termes d'horizons diagnostiques, propriétés diagnostiques et matériaux diagnostiques, tous appelés diagnostics, qui doivent autant que possible être mesurables et observables sur le terrain.
- Le choix des caractéristiques diagnostiques prend en compte leurs relations avec les processus de formation des sols. Il est admis que la compréhension de ces processus contribue à une meilleure caractérisation des sols, mais qu'ils ne doivent pas être utilisés en tant que tels comme critère de différenciation.
- Dans la mesure du possible, les critères diagnostiques retenus à un niveau élevé de généralisation ont de l'importance pour l'aménagement.

- Les paramètres climatiques ne sont pas appliqués dans la classification des sols. Il est clair cependant qu'ils doivent être employés en combinaison avec les caractéristiques des sols pour interpréter la classification, mais ils ne doivent pas faire partie de la définition des sols. La classification des sols n'est donc pas subordonnée à la disponibilité de données climatiques. Le changement climatique ne rendra pas obsolète la dénomination d'un sol
- Les diagnostics ont des noms (ex. horizon argique, propriétés stagniques, matériel fluviatique).
- Le WRB (World Reference Base) n'utilise pas de symboles d'horizons (horizons A, horizons B). Par conséquent, les horizons qui ne sont pas diagnostiques n'ont pas de nom (**FAO 2015**).
- Au lieu de cela, WRB recommande d'utiliser les symboles d'horizon fournis par les Directives de la **FAO (2006)** pour la description des sols.
- La WRB est un système de classification global, permettant l'inclusion des systèmes nationaux de classification des sols.
- La WRB n'a pas pour dessein de se substituer aux systèmes nationaux de classification des sols, mais bien de servir de commun dénominateur pour communiquer à l'échelon international.

La WRB comprend deux niveaux catégoriels:

\* le **Premier niveau**, comprenant 32 Groupes de sols de référence (RSGs);

\* le **Second niveau**, comprenant le nom du RSG combiné avec un ensemble de qualificatifs principaux et supplémentaires.

- De nombreux RSGs (Reference Soil Groups) sont représentatifs de régions pédologiques majeures; ainsi, la WRB est à même de donner un aperçu général de la couverture des sols du monde.
- Les définitions et descriptions reflètent les variations dans les caractéristiques des sols survenant à la fois verticalement et latéralement dans le paysage.
- L'appellation *Base de référence* reflète la fonction de dénominateur commun de la WRB: l'amplitude de ses unités (les RSGs) est telle qu'elle stimule l'harmonisation et la corrélation avec les systèmes nationaux existants.
- En plus de cette fonction de lien entre les systèmes nationaux existants, la WRB sert également de moyen de communication pour l'établissement des bases de données globales et pour l'inventaire et la surveillance des ressources mondiales en sols.

- La nomenclature employée pour distinguer les groupes de sols est basée sur des termes traditionnels ou faciles à introduire dans le langage actuel. Ils sont définis avec précision afin d'éviter les confusions issues d'un usage de termes identiques ayant des connotations différentes.

Il y a 185 qualificatifs au total. Pour chaque RSG, il existe une liste de qualificatifs disponibles, qui sont subdivisés en deux types :

1. **Les qualificatifs principaux** décrivent les caractéristiques typiques d'un RSG. Ils sont classés par ordre d'importance. Ils sont placés avant le nom du RSG.
2. **Les qualificatifs supplémentaires** décrivent des caractéristiques supplémentaires. Ils ne sont pas classés et utilisés par ordre alphabétique. Ils sont placés après le nom du RSG entre parenthèses et séparés les uns des autres par des virgules.

Les noms des RSG et des qualificatifs commencent par des majuscules. Ils doivent être donnés en anglais et ne doivent pas être traduits dans une autre langue afin de garantir qu'un certain sol porte le même nom partout dans le monde.

#### **b. Liste des groupes de sols de référence selon WRB 2015**

(Guide simplifié pour les Groupes de sols de référence de la WRB (RSGs) avec suggestion de codes)

Voici la liste des 32 groupes de sols de référence dans la partie (chapitre 4 du manuel WRB), y compris les codes (annexe 3 du manuel WRB). Cette liste est principalement tirée du tableau 2 (Chapitre 1) du Manuel WRB.

##### **1. Sols avec couches organiques épaisses**

Histosols HS (sols avec couches organiques épaisses)

##### **2. Sols avec forte influence humaine**

Anthrosols AT (sous usage agricole long et intensif)

Technosols TC (contenant des quantités importantes d'artefacts)

##### **3. Sols avec limitations au développement racinaire**

Cryosols CR (affectés par du permafrost)

Leptosols LP (minces ou avec nombreux éléments grossiers)

Solonetz SN (à teneur élevée en Na échangeable)

Vertisols VR (conditions humidité-sécheresse alternantes, gonflement-retrait des argiles)

Solonchaks SC (concentration élevée en sels solubles)

##### **4. Sols dominés par la chimie Fe/Al**

Gleysols GL (affectés par une nappe phréatique, par les marées ou submergés)

Andosols AN (allophanes ou complexes Al-humus)

Podzols PZ (accumulation en profondeur d'humus et/ou d'oxydes)

Plinthosols PT (accumulation et redistribution du Fe)

Nitisols NT (argiles à faible activité, fixation du P, nombreux oxydes de Fe, structure forte)

Ferralsols FR (dominance de kaolinite et d'oxydes)

Planosols PL (eau stagnante, différence texturale abrupte)

Stagnosols ST (eau stagnante, différence structurale et/ou différence texturale modérée)

#### **5. Accumulation prononcée de matière organique dans la couche superficielle minérale**

Chernozems CH (couche superficielle très foncée, carbonates secondaires)

Kastanozems KS (couche superficielle foncée, carbonates secondaires)

Phaeozems PH (couche superficielle foncée, pas de carbonates secondaires (sauf à grande profondeur), teneur en bases élevée)

Umbrisols UM (couche superficielle foncée, faible teneur en bases)

#### **6. Accumulation de sels moyennement solubles ou de substances non salines**

Durisol DU (accumulation de, et cimentation par la, silice secondaire)

Gypsisols GY (accumulation de gypse secondaire)

Calcisols CL (accumulation de carbonates secondaires)

#### **7. Sols à sous-sol enrichi en argile**

Retisols RT (digitation de matériau grossier, peu colore, dans une couche plus colorée et de texture plus fine)

Acrisols AC (argiles à faible activité, faible teneur en bases)

Lixisols LX (argiles à faible activité, teneur élevée en bases)

Alisols AL (argiles à forte activité, faible teneur en bases)

Luvisols LV (argiles à forte activité, teneur élevée en bases)

#### **8. Sols à différenciation de profil faible ou nulle**

Cambisols CM (modérément développés)

Arenosols AR (sableux)

Fluvisols FL (à sédiments stratifiés fluviatiles, marins ou lacustres)

Regosols RG (sans développement de profil significatif)

#### **Qualificatifs (quelques exemples avec définitions)**

Humic hu	Lignic lg	Ortsteinic os	Reductic rd
----------	-----------	---------------	-------------

**Humic (hu)** (du latin *humus*, terre): ayant  $\geq 1$  % de *carbone organique du sol* dans la fraction terre fine (moyenne pondérée sur une profondeur de 50 cm à partir de la surface du sol minéral) (si une *roche continue*, un matériau *technique dur* ou une couche cimentée ou

indurée est présentée dans la profondeur spécifiée, la zone située en dessous n'est pas prise en compte dans le calcul).

**Lignic (lg)** (du latin *lignum*, bois): ayant à  $\leq 50$  cm de la surface du sol des inclusions de fragments de bois intact remplissant  $\geq 25$  % du volume du sol.

**Ortsteinic (os)** (de l'allemand *ortstein*, pierre locale): ayant un horizon *spodique* ayant un sous-horizon d'une épaisseur  $\geq 2,5$  cm qui est cimenté (« ortstein ») dans  $\geq 50$  % de sa dimension horizontale (*uniquement pour les Podzols*).

**Reductic (rd)** (du latin *reductus*, ramené): ayant dans  $\geq 25$  % du volume de la terre fine à  $\leq 100$  cm de la surface du sol des *conditions réductrices* causées par des émissions gazeuses comme du méthane ou du dioxyde de carbone, ou par des infiltrations de liquides autres que l'eau (ex. pétrole).

### c. Exemple de classification d'un sol selon la WRB

- **Description de terrain:**

Sol développé sur loess à argiles à activité élevée, montrant une augmentation d'argile marquée à 60 cm de profondeur; revêtements argileux dans l'horizon enrichi en argile et pH d'environ 6 entre 50 et 100 cm de profondeur. La couche supérieure, pauvre en argile, est composée d'un horizon supérieur foncé et un inférieur peu coloré. L'horizon enrichi en argile présente quelques taches de couleur intense à l'intérieur des agrégats de sol et des conditions réductrices à quelques endroits durant le printemps. Les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- a. augmentation d'argile et/ou revêtements argileux → horizon argique
- b. horizon argique à CEC et taux de saturation en bases élevés (déduction du pH 6) → Luvisol
- c. peu coloré → qualificatif Albic
- d. quelques taches → propriétés stagniques
- e. propriétés stagniques et conditions réductrices commençant à 60 cm → qualificatif Endostagnic
- f. revêtements argileux → qualificatif Cutanic
- g. augmentation d'argile → qualificatif Differentic

**La classification de terrain est:**

Albic Endostagnic Luvisol (Cutanic, Differentic)

- **Analyses de laboratoire:**

Les analyses de laboratoire confirment une CEC kg<sup>-1</sup> argile élevée dans l'horizon *argique* et un taux de saturation en bases élevé entre 50 et 100 cm de profondeur.

Elles montrent également que la classe texturale est un argilo-limoneux avec 30 % d'argile (qualificatif Siltic) dans la couche de surface et une argile limoneuse a 45 % d'argile (qualificatif Clayic) en profondeur.

***La classification finale devient:***

Albic Endostagnic Luvisol (Endoclayic, Cutanic, Differentic, Episiltic)

## **II.4. Introduction à la cartographie et à la mise en valeur des sols**

### **II.4.1. La carte pédologique**

#### **a. Définition d'une carte pédologique**

D'après **Segalen (1970)**, la carte pédologique est un document qui a pour objectif de donner une image aussi fidèle que possible de la répartition, de la localisation et de la nature des catégories de sols étudiés.

La carte pédologique est un document, en couleurs, avec une légende, généralement accompagnée d'une notice explicative. Les unités pédologiques reconnues sont représentées par les plages de couleur. Suivant le degré de précision et l'échelle avec lequel le travail a été fait, celles-ci vont de la classe à la phase.

On peut avoir des unités complexes. On peut aussi avoir des unités simples, c'est-à-dire que les unités reconnues représentent au moins de 80 % de la surface considérée. On ne peut pas différencier les juxtapositions qui concernent les différentes unités entremêlées de telle manière, qu'à l'échelle de la carte. Dans une séquence, et par suite de conditions particulières, les sols se succèdent dans un ordre déterminé (de roche-mère à titre d'exemple). Dans une chaîne, chaque sol est relié génétiquement au suivant et au précédent.

#### **b. Utilités de la carte pédologique**

La carte pédologique répond à deux types fondamentaux d'ambitions:

**Analyse** : représente la description détaillée sur les différents éléments constituant les sols et le paysage.

**Prévision**: prévoir ce qui pourra être fait de ces sols en fonction des données locales et des contraintes exercées par la nature des sols.

La description et la présentation des sols sont données par la carte pédologique proprement dite. Cette donnée, bien faite, doit être fixe.

La carte d'utilisation rend compte des prévisions. Ces prévisions sont variables, et qui dépendent, des populations, de l'infrastructure économique, de la nature des sols et de l'état des marchés.

##### **➤ Buts analytiques**

- Déterminer les caractéristiques importantes des sols;

- Les classer et en dressant l'inventaire;
- Etablir et porter la limite sur les cartes des types reconnus;
- Prévoir les types d'utilisation possibles sous différents modes de cultures.

➤ **Buts généraux des cartes d'utilisation**

1/ Choix des emplacements des fermes expérimentales et stations de recherche:

Pour que les résultats d'une recherche agronomique soient valables, il faut savoir à quels sols s'appliquent ces résultats, quelle est l'étendue à laquelle ces résultats peuvent s'appliquer.

2/ Installations d'exploitations agricoles et gestion rationnelles en indiquant: les méthodes de labour, les grands types d'utilisation, les engrais et amendements, les rotations, les systèmes antiérosifs, etc.

3/ Etude de l'irrigation et du drainage. Il est nécessaire de bien connaître les qualités des sols à drainer avant d'effectuer le drainage, certaines régions irriguées ont été affectées par des remontées de sels. L'identité du sol (nature des horizons profonds, épaisseur des horizons, texture, etc.) permet d'éviter beaucoup d'erreurs.

4/ Etude des sols afin de leur achat par des organismes d'Etat pour l'aménagement des centres urbains.

5/ La cartographie des sols a de multiples usages : pour les forêts et les eaux et pour l'installation des tuyaux, des routes, câbles télégraphiques, pipe-lines, etc.

6/ Connaissances scientifiques: chaque carte pédologique est une contribution à l'étude des sols en aboutissant à une meilleure interprétation des phénomènes fondamentaux, qui sont à l'origine de la formation des sols et leur évolution.

**II.4.2. Lecture d'une carte pédologique**

Selon **Segalen (1970)**, chaque type de sol (Tableau 2) est affecté de signes en noir et une couleur. Le choix de ces couleurs a été fait de la façon suivante, adopté par la Section de Pédologie de l'ORSTOM.

**Tableau 2 :** Lecture d'une carte pédologique (Segalen 1970)

Type de sol	Couleur
Sols minéraux bruts	Le fond de ces sols est laissé en blanc, avec des signes en noir qui indiquent la roche-mère, donc ils n'ont pas de couleur.
Sols peu évolués	Il n'y a pas de couleur très précise pour ce type de sols, et qui sont habituellement en points gris, pour montrer qu'une évolution très nette n'est pas discernable. Un début d'évolution est indiqué par une teinte pâle (vert pâle pour une halomorphie, bleu pâle pour une hydromorphie).
Sols calcimagnésiques	Teinte jaune (attribuer généralement aux sols calcaires).
Vertisols	Teinte violette
Sols isohumiques et les sols à mull	Teintes brunes
Podzols	Teinte rose pour indiquer l'importance revêtue par les mouvements du fer.
Sols à sesquioxydes	Couleurs orangées pour les sols ferrugineux tropicaux. Couleurs rouges pour les sols méditerranéens et ferrallitiques.
Sols hydromorphes	Couleurs bleues
Sols halomorphes	Couleurs vertes

#### **II.4.3. Introduction à la mise en valeur des sols (cas des sols algériens)**

Cette partie a été réalisée comme une étude de cas :

#### **IMPACT OF ORGANIC AMENDMENTS ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES UNDER SEMI-ARID CLIMATE (TIARET, ALGERIA)**

Cette étude représente un article qui fait partie des résultats de ma thèse de doctorat intitulée: "**EVOLUTION ET DYNAMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE DU SOL EN CONDITIONS SEMI-ARIDES**" et soutenue le 07 mars 2021.

Cet article (annexe 2) a été publié dans la revue « **Journal of Fundamental and Applied Sciences** » le 01 septembre 2020, et qui a pour but la valorisation des sous-produits issus

d'élevage afin d'améliorer la fertilité physique d'un sol sous climat semi-aride (région de Tiaret, Algérie), et qui a abouti à la conclusion suivante : « Les amendements organiques contribuent positivement à la protection et à la mise en valeur de nos ressources édaphiques, car ils apportent une première solution à une problématique actuelle qui est la perte de fertilité des sols (300 000 ha de terre agricole à l'échelle locale) et la diminution de leur capital organique en région semi-aride ».

# **Partie II : Fertilisation**

## **Introduction**

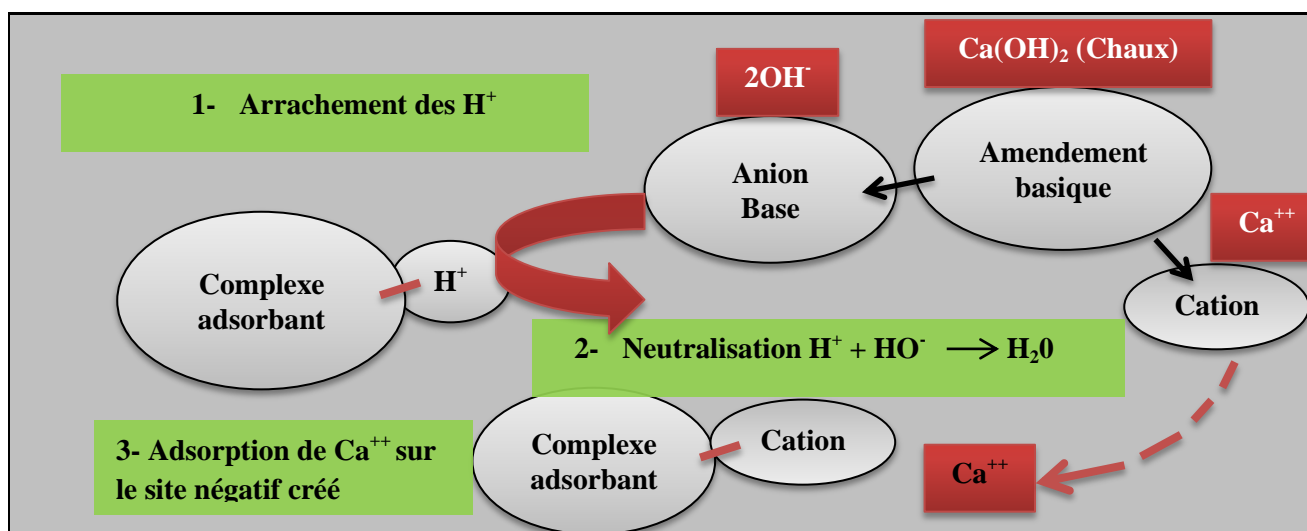
A l'instar des sols méditerranéens, les sols d'Algérie sont généralement caractérisés par leur faible taux de matière organique, conséquence du type de climat qui règne dans nos régions et des systèmes culturaux pratiqués qui ne sont pas favorables à la constitution d'une réserve organique du sol (**Dridi and Toumi 1999 ; Bernoux and Chevallier 2013**). Les matières organiques exportées par les récoltes, dans des sols déjà pauvres, ne sont pas remplacées de manière adéquate (**Grosbellet 2008**).

Cette pratique, combinée à la pression foncière, a accentué la pauvreté des sols et favorisé la migration des agriculteurs à la recherche de nouvelles terres cultivables vers les aires protégées. Dès lors, la disponibilité des terres cultivables, le problème de leur dégradation et de leur reconstitution sont devenus une préoccupation majeure à l'échelle nationale (**Koull and Halilat 2016**). Ces sols, compte tenu de leurs caractéristiques, présentent de mauvaises qualités (**Dridi and Toumi 1999 ; Koull and Halilat 2016**), pour les améliorer, il est important de maintenir les niveaux de la matière organique du sol ( $3\% \leq MO \leq 4\%$ ) (**Grosbellet 2008**), qui affectent directement ces propriétés et sa perte est directement responsable de la dégradation de sa qualité et de sa fertilité (**Koull and Halilat 2016**) ; cela représente une menace pour la survie à long terme de la production agricole et du sol (**Oulbachir and al. 2014**). Une solution possible pour amortir la dégradation de cette ressource naturelle (300 000 ha / an de surface agricole utile) (**FAO 2015**), consiste à appliquer des engrais organiques et/ou minéraux à ces sols, afin d'apporter des éléments nutritifs aux plantes, d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols agricoles et d'accroître fortement les rendements quantitatifs ou qualitatifs des cultures (**Samreen and al. 2017**).

## Chapitre I : Les amendements calcaires

### I.1. Définition

Ce sont des amendements qui ont pour but d'apporter du calcium (Figure 29) pour corriger l'acidité du sol qui limite la disponibilité des éléments nutritifs et améliorer le fonctionnement du complexe argilo-humique : chaux vive agricole, chaux éteinte, craie, marne, calcaires marins. Ils sont souvent apportés en combinaison avec des amendements magnésiens (chaux magnésien vive, chaux magnésienne éteinte...) (Dicova 1997 ; Groupe Chaulage Comifer 2009).



**Figure 29:** Correction du pH du sol par l'apport de la chaux (<https://www.agroleague.com/blog/le-calcium-dans-le-sol-et-son-role-primordial-sur-la-fertilite-physique-du-sol>)

### I.2. Types

D'après Linères and Djakovitch (1993), on distingue quatre grands types d'amendements calcaires :

- Les amendements crus ;
- Les amendements cuits ;
- Les amendements mixtes ;
- Les amendements engrais.

En général, les amendements calcaires sont classés par la normalisation en fonction de leur origine (norme NFU 44-001):

- **Classe 1** : le carbonate de calcium d'origine naturelle. Il contient généralement entre 50 et 55% d'équivalent CaO.
- **Classe 2** : le carbonate de magnésium ( $MgCO_3$ ) et/ou de calcium ( $CaCO_3$ ) d'origine naturelle, ou dolomie entre 28 et 32% d'équivalent CaO et entre 18 et 21% d'équivalent MgO.
- **Classe 3** : les chaux calciques (CaO) et/ou magnésiennes (MgO). Ces matières premières sont qualifiées de substances dangereuses, ceci doit être mentionné sur leur étiquetage.
  - de 85% à 95% de CaO pour la chaux vive calcique ;
  - de 50% à 56% de CaO et de 30 à 40% de MgO pour la chaux vive magnésienne.
  - $Ca(OH)_2$ ,  $Mg(OH)_2$ , chaux éteintes, obtenus par hydratation des chaux vives.
- **Classe 4** : mélange des classes 1, 2 et 3.  
Ce sont les seuls mélanges autorisés.
- **Classe 5** : écumes de sucrerie et boues de décalcification des eaux de forages, mises sur le marché. Ces produits sont constitués principalement de  $CaCO_3$  et d'eau.
- **Les amendements-engrais**, fertilisants mixtes par constitution (**normes NF U44-203, NF U44-001/A1**), Amendements Thomas.

Ils sont élaborés à partir des scories de déphosphoration, coproduites lors de l'élaboration de l'acier à partir de la fonte, selon le procédé Thomas. La scorie brute de déphosphoration une fois refroidie, est concassée, déferrillée et homogénéisée.

Ce sont des matières premières qui ont deux fonctions :

- Une fonction amendante ;
- Une fonction fertilisante.

Ce sont des produits contenant essentiellement du calcium sous forme de silicates, de phosphates ou d'oxydes.

### 1.3. Critères d'appréciation des amendements calcaires

D'après **Schwartz *and al.* (2005)**, l'amendement calcaire (basique) apporté au sol améliore ses états physiques, chimiques et biologiques au travers de son effet sur l'acidité du sol, et aussi par des effets indirects sur la mobilisation des éléments nutritifs, avec une incidence particulière sur la dynamique de l'évolution de la matière organique.

Conventionnellement, les teneurs des amendements basiques sont exprimées en équivalent CaO et/ou MgO du produit tel qu'il est livré, même si leur forme chimique est autre.

**a. Valeur neutralisante**

La valeur neutralisante (VF) est une mesure de laboratoire qui permet d'apprécier le pouvoir amendant d'un produit, par attaque à l'acide chlorhydrique (**NF U44-173**). Elle ne permet pas de prévoir la vitesse de cette solubilisation, donc la vitesse d'action de l'amendement.

La déclaration de la valeur neutralisante est obligatoire pour tous les amendements basiques et amendements engrais.

**b. Solubilité carbonique**

La solubilité carbonique est une mesure de laboratoire qui permet d'estimer la vitesse d'action du produit lorsqu'il sera mélangé au sol.

**c. Finesse de mouture**

La déclaration de finesse de mouture est obligatoire pour les produits crus de classe 1 et 2.

Elle s'exprime par le pourcentage du produit passant à travers les mailles du tamis exigé par la normalisation.

Plus un produit est fin, plus sa valeur neutralisante est élevée. La solubilité carbonique est essentiellement liée à la finesse de mouture.

**I.4. Evaluer les besoins en chaulage**

Les sols décarbonatés ou acides nécessitent des amendements calcaires pour entretenir et rétablir la saturation du complexe organo-minéral. En revanche, les pertes en éléments basiques, dues aux prélèvements des plantes et à l'érosion, sont compensées par l'altération de la roche-mère dans le cas des sols calcaires, qu'il ne faut surtout pas chauler. Le choix de l'amendement basique doit répondre à l'ensemble des données du sol. La gestion des apports et le fonctionnement du sol dépendent aussi du choix des engrais, de l'irrigation, du drainage et du travail du sol. Il faut donc assurer un équilibre de disponibilité entre tous les éléments dont ont besoin les micro-organismes du sol et les plantes en volume et surtout en flux. La qualité des fruits par exemple est liée à cet équilibre. Cela concerne surtout la teneur en sucres et en acides, l'état sanitaire et l'aptitude à la conservation (**Groupe Chaulage Comifer 2009**).

## Chapitre II : les amendements humifères

### II.1. Définition

La fertilisation organique ou amendements, c'est l'incorporation au sol, de matières organiques plus ou moins décomposées, tels que les fumiers. Elle permet de favoriser une grande variété d'habitats pour les micro-organismes dans le sol (**Bernoux and Chevallier 2013 ; Benouadah and al. 2020a**); qui, par ses activités, produit de l'humus sans lequel un sol devient mort, impropre à la croissance des plantes (**Doucet 2006**), ou se dégrade puis le transforme en une forme minérale assimilable par les plantes (**Dridi and Toumi 1999**). Pour cette raison, les biologistes pensent que la matière organique du sol contribue de manière importante à la fertilité et à la productivité des sols et que la santé biologique des sols est l'un des meilleurs indicateurs diagnostiques de la qualité des sols (**Benouadah and al. 2020b**). Assurer-vous que tous les déchets organiques soient utilisés avant de penser à appliquer des engrais. Le fumier et les fientes de volailles, les bouses de vache fournissent aux plantes des éléments nutritifs. Il en est de même des déchets d'origine végétale, pailles, tiges et autres matières organiques. Avant leur épandage dans les champs, ces déchets doivent cependant être bien compostés et bien décomposés (**FERTIAL 2017 ; Benouadah and al. 2022a**).

Les engrais organiques sont précieux, car ils ont un double rôle, d'une part ils améliorent l'état du sol et d'autre part, ils apportent aux plantes des éléments nutritifs (**FERTIAL 2017**).

La matière organique diminue l'érosion, améliore la structure du sol, et produit un effet régulateur sur sa température et l'aide à emmagasiner davantage d'eau. Grâce à ces avantages, les engrais organiques sont souvent la base même du succès des engrais minéraux. La combinaison d'engrais minéraux et organiques crée les conditions de milieu idéales à la culture, car les engrais minéraux apportent aux plantes les éléments nutritifs nécessaires alors que les amendements organiques améliorent les propriétés du sol. A elle seule, la fumure organique ne couvre pas tous les besoins de la production agricole, donc elle doit être complétée par des apports d'engrais minéraux (**FERTIAL 2017**).

### II.2. Propriétés de l'humus

L'humus est la première couche de sol très riche en matière organique, en divers organismes vivants (lombrics, acariens, nématodes, algues, bactéries, champignons...) et en débris végétaux plus ou moins décomposés. Selon les conditions physicochimiques du sol (humidité, température,

pH, texture, taux d'argile et de limon), cette matière organique persiste plus ou moins longtemps (**Bernoux and Chevallier 2013**).

En pratique, l'humus est une matière humide au toucher, grumeleuse, de couleur noire; il se trouve essentiellement près de la surface du sol. Un sol humifère, ou riche en humus, est donc généralement riche, meuble frais et de couleur foncée, tandis qu'un sol peu humifère est souvent pauvre et sensible au compactage, rapidement sec, friable et clair (il existe cependant des exceptions : on peut très bien avoir un sol brun et pauvre, ou clair et riche) (**FERTIAL 2017**).

L'humus est indispensable à l'amélioration de la stabilité et de la fertilité d'un sol. Pourquoi l'humus est-il important ? Pourquoi est-il utile aux plantes ?

#### ➤ **Nutrition des plantes**

Selon **Soltner (2005)**, l'humus, comme l'argile, peut fixer les cations indispensables, par son pouvoir d'adsorption, et les libérer pour alimenter les plantes en croissance, grâce au mécanisme de l'échange des ions. Cette propriété, désignée, capacité d'échange cationique (CEC) contribue au stockage et à la mise à disposition ultérieure d'éléments nutritifs pour les plantes. La CEC permet en outre de lutter contre les pertes en éléments nutritifs par lixiviation (**Calvet and al. 2011**). Grâce à son pouvoir tampon, l'humus prévient en outre les variations subites et néfastes du degré d'acidité dans le sol (**Doucet 2006**).

#### ➤ **Stabilité et fertilité du sol**

L'humus prévient le tassement des particules, rend les sols plus légers, plus poreux et donc mieux aérés. Il rend les sols plus meubles et augmente leur perméabilité à l'air et à l'eau. En même temps, il est un régulateur de l'humidité du sol. En effet, il maintient une meilleure réserve d'eau, grâce à son pouvoir d'absorption élevé, et tend, du même coup à réduire l'évaporation. L'humus augmente la cohésion des agrégats du sol et diminue leur mouillabilité ; c'est donc un élément stabilisant de la structure du sol, puisqu'il agit notamment contre son pire ennemi : l'eau (**Doucet 2006**).

D'après **Lefèvre (2015)**, la matière organique du sol stimule l'activité biologique qui s'y trouve : elle représente la source principale d'énergie et d'éléments nutritifs indispensables aux microorganismes du sol qui, en la décomposant, libère du CO<sub>2</sub> et des éléments nutritifs assimilable par les plantes. La MOS permet de ce fait le maintien de l'activité biologique du sol ainsi que la productivité des écosystèmes (**Bernoux and Chevallier 2013**).

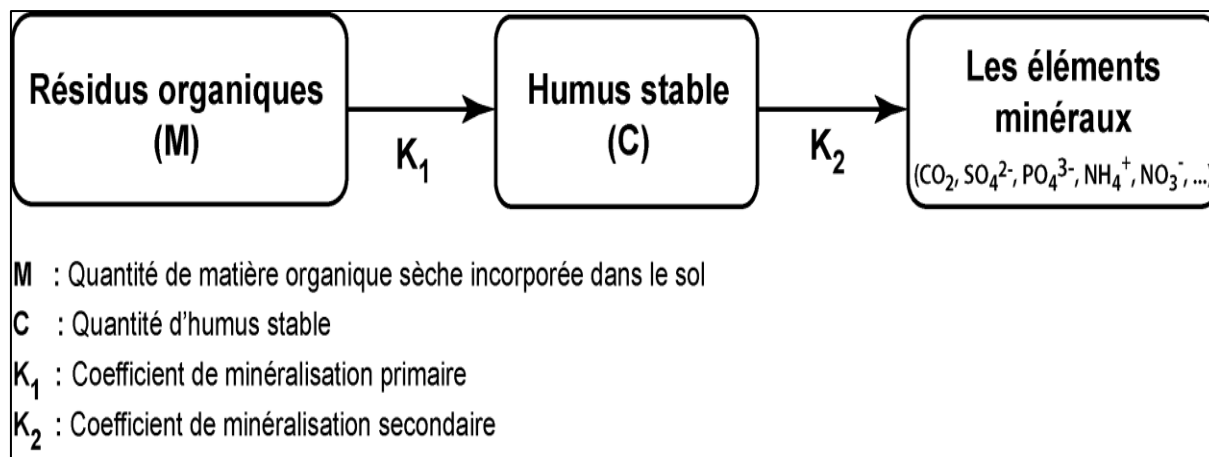
### ➤ Comment rendre un sol plus humifère ?

En pratique, si le sol est pauvre en humus, comment y remédier ? Comment rendre un sol plus humifère ? Voici trois notions fondamentales (**Schvartz and al. 2005**):

- D'abord, il faut éviter l'utilisation d'engrais chimiques (pesticides), qui nuisent à la vie du sol (micro-organismes, vers de terre...etc.) ;
- Ensuite, il est utile d'apporter d'une façon régulière au sol des amendements organiques : paillages végétaux qui, en se décomposant, se transformeront en humus ; fumier bien décomposé, compost, engrais verts , BRF (Bois Raméal Fragmenté).
- Enfin, on évitera de retourner trop le sol, pour ne pas perturber son équilibre (il faut que de la microfaune et l'humus se trouvent dans les couches supérieures : retourner le sol, c'est le désorganiser).

### II.3. Bilan humique

Selon **Mathieu and al. (2003)**, le bilan humique désigne la prévision de l'évolution du taux de reconstitution et de destruction des stocks de matières organiques dans le sol. Le bilan humique met en adéquation les gains (humus) moins les pertes (minéralisation) au cours du temps (Figure 30).



**Figure 30** : Bilan humique selon le modèle de Henin-Dupuis (**Mathieu and al. 2003**)

D'après **Schvartz and al. (2005)**, ce bilan humique est un calcul de type entrées-sorties, ces deux notions de base, qui permet de vérifier dans un sol donné, la consommation et/ou le renouvellement de son stock d'humus.

**Les entrées** : Globalement tout ce qui provient des amendements organiques et qui va générer de l'humus.

**Les sorties :** La minéralisation annuelle qui dépend fortement de la température et de la pluviométrie, deux éléments ralentissent la minéralisation (le taux d'argile et de calcaire actif) en limitant l'activité microbienne. Le travail du sol tel que le semis direct, influence également de façon très significative les sorties.

La question de la quantité d'humus dans le sol dépend directement de ce. Les conditions environnementales, la nature de sol et l'activité biologique vont jouer fortement sur les dynamiques d'humification et de minéralisation dans le sol (bilan entrées/sorties) sont fortement influencées par sa nature, ses conditions environnementales et son activité biologique, qui conditionnent la quantité d'humus (**Benouadah and al. 2020b**).

#### **II.4. Les diverses sources d'humus**

D'après **FERTIAL (2017)**, l'humus est issu de la dégradation des matières organiques fraîches (débris végétaux, exsudats racinaires, cadavres d'animaux, déjections, ...) sous l'action des micro-organismes (bactéries), des champignons et de la microfaune du sol (vers de terre, insectes, petits arthropodes, nématodes, etc.). On parle d'humification des matières organiques. Pour qu'elle ait lieu correctement, certaines conditions doivent être réunies : humidité et température suffisantes, aération, pH proche de la neutralité ...etc. Il faut aussi, bien sûr, que le sol soit vivant : sans micro-organismes, pas d'humus ! Sans matière organique, pas de vie dans le sol, et sans vie dans le sol, pas d'humus ! Le cercle est vertueux. Donc, matière organique, humus et vie du sol sont donc étroitement liés : cette notion est fondamentale. D'une part, les matières organiques fraîches sont transformées en humus grâce aux micro-organismes et à la faune du sol. D'autre part, les matières organiques sont les aliments de ces êtres vivants.

#### **II.5. Autres sources d'humus :**

##### **a. Fumiers**

Le fumier (Figure 31) est une matière organique plus en mois fermentée, composée par un mélange de litière (paille, fourrage,...) et de déjections d'animaux, considérée comme fumure organique de référence (**Dridi and Toumi, 1999**).



**Figure 31:** Différents types de fumier (Clichée Benouadah 2019)

### b. Fientes

Les fientes (Figure 32) sont les déjections des volailles, sans litière (Znaidi 2002).



**Figure 32:** Fientes de poulets

(<https://www.gammvert.fr/conseils/conseils-de-jardinage/l-engrais-des-poules>)

### c. Purins

D'après Siboukeur (2013), les purins (Figure 33) sont des mélanges qui ne comprennent que des exsudats liquides de déjections.



**Figure 33:** Les purins (<https://idele.fr/gestion-des-effluents-et-des-dejections-ged?>)

### d. Engrais verts

L'engrais vert (Figure 34) correspond à une culture de végétation destinée à protéger et améliorer le sol par la fourniture d'éléments fertilisants (Siboukeur 2013).



**Figure 34 : Les engrais verts (<https://jardinage.lemonde.fr/dossier-79-engrais-verts-naturels-moutarde-trefle-sarrasin.html>)**

### e. Compost

Le compost (Figure 35) est un produit stable riche en humus, obtenu après le passage de la matière organique de l'état brut à l'état stabilisé par le biais d'un processus de compostage (Siboukeur 2013).



**Figure 35 : Le processus de compostage**

(<https://almagrownintown.fr/blogs/news/composter-en-ville-cest-possible>)

### f. Paille ou mulch

Il s'agit des résidus de culture pailleux ou non (Figure 36), les déchets végétaux ligneux ou non (Figure 37) (Adden 2004).



**Figure 36 : Paille (<https://www.permaculturedesign.fr/botte-paille-paillage-economique/>)**



**Figure 37 : Mulch (<https://www.gettyimages.fr/photos/mulch>)**

**g. Déchets industriels ou urbains**

On note essentiellement : les écumes de sucrerie (Figure 38) et les boues de station d'épuration (Figure 39) (Siboukeur 2013).

**h. Ordures ménagères et les écorces concassées**

Ce sont des matières fertilisantes du sol (Figure 40 et 41), apportées au sol de préférence à l'état composté (Siboukeur 2013).



**Figure 38 : Les écumes de sucrerie (<http://www.ascofrance.com/forum/48375/cheilymenia-theleboloides-sur-ecume-de-sucrerie>)**



**Figure 39 : Les boues de station d'épuration (<https://www.actu-environnement.com/ae/news/boues-epuration-stockage-revision-monomenclature-iota-melange-36474.php4>)**



**Figure 40 : Les ordures ménagères**

(<https://www.mourmelonlegrand.fr/cadre-de-vie/les-ordures-menageres>)



**Figure 41 : Les écorces concassées**

(<https://www.permaculturedesign.fr/ecorces-de-pin-bois-paillage/>)

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

### **III.1. Définition et classification des différents engrais**

D'après **Schvartz and al. (2005)**, les formulations d'engrais minéraux utilisées par les agricultures apportent pour l'essentiel l'azote (N), le phosphore ( $P_2O_5$ ), et le potassium ( $K_2O$ ) soit sous la forme d'engrais simple qui ne contiennent qu'un élément N, ou P ou K, soit sous la forme d'engrais composés binaires (deux éléments) ou ternaires (trois éléments NPK associés).

### **III.2. Intérêt des engrais**

Selon **FERTIAL (2017)**, les engrais sont des substances minérales, destinées à fournir aux plantes des compléments d'éléments nutritifs, en vue d'améliorer leur croissance, et d'augmenter le rendement des cultures et la qualité des produits.

- Si le sol est abondamment pourvu en éléments minéraux, les plantes poussent bien et donnent de bons rendements.
- Si le sol est pauvre en un seul élément, la croissance des plantes est limitée et les rendements sont réduits. Si nous voulons obtenir des rendements élevés, nous devons apporter aux cultures les éléments dont le sol manque.

### **III.3. Eléments nutritifs nécessaires à la croissance de la plante**

D'après **FERTIAL (2017)**, Pour se développer, la grande majorité des plantes exigent 16 éléments nutritifs provenant de l'air et du sol qui les entourent.

- Les éléments ci-après proviennent :
  - **De l'air** : Le carbone(C) sous forme de  $CO_2$  (anhydride carbonique) ;
  - **De l'eau** : L'hydrogène (H) et l'oxygène (O) à l'état d'eau ( $H_2O$ ) ;
  - **Du sol et des engrais minéraux et organiques** :

**Des éléments de base** (macro éléments) : l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K).

**Des éléments secondaires** : le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le soufre (S).

**Des oligo-éléments** : le fer (Fe), le manganèse (Mn), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), le bore (B), le molybdène (Mo).

### **III.4. Carence en éléments minéraux**

D'après **FERTIAL (2017)**, le manque d'un ou plusieurs éléments nutritifs provoque l'apparition de symptômes visuels de carence (Figure 42).

➤ **Les signes de carences en éléments de base : N.P.K**

**Pour l'azote (N)**

- Végétation languissante ;
- Feuillage vert clair ou jaunâtre (chlorose) ;
- Plantes de taille peu développée.

**Pour le phosphore (P)**

- Feuillage vert foncé, bronzé ou taché de rouge ;
- Rameaux grêles ou mal formés ;
- Floraison peu abondante ;
- Avortement des fleurs ;
- Maturation tardive des fruits.

**Pour le potassium (K)**

- Nécroses brunes à la pointe, sur les bords et entre les nervures des feuilles ;
- La distance entre les nœuds sur la tige devient moins grande,
- Le bord des feuilles s'enroule parfois vers le haut ;
- Plantes sensibles aux maladies;
- Fruits peu sucrés ni savoureux ;
- Mauvaise conservation des légumes-racines.

➤ **Les signes de carences en éléments secondaires et en oligo-éléments**

**Carence en calcium (Ca)**

Les feuilles demeurent petites, elles sont parfois enroulées aux extrémités. La pointe et le bord deviennent jaunes, bruns ou rougeâtres. On peut observer une nécrose. Cette carence affecte surtout les jeunes feuilles. Elle est plutôt rare.

**Carence en zinc (Zn)**

Les plantes sont nanifiées. On observe une distorsion de la plante, surtout le bord des feuilles. Les feuilles peuvent être décolorées.

**Carence en magnésium (Mg)**

On voit une décoloration entre les nervures (blanc-jaune ou brun-rouge). Les vieilles feuilles sont les premières atteintes.

**Carence en soufre (S)**

La croissance de la plante est réduite. Les jeunes feuilles sont jaunes ou vert pâle ; les tiges, rigides et cassantes.

**Carence en molybdène (Mo)**

La croissance est lente, les jeunes feuilles deviennent vert clair et sont déformées.

**Carence en cuivre (Cu)**

Il y a une chlorose de la pointe des feuilles. Les jeunes feuilles peuvent se tordre.

**Carence en fer (Fe)**

Cette carence entraîne une chlorose. On la reconnaît à un jaunissement des feuilles jusqu'aux nervures. Les feuilles peuvent, dans un état avancé, devenir transparentes et cassantes. Les jeunes feuilles sont les premières à en être affectées. Semblables aux symptômes d'une carence en manganèse, on peut néanmoins les distinguer aisément. La décoloration due à une carence en manganèse se fait par taches alors que celle due à une carence en fer est complète.

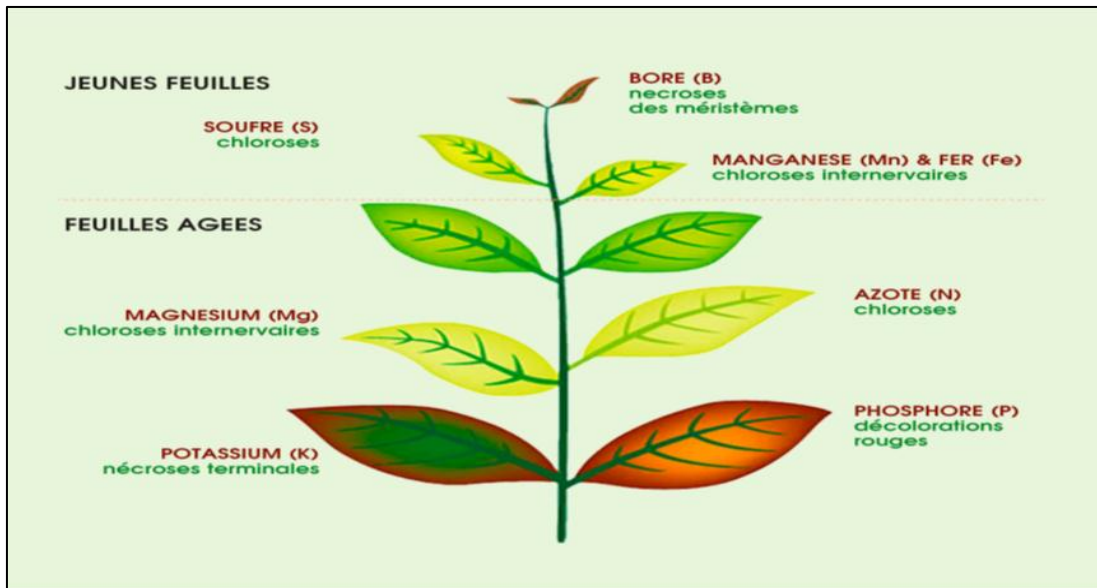
**Carence en bore (B)**

La croissance s'en trouve ralentie. Les organes de la plante sont endommagés, des crevasses se forment. Les racines se nécrosent à leur extrémité.

**Carence en manganèse (Mn)**

Elle est également marquée par un jaunissement entre les nervures. Contrairement à la carence en fer, le jaunissement se fait cette fois par taches. Les nervures demeurent bien vertes. Cette carence s'observe d'abord sur les feuilles supérieures de la plante. Il faut ajouter un engrais contenant du manganèse.

Cependant, une carence peut survenir malgré la présence de manganèse. Elle est alors causée par un déséquilibre entre les éléments nutritifs.



**Figure 42:** Carence en éléments nutritifs

(<https://autonomiejardin.com/2019/12/06/prevenir-et-soigner-la-chlorose-des-vegetaux/>)

### III.5. Les engrais minéraux simples

Selon Dicova (1997) ; Schwartz *and al.* (2005) ; FERTIAL (2017), on distingue :

#### III.5.1. Engrais azotés

Les engrais azotés de synthèse sont fabriqués à partir de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) obtenu par combinaison de l'hydrogène et de l'azote (Figure 43):

- L'hydrogène, provenant soit :
  - ✓ Du craquage du gaz naturel  $\text{CH}_4$ ,
  - ✓ De l'électrolyse de l'eau,
  - ✓ Du craquage des hydrocarbures.
- L'azote extrait de l'air.

Avec les engrais de synthèse, la quantité d'azote apportée,  $\text{NO}_3^-$  et/ou  $\text{NH}_4^+$ , est parfaitement connue et peut être ajustée avec une bonne précision à la demande de la culture.

##### a. Engrais nitriques

Ils contiennent de l'azote sous la seule forme nitrique,  $\text{NO}_3^-$ .

- Le nitrate de sodium  $\text{NaNO}_3$  : 16% de N et 36,5% de  $\text{Na}_2\text{O}$ .
- Le nitrate de calcium  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  : 15,5% de N et 34% de  $\text{CaO}$ .
- Le nitrate de calcium et de magnésium  $\text{Ca, Mg}(\text{NO}_3)_2$  : 15% de N, 46% de  $\text{CaO}$  et 8% de  $\text{MgO}$  ;

- Le nitrate de potassium  $\text{KNO}_3$  : 13% de N et 46% de  $\text{K}_2\text{O}$ .

Ces engrais nitriques vendus sous forme granulée sont utilisés en culture spéciales.

Ils sont employés généralement en cours de végétation au moment où la culture est en pleine croissance.

#### **b. Engrais ammoniac-nitriques**

Ils contiennent de l'azote sous les deux formes, ammoniacale et nitrique.

- Les ammonitrates

Ce sont de loin les engrais simples les plus utilisés, en raison de leur teneur élevée en azote, de leur bonne conservation, de leur souplesse d'emploi et de l'efficacité agronomique due à leur composition mi-nitrique (azote immédiatement disponible pour la plante), mi-ammoniacale (effet différé de quelques semaines).

Ils sont habituellement sous forme granulée et sont disponibles sous deux dosages :

Les ammonitrates à 27 % ou 35,5 % de N ;

- Les ammonitrates enrichis en  $\text{SO}_3$  et/ou  $\text{MgO}$ .

Le rôle du soufre et du magnésium étant, dans l'alimentation des plantes, souvent en synergie avec l'azote.

#### **c. Engrais ammoniacaux**

Ils fournissent de l'azote sous la seule forme ammoniacale,  $\text{NH}_4^+$ .

- Le sulfate d'ammoniaque  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  : 21% de N et 61% de  $\text{SO}_3$ .
- L'ammoniac anhydre  $\text{NH}_3$  : 82% de N.

#### **d. Autres formes**

- L'urée  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  : 46% de N.

C'est l'engrais azoté solide le plus concentré. Très soluble, l'urée se transforme rapidement dans le sol en gaz carbonique et en gaz ammoniacal. Sa facilité de dissolution dans l'eau et l'innocuité relative de ses solutions sur le feuillage permettent de l'utiliser en pulvérisations foliaires et pour l'irrigation fertilisante. Elle est habituellement sous forme perlée ou, de plus en plus, granulée.

- Les solutions azotées

Elles sont fabriquées à partir du nitrate d'ammoniaque et de l'urée, parfois du sulfate d'ammoniaque.

On trouve notamment :

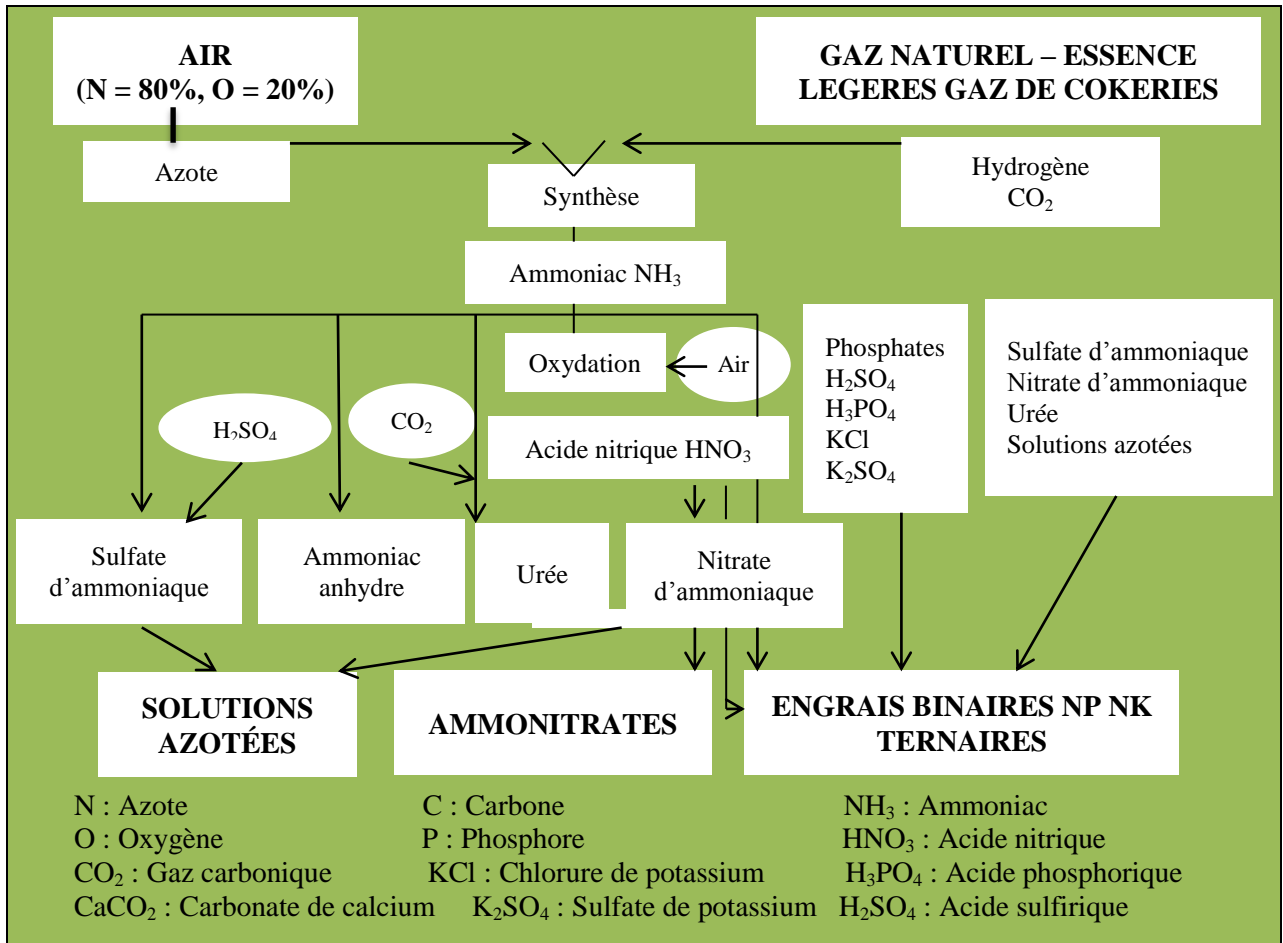
- ✓ Les solutions à base d'urée dosant 20 kg d'azote (N) pour 100 litres. Peu concentrées, elles sont aujourd'hui peu utilisées.
- ✓ Des solutions contenant du soufre, mélange de sulfate d'ammoniaque, de nitrate d'ammoniaque et d'urée dosant de 25 à 36 kg de N pour 100 litres (20 à 28% de N et 10 à 18% de SO<sub>3</sub> 100 kg).
- ✓ Et, surtout, des solutions de nitrate d'ammoniaque et d'urée titrant de 36 à 40 kg de N pour 100 litres (28,3 à 30,7% de N pour 100 kg).

Les solutions azotées sont généralement employées en couverture sur des cultures en cours de végétation. Elles nécessitent l'utilisation de dispositifs de stockage et d'épandage spécifiques.

- La cyanamide calcique CaCN<sub>2</sub> : 18 à 21% de N.

Ce produit peu utilisé contient 60 à 70% de CaO et présente surtout un intérêt pour son action désinfectante dans les herbages et les cultures maraîchères.

Les ammonitrates, les solutions azotées et l'urée apportent environ 95% de l'azote des engrais azotés simples utilisés.



**Figure 43:** Principe de fabrication des engrais azotés (Schvartz *and al.* 2005)

### III.5.2. Engrais phosphatés

D'après **Dicova (1997)**, les engrais phosphatés sont caractérisés par leur teneur en phosphore, exprimée en anhydride phosphorique P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, et par leur solubilité dans différents réactifs. Leur dénomination est décrite dans la norme française **NF U 42-001**. Parmi les nombreuses dénominations, citons les superphosphates, les phosphates naturels et les scories Thomas (Figure 44).

#### a. Superphosphates

Les superphosphates sont essentiellement des mélanges de phosphate mono-calcique soluble dans l'eau et de sulfate de calcium peu soluble, en proportions variables selon l'acide utilisé.

Ils contiennent des éléments traces, métalliques ou non, comme le manganèse, le zinc, le cadmium, le bore, le fluor ou le chrome, provenant des phosphates naturels et rendus plus solubles par l'attaque acide.

### **b. Phosphates naturels partiellement solubilisés**

Ils contiennent essentiellement du phosphore monocalcique, du phosphate tricalcique et du sulfate de calcium. Leur teneur minimale en  $P_2O_5$  total est de 20%, dont 40% doit être soluble dans l'eau ; 90% du produit doit passer à travers un tamis à mailles de 0,160 mm.

### **c. Phosphates naturels partiellement tendres (fins ou semi-fins)**

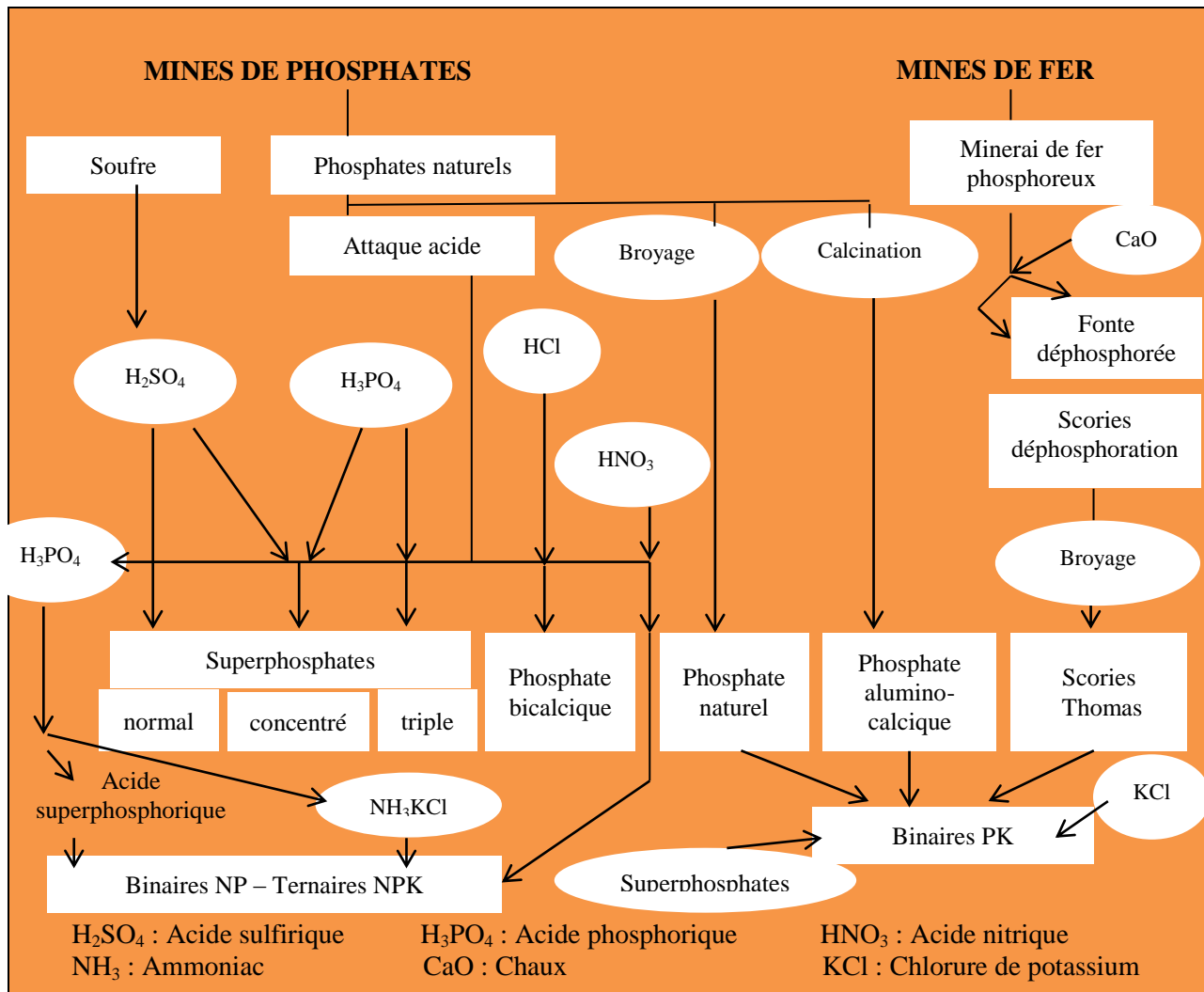
Ils dosent au minimum 25% et jusqu'à 33% de  $P_2O_5$  total sous forme de tricalcique.

La finesse de mouture et la solubilité dans l'acide formique à 2% permettent de distinguer les phosphates naturels tendres fins et les phosphates naturels tendres semi-fins. Cette forme ne convient pas aux sols à pH alcalins.

### **d. Scories Thomas**

Poudre fine (au moins 75% du produit doit passer à travers un tamis à mailles de 0,160 mm), noirâtre, peu hygroscopique, dont la densité est voisine de 2, les Scories Thomas titrent au minimum 12% de  $P_2O_5$  total, dont 75% sont solubles dans l'acide citrique à 2%. Elles contiennent 10% de CaO libre et 30 à 35% lié au phosphore, susceptibles de jouer un rôle alcalisant dans le sol. Elles renferment également du magnésium et divers éléments traces (Mn, Si, Va, Fe, Mo,...).

Les Scories Thomas doivent leur nom au sidérurgiste « personne qui travaille dans la sidérurgie, l'industrie d'élaboration du fer, de l'acier, de la fonte » britannique Thomas, qui mit au point en 1876 un procédé de déphosphoration des minerais de fer.



**Figure 44:** Principe de fabrication des engrais phosphatés (Schvartz *and al.* 2005)

### III.5.3. Engrais potassiques

Selon **Schvartz *and al.* (2005)**, le potassium se trouve dans des gisements naturels, où sont mélangés divers sels: chlorure et sulfate (Figure 45).

Les sels bruts les plus courants à l'état naturel sont :

- La sylvinite : KCl + NaCl
- La carnallite : KCl + Mg Cl<sub>2</sub>
- La kaïnite : KCl + MgSO<sub>4</sub>

C'est à partir de ces sels que sont préparés les engrais potassiques mis à la disposition de l'agriculture.

**a. Chlorure de potassium, KCl**

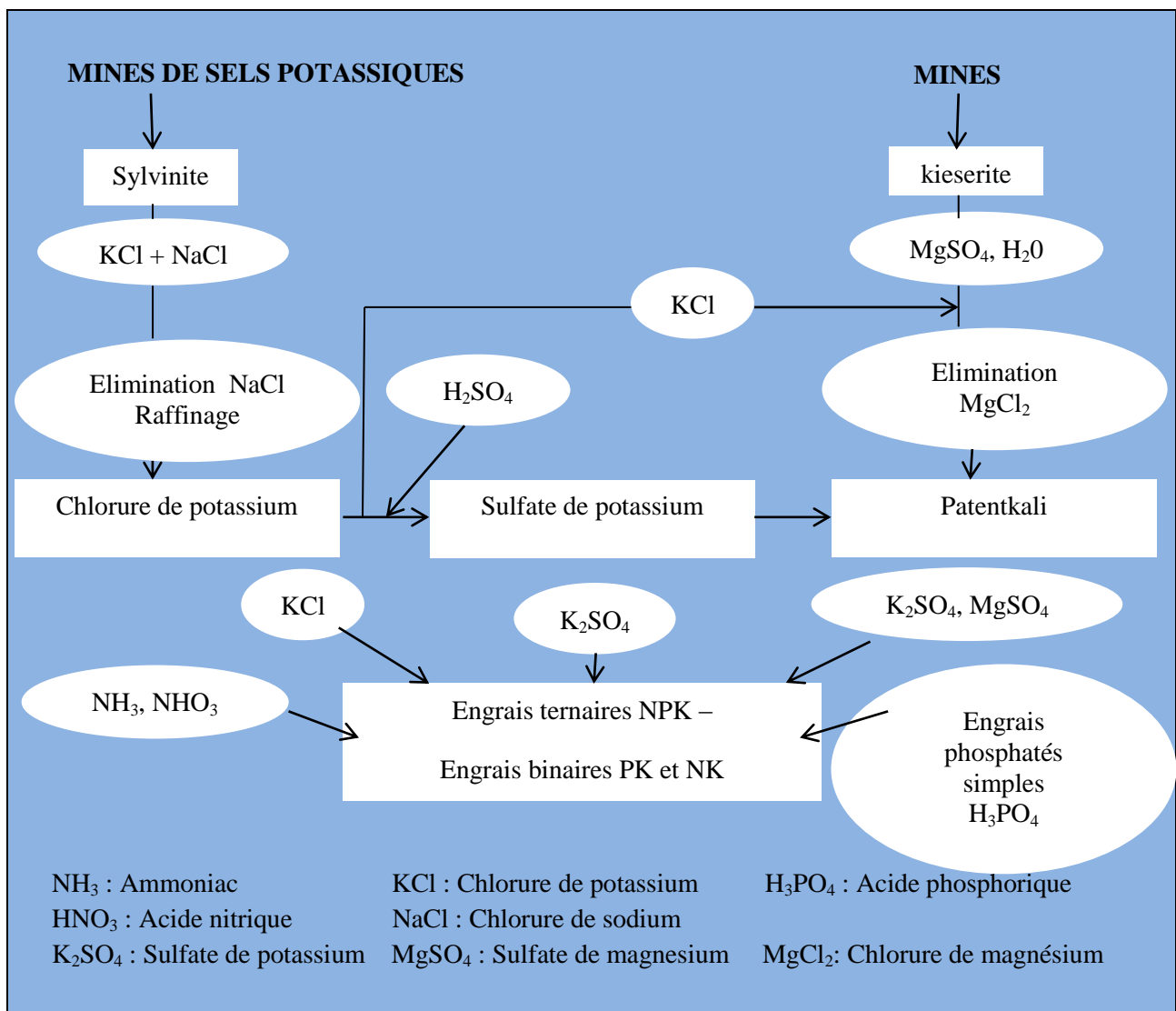
Il est pratiquement pur et se présente sous forme de chlorure « granulé », petits fragments de 1 à 5 mm obtenus par compactage sous forte pression et titrant 60% de  $K_2O$ .

**b. Sulfate de potassium,  $K_2SO_4$**

Il titre 50% de  $K_2O$  et 43% de  $SO_3$ . En raison de sa faible salinité, il est utilisé en culture maraîchère de plein champ ou en milieu contrôlé (serre).

**c. Patent-Kali,  $K_2SO_4, MgSO_4$**

C'est un sulfate double de potassium et de magnésium qui titre 30% de  $K_2O$ , 54% de  $SO_3$  et 10% de  $MgO$ .



**Figure 45:** Principe de fabrication des engrais potassiques (Schvartz and al. 2005)

## **III.6. Les engrais composés**

### **III.6.1. Définition**

Selon **Schwartz and al. (2005)**, l'agriculteur trouve à sa disposition des engrais composés contenant au moins deux des trois éléments fertilisants de base : N, P et K, pour faciliter les apports simultanés de plusieurs éléments fertilisants.

Selon les procédés de fabrication, on distingue les engrais composés obtenus par :

- ✓ Réactions chimiques ;
- ✓ Mélange physique après mouture ;
- ✓ Mélange mécanique d'engrais simples ou complexes ;
- ✓ Dissolution dans l'eau.

#### **A-Engrais composés obtenus par réactions chimiques**

Ces réactions chimiques sont réalisées entre des matières premières et des produits intermédiaires : phosphate naturel, ammoniac, acide nitrique, sulfurique et phosphorique, chlorure et sulfate de potassium, ... Sont produits ainsi :

- Des engrais ternaires NPK ;
- Des engrais binaires NP, tels que les phosphates d'ammoniaque (18% N, 46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) ;
- Des engrais binaires NK, tel que le nitrate de potassium.

Ces engrais composés sont généralement sous forme granulée.

#### **B- Engrais composés obtenus par mélange physique, après mouture d'engrais simple**

Des procédés mécaniques permettent d'obtenir une composition homogène et stable.

Cette condition doit nécessairement être remplie pour se prévaloir de la qualité d'engrais composés. Ces engrais se présentent sous forme pulvérulente, compactée ou granulée.

On distingue essentiellement des engrais ternaires NPK et des engrais binaires PK, qui sont les utilisés comme engrais de fond à l'automne : super-potassique, phospho-potassique, scories potassiques.

Les différentes matières premières phosphatés peuvent être généralement associées entre elles pour obtenir des engrais composés PK tels que les super-phospho-potassique, les scories phospho- potassiques.

#### **C- Engrais composés obtenus par mélange mécanique d'engrais simples ou complexes**

Ce procédé reprend des engrais qui se présentent déjà sous forme granulée, perlée ou compactée.

Les caractéristiques physiques de matières constitutives du mélange doivent être les plus semblables possibles pour obtenir une bonne homogénéité de l'engrais final, seule garantie d'un bon épandage.

Toute manutention peut entraîner des modifications d'homogénéité du produit.

### D- Engrais composés liquides obtenus par dissolution dans l'eau

Ces engrais liquides peuvent correspondre à des solutions vraies, ou à des produits en suspensions dans l'eau.

- Solutions claires : leur densité varie de 1,2 à 1,4 ; leur dosage peut être exprimé en kilogrammes pour 100 kg ou pour 100 litres d'engrais.
- Suspensions : elles permettent d'atteindre des teneurs en éléments fertilisants analogues à celles des engrais ternaires solides les plus concentrés. Leur épandage implique la mise en œuvre d'un matériel spécialement adapté.

### E- Désignation des engrais composés minéraux

Les engrais binaires PK et les engrais composés azotés ternaires NPK et binaires NP et NK sont désignés par une série de trois nombres donnant, dans l'ordre, les teneurs de l'engrais en azote, anhydride phosphorique et oxyde de potassium.

Par exemple (Figure 46): Un 15-11-22 contient 15% d'azote (N), 11% d'anhydride phosphorique ( $P_2O_5$ ) et 22% d'oxyde de potassium ( $K_2O$ ).

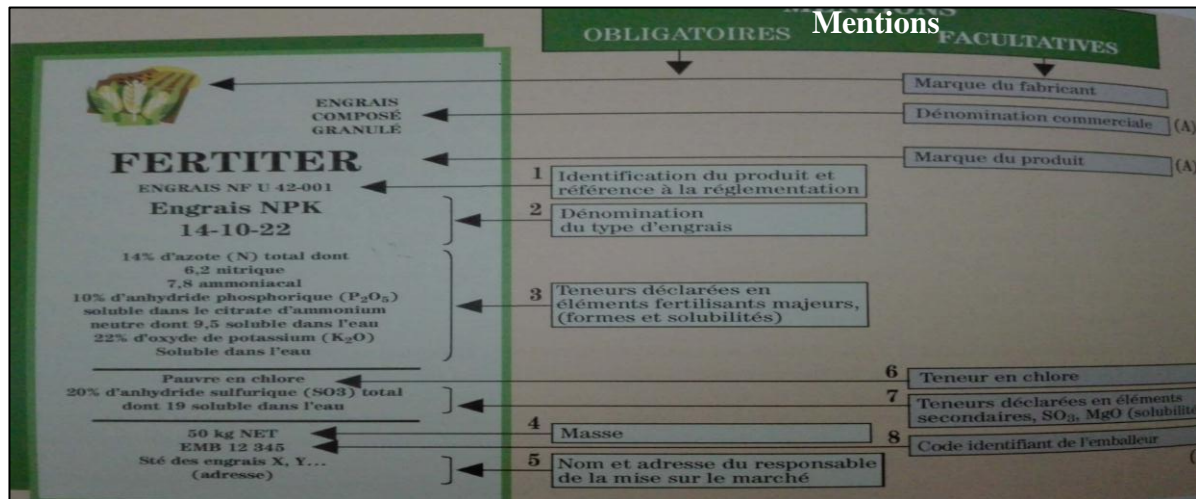


Figure 46: Exemple d'étiquetage d'un engrais (Schvartz and al. 2005)

### III.6.2. Les principaux engrais composés existants en Algérie

D'après Ramdani (2019), en Algérie, l'industrie des fertilisants, est une filière en pleine mutation. Il existe trois grands producteurs, issus des groupes internationaux, FERTIAL –

SORFERT – AOA, se partagent la production des matières premières et le marché des fertilisants, en Algérie. FERTIAL occupe la première place du podium (68% des parts de marché) en confirmant sa position de leader en matière de production et vente des fertilisants. D'après **FERTIAL (2017)**, FERTIAL se distingue véritablement dans l'offre d'une large gamme d'engrais composés (Figure 47):

- **L'AZOTE PHOSPHATE POTASSIQUE SULFATE N.P.K.S (04.20.25)**

Est un engrais complexe ternaire. Il contient 4% de N, 20% de P et 25 % de K. Engrais de fond, il est destiné à toutes les cultures pérennes dont la viticulture et l'arboriculture. Il contient également un élément secondaire :

Du soufre (12%) et des oligo-éléments : Bore (29 ppm), fer (2036 ppm), manganèse (34 ppm), zinc (173 ppm), cuivre (02 ppm).

- **L'AZOTE PHOSPHATE POTASSIQUE SULFATE N.P.K.S (10.10.10)**

Est un engrais ternaire qui contient 10% de N, 10% de P et 10 % de K. Il est polyvalent et utilisé pour le maraichage, la viticulture et l'arboriculture comme engrais de fond au moment du semis et pour les différentes plantations. Il s'adapte à tous les types de sols. Il contient également des oligo-éléments : Bore (30 ppm), fer (1723 ppm).

- **L'AZOTE PHOSPHATE POTASSIQUE CHLORE N.P.K.C (15.15.15)**

Est un engrais ternaire qui, contient 15% de N, 15% de P et 15% de K. Polyvalent, il est utilisé pour toutes les cultures maraichères et industrielles (exception faite aux cultures sensibles au chlore) comme engrais de fond au moment du semis, sur des sols non salins disposant d'une capacité de ressuyage.

- **L'AZOTE PHOSPHATE POTASSIQUE SULFATE**

- **N.P.K.C (15.15.15)**

Est un engrais ternaire qui contient 15% de N, 15% de P et 15% de K. Polyvalent, il est utilisé pour les cultures maraichères, viticulture et arboriculture comme engrais de fond au moment du semis et pour les différentes plantations. Il s'adapte à tous les types de sols. Il contient également du soufre (8%) et des oligo-éléments : Bore (45 ppm), fer (1723 ppm), manganèse (30 ppm), zinc (156 ppm), cuivre (02 ppm).



**Figure 47:** Engrais composés existants en Algérie (FERTIAL 2017)

### III.6.3. Appréciation et choix d'un engrais composé

L'appréciation de la valeur d'un engrais composé doit faire intervenir (Schvartz *and al.* 2005 ; FERTIAL 2017):

- La richesse, évaluée par la quantité d'unités fertilisantes pour 100kg d'engrais ;
- L'équilibre en NPK, car les éléments n'ont pas la même valeur marchande ni la même action fertilisante ;
- La forme sous laquelle se présentent les éléments fertilisants :
  - ✓ Pour N : nitrique, ammoniacale, uréique, cyanamidée ou organique,
  - ✓ Pour  $P_2O_5$  : soluble eau, soluble s dans différents citrates, soluble dans l'acide citrique à 2% ou soluble dans l'acide formique à 2%.
  - ✓ Pour  $K_2O$  : soluble dans l'eau ; pour les cultures qui craignent la présence de chlore, il existe des formules spéciales portant la mention « pauvre en chlore ».

Les formes de de l'engrais et leurs teneurs en éléments fertilisants Figurent obligatoirement sur l'étiquette des sacs, les factures et les documents publicitaires.

## **Chapitre IV : Les lois et la pratique de la fertilisation minérale**

### **IV.1. Les différentes lois de la fertilisation minérale**

D'après **FERTIAL (2017)**, la fertilisation a pour principal objectif l'amélioration et l'entretien de la fertilité du sol pour satisfaire les besoins des cultures. Les principes actuels de la fertilisation sont issus de trois lois fondamentales :

#### **a. La loi des restitutions au sol**

Cette loi est basée sur la compensation des exportations des éléments nutritifs par les plantes, et ce par des restitutions pour éviter l'épuisement des sols. Cette notion est insuffisante pour trois raisons :

- ✓ Certains sols sont naturellement pauvres en un ou plusieurs éléments minéraux, de ce fait ils doivent être enrichis pour satisfaire les besoins des sols cultivés.
- ✓ Généralement, les pertes d'éléments fertilisants du sol sont causées par lessivage.
- ✓ Les plantes ont des besoins intenses en éléments minéraux durant certaines périodes de leur cycle végétatif, appelés «besoins instantanés» au moment des quelles les réserves mobilisables du sol peuvent être insuffisantes.

#### **b. La loi des rendements moins que proportionnels**

Les rendements ne croissent pas proportionnellement lorsqu'on apporte au sol des doses croissantes d'un élément fertilisant.

- ✓ Au fur et à mesure que les quantités en éléments fertilisants apportées s'élèvent, les augmentations de rendement qu'on obtient sont de plus en plus faibles.
- ✓ Ainsi il existe une dose optimale de fertilisation du fait que la dose maximale n'étant pas la plus économique.
- ✓ De plus l'apport de l'élément fertilisant doit tenir compte de la capacité d'échange du sol, de la dynamique des éléments nutritifs et du rythme d'absorption des éléments.

#### **c. La loi du minimum**

Le rendement de la culture diminue suite à une insuffisance d'un élément assimilable dans le sol, qui réduit l'efficacité des autres éléments.

Tous les éléments minéraux doivent être présents selon un certain équilibre variable avec la culture. Les éléments de base (NPK) et les éléments secondaires (Ca, S, Mg) doivent être nécessairement présents en quantités suffisantes mais les oligo-éléments peuvent jouer le rôle de facteur limitant s'il y a carence en un seul élément.

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

### A/ La pratique de production de fumure vise à décrire la démarche adoptée

Selon **Thévenet (1993)**, cette pratique se déroule en quatre étapes: (i) la caractérisation des fumures nécessaires à la compréhension des pratiques ; (ii) l'identification des systèmes de la production de organiques ; (iii) la caractérisation des systèmes de production de fumures retenus ; (iv) enfin, l'évaluation de la durabilité et de la productivité de ces systèmes de production.

### B/ Les bonnes pratiques de fertilisation : au bon moment et ni trop, ni trop peu

D'après **Thévenet (1993)**, une fertilisation raisonnée s'appuie sur une analyse de la terre agricole et les conseils de fertilisation et le choix de la fumure à apporter. Face à une telle situation donnée, la conduite de la fertilisation a dû prendre en compte deux objectifs principaux :

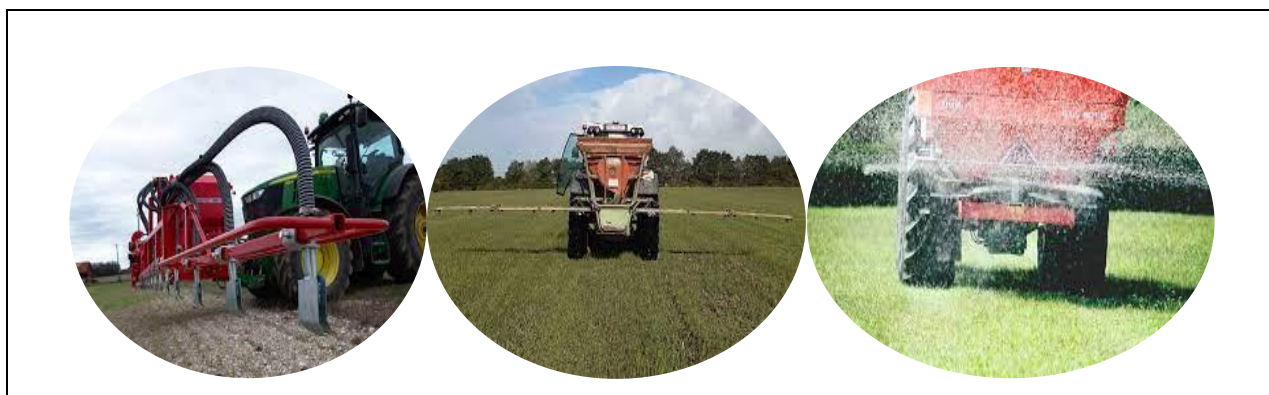
- Permettre à l'agriculteur d'adapter en permanence ses apports de fertilisants à des objectifs de rendement variables en qualité et en quantité ;
- Réduire au maximum les risques de pollution.

## IV.3. Méthode d'application des engrais

Après avoir choisi les engrais à utiliser pour une terre et une culture donnée, il reste la méthode à adopter pour obtenir les meilleurs résultats, il faut encore la faire au bon moment et à la meilleure manière (**Schvartz and al. 2005 ; FERTIAL 2017**).

### a. Epannage à la volée

C'est l'application uniforme de l'engrais à la surface du sol à traiter (Figure 48). Cela peut se faire avant le labour, immédiatement avant la plantation ou pendant la croissance de la culture.



**Figure 48:** Epannage à la volée

([https://www.agrireseau.net/legumeschamp/documents/fertilisation\\_bande.pdf](https://www.agrireseau.net/legumeschamp/documents/fertilisation_bande.pdf))

### **b. Enfouissement**

Consiste à enfouir les engrais solides ou liquides dans le sol avant les semis ou la plantation (Figure 49).

L'enfouissement d'engrais solides peut être à l'aide d'instrument simple comme la charrue, la houe...



**Figure 49:** Enfouissement de l'engrais

(<https://entrepriseagricole.be/lenfouissement-des-engrais-verts/>)

### **c. Application foliaire d'engrais chimiques**

Les feuilles des plantes sont capables d'absorber très rapidement et très complètement un grand nombre d'éléments nutritifs (Figure 50).



**Figure 50:** Application foliaire d'engrais chimiques

(<https://www.aquaportail.com/definition-753-fertilisant-foliaire.html>)

#### **d. Localisation d'engrais**

Désigne l'application de l'engrais dans le sol au voisinage de la plante ou la semence (Figure 51). Ce procédé est utilisé pour l'application de faibles quantités d'engrais. Cette pratique est fortement recommandée et s'est montrée plus profitable que l'épandage à la volée.



**Figure 51:** Localisation d'engrais

(<https://www.agriexpo.online/fr/prod/vila-maquinaria-agricola/product-175906-70490.html>)

# **Références bibliographiques**

- AFNOR, 2000.** Norme française NF X 31-006. Qualité du sol. Terminologie relative à la fertilisation.
- Beauchamp, J. (2006).** L'eau et le sol. Université de Picardie Jules Verne. URL : <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/eau-sol.htm>, Consulté le 03/10/2022 à 11h:00
- Benouadah, S., Oulbachir, K., Benaichata, L., Miara, M.D. and Snorek, J. (2020a).** Evolution of the microbial population of a cultivated soil with organic matter input under semi-arid conditions (Tiaret, Algeria). *Ukrainian Journal of Ecology*, 10(3): 28-35.
- Benouadah, S., Oulbachir, K., Benaichata, L., Miara, MD., Labdelli, F. and Rezzoug, W. (2020b).** Impact of organic amendments on soil physical properties under semi-arid climate (Tiaret, Algeria). *Journal Fundamental Applied Sciences*, 12:1386-1403.
- Benouadah, S. and Oulbachir, K. (2022a).** Contribution to the valorization of three breeding by products-preliminary estimates. *Ukrainian Journal of Ecology*, 12: 25-30.
- Benouadah, S., Faraoun, F. and Oulbachir, K. (2022b).** Incidence of manure amendment on soil organic stock under semi-arid environment. *Fresenius Environmental Bulletin*, 31(11) :10892-10902.
- Bernoux, M. and Chevallier, T. (2013).** Le carbone dans les zones sèches. Des fonctions multiples indispensables. Les dossiers thématiques du CSFD. *Agropolis International*, **10**, 1-44.
- Blake, G.R. and Hartge, K. (1986).** Bulk density. *Methods Soil Analysis*, 5: 363–375.
- Boumaaza, B. (2021).** Agronomie générale « polycopié ». Université Ibn Khaldoun Tiaret. 124p.
- Boiffin, J. and Sébillotte, M. (1982).** Fertilité, potentialités, aptitudes culturales. Signification actuelle pour l'agronomie. in Fertilité du milieu et Agriculture. *Bull. Tech. Inf*, 370-372 n° spécial : 345-353.
- Bourguignon, C. and Bourguignon, L. (1992).** Le sol « La terre et les champs ». 211p.
- Calvet R., 2003.** Le sol, Propriétés et fonctions : Phénomènes physiques et chimiques, applications agronomiques et environnementales. Tome2. Vol2. Editions France agricole. Paris. 513p.
- Calvet, R. (2013).** Le sol. Edition France Agricole. ISBN 978-85557-244-4. 345p.
- Cédra, C. (1993).** Les matériels de travail du sol, semis et plantation. 1ere Edition. Editions TEC&DOC. Lavoisier. Collection FORMAGRI. Vol3. Paris. 384p.
- Dicova, C. (1997).** Les matériels de fertilisation et traitement des cultures. Ed. Tec & Doc. Lavoisier. 276p.
- Doucet, R. (2006).** Le climat et les sols agricoles. Ed Berget A.C. Canada. 373p.
- Dridi, B. and Toumi, C. (1999).** Influence des amendements organiques et d'apports de boues sur les propriétés d'un sol cultivé (Influence of organic amendments and sludge inputs on the properties of a cultivated soil). *Etude et Gestion des sols*, 6(1): 7-14.

- FAO. (2015).** World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. FAO, Rome, Italy, 106p.
- FAO. (2018)** Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems – Guidelines for assessment (Draft for public review). Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. FAO, Rome, Italy, 64p.
- FERTIAL, (2017).** Manuel d'utilisation des engrais, publié par la Société des Fertilisants d'Algérie, 128p. URL : (<https://www.fertial-dz.com/fiches/Manuel-utilisation-des-engrais.pdf>), Consulté le 13/10/2022 à 18h:00
- Foth, D.H. (1990).** Fundamentals of soil science. eighth edition. Michigan State University.
- Koull, N. and Halilat, M.T. (2016).** Effets de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région d'Ouargla (Algerie). *Etude et Gestion des Sols*, 23, 915-923.
- Girard, M-C., Walter, C., Rémy, J-C., Berthelin, J. and Morel, J-L. (2005).** Constituants originaux du sol. *in Sols et environnement*. Dunod. Paris ISBN 2 10 005520 8. 36p.
- Gobat, J.M., Aragno, M. and Matthey, W. (2010).** Le sol vivant. 3eme édition. Presse polytechnique et Universitaire romands Lausanne. Italie. 817p.
- Grosbellet, C. (2008).** Evolution and effects on soil structure of organic matter brought in large quantities. *INRA, Sagah Angers*. Paris, 203p.
- Groupe Chaulage Comifer, (2009)** Le chaulage; des bases pour le raisonner, Brochure éditée par le Comifer, 112p.  
URL:[https://comifer.asso.fr/images/publications/brochures/brochure\\_chaulage%20maj%202012\\_chaulage%20lt.pdf](https://comifer.asso.fr/images/publications/brochures/brochure_chaulage%20maj%202012_chaulage%20lt.pdf), Consulté le 25/11/2022 à 10h:00
- Kouyaté, K (2022).** Les échanges d'ions au niveau du sol. URL : ([https://www.youtube.com/watch?v=eIzV1\\_a6R8c&list=PPSV](https://www.youtube.com/watch?v=eIzV1_a6R8c&list=PPSV)), consulté le 10/11/2022 à 19h.
- Lefèvre, R. (2015).** Matière organique stable du sol, dynamique et mécanismes de (dé) stabilisation. Thèse de Doctorat. France : Université Pierre et Marie Curie. 140p.
- Linères, M. and Djakovitch, J-L. (1993).** Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse bio-chimique Colloque GEMAS COMIFER Blois. 368p.
- Mathieu, C., Pieltain, F. and Jeanroy, E. (2003).** Analyse chimique du sol: *Méthodes choisies, Ed Tec & Doc. Paris. 233p.*
- Mathieu, C., Pieltain, F. and Jeanroy, E. (2003).** Analyse physique du sol : *Méthodes choisies, Ed Tec & Doc. Paris. 256p.*
- Montoroi, J.P. (1997).** Etude et gestion des sols. Conductivité électrique de la solution du sol et d'extraits aqueux de sol : application à un sol sulfaté acide salé de Basse-Casamance (Sénégal). Article scientifique 4, (4). Editions AFES. Montpellier. 498p.

- Morel, R. (1996).** Les sols cultivés. Lavoisier. Ed. Tec & Doc. Lavoisier, ISBN:2-7430-0149-6, 2<sup>ème</sup> édition. 389p.
- Noguera, C. (2010).** Les argiles : des nanomatériaux modernes, au passé millénaire. *MATÉRIAUX & TECHNIQUES*, 2 : 98-101.
- Oulbachir, K., Zoubeidi, M., Kouadria, M. and Bouchenafa, N. (2014).** Pratiques de conservation des agro systèmes en vue du développement durable. *Mater Environment Science journal.*, 5: 2.
- Petard, J. (2003).** Les Méthodes d'analyse, Tome 1, Analyses De Sols.
- Ramdani, L. (2019).** La relance de l'industrie algérienne des engrais comme facteur de diversification économique : une optique méso-analytique. *Revue Économie, Gestion et Société*, 19 :1-15.
- Samreen, S., Zahir, S. and Wisal, M. (2017).** Impact of organic amendments on soil carbon sequestration, water use efficiency and yield of irrigated wheat. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ « BASE »*, 21 (1), 36-49.
- Siboukeur, A. (2013).** Assessment of the fertilizing value of different types of manure. Mémoire de Master. Algérie: Université Kasdi Merbah, Ouargla. 220p.
- Schwartz C., Muller J-C. and Decroux J. (2005).** Agriculture et fertilisation. *in* Guide de la fertilisation raisonnée. France Agricole. Comifer, ISBN : 2-85557-120-0, 473p.
- Scott, N.M., (1981).** Evaluation of sulfate status of soils by plant and soil test. *J. Sci. Food Agric*, 32 : 193-199.
- Segalen, P. (1970).** La cartographie pédologique. *In* pédologie et développement. 215p.
- Soltner, D. (2005).** Les bases de la production végétale. Le sol et son amélioration. Tome I, 24<sup>ème</sup> Ed; collection Sciences et techniques agricoles.
- Thévenet, G. (1993).** La fertilisation raisonnée. Du concept du raisonnement aux applications pratiques ; la démarche du COMIFER. Ingénieur de la vie, 427 Spécial/ Fertilisation Agriculture et Environnement, 245p.
- Vilain, M. (1997).** La production végétale. Ed. Tec & Doc. Lavoisier.
- Znaïdi, I.A. (2002).** Etude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques et des effets des jus de composts biologiques sur les maladies des plantes. Thèse de Master. Tunisie. 158p.

# **Annexes**

# **Annexe 1: Glossaire**

## **Agronomie**

Le mot « agronomie » recouvre l'étude scientifique des problèmes physiques, chimiques et biologiques que pose la pratique de l'agriculture.

Ce terme correspond pour les spécialistes à l'étude du fonctionnement des peuplements végétaux cultivés et des systèmes de culture en interactions avec le climat et le sol.

L'objet de l'agronomie est alors d'une part de construire une théorie du fonctionnement global d'un peuplement végétal cultivé et, d'autre part, de fournir les éléments du raisonnement de la conduite des cultures, en particulier du travail du sol et de la fertilisation.

## **Amendement**

Substance incorporée au sol pour améliorer sa constitution physico-chimique. On distingue les amendements organiques, les amendements calcaires et les amendements magnésiens.

### **Amendement calcique**

Apport de roches plus ou moins broyées et exogènes à une parcelle agricole. Ces mini morceaux de roche contiennent un calcium dit "insoluble", et d'autres choses. En réalité ce calcium se solubilisera plus ou moins rapidement suivant la finesse de broyage de la roche et sa tendreté.

## **Argiles**

Ce sont les particules les plus fines des sols. Leur nature dépend du climat et de la composition de la roche mère. Leur extrême importance dans les sols tient à leur nature colloïdale et à leur structure en feuillets qui déploie une très grande surface permettent ainsi de mettre en réserve les éléments nutritifs du sol et d'offrir un contact étroit avec les microbes du sol. On dénombre plus de 1500 types d'argiles dont les surfaces internes (celle des feuillets) vont 30 m<sup>2</sup>/g à 800 m<sup>2</sup>/g.

## **Bilan humique**

Selon la structure du sol, le pH, la profondeur de labour, le coefficient de minéralisation, les pertes d'humus peuvent être plus ou moins importantes et rapides. Afin de préserver la fertilité du sol, ce déficit doit être compensé par l'apport de matières organiques restituées par des cultures (résidus de récoltes, pailles, prairies...), par des élevages (fumiers, lisiers...) ou

par d'autres activités (composts, boues résiduaires...). Le bilan humique indique le solde positif ou négatif entre les pertes et les gains de matières organiques, évalués soit de manière prévisionnelle, soit au terme d'un exercice cultural.

### **Biomasse**

Masse totale des organismes vivants présents à un moment donné dans un biotope, ici, en l'occurrence le sol. On exprime cette biomasse du sol en poids par hectare.

### **Calcaire**

Roche contenant une majorité de carbonate de calcium dans sa composition.

### **Calcium**

Élément chimique du tableau de Mendeleïev. Dans de l'eau, l'ion calcium porte deux charges positives.

### **Carbonates**

Sels de l'acide carbonique. Dans les sols, on rencontre surtout les carbonates de calcium et de magnésium. Les microbes, en séparant l'acide carbonique du calcium, libèrent ce dernier dans les sols. Les sols sédimentaires sont souvent riches en carbonates de calcium.

### **Carence**

Maladies des plantes dues à l'absence ou à l'insuffisance d'un élément minéral dans le sol (azote, phosphore, potasse, fer et magnésium ou oligoélément agissant à très faible dose : zinc, manganèse, cuivre, bore, molybdène, etc.).

### **Chaulage**

Action de chauler une terre agricole avec de la chaux ou un autre amendement calcique. Cette pratique est courante dans les sols trop acides pour lutter contre l'acidité et dans les sols dépourvus ou trop pauvres en calcium.

### **Chlorose**

Carence en chlorophylle des plantes se traduisant par la coloration jaune pâle des organes qui devraient être verts (feuilles, tiges) et pouvant avoir des causes diverses (anomalie génétique, carence du sol en fer, infections parasitaires, etc.).

## **Complexe argilo-humique**

Ensemble ou complexe constitué par de l'argile et de l'humus. Ces deux éléments colloïdaux sont liés par l'intermédiaire d'ions  $\text{Ca}^{++}$ , d'ions  $\text{Fe}^{++}$  et, le cas échéant, par attraction électronique. L'humus protège l'argile contre sa dispersion et stabilise la structure du sol. Par ses propriétés absorbantes, le complexe argilo-humique retient la solution du sol et limite les risques de lessivage des éléments nutritifs.

## **Engrais**

Matière fertilisante dont la fonction principale est d'apporter aux plantes un (des) élément (s) directement utile (s) à leur nutrition.

## **Fertilisation**

L'ensemble des techniques agricoles permettant la mise en œuvre des matières fertilisantes assurant la fertilité du sol.

La fertilisation engloberait toutes les pratiques agricoles. Ces opérations ont pour but de conserver ou d'améliorer la productivité d'une terre agricole.

La fertilisation est un concept clair, lié à la définition des matières fertilisantes et qui inclut d'une part les engrais dont la fonction principale est d'apporter des éléments nutritifs aux plantes, d'autre part les amendements destinés à améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

## **Horizon**

Couche du sol plus ou moins épaisse et sensiblement parallèle à la surface. La succession des horizons profonds minéraux, intermédiaires organo-minéraux et superficiels organiques, forme les sols. L'agriculteur doit connaître les horizons de son sol ou ce que l'on appelle le profil de son sol.

## **Humification**

L'ensemble de transformations biologique et chimique de la litière organique en humus. Le processus se sépare en trois phases : le broyage par la macrofaune, les transformations biochimiques de la microflore et la polymérisation chimique.

## **Humus**

Substance organique complexe du sol issu de la décomposition et transformation de la litière et des animaux. Sa nature colloïdale en fait avec l'argile le réservoir des substances nutritives du sol et la source de stabilité du sol. Il forme avec l'argile des complexes argilo-humiques, contribue à la capacité d'échange cationique (CEC) et favorise l'activité biologique du sol.

La matière organique du sol est estimée par l'analyse de sa nature en carbone organique. On distingue la matière organique libre et la matière organique liée : la matière organique libre est séparable par des moyens physiques ; elle correspond aux débris végétaux (résidus culturaux divers, racines mortes). La matière organique liée n'est pas séparable par des moyens mécaniques, car elle est intimement associée aux minéraux du sol.

## **Lessivage**

Entrainement par l'eau de percolation de particules fines du sol et de substances dissoutes. Ce terme est couramment utilisé en agronomie pour désigner un entrainement par l'eau de percolation d'éléments minéraux hors de la zone potentiellement exploitable par les racines. L'azote est particulièrement concerné par le lessivage.

## **Lixiviation**

Du latin *lixivia* qui signifie lessive, le terme lixiviation est utilisé en agronomie pour préciser des situations de lessivage conduisant à l'entrainement dans le sol d'éléments solubles par l'eau qui percole.

## **Matières organiques**

L'ensemble des substances carbonées provenant des débris végétaux, des déjections et des cadavres d'animaux. Les matières organiques se transforment en permanence, passant de l'état de « matières organiques fraîches » (restes de récolte, fumier...) à l'état d'humus et d'éléments minéraux assimilables par les plantes. Sous la forme d'humus, les matières organiques représentent de 1 à 5% du poids de la couche de sol travaillée. Les matières organiques exercent un rôle très important sur la formation et l'évolution des sols. Elles améliorent les propriétés physiques de la terre (stabilité structurale, capacité de rétention en eau, porosité...) et ses propriétés chimiques (libération progressive d'éléments nutritifs, notamment l'azote).

## **Nécrose**

Mortification tissulaire et cellulaire se produisant au niveau d'un tissu, d'un organe, d'une région anatomique, alors que le reste de l'organisme continue à vivre.

## **Pédologie**

Elle est définie essentiellement par son objet : l'étude des sols.

Elle a été limitée à l'étude de la formation et de l'évolution des sols (pédogénèse), et a difficilement à trouver sa place entre la chimie et l'agronomie.

A partir de 1960, est introduite la notion de pédon : volume élémentaire nécessaire et suffisant pour définir à un instant donné l'ensemble des caractères structuraux et des constituants matériels d'un sol. Il est l'unité de base des descriptions et des classifications pédologiques qui décrivent des « types » de sol.

## **Rendzine**

Sol développé sur roche carbonatée ou calcaire, caractéristique par sa faible profondeur et son contraste entre un horizon de surface formé d'humus carbonaté et de couleur noire reposant directement sur l'horizon minéral formé par la roche mère. On peut aider ces sols jeunes à évoluer en cultivant des engrais verts pour stimuler la vie microbienne afin de décarbonater l'humus et de stimuler la formation de complexe argilo-humique.

## **Rhizosphère**

Zone du sol située à moins de deux centimètres d'une racine vivante et recevant donc l'influence des exsudats racinaires. Du fait de la nourriture venant des racines, l'activité microbienne est intense dans le sol rhizosphérique.

## **Sol**

La partie meuble de la lithosphère, cette couche constitue la couverture pédologique, c'est une ressource fondamentale non permanente, très lentement renouvelable, qu'il faut protéger au même titre que l'eau et l'air.

# **Annexe 2: Etude de cas**

## IMPACT OF ORGANIC AMENDMENTS ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES UNDER SEMI-ARID CLIMATE (TIARET, ALGERIA)

S. Benouadah, K. Oulbachir\*, L. Benaichata, M. D. Miara, F. Labdelli, W. Rezzoug

Université de Tiaret, Faculté SNV, Laboratoire d'Agrobiotechnologie et de Nutrition en  
Zones semi-aride, Algérie

Received: 12 June 2020 / Accepted: 30 August 2020 / Published online: 01 September 2020

### ABSTRACT

Soil organic matter (SOM) is a cost-effective and informative indicator of physical fertility. The aim of this experimental work is to assess the effects of organic amendments such as manures on soil physical properties under semiarid climate. A 4-seasons field experiment was conducted using three manures included poultry, horse and cattle. All manures were applied at doses 20% and 40%. According to the experiment average data in the top soil (0-20 cm) indicated that all treatments were recorded a significant improvement of soil physical properties in comparison to control soil such as bulk density, porosity, water retention capacity, saturated hydraulic conductivity and structural stability. The very highly significant effect ( $P < 0.001$ ) was observed in poultry manure (FV40) treatment, the possible reasons may be due to their low C:N ratios and high intrinsic nutrient contents.

**Key words:** Manures; Soil physical properties; Semiarid climate; Algeria.

Author Correspondence, e-mail: [oulbachir.k2019@gmail.com](mailto:oulbachir.k2019@gmail.com)

doi: <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v12i3.25>



## 1. INTRODUCTION

A l'instar des sols méditerranéens, les sols d'Algérie sont généralement caractérisés par leur faible taux de matière organique (MO), conséquence du type de climat qui règne dans nos régions et des systèmes culturels pratiqués qui ne sont pas favorables à la constitution d'une réserve organique du sol [17]. Les matières organiques exportées par les récoltes, dans des sols déjà pauvres, ne sont pas remplacées de manière adéquate [21]. Cette pratique, combinée à la pression foncière, a accentué la pauvreté des sols et favorisé la migration des agriculteurs à la recherche de nouvelles terres cultivables vers les aires protégées. Dès lors, la disponibilité des terres cultivables, le problème de leur dégradation (300 000 ha par an) et de leur reconstitution sont devenus une préoccupation majeure à l'échelle nationale [24]. Ces sols, compte tenu de leurs caractéristiques, présentent de mauvaises qualités physiques [17,24], pour les améliorer, il est important de maintenir les niveaux de la matière organique du sol ( $3\% \leq MO \leq 4\%$ ) [21], qui affectent directement ces propriétés physiques et sa perte est directement responsable de la dégradation de sa qualité [27,28]. Il est admis aussi qu'un sol dont le taux de matière organique est bas se compacte facilement et perd de ce fait une partie de sa fertilité physique [17,29,34] ; cela représente une menace pour la survie à long terme de la production agricole et du sol [43]. Une solution possible pour amortir la dégradation de cette ressource naturelle consiste à appliquer des amendements organiques à ces sols, afin d'améliorer leurs propriétés [55,40,53,17,47]. Cependant, il est très clair que les études sur les amendements organiques sont encore insuffisantes, notamment en Algérie et plus précisément dans la région semi-aride où ces types de sols occupent de grandes surfaces. Dans cette perspective, notre travail a consisté en une étude comparative permettant de décrire, comprendre et connaître les impacts de deux doses (20% et 40%) de trois types de fumiers à savoir ; volailles, chevaux et bovins sur les paramètres physiques du sol. En effet ces systèmes œuvrent pour une gestion durable, étant donné qu'elles ont tendance, à diminuer le recours aux intrants chimiques, valoriser les déchets, contribuer à protéger la ressource sol et améliorer son statut organique.

## 2. MATERIEL ET METHODES

**Zone d'étude :** L'étude a été effectuée à la station expérimentale de Sébaine (Institut Technique des Grandes Cultures), située à 25 km au nord de la wilaya de Tiaret qui fait partie des hautes plaines céréalières de l'ouest Algérien, dont les coordonnées sont  $x = 1^{\circ}36'27''$ ,  $y = 35^{\circ}27'32.4''$  et  $z = 960\text{m}$ . Le climat de la région est méditerranéen semi-aride avec une température moyenne de  $15.4^{\circ}\text{C}$  et une pluviométrie annuelle moyenne de 410 mm durant la période 1985-2019 [37].

**Site expérimental :** Avant l'expérimentation, des échantillons composites de sol (0-20 cm) ont été prélevés, séchés à l'air, broyés, tamisés à 2 mm et analysés pour la caractérisation physico-chimique, considérée comme base de référence pour l'étude. Le sol (tableau 1) utilisé a une texture argilo-limoneuse, modérément neutre. Il est calcaire et non salé. Sa teneur en matière organique est relativement faible et sa teneur en azote est relativement appréciable. Les fragments grossiers tels que les graviers et les résidus de récolte représentent moins de 1% de la masse de l'échantillon témoin, considérée comme négligeable.

**Tableau 1 :** Caractéristiques physicochimiques du sol témoin (0-20 cm)

Paramètre	Valeur	
Granulométrie	Argile (%)	47%
	Limon (%)	35%
	Sable (%)	18%
Classe texturale	Argilo-limoneuse	
pH eau (1 :5)	7.25	
CE (1 :5)	$0.1 \text{ dS.m}^{-1}$	
Matière Organique	1.5%	
Densité apparente	$1.26 \text{ g.cm}^{-1}$	
Densité réelle	$2.46 \text{ g.cm}^{-1}$	
Azote total	0.08%	
Calcaire total ( $\text{CaCO}_3$ )	24%	
Fragments grossiers	0.95 (%)	

Pour notre étude, nous avons travaillé avec trois types de fumiers afin de comparer leurs effets sur les propriétés physiques du sol. Les fumiers de bovins et de volailles bien décomposés (environ 12 mois) ont été collectés auprès des agriculteurs locaux et le fumier de chevaux a été collecté de la Grande Jumenterie de la wilaya Tiaret (Algérie) : il s'agit de fumier frais composé d'un mélange de paille et de déjections de chevaux de différentes races "Barbe, Arabe-Barbe, Purcent Arabe et Selle Français". Après séchage à l'air, un échantillon représentatif de chaque fumier a été prélevé et transféré au laboratoire d'Agro-Biotechnologie et de Nutrition en Zones Semi-arides de l'Université de Tiaret, Algérie et analysé pour le C total par calcination [22], N total par la méthode de Kjeldhal [42], K total et P total par le spectrophotomètre à adsorption atomique (SAA) [48]. Les résultats analytiques des différents échantillons de fumiers (tableau 2) montrent que les pH des trois fumiers sont moyennement alcalins. Les teneurs les plus élevées en N (2,10%) et en K (2,2%) sont enregistrées par le fumier de volailles et les teneurs les plus élevées en C (28,17%), en P (2,3%) et en FG (42%) sont enregistrées par le fumier de chevaux. Le rapport C/N du fumier varie de 11.20 pour le fumier de volaille à 31,3 pour le fumier de chevaux, le fumier de bovins occupe une position intermédiaire.

**Tableau 2 :** Caractéristiques physicochimiques des fumiers utilisés

Fumier	pH (eau)	C Total	N Total	C/N	P Total	K Total	FG
FV	7.8	23.53 (%)	2.1 (%)	11.20	1.5 (%)	2.2 (%)	8 (%)
FC	8.15	28.17 (%)	0.9 (%)	31.3	2.3 (%)	0.7 (%)	42 (%)
FB	7.92	27.26 (%)	1.05 (%)	25.96	1.03 (%)	0.93 (%)	16 (%)

*FV : Fumier de Volailles ; FC : Fumier de Chevaux ; FB : Fumier de Bovins ; pH : Potentiel Hydrogène; C Total: Carbone organique Total; N Total: Azote Total; P Total: Phosphore Total; K Total: Potassium Total; FG: Fragments Grossiers.*

Chaque fumier était bien mélangé puis incorporé dans le sol (0-20 cm) selon la dose indiquée pour chaque type de traitement (30 novembre 2018), par conséquent, l'étude a été réalisée dans une parcelle qui mesure 1173m<sup>2</sup>, divisée en blocs avec trois répétitions, comparant six traitements à un sol témoin (T : fumier à 0%); (FV20, FC20, FB20: fumier à 20%) et (FV40, FC40, FB40: fumier à 40%), ces doses ont été utilisées par [21]. Les

prélèvements ont été effectués en (hiver: 28 février 2019), (printemps: 30 mai 2019), (été: 27 août 2019) et (automne: 25 novembre 2019), soit 3, 6, 9 et 12 mois après la mise en place du site expérimental. Les dates de prélèvements ont été nommées respectivement 3M, 6M, 9M et 12M.

Sur ces échantillons, sont effectuées les analyses physiques selon les méthodes suivantes : densité apparente par la méthode du cylindre calibré ( $252.2 \text{ cm}^3$ ) [5], porosité dont le calcul s'est fait à partir de la densité apparente et de la densité réelle [31], perméabilité par la loi de Darcy on s'est basé sur le coefficient de perméabilité **K** [21], rétention en eau par séchage au four ( $105^\circ\text{C}$ , 24h) et soustraction des masses de sol sec et de sol saturé [44] et la stabilité structurale selon la méthode de **Henin (1955)** on s'est basé sur l'indice d'instabilité **I<sub>s</sub>**, citée par [31].

Le traitement des résultats a été effectué par une analyse statistique (analyse de la variance ANOVA par SPSS « version 22 »).

### 3. RESULTATS ET DISCUSSION

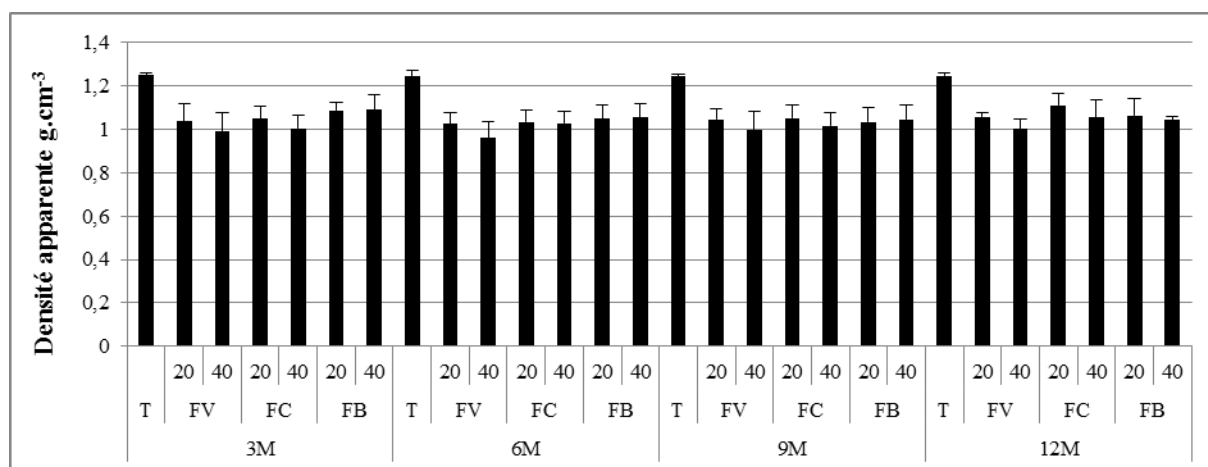
#### Densité apparente et porosité

La densité apparente du sol traduit globalement l'état de compaction du sol et indirectement, la porosité totale [3]. Elle est l'un des paramètres les plus importants dans les études portant sur la structure du sol [11].

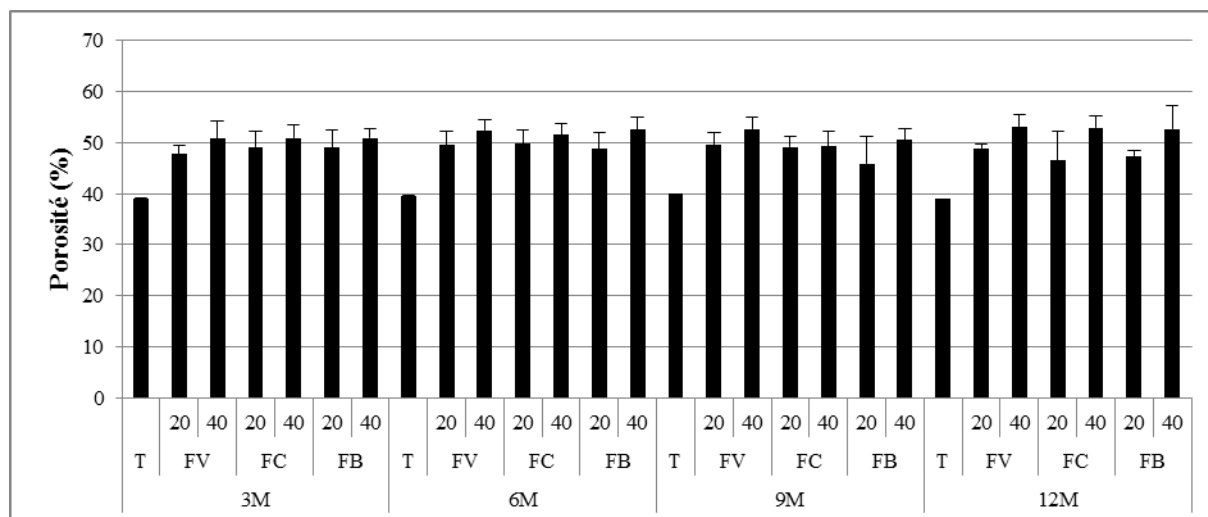
Les résultats analytiques illustrés dans la figure 1 montrent que la densité apparente du témoin est de ( $1,25 \pm 0.01 \text{ g.cm}^{-3}$ ) durant l'expérimentation. Elle est supérieure à la densité apparente mesurée dans les sols amendés : de l'ordre de ( $1,045 \pm 0.05 \text{ g.cm}^{-3}$ ) pour les sols amendés avec 20% de fumier, de ( $0,98 \pm 0.055 \text{ g.cm}^{-3}$ ), ( $1,020 \pm 0.07 \text{ g.cm}^{-3}$ ) et ( $1,033 \pm 0.044 \text{ g.cm}^{-3}$ ) pour les traitements FV40, FC40 et FB40 respectivement. D'après la figure 2, la porosité augmente avec l'apport de la matière organique et pendant toute la période expérimentale (de  $45.83 \pm 5.524 \%$  à  $53.183 \pm 2.287 \%$ ) en comparaison avec le témoin ( $39 \pm 0.01\%$ ). L'amendement organique a diminué la densité apparente et évolué la porosité significativement avec l'augmentation de la dose apportée. L'amélioration est plus remarquable pour le traitement FV40, ceci s'explique par l'augmentation de la teneur en

matière organique (qui rend le sol plus facile à travailler car ils est plus léger) et par la texture du fumier et encore à l'activité biologique que leur incorporation provoque [21]. L'analyse statistique de la variance ANOVA (tableau 3) confirme que le traitement FV40 a un effet très hautement significatif ( $P < 0.001$ ) sur la densité apparente et la porosité. D'après [18], la matière organique exogène améliore la structure des sols car l'humus qui en résulte prévient le tassement en une masse solide et favorise la granulation des particules, rendant les sols plus légers, plus poreux et mieux aérés. D'après [48], la matière organique agit comme régulateur de l'humidité du sol et elle augmente sa porosité et favorise sa conductivité hydraulique.

Ces résultats renvoient aux différences de densité apparente et de porosité entre les traitements et le sol témoin durant l'expérimentation. Selon [33], une valeur élevée de densité apparente signifie que les vides sont réduits et que les particules sont fortement compactées donc l'amélioration de la densité apparente et de la porosité des sols amendés signifient que le fumier a un effet de structuration [17,47].



**Fig.1.** Evolution de la densité apparente du sol ( $\text{g.cm}^{-3}$ )



**Fig.2.** Evolution de la porosité du sol (%)

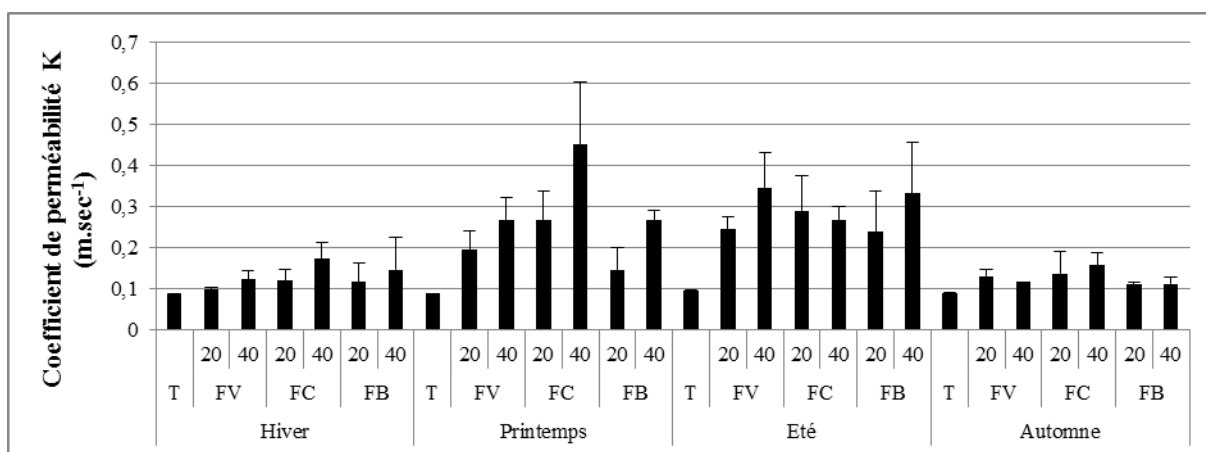
### Perméabilité

La perméabilité a été mesurée avec des échantillons non déstructurés et a fait l'objet d'une analyse de variance ANOVA qui a montré que les mesures de la perméabilité réalisées sur le témoin ne sont pas différentes au cours du temps (pour  $\alpha = 0.05$ ) et elles sont inférieures ( $0.090 \pm 0.01 \text{ m.sec}^{-1}$ ) à celles des sols amendés car les sols à textures fines étant les moins perméables [30]. Pour les traitements FV20, FC20 et FB20 comme pour FV40 et FB40, les valeurs de la perméabilité (figure 3) augmentent du 3ème au 9ème mois puis diminuent rapidement en automne par minéralisation de la matière organique des fumiers d'où on ne mesure pas de différence significative entre les traitements FV et FB.

Pour le traitement FC40, la perméabilité a évolué fortement et d'une façon très hautement significative ( $P < 0.001$ ) au 6ème mois ( $0,452 \pm 0,151 \text{ m.sec}^{-1}$ ). Ce résultat est surprenant dans la mesure où ce type de fumier est riche en fragments grossiers (il contient plus de 40% d'éléments supérieurs à 2mm, voir tableau 2), qui devraient permettre d'augmenter de façon significative la perméabilité [21]. Selon [13], la paille de céréales est une excellente source de matière organique contenue dans les fragments grossiers de fumier de chevaux. Au 9ème mois, la perméabilité diminue, ce qui témoigne la dégradation des fragments grossiers, soit par fragmentation physique, soit par minéralisation; coïncidant significativement ( $P < 0,001$ ) avec la période estivale au moment où les facteurs pédoclimatiques tels que l'humidité et la température du sol étaient favorables au déclenchement de cette minéralisation. Le fumier frais est facilement utilisable par les micro-organismes décomposeurs du sol et peut

également stimuler la dégradation de la matière organique préexistante dans le sol. Cet effet, communément nommé «priming effect» [16]. Au 12ème mois, les mesures de perméabilité diminuent rapidement dues à une intense minéralisation de la matière organique [56]. Une surminéralisation de la matière organique du sol peut être observée par un apport de matière organique fraîche [16] ce qui est en accord avec nos résultats.

La matière organique peut influencer les mesures de perméabilité par la taille des particules, ainsi que par la dose apportée [54]. L'amélioration de la perméabilité pourrait s'expliquer notamment par la quantité d'humus qui en résulte après la décomposition de la matière organique, rendant les sols plus meubles et augmentant ainsi leur perméabilité à l'air et à l'eau [18]. Elle dépend également du volume poral, plus ce dernier augmente et plus la perméabilité est susceptible d'augmenter [8]. La richesse des fumiers en particules grossières aurait pu entraîner un effet "mécanique" [23,19] en créant une macroporosité importante. Ça n'a pas été le cas, dès le 6ème mois pour le traitement FC40 et au 9ème mois pour tous les autres traitements, ce qui confirme la minéralisation de la matière organique apportée. En ce qui concerne l'importance de la dose de matière organique, globalement, la perméabilité augmente avec la teneur en matière organique, ce qui est cohérent avec nos résultats et conformes aux études [39,32,1,54,21,]. [23,26], ont montré que l'application du fumier de ferme a également amélioré la perméabilité et la densité apparente du sol.



**Fig.3.** Evolution de la perméabilité du sol (m.s<sup>-1</sup>)

### Rétention en eau

La rétention en eau comme la perméabilité ont été mesurées dans des échantillons non déstructurés. Les résultats analytiques illustrés dans la figure 4 montrent que les mesures de la

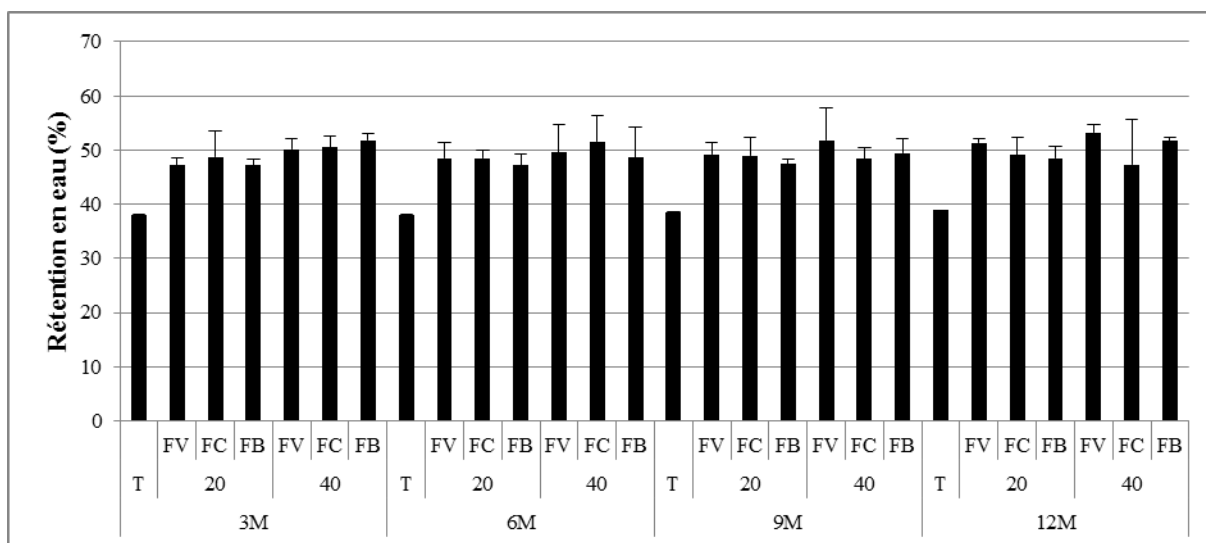
rétenion en eau des sols amendés sont supérieures à celle mesurée durant l'expérimentation pour le témoin ( $38.5 \pm 0,008\%$ ). Il a été intéressant de constater que quel que soit le traitement considéré, on enregistre une augmentation de la capacité de rétenion en eau. Globalement les teneurs en eau des sols amendés contenant 40% de fumier sont plus élevées que celles des sols amendés à 20% ce qui est cohérent avec les résultats trouvés par [21]. La rétenion en eau augmente avec l'apport de la matière organique, elle passe ainsi à ( $51,316 \pm 0,715\%$ ,  $49,113 \pm 3,16$ ,  $48,55 \pm 2,198$ ,  $53,213 \pm 1,489$  et  $50,733 \pm 0,717\%$ ) respectivement pour les traitements FV20, FC20, FB20, FV40 et FB40. Pour le traitement FC40, la rétenion en eau a évolué progressivement jusqu'au 6ème mois ( $51,53 \pm 4,922\%$ ) puis elle a diminué d'une façon très hautement significative ( $P < 0.001$ ) à partir du neuvième mois, du fait d'une minéralisation rapide de la matière organique (fragments grossiers) [56]. [51,24], ont indiqué que la matière organique était détruite rapidement par minéralisation en périodes chaudes, ce qui confirme nos résultats.

Le fumier en cours d'humification comme toutes les autres sources de matière organique a amélioré significativement et durablement les propriétés de rétenion en eau des sols amendés, cette amélioration est maintenue au cours du temps, malgré la dégradation des produits organiques [24]. [34,26] ont indiqué que la matière organique retient d'autant mieux l'eau qu'elle est humifiée car l'humus qui en résulte favorise une meilleure réserve en eau, grâce à son pouvoir d'absorption (caractère hydrophile) élevé, et tend, du même coup à réduire l'évaporation et à augmenter la résistance à la sécheresse [15,10,30,18,12]. Selon [52], le taux d'acide fulvique de la matière organique augmente en fonction de son humification et par conséquence la quantité d'eau absorbée par la matière organique augmente.

Les matières organiques sont de 2 à 5 fois plus adsorbantes que les meilleures argiles [20].

Ceci est dû au fait que les composés humiques possèdent une charge négative supérieure à celle des colloïdes minéraux [49]. En général, la matière organique retient physiquement plus d'eau que les composés minéraux du sol (sable, limon et argile), ainsi elle augmente la rétenion du sol en eau [24]. Nos résultats sont cohérents avec de nombreuses recherches qui montrent que la matière organique apportée améliore d'une façon déterminante les propriétés de rétenion en eau [41,38,45,9,21]. [35] ont montré que les amendements organiques ont

augmenté significativement la rétention en eau. Tandis que, [17] a trouvé des résultats contradictoires qui révèlent que le fumier n'améliore pas de façon efficace la réserve en eau.



**Fig.4.** Evolution de la rétention en eau du sol (%)

### Stabilité structurale

La stabilité structurale du sol signifie la résistance opposée par les agrégats contre toute action des facteurs externes tendant à les dégrader ou à les détruire, et celle de l'eau en particulier [31].

Les résultats envisagés dans la figure 5 révèlent que l'indice d'instabilité (Is) du témoin est de  $(1,34 \pm 0,01)$  durant l'expérimentation. D'après les classes de stabilité structurale, le sol initial a une stabilité médiocre [31]. En ce qui concerne les sols amendés, la matière organique a diminué significativement l'indice d'instabilité ( $P < 0,001$ ). La plus faible valeur est  $(1,041 \pm 0,014)$  obtenue sous le traitement FV40 après 3 mois. Ces résultats mettent en évidence le rôle de la matière organique dans la stabilisation de la structure [21].

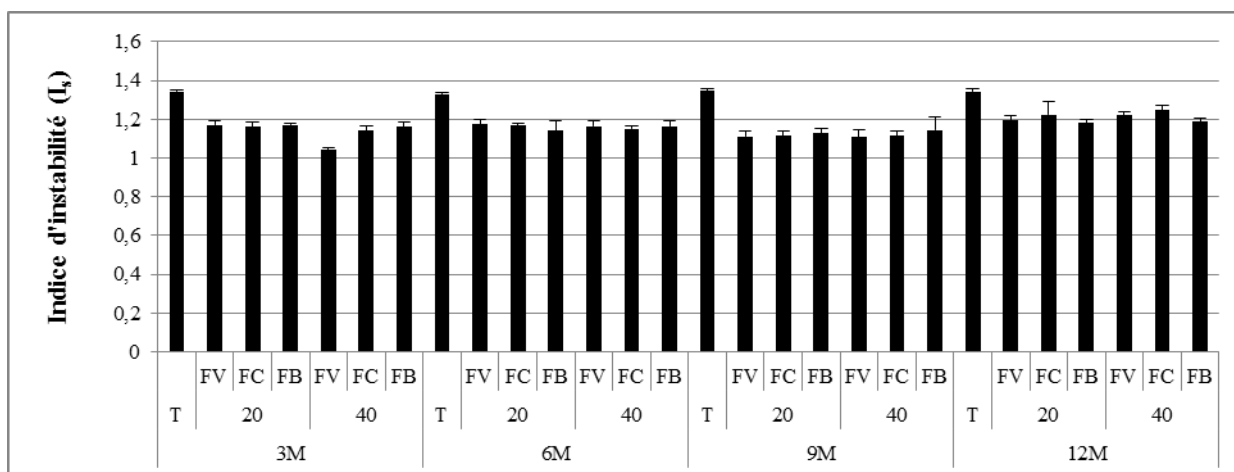
Les matières organiques assurent la cohésion des autres constituants du sol entre eux et contribuent à la structuration du sol et à sa stabilité [21]. Ainsi, la matière organique apportée au sol joue un rôle central dans sa structuration et participe à sa stabilité vis-à-vis des agressions extérieures (pluie, tassement...) en limitant notamment l'érosion hydrique [12]. Dans ce cadre, les résidus organiques à rapport C/N élevé favorisent davantage la genèse de la structure [46].

Des résultats similaires ont été rapportés dans une étude de sol où ont été comparés les amendements organiques : les fumiers frais et déshydraté confèrent au sol la meilleure

stabilité structurale par apport aux composts [50]. Les matières organiques fraîches, à la surface du sol, atténuent le choc des gouttes des pluies et permettent à l'eau pure de s'infiltrer lentement dans le sol ; l'écoulement en surface et l'érosion sont ainsi réduits [6].

[4] s'interroge sur l'existence potentielle d'un seuil au-delà duquel l'apport de matière organique n'a plus, ou moins, d'effet sur la stabilité des agrégats. Il montre que ce seuil se situe autour de 3%, en travaillant en conditions contrôlées. Les doses de carbone que nous avons incorporées sont supérieures à celle proposée par [4], mais il est intéressant de constater que la structure des sols amendés se stabilisait dès le 3<sup>ème</sup> mois.

La stabilité structurale joue un rôle important dans la fertilité physique du sol car elle influence l'aération, la circulation de l'eau et la perméabilité [31].



**Fig.5.** Evolution de la stabilité structurale du sol

**Tableau 3** : Analyse de la variance ANOVA : paramètres physiques du sol

<b>Paramètres</b>	<b>Variables</b>	<b>Ddl</b>	<b>Somme des carrés</b>	<b>Moyenne des carrés</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>Densité apparente</b>	Traitement	6	0.545038	0.0908397	26.52	0.0000
	Saison	3	0.0369157	0.0123052	3.59	0.0575
<b>Porosité</b>	Traitement	6	618.396	103.066	13.38	0.0000
	Saison	3	36.0777	12.0259	1.56	0.2060
<b>Perméabilité</b>	Traitement	6	0.2217907	0.0363178	7.74	0.0000
	Saison	3	0.357674	0.119225	25.41	0.0000
<b>Rétention en eau</b>	Traitement	6	1306.5	217.749	21.51	0.0000
	Saison	3	47.3353	15.7784	1.56	0.2067
<b>Stabilité structural</b>	Traitement	6	0.387837	0.0646394	48.59	0.0000
	Saison	3	0.6670959	0.0223653	16.81	0.0000

#### 4. CONCLUSION

L'application d'amendement organique nous permet de dire que la matière organique a amélioré les propriétés physiques du sol avec une importance et une durabilité meilleure pour le fumier de volailles avec la dose 40%. Depuis des siècles, le fumier de volailles est reconnu comme le plus notable des engrais naturels, en raison de sa forte teneur en azote [14]. Ce fertilisant contient de l'azote sous deux formes principalement l'azote ammoniacal qui se comporte comme un engrais minéral classique et l'azote organique qui a besoin d'être dégradé par les microorganismes du sol pour se minéraliser [2].

L'apport organique fait diminuer la densité apparente et augmenter la porosité de façon très hautement significative ( $P < 0.001$ ). La plus faible valeur de la densité apparente, de l'ordre de ( $0.98 \pm 0.055 \text{ g.cm}^{-3}$ ) et la plus grande valeur de la porosité, de l'ordre de ( $52.487 \pm 2.109 \%$ ) ont été enregistrées avec le traitement FV40 durant l'expérimentation.

L'étude de la perméabilité a montré que l'apport de matière organique exogène est très positif pour tous les traitements. Par ailleurs, les résultats obtenus ont montré un effet très hautement significatif ( $P < 0.001$ ) des variations saisonnières sur la perméabilité du sol avec trois phases

distinctes: une première période, variant de trois à six mois, caractérisée par une évolution progressive des mesures de perméabilité de tous les traitements dont la plus grande valeur a été marquée par le traitement FC40 au 6<sup>ème</sup> mois ( $0.452 \pm 0.151 \text{ m.sec}^{-1}$ ) ; une deuxième phase: caractérisée par la diminution des mesures de la perméabilité des sols amendés par la dose 40% de fumier de chevaux frais par minéralisation précoce coïncidant avec la saison estivale; une troisième période: caractérisée par une diminution rapide des mesures de perméabilité par une intense minéralisation pour tous les traitements en automne lorsque les conditions pédoclimatiques étaient favorables.

Le fumier a amélioré significativement et durablement les propriétés de rétention d'eau des sols amendés, cette amélioration est maintenue au cours du temps, malgré la dégradation des produits organiques dont le grand pourcentage est obtenu par la dose 40% de fumier de volailles ( $53.213 \pm 1.489\%$ ) après 12 mois suivi par le fumier de bovins ( $50.733 \pm 0.717\%$ ).

En ce qui concerne la stabilité structurale, la matière organique a diminué significativement l'indice d'instabilité. La plus faible valeur notée est de ( $1.041 \pm 0.014$ ), elle a été obtenue avec le traitement FV40 après 3 mois.

Enfin, les propriétés physiques du sol peuvent être influencées par la dose, les propriétés de la matière organique apportée (fumier frais ou décomposé, teneurs en fragments grossiers et en éléments fertilisants) et les conditions pédoclimatiques.

Il est recommandé d'apporter régulièrement du fumier bien décomposé avec un faible rapport C/N et une teneur élevée en éléments fertilisants afin d'éviter la dégradation, la surminéralisation et améliorer le statut organique et par conséquent la fertilité physique des sols agricoles.

Les amendements organiques contribuent positivement à la protection et à la mise en valeur de nos ressources édaphiques, car ils apportent une première solution à une problématique actuelle qui est la perte de fertilité des sols (300 000 ha de terre agricole à l'échelle locale) et la diminution de leur capital organique en région semi-aride.

## 5. REMERCIEMENTS

J'adresse mes vifs remerciements et ma profonde reconnaissance à madame OULBACHIR

KARIMA pour ses encouragements et son aide précieuse et constante qu'elle m'a apportée dans la réalisation de cet article. L'occasion m'est également accordée afin de remercier tous ceux qui, durant cette période expérimentale, m'ont apporté : aide, conseils et orientations, en particulier mesdames : LABDELLI FATIHA, FARAOUN FATIHA, REZZOUG WAFAA et BOUDIAF MALIKA.

## 6. REFERENCES

- [1] Aggelides S.M, Londra P.A. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil. *Bioresource Technology.*, 2000, **71**, 253-259.
- [2] Ait Aissa H. 'Amélioration de la Prédiction de la Composition des Effluents d'Elevage par Spectroscopie Proche Infrarouge', Master Professionnel II : Opex [Optimisation des Protocoles Expérimentaux], 2011.
- [3] Alongo S, Kombele F. Evolution de la densité apparente et du rapport C/N du sol sous les variétés exotiques et locale de manioc dans les conditions naturelles de Kisangani (Rd Congo). *Annales de l'Institut Facultaires des sciences agronomiques de Yangambi.*, 2009, **1**, 197-214.
- [4] Annabi M. Stabilisation de la structure d'un sol limoneux par des apports de composts d'origine urbaine: relation avec les caractéristiques de leur matière organique. Thèse de doctorat de l'INA-PG, 2005. 268p.
- [5] Baize D. Guide des analyses en pédologie, Paris, 2000.
- [6] Balesdent J. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France, INRA, Paris, 1996, pp. 245-260.
- [7] Bernoux M, Chevallier T. Le carbone dans les zones sèches. Des fonctions multiples indispensables. Les dossiers thématiques du CSFD. *Agropolis International.*, 2013, **10**, 1-44.
- [8] Bottinelli N. Evolution de la structure et de la perméabilité d'un sol en contexte de non labour associé à l'apport d'effluent d'élevage : rôle de l'activité lombricienne. Thèse doctorat INRA, Rennes, 2010, pp.22.
- [9] Celik I, Ortas I, and Kilic S. Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil. *Soil & Tillage Research.*, 2004, **78**, 59-67.

- 
- [10] Chareau C. Matière organique et propriétés biochimiques du sol dans la zone tropicale sèche d'Afrique occidentale, Bul, pédologique de la FAO, n0 27, Rome, 1975, pp. 305-323.
- [11] Chauvel A. Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées : Office de la recherche scientifique et technique outremer, 1977.
- [12] Citeau L, Bispo A, Bardy, and KING D. Gestion durable des sols. Edit. Quae, 2008, p 336.
- [13] CPVQ (Conseil des productions végétales au Québec). Guide des pratiques de conservation en grandes cultures. Guide technique. Québec, 2000, p 400.
- [14] Delgado M, Rodríguez C, Martín J.V, Miralles R, and Alonso F. 'Environmental Assay on the Effect of Poultry Manure Application on Soil Organisms in Agro Ecosystems'. The Science of the Total Environment, 2012.
- [15] Demolon A. Principe d'agronomie, croissances des végétaux cultivés. Edit: Dunod, Paris, 196, p 576.
- [16] Derrien D, Dignac M.F, Basile-Doelsch I, Barot S, Cécillon L, Chenu C, Chevallier T, Freschet G.T, Garnier P, Guenet B, Hedde M, Klumpp K, Lashermes G, Maron P.A, Nunan N, Roumet C, and Barré P. Stocker du C dans les sols : Quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs ? *Étude et Gestion des Sols.*, 2016, **23**, 193 – 223.
- [17] Dridi B, Toumi C. Influence des amendements organiques et d'apports de boues sur les propriétés d'un sol cultivé (Influence of organic amendments and sludge inputs on the properties of a cultivated soil). *Etude et Gestion des sols.*, 1999, 6(1), 7-14.
- [18] Doucet R. Le climat et les sols agricoles. *Berget A.C (ed)*. Canada, 2006, p 172-173.
- [19] Garcia-Orenes F, Guerrero C, Mataix-Solera J, Navarro-Pedreño J, Gomez I, and Mataix-Beneyto J. Factors controlling the aggregate stability and bulk density in two different degraded soils amended with biosolids. *Soil & Tillage Research.*, 2005, 82, 65-76.
- [20] Gobat J.M, Aragno M, and Matthey A W. Le sol vivant. Bases de pédologie. Biologie des sols. Edit. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2003. p 571.
- [21] Grosbellet C. Evolution and effects on soil structure of organic matter brought in large quantities. *INRA, Sagah Angers*. Paris, 2008.
- [22] Kebir T. Study of contamination, accumulation, and mobility of some heavy metals in

vegetables, fruits and agricultural soils located near an industrial load of the factory alzinc of the city of Ghazaouet. *Agricultural Sciences University, Abou Bakr Belkaid*. Tlemcen, 2012.

- [23] Khaleel R, Reddy K.R, and Overcash M.R. Changes in soil physical properties due to organic waste applications: a review. *Journal of Environmental Quality.*, 1981, 10, 133-141.
- [24] Koull N, Halilat M.T. Effets de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région d'Ouargla (Algerie). *Etude et Gestion des Sols.*, 2016, **23**, 9- 23.
- [25] Hati K.M. Effect of inorganic fertilizer and farmyard manure on soil physical properties, root distribution, and water use efficiency of soybean in vertisols of central India. *Bioresour. Technol.*, 2006, **97(16)**, 2182-2188.
- [26] Hillel D. L'eau et le sol : principes et processus physiques, Poly Académie, Press, Newyourk, 1974, p 375.
- [27] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma.*,2004, **123**, 1-22.
- [28] Lal R. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degrad. Dev.*, 2006, **17**, 197-209.
- [29] Lampurlanes J, Angas P, and Cantero-Martinez C. Root growth, soil water content and yield of barley under different tillage systems on two soils in semiarid conditions. *Field Crops Res.*, 2001, **69**, 27-40.
- [30] Mallaoui N. Contribution à l'étude de l'influence de la salinité sur l'évolution de la matière organique. Thèse d'oct. INPL, Nancy, 1982, p 127.
- [31] Mathieu C, Pieltain F, and Jeanroy E. Analyse chimique du sol : *Méthodes choisies, Tec & Doc ed*, 2003.
- [32] McCoy E.L. Sand and organic amendment influences on soil physical properties related to turf establishment. *Agronomy Journal.*, 1998, **90**, 411-419.
- [33] Mermound A. Cours de physique du sol. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Ouagadougou & Lausanne, 2010.
- [34] Mohammad W, Shah Z, Shah S.M, and Iqbal M.M. Wheat yield, fertilizer N utilization and water use efficiency as influenced by tillage and P levels under rainfed conditions. *Pak. J. Soil Sci.*, 2003, **22(1)**, 11-18.

- 
- [35] Monica O.H, Philip A, and Stansly P. Soil chemical, Physical, and Biological Properties of a Sandy Soil Subjected to long-Term Organic Ammendments. *Journal of Sustainable Agriculture*. 2011, **53:3**, 243-259.
- [36] Monniers G. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques.*, 1965, **16 (4 et 5)**, 327-534.
- [37] Naceur K, Maatoug M, Benaichata L, Hermann H, and Mykola K. Quantification of Mass Concentrations Aerosols PM2.5 in Primary Schools. A Case Study: Tiaret City (Algeria). *Journal of Environmental Research, Engineering and Management.*, 2019, **75 (2)**, 47-59.
- [38] Nyamangara J, Gotosa J, and Mpofo S.E. Cattle manure effects on structural stability and water retention of a granitic sandy soil in Zimbabwe. *Soil & Tillage Research.*, 2001, **62** :157-162.
- [39] Obi M.E, Ebo P.O. The effects of organic and inorganic amendments on soil physical properties and maize production in a severely degraded sandy soil in southern Nigeria. *Bioresource Technology.*, 1994, **51**, 117-123.
- [40] Odlare M, Pell M, and Svensson K. Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues. *Waste Manage.*, 2008,**28**, 1246-1253.
- [41] Ohu J.O, Raghavan G.S.V, and McKyes E. Peatmoss effect on the physical and hydraulic characteristics of compacted soils. *American Society of Agricultural Engineers.*, 1985, **28**, 420-424.
- [42] Oiu L, Zhang X, Cheng J, and Yin X. Effects of black locust (*Robinia pseudoacacia*) on soil properties in the loessial gully region of the loess Plateau, China. *Plant and Soil.*, 2010, **332**: 207-217.
- [43] Oulbachir K, Zoubeidi M, Kouadria M, and Bouchenafa N. Conservation practices agro systems for sustainable development. *Mater Environment Science journal.*,2014, 5: 2.
- [44] Petard J. Les Méthodes d'analyse, Tome 1, Analyses De Sols, 2003.
- [45] Rawls W.J, Pachepsky Y.A, Ritchie J.C, Sobecki T.M, and Bloodworth H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma.*, 2003, **116** : 61-76.
- [46] Roger P, Garcia J.L. Microbiologie du sol. Institut Fédératif de Recherche en

Biotechnologie Agro-Industrielle de Marseille, 2001, p 193.

[47] Samreen S, Zahir S, and Wisal M. Impact of organic amendments on soil carbon sequestration, water use efficiency and yield of irrigated wheat. *BASE.*, 2017, 21 (1): 36-49.

[48] Siboukeur A. Assessment of the fertilizing value of different types of manure. *Agricultural Sciences University, Kasdi Merbah*. Ouargla, 2013.

[49] Soltner D. Les bases de la production végétale. Tome I. Le sol et son amélioration. Collection Sciences et Techniques Agricoles. 23ème. Ed. Paris, 2003, p 472.

[50] Sophie D, Christian I. Effet d'apport de différents amendements organiques sur les propriétés du sol- Bilan de 15 années d'essai en culture légumière à la SERAIL. *Echo-MO.*, 2010, **81**, 1-5.

[51] Toutain G. Element d'agronomie saharienne de la recherche au développement, I.N.R.A, Paris, 1979, p 276.

[52] Vaghan D, and Malcolm R.E. Soil organic matter and biological activity, Development in plant and soil sciences, Martnus Nijhaff, vol 16, 1985, 469 p.

[53] Vasconcelos R.F.B. Limites de consistência e propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. *Rev. Bras. Ciênc. Solo.*, 2010, **34(3)**, 639-648.

[54] Zeytin S, Baran A. Influences of composted hazelnut husk on some physical properties of soils. *Bioresource Technology.*, 2003, **88**, 241-244.

[55] Wells A, Chan K, and Cornish P. Comparison of conventional and alternative vegetable farming systems on the properties of a yellow earth in New South Wales. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2000, **80**, 47-60.

[56] Wei X, Shao M, Gale W, and Li I. Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural land. *Scientific Reports.*, 2014, 4, 4062.

**How to cite this article:**

Benouadah S, Oulbachir K, Benaichata L, Miara MD, Labdelli F, Rezzoug W. Impact of organic amendments on soil physical properties under semi-arid climate (tiaret, algeria). *J. Fundam. Appl. Sci.*, 2020, 12(3), 1386-1403.

