

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE MOHAMED KEIHDR BISKRA  
FACULTE DES SCIENCES EXACTES ET SCIENCES DE LA  
NATURE ET DE LA VIE**

**DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES**

**Polycopie des TP  
M1 Hydropédologie**

**TP physique et chimie des sols**

**Réalisée par : HIOUANI FATIMA**

**Année universitaire 2024/2025**

## Sommaire

|  | <b>Page</b> |
|--|-------------|
| Liste des figures  |             |
| Liste des tableaux   |             |
| Verreries courantes de laboratoire   |             |
| Appareils couramment utilisées dans les analyses des sols  |             |
| Relation entre les unités de mesure les plus couramment utilisées dans les analyses du sol             |             |
| Tableau périodique   |             |
| TP 01 : Echantillonnage de sol.....  | 01          |
| TP02 : Le pH (potentiel d'hydrogène).....  | 04          |
| TP 03 : La conductivité électrique.....  | 07          |
| TP 04: Dosage des sels solubles.....   | 10          |
| TP 04/1: Dosage des sulfates ( $\text{SO}_4^{-2}$ ).....   | 10          |
| TP 04/2 : Les chlorures (Méthode volumétrique de Mohr).....  | 12          |
| TP 04/3: Les carbonates et les bicarbonates.....   | 14          |
| TP 05: Le calcaire total.....  | 16          |
| TP 06: Le calcaire actif (Méthode Drouineau- Galet).....   | 18          |
| TP 07: Le dosage du carbone organique (Méthode Walkley et Black).....                                  | 20          |
| TP 08: Le phosphore assimilable (méthode Joret-Hebert).....  | 22          |
| TP 09: La capacité d'échange cationique.....   | 26          |
| TP 10: Dosage de l'azote total (Méthode Kjeldahal).....  | 28          |
| TP 11: Dosage de gypse (méthode de l'acétone).....   | 30          |
| TP 12: La densité réelle (méthode de pycnomètre).....  | 32          |
| TP 13: La densité apparente (méthode de cylindre).....   | 34          |
| TP 14: Mesure de l'humidité des sols à un pF donné (Méthode par pression).....                         | 36          |
| TP 15: L'analyse granulométrique (méthode de la pipette de Robinson).....                              | 39          |
| TP 16: La stabilité structurale « méthode Henin ».....   | 43          |
| TP 17: Mesure de la perméabilité par la méthode du double anneau d'infiltration « Méthode Muntz »..... | 47          |
| Références bibliographiques  |             |

## LISTE DES FIGURES

| <b>N</b>         | <b>Titre</b>                              | <b>Page</b> |
|------------------|---|-------------|
| <b>Figure 01</b> | La méthode de la fosse pédologique.....   | 01          |
| <b>Figure 02</b> | La tarière.....                           | 02          |
| <b>Figure 03</b> | Exemple de grilles d'échantillonnage..... | 03          |

## LISTE DES TABLEAUX

| N                 | Titre   | Page |
|-------------------|---|------|
| <b>Tableau 01</b> | Niveau du sol pH et condition associée Hach company, USA 1992 in Rayan et <i>al</i> , 2001.....                                   | 06   |
| <b>Tableau 02</b> | Normes d'interprétation de la conductivité électrique (l'extrait saturé de pâte de sol) selon Servant, 1975 in Baize, (1988)..... | 08   |
| <b>Tableau 03</b> | La relation entre la texture de la terre et les chiffres de conversion T.   | 09   |
| <b>Tableau 04</b> | Les normes d'interprétation des eaux d'irrigation fixée par la FAO, (1996).....   | 15   |
| <b>Tableau 05</b> | Normes d'interprétation selon E.N.I.T.A. B (2000) ; Gagnard et <i>al</i> (1988).....  | 21   |
| <b>Tableau 06</b> | La gamme du phosphore.....  | 24   |
| <b>Tableau 07</b> | Normes d'interprétation selon Calviet et Villemin (1986).....   | 25   |
| <b>Tableau 08</b> | Normes d'interprétation de la CEC selon Metson (1961) in Hazelton et Murphy, (2007).....  | 27   |
| <b>Tableau 09</b> | La relation entre la concentration de sulfate de calcium avec la CE...  | 31   |
| <b>Tableau 10</b> | Echelle générale de densité apparente selon Harte (pers. comm) in Hazelton et Murphy, 2007).....                                  | 35   |
| <b>Tableau 11</b> | Effet de la densité apparente sur l'état du sol (Hunt et Gilkes ,1992 in Hazelton et Murphy, 2007).....                           | 35   |
| <b>Tableau 12</b> | Normes d'interprétation de la porosité (E.N.I.T.A.B, 2000).....   | 35   |
| <b>Tableau 13</b> | Correspondance des expressions de pression statique.....  | 36   |

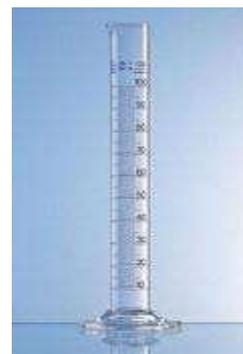
## Verreries courantes de laboratoire



Bécher



Fiole



Eprouvette



Propipette



Burette



Erlenmyer



Ballon



Pipette graduée



Pipette jaugée



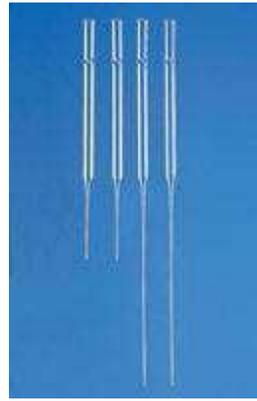
Ampoule à décanter



Entonnoire



Pipette pasteur



Pissette



Mortier



Cristalliseur



Boite pétri



Tube à essai

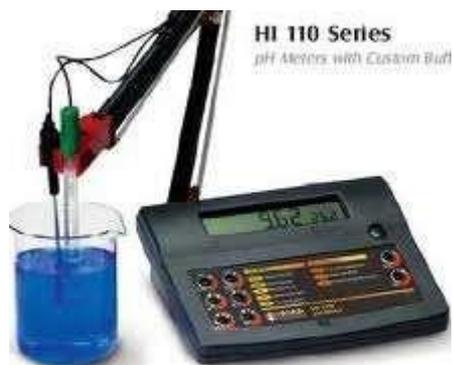


Porte tube à essai



Creuset

## Appareils couramment utilisés dans les analyses des sols



pH mètre



Conductimètre



Etuve



Agitateur



Balance de précision



Balance analytique



Centrifugeuse



Four à moufle



Calcimètre de Bernard



Marmite de Richard



Bain marie



Bain sable



Pycnomètre



Tamiseur



Pipette de Robinson

**Relation entre les unités de mesure les plus couramment utilisées dans les analyses du sol :**

|            | 1 ppm           | %                   | ‰                   | 1 mg/100 g       | 1 mg/kg         | 1 µg/g          | 1 meq/100g          |
|------------|-----------------|---------------------|---------------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| 1 ppm      | 1               | 10 <sup>-4</sup>    | 10 <sup>-3</sup>    | 10 <sup>-1</sup> | 1               | 1               | 1/10PE              |
| 1%         | 10 <sup>4</sup> | 1                   | 10                  | 10 <sup>3</sup>  | 10 <sup>4</sup> | 10 <sup>4</sup> | 10 <sup>3</sup> /PE |
| 1‰         | 10 <sup>3</sup> | 10 <sup>-1</sup>    | 1                   | 10 <sup>2</sup>  | 10 <sup>3</sup> | 10 <sup>3</sup> | 10 <sup>2</sup> /PE |
| 1 mg/100 g | 10              | 10 <sup>-3</sup>    | 10 <sup>-2</sup>    | 1                | 10              | 10              | 1/PE                |
| 1 mg/kg    | 1               | 10 <sup>-4</sup>    | 10 <sup>-3</sup>    | 10 <sup>-1</sup> | 1               | 1               | 1/10PE              |
| 1 µg/g     | 1               | 10 <sup>-4</sup>    | 10 <sup>-3</sup>    | 10 <sup>-1</sup> | 1               | 1               | 1/10PE              |
| 1 meq/100g | 10PE            | 10 <sup>-3</sup> PE | 10 <sup>-2</sup> PE | PE               | 10PE            | 10PE            | 1                   |

$$\text{PE (poids équivalent)} = \frac{\text{poids moléculaire}}{\text{valence}}$$

$$\text{ppm} = \text{meq/l} \times \text{PE}$$

$$1 \text{ g} = 1000 \text{ mg} = 1000000 \text{ } \mu\text{g}$$

$$1 \text{ } \mu\text{g} = 0.001 \text{ mg} = 0.000001 \text{ g}$$

$$1 \text{ L} = 1000 \text{ ml}$$

$$1 \text{ ml} = 0.001 \text{ l}$$

$$\text{ppm} = \mu\text{g/ml (solide/liquide)}$$

$$\text{ppm} = \text{mg/l (solide/liquide)}$$

$$\text{ppm} = \mu\text{g/g (solide/solide)}$$

$$\text{ppm} = \mu\text{l/l (liquide/liquide)}$$

$$\text{ppm} \times 10^{-4} = \%$$

$$1\% = 10000 \text{ ppm}$$

$$1\% = 1 \text{ g/100ml}$$

$$\text{ppm} = \text{mg/kg}$$

$$\text{ppm} \times 2,24 = \text{kg/ha}$$

$$\text{m} \mu\text{eq/l} \times \text{poids moléculaire} = \text{ppm}$$

$$\text{m} \mu\text{eq} = \frac{\text{masse atomique}}{\text{valence}} \times \frac{1}{1000}$$

$$\text{mg/l} = \text{m} \mu\text{eq/l} \times \frac{\text{masse atomique}}{\text{valence}}$$

$$1 \text{ } \mu\text{S/cm} = 1000 \text{ mS/cm}$$

$$1 \text{ dS/m} = 1 \text{ mS / cm} = 1000 \text{ uS / cm} \quad (1 \text{ uS / cm} = 5 \text{ ppm})$$

# TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

| PERIODE | GROUPE | NUMÉRO DU GROUPE CHIMICAL ABSTRACT SERVICE (1985) |       |        |       |      |       |        |        |         |     |       |        |         |        |       |        |         |        | 18 VIIIA |    |
|---------|--------|---|-------|--------|-------|------|-------|--------|--------|---------|-----|-------|--------|---------|--------|-------|--------|---------|--------|----------|----|
|         |        | 1 IA  | 2 IIA | 3 IIIB | 4 IVB | 5 VB | 6 VIB | 7 VIIB | 8 VIII | 9 VIIIB | 10  | 11 IB | 12 IIB | 13 IIIA | 14 IVA | 15 VA | 16 VIA | 17 VIIA |        |          |    |
| 1       | H      | 1,0079  |       |        |       |      |       |        |        |         |     |       |        |         |        |       |        |         | 4,0026 | He       |    |
| 2       | Li     | 6,941   | Be    |        |       |      |       |        |        |         |     |       |        |         |        |       |        |         |        | 9,0122   | Ne |
| 3       | Na     | 22,990  | Mg    | 3      | 4     | 5    | 6     | 7      | 8      | 9       | 10  | 11    | 12     | 13      | 14     | 15    | 16     | 17      | 18     |          |    |
| 4       | K      | 39,098  | Ca    | Sc     | Ti    | V    | Cr    | Mn     | Fe     | Co      | Ni  | Cu    | Zn     | Ga      | Ge     | As    | Se     | Br      | Kr     |          |    |
| 5       | Rb     | 85,468  | Sr    | Y      | Zr    | Nb   | Mo    | Tc     | Ru     | Rh      | Pd  | Ag    | Cd     | In      | Sn     | Sb    | Te     | I       | Xe     |          |    |
| 6       | Cs     | 132,91  | Ba    | La-Lu  | Hf    | Ta   | W     | Re     | Os     | Ir      | Pt  | Au    | Hg     | Tl      | Pb     | Bi    | Po     | At      | Rn     |          |    |
| 7       | Fr     | 223,018   | Ra    | Ac-Lr  | Rf    | Db   | Sg    | Bh     | Hs     | Mt      | Uun | Uuu   | Uub    | Uuq     | Uuq    | Uuq   | Uuq    | Uuq     | Uuq    |          |    |

| Lanthanides |    |        |    |    |        |    |    |        |    |    |        |    |    |     |    |    |        |    |    |        |    |    |        |    |    |        |    |    |        |    |    |        |    |    |        |    |    |        |    |    |        |    |    |        |
|-------------|----|--------|----|----|--------|----|----|--------|----|----|--------|----|----|-----|----|----|--------|----|----|--------|----|----|--------|----|----|--------|----|----|--------|----|----|--------|----|----|--------|----|----|--------|----|----|--------|----|----|--------|
| 57          | La | 138,91 | 58 | Ce | 140,12 | 59 | Pr | 140,91 | 60 | Nd | 144,24 | 61 | Pm | 145 | 62 | Sm | 150,36 | 63 | Eu | 151,96 | 64 | Gd | 157,25 | 65 | Tb | 158,93 | 66 | Dy | 162,50 | 67 | Ho | 164,93 | 68 | Er | 167,26 | 69 | Tm | 168,93 | 70 | Yb | 173,04 | 71 | Lu | 174,97 |

| Actinides |    |        |    |    |        |    |    |        |    |   |        |    |    |     |    |    |     |    |    |     |    |    |     |    |    |     |    |    |     |    |    |     |     |    |     |     |    |     |     |    |     |     |    |     |
|-----------|----|--------|----|----|--------|----|----|--------|----|---|--------|----|----|-----|----|----|-----|----|----|-----|----|----|-----|----|----|-----|----|----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|----|-----|
| 89        | Ac | 227,04 | 90 | Th | 232,04 | 91 | Pa | 231,04 | 92 | U | 238,03 | 93 | Np | 237 | 94 | Pu | 244 | 95 | Am | 243 | 96 | Cm | 247 | 97 | Bk | 247 | 98 | Cf | 251 | 99 | Es | 252 | 100 | Fm | 257 | 101 | Md | 258 | 102 | No | 259 | 103 | Lr | 262 |

La masse atomique relative est donnée avec six chiffres significatifs. Pour les éléments qui n'ont pas de nucléides stables, la valeur entre parenthèses indique le nombre de masse de l'isotope de l'élément ayant le durée de vie la plus grande.

Toutes les données pour les éléments 114 et 115 ont été obtenues par extrapolation à partir de données expérimentales.

## TP 01 : Echantillonnage de sol

Il y a deux façons de prélever des échantillons de sol, selon le genre de tests qui doivent être faits. On distingue:

**1. Les échantillons perturbés**, qui ne représente pas tout à fait le sol dans l'état naturel qu'il avait avant l'échantillonnage. Les échantillons perturbés sont utilisée pour la détermination de la teneur n eau, la granulométrie et les analyses physico-chimiques et biologiques.

### Matériel

- Couteau de pédologie
- Double mètre
- Bêche, pioche, pelle
- Tarière
- Caisses en bois ou en plastique (stockage et transport des échantillons)
- Etiquettes
- Sacs en polyéthylène solide

|        |            |
|--------|------------|
| Date   | horizon    |
| Lieu   | profondeur |
| Profil | coordonnée |

Modèle d'étiquette

### 1.1. Le profil pédologique (fosse pédologique)

- Bien nettoyer l'endroit choisi et vérifier s'il n'y a pas d'anomalies à la surface
- Creuser une fosse (bêche et pelle) : les dimensions doivent en être suffisantes pour permettre une étude soigneuse de l'une des parois exposée au soleil. Une bonne fosse doit avoir environ 80 x120 cm de surface et 200 cm de profondeur.

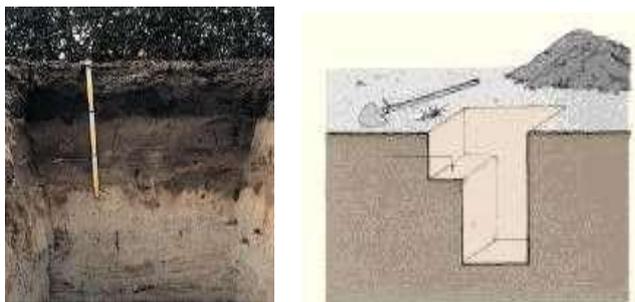


Figure 01: [La méthode de la fosse](#) pédologique

- Nettoyez soigneusement le profil sur toute sa hauteur. Si elle est très humide, la laisser sécher pendant quelques heures.
- Echantillonnez de chaque horizon sur toute la largeur en se maintien vers sa partie centrale par rapport à ses limites supérieure et inférieure. Commencez par l'horizon le plus profond et continuez en remontant. Pour échantillonner les horizons les plus proches de la surface, qui peuvent avoir été perturbés par les travaux de creusement, éloignez-vous jusqu'à un endroit qui n'a pas été remué, le plus près possible de la fosse, creusez un trou peu profond et prélevez- y l'échantillon.
- Prendre un échantillon de 2 kg à l'aide d'un coteau pédologique. Nettoyer soigneusement l'outil de prélèvement entre chaque prise d'échantillon.
- Enlever les racines et les pierres.
- Remplir la fiche d'échantillon
- Ensacher l'échantillon et remplir l'étiquette ; noter tous les coordonnées sur la fiche d'échantillonnage

## 1.2.Méthode du sondage à la tarière

La méthode du sondage à la tarière est un moyen d'obtenir des échantillons de sol à différentes profondeurs par forage, c'est-à-dire sans avoir à creuser une fosse. Le sondage à la tarière est une méthode rapide et peu coûteuse. Elle permet d'explorer rapidement le sol en divers points du terrain, mais ne fournit que des échantillons perturbés.



**Figure 02** : La tarière.

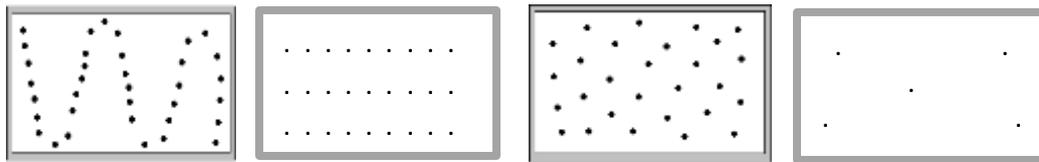
Pour échantillonner avec une tarière, vous devez procéder comme suit:

- Enfoncez la tarière dans le sol jusqu'à une profondeur de 10 à 15 cm.
- Retirez la tarière avec précaution pour laisser le sol à sa place, tel qu'il était dans le terrain, et placez l'échantillon sur une feuille de plastique ou sur des journaux.

- Continuez de percer sur 10 à 15 cm à chaque fois. Placez les tronçons obtenus successivement l'un après l'autre, afin d'obtenir une carotte montrant les horizons du sol.

**1.3. Les échantillons intacts (non perturbés)**, qui représentent exactement le sol à l'état naturel, avant l'échantillonnage. Les échantillons non perturbés sont utilisés pour la détermination de la densité apparente,

### Répartition des prélèvements



Zig zag

Quadrillage

Aléatoire

Diagonal

**Figure 03:** Exemple de grilles d'échantillonnage.

### Profondeur de prélèvement

- Pour une vieille prairie : à moins de 10cm de la surface, sous le feutrage de racines.
- Pour une terre labourée : dans la couche travaillée par la charrue (15 à 30 cm)
- Pour une plantation de vigne : ou d'arbre fruitiers ; deux prélèvements, l'un dans la couche travaillée, l'autre dans la couche située au-dessous.
- Pour les analyses de reliquats d'azote ; en fin d'hiver, les prélèvements se font à 3 profondeurs, 30, 60 et 90cm.

### Conditions du champ à éviter

Tenter d'éviter les zones renfermant des sources possibles de fausse interprétation de l'échantillon ou les échantillonner à part, comme :

- Les zones érodées
- Les zones mal drainées
- Les zones soumises à différentes méthodes de culture
- Les zones soumises à différents traitements à base de chaux, de fumier ou d'engrais
- Les extrémités des champs où les équipements tournent et les bords de clôtures
- Les récentes bandes de fertilisation
- Les sillons qui exposent le sous-sol
- Les chemins et les tas de chaux, de fumier ou de résidus végétaux adjacents aux zones.

## TP02 : Le pH (potentiel d'hydrogène)

### Introduction

La réaction du sol est une caractéristique fondamentale dont l'importance réside dans le fait qu'elle influence tous les processus d'évolution des sols, et la croissance des végétaux.

Le terme réaction du sol se réfère à la teneur en ions  $H^+$  dans la solution du sol. De manière à faciliter cette expression, on utilise le logarithme décimal de la concentration d'une solution en ions  $H^+$  : c'est le pH

$$pH = \log \frac{1}{[H^+]}$$

Le pH varie entre 0 et 14 et le  $pH = 7$  lorsque  $[H^+] = [OH^-]$

On peut mesurer deux types d'acidité du sol : l'acidité actuelle, et l'acidité d'échange

**Acidité actuelle (pH eau) :** Elle est due aux ions  $H^+$  libre dans la solution du sol ; elle est mesurée avec le pH mètre dans une suspension sol/eau de 1/ 2.5.

**Acidité d'échange (pH KCl) :** Elle est due à l'hydrogène adsorbés sur le complexe adsorbant, facilement échangeables par d'autres cations, comme avec  $K^+$  dans une solution de KCl. C'est le pH KCl ; permet donc de mesurer l'acidité d'échange d'une suspension sol/KCl de 1/ 2.5.

**But :** la détermination du pH du sol

**Principe :** on constitue une suspension de sol dans l'eau (pH eau) ou dans une solution de KCl (pH KCl) avec un rapport 1/2.5, dans laquelle on mesure le pH

### Réactifs

Chlorure de potassium KCl 0.1N (7.465g/l)

### Mode opératoire

#### pH eau (1/2.5)

- Peser 10 g du sol.
- Ajouter 25 ml d'eau distillée dans un bécher de 100 ml.
- Agiter pendant 15 mn avec un agitateur magnétique.
- Laisser reposer 15 mn.
- Mesurer le pH à l'aide d'un pH mètre.

### **pH KCl**

- Peser 10 g de sol.
- Ajouter 25 ml de KCl 0.1 N (7.465 g/l) dans un bécher de 100 ml.
- Agiter pendant 30 mn avec un agitateur magnétique.
- Laisser reposer 15 mn.
- Mesurer le pH à l'aide d'un pH mètre.

### **Normes d'interprétations**

#### **pH eau**

Selon la première version du référentiel pédologique Française in Baize 1988 :

pH inférieur à 3.5 —————> hyper-acide

pH entre 3.5 et 5 —————> très acide

pH entre 5 et 6.5 —————> acide

pH entre 6.5 et 7.5 —————> neutre

pH entre 7.5 et 8.7 —————> basique

pH supérieur à 8.7 —————> très basique

#### **pH KCl : Selon l'I.T.A 1977**

pH inférieur à 4 —————> hyper-acide

pH entre 4 et 4.9 —————> très acide

pH entre 5 et 5.9 —————> acide

pH entre 6 et 6.9 —————> légèrement alcalin

pH= 7 —————> neutre

pH entre 7.1 et 8 —————> légèrement alcalin

pH entre 8.1 et 9 —————> alcalin

pH entre 9.1 et 10 —————> fortement alcalin

pH supérieur à 10 —————> hyper alcalin

### Et les normes d'interprétations du pH KCl selon Mathieu et Pielain, (2003)

La différence entre le pH eau et le pH KCl est d'autant plus élevée que l'acidité échangeable élevée:

- 1 unité d'écart entre le pH eau et le pH KCl: acidité échangeable forte
- 1/2 unité d'écart entre le pH eau et le pH KCl: acidité échangeable moyenne
- Moins de 1/2 unité d'écart entre le pH eau et le pH KCl: échangeable faible

**Tableau 01:** Niveau du sol pH et condition associée Hach company, USA 1992 in Rayan et al, 2001.

| <b>pH du sol</b> | <b>Indication</b>   | <b>Condition associée</b>   |
|------------------|---|---|
| < 5              | Le sol est déficient en Ca et/ou Mg, et devrait être chaulé | Mauvais croissance des cultures en raison de la faible capacité d'échange cationique et possibilité de toxicité par Al <sup>3+</sup> . La carence en P est attendue |
| 5.5 – 6.5        | Le sol est sans chaux, devrait être contrôlé de près        | Satisfaisante pour la plupart des cultures  |
| 6.5 – 7.5        | Plage idéale pour la culture                                | La capacité d'échange cationique est de près de 100% de saturation de base  |
| 7.5 – 8.4        | Le calcaire libre existe dans le sol                        | Habituellement excellente infiltration et percolation de l'eau due à la teneur élevée en Ca des argiles.<br>P et les micronutriments sont moins disponibles.        |
| > 8.4            | Indique invariablement, un sol sodique                      | Condition physique mauvaise.<br>Infiltration et la percolation de l'eau du sol est lent. Détérioration possible des racines et dissolution de la matière organique. |

## TP 03 : La conductivité électrique

### Introduction

La conductivité électrique d'une solution est un indice des teneurs en sels solubles ; cette propriété électrochimique est basée sur le fait que la conductance (inverse de la résistance électrique) d'une solution s'accroît au fur à mesure que les concentrations en cation et anions, porteurs de charges électriques, augmentent.

Pour extraire les sels solubles du sol ; deux méthodes peuvent être utilisées. L'extrait de pate saturée et la seconde consiste à faire des extractions aqueuses de rapports pondéraux sol/eau fixe. Les rapports d'extractions sont généralement 1/1, 1/2, 1/5 et 1/10 ; le rapport 1/5 est le plus utilisé.

### La conductivité électrique (1/5)

#### But de TP

La mesure de la conductivité électrique du sol

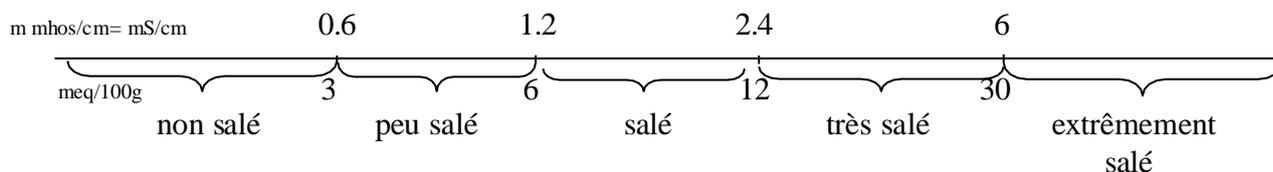
#### Principe

On détermine sur une solution d'extraction aqueuse la conductivité. Cette dernière étant fonction de la concentration en électrolytes.

#### Mode opératoire

- Peser 10 g du sol.
- Ajouter 50 ml d'eau distillée dans un bécher de 100 ml.
- Agiter pendant 15 mn avec un agitateur magnétique.
- Laisser reposer 10 mn.
- Mesurer la CE à l'aide d'un conductivimètre.

#### Normes d'interprétation : Selon Aubert, (1978)



## La conductivité électrique (l'extrait saturé de pâte de sol)

### Mode opératoire

- Peser 300 g de la terre fine
- Introduire dans un creuset et ajouter une certaine quantité d'eau distillée
- Malaxer avec une spatule jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène satisfaisant aux tests de Riverside : la pâte doit briller comme un miroir, couler le long des parois, se détacher de la spatule. Si l'on trace un sillon sur la pâte, l'eau ne doit pas se rassembler dans ce sillon
- Conserver la pâte, ainsi réalisée, une demi-journée à l'air libre, après on vérifie encore une fois si la pâte est bien faite (critères de Riverside)
- Couvrir un entonnoir büchner avec le papier filtre
- Verser la pâte dans l'entonnoir büchner
- Filtrer sous vide à l'aide d'une pompe
- Jeter les 10 premiers millilitres du filtrat
- Arrêter la filtration dès que la terre devient sèche à la surface
- Pipeter exactement 10 ml de l'extrait saturé obtenu dans un flacon et compléter à 50 ml avec de l'eau distillée (pour que l'électrode de conductimètre soit bien couverte par la solution). On aura alors dilué l'extrait saturé 5 fois
- Mesurer tout de suite la conductivité électrique.

### Normes d'interprétation

**Tableau 02:** Normes d'interprétation de la conductivité électrique (l'extrait saturé de pâte de sol) selon Servant, 1975 in Baize, 1988.

| Classe | Désignation         | Conductivité électrique<br>dS/m à 25°C | Somme des anions en<br>méq/l |
|--------|---------------------|--|------------------------------|
| 0      | Non salé            | < 2.5                                  | < 25                         |
| 1      | Faiblement salé     | 2.5 - 5                                | 25 - 50                      |
| 2      | Moyennement salé    | 5 - 10                                 | 50 - 105                     |
| 3      | Salé                | 10 - 15                                | 105 - 165                    |
| 4      | Fortement salé      | 15 - 20                                | 165 - 225                    |
| 5      | Très fortement salé | 20 - 27.5                              | 225 - 315                    |
| 6      | excessivement salé  | 27.5 - 40                              | 315 - 620                    |
| 7      | hyper-salé          | > 40                                   | > 620                        |

### Normes d'interprétation : Selon Aubert, (1978)

|        |   |                  |
|--------|---|------------------|
| < 2    | → | non salé         |
| 2 à 4  | → | peu salé         |
| 4 à 8  | → | salé             |
| 8 à 20 | → | très salé        |
| > 20   | → | extrêmement salé |

### Facteurs de conversion

- **Pour le sol :** La conversion conductivité de l'extrait 1/5 a la conductivité de l'extrait saturé : Généralement on exprime les résultats en dS/m à 25°C dans l'extrait saturé de pate de terre, ce qui correspond bien aux conditions du terrain. Si on a mesuré la conductivité de l'extrait 1/5, il faut interpréter les résultats en fonction de la texture de la terre. Pour le chiffre de la conductivité de l'extrait saturé, qui est plus valable, on multiplie avec les chiffres de conversion (T) en fonction de la texture (Tableau).

**Tableau 03:** La relation entre la texture de la terre et les chiffres de conversion T.

| Terre                 | T (moyen) |
|-----------------------|-----------|
| Sableuse (S)          | 50        |
| Sablo-limoneuse (SL)  | 35        |
| Limono-sableuse (LS)  | 20        |
| Limono-argileuse (LA) | 15        |
| Argilo-limoneuse (AL) | 10        |
| Argileuse (A)         | 5         |

**Exemple :** si la conductivité de l'extrait 1/5 d'une terre LA est 0.8 dS/m, la conductivité de son extrait saturé est  $0.8 \times 15 = 12$

- Conversion conductivité extrait 1/5 → % sels dans la terre sèche : On multiplie la conductivité de l'extrait 1/5 (dS/m) par 0.32

$$\% \text{ sel dans la terre sèche} = CE \text{ mmhos/cm (dS/m)} * 0.32$$

- Teneur en sels solubles totaux meq/l = 10 x CE (relation de Richards in Aubert, 1978)

$$\text{Teneur en sels solubles totaux meq/100g de terre} = 10 \times CE \times \frac{V}{1000} \times \frac{100}{P}$$

$$= CE \times \frac{V}{P}$$

$V$  = volume en ml d'eau déminéralisée nécessaire pour obtenir un extrait à saturation

$P$  = poids en g de la terre utilisée pour l'extraction.

## TP 04: Dosage des sels solubles

### Introduction

Pour l'étude de la caractérisation des sols salins et/ ou alcalins les sels solubles sont déterminés sur l'extraits de la pâte saturé. Ils peuvent également être dosés dans des extraits aqueux plus dilués (1/5 et autres rapports sol/eau). Les anions et cations dominants sont : carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) si le pH est supérieur à 8.3, bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) et les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$ .

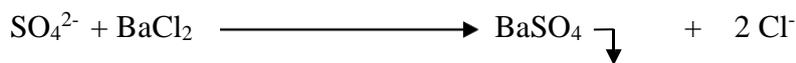
Nous présentent ci- après les méthodes de dosage des sulfates, des chlorures, des carbonates et des bicarbonates.

### TP 04/1: Dosage des sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

**But :** dosage des sulfates

#### Principe

L'ion sulfate  $\text{SO}_4^{2-}$  réagit avec l'ion baryum pour former un précipité de sulfate de baryum :



Le précipité est maintenu en suspension grâce à une solution de gomme d'acacia. La densité optique de la solution à 600nm est une mesure de la quantité de sulfates présents dans la solution.

#### Réactifs

- Eau déminéralisée ayant une conductivité  $< 0.1 \text{ mSm}^{-1}$ .
- Solution NaCl, HCl :  
Dans une fiole jaugée de 2000ml ajouter 40ml d' HCl concentré (36%,  $d = 1.18$ ) à 480 de chlorure de sodium p.a . Ajuster au volume avec de l'eau déminéralisée. Homogénéiser
- Gomme d'acacia 0.25% :  
Dans une fiole jaugée de 100ml dissoudre dans de l'eau déminéralisée 0.25g de gomme d'acacia. Ajuster au volume. Homogénéiser
- Chlorure de baryum ( $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en poudre
- Solution mère de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )  $200 \text{ meq.l}^{-1}$  :  
Dans une fiole jaugée de 500ml contenant environ 400ml d'eau déminéralisée dissoudre 7.1025g de sulfate de sodium anhydre, ajuster au volume. Homogénéiser

- Solution fille de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) :

Dans une fiole jaugée de 1000ml diluer respectivement 5, 10, 15, 20 et 25ml de la solution mère avec de l'eau déminéralisée. Ces solutions contiennent respectivement 1, 2, 3, 4 et 5 meq.l<sup>-1</sup>. Ajuster au volume avec de l'eau déminéralisée. Homogénéiser

### **Mode opératoire**

- Transférer 25ml de l'extrait dilué (à 10 ou à 100) ou de l'eau à analyser (Ex : eau d'irrigation) dans une fiole jaugée de 100ml et ajouter 10ml de la solution (NaCl. HCl), 2ml de gomme d'acacia et 1g de poudre de chlorure de baryum.  
Agiter à la main et ajuster au volume avec de l'eau déminéralisée. Homogénéiser.
- Préparer un témoin et les solutions filles selon le même protocole.
- En prenant le témoin comme référence, ajuster à 0.00 l'absorbance du spectrophotomètre, régler à 600nm.
- Mesurer l'absorbance au spectrophotomètre à 600nm pour les solutions filles et les échantillons.

### **Calcul**

Après lecture au spectrophotomètre, préparer un graphique sur papier millimètre dont l'axe des X étant l'absorbance et l'axe des Y la concentration en sulfates (meq.l<sup>-1</sup>) des solutions filles.

Tracer la droite d'étalonnage et déterminer à l'aide de cette droite les concentrations en sulfates (meq/l) des échantillons de la façon suivante :

$$\text{SO}_4 \text{ (meq/l)} = \text{C} \times \text{D} \text{ ou mmol/l}$$

C : concentration calculée à partir de la droite d'étalonnage.

D : niveau de dilution (10 ou 100)

## TP 04/2 : Les chlorures (Méthode volumétrique de Mohr)

**But :** le dosage des chlorures par la méthode de Mohr.

### Principe

Les chlorure sont dosés par la méthode volumétrique de MOHR où les chlorures sont totalement précipités par le nitrate d'argent ( $\text{AgNO}_3$ ) en présence de chromate de potassium ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ). La fin de la réaction est marquée par la formation d'un précipité rouge ( $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ ) avec l'argent en excès.

### Réactifs

- Nitrate d'argent ( $\text{AgNO}_3$ ) 0.01N: dissoudre 1.6987 g de nitrate d'argent dans 1000ml d'eau distillée. Conserver a l'abri de la lumière
- Chlorure de sodium  $\text{NaCl}$  0.01N : dissoudre 0.585g de chlorure de sodium dans 1000ml d'eau distillée
- Chromate de potassium  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  5% : dissoudre 5g de chromate de potassium dans 80ml d'eau distillée, et ajouter des gouttes de nitrate d'argent ( $\text{AgNO}_3$  1N =17g/l) jusqu'à l'apparition d'un léger précipité rouge. Ajuster avec l'eau distillée à 100ml.

### Mode opératoire

- Transvaser une aliquote de 5 ml de l'extrait diluée (à10 ou à100) ou de l'eau à analyser (Ex : eau d'irrigation) dans une fiole de 100 ml
- Ajouter 4 gouttes de chromate de potassium.
- Titrer avec la solution de nitrate d'argent jusqu'à l'apparition d'une coloration barbillon brique.
- Faire un témoin avec le chlorure de sodium pour estimer la normalité de nitrate d'argent exactement. Donc prélever 5 ml de chlorure de sodium 0.01N et ajouter 3 gouttes de chromate de potassium et titrer avec le nitrate d'argent.

$$\text{Cl (méq/l)} = \frac{(V-B) \times N \times R \times 1000}{Wt}$$

V : volume d' $\text{AgNO}_3$  0.01N utilisé pour la titration de l'échantillon en ml.

Wt : poids du sol sec en g

N : normalité de la solution d' $\text{AgNO}_3$

B : volume d' $\text{AgNO}_3$  0.01N utilisé pour la titration de témoin

R: Rapport entre, le volume total de l'extrait et l'extrait utilisé pour la titration

Calcule de la normalité d'AgNO<sub>3</sub>:

$$N_{\text{AgNO}_3} = \frac{10 \times N_{\text{NaCl}}}{V_{\text{AgNO}_3}}$$

$N_{\text{AgNO}_3}$  : Normalité de la solution d'AgNO<sub>3</sub>

$V_{\text{AgNO}_3}$  : Volume d'AgNO<sub>3</sub> utilisé (ml)

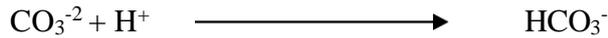
$N_{\text{NaCl}}$  : Normalité de la solution de NaCl

### TP 04/3: Les carbonates et les bicarbonates

**But :** dosage des carbonates et des bicarbonates

#### Principe

Lorsque le pH de la pate saturée est supérieur à 8,4 est en présence probable d'ion carbonate. En dosant l'échantillon avec une solution acide jusqu'à pH=8,4, on convertit l'ion carbonate en bicarbonate :



La quantité d'acide nécessaire au dosage correspond à la quantité de carbonates totaux présents au départ.

Si on poursuit le dosage,  $\text{HCO}_3^-$  réagit à son tour avec l'acide pour donner :



Les carbonates et les bicarbonates sont dosés sur la même aliquote.

Dans les extraits de saturation des sols salés, les quantités de carbonates et de bicarbonates présents ne nécessitent pas en général une dilution. On procède donc sur une aliquote sans dilution.

#### Réactifs

- Phénolphthaline (1%)  $\longrightarrow$  1g dans 100 ml d'éthanol
- Méthyle orange (0.01%)  $\longrightarrow$  0.01g dans 100ml d'eau distillée
- Acide sulfurique 0.05N

#### Mode opératoire

- Prélever 20ml de la solution du sol ou de l'eau à analyser (Ex : eau d'irrigation) et ajouter 3 gouttes de phénolphthaléine : s'il y a une coloration rose, il y a les carbonates.
- Titrer avec l'acide sulfurique jusqu'à la disparition de la couleur rose.
- S'il n'y a pas une coloration de la solution ; il y a les bicarbonates. Ajouter des gouttes (3-4) de l'indicateur coloré méthyle orange et titrer avec l'acide sulfurique jusqu'à l'apparition de la coloration orange (changement de la coloration : jaune  $\rightarrow$  orange).

#### Calcul

$$\text{Bicarbonates (HCO}_3^-) \text{ méq/l} = \frac{x \cdot 0.05 \cdot 1000}{y}$$

x : volume de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  utilisé pour la titration.

y : volume de la solution du sol ; 20ml.

$$\text{Carbonates (CO}_3\text{) m\acute{e}q/l} = \frac{2 \cdot x \cdot 0.05 \cdot 1000}{y}$$

### Note bien

Dans les extraits de saturation des sols salés, les quantités de carbonates et de bicarbonates présents ne nécessitent pas en général une dilution. On procède sur une aliquote sans dilution.

### Normes d'interprétation

**Tableau 04:** Les normes d'interprétation des eaux d'irrigation fixée par la FAO, (1996).

| Paramètre de l'eau  | Symbole                       | Unité | Valeur maximale admissible |
|---------------------|-------------------------------|-------|----------------------------|
| <b>Carbonates</b>   | CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | mg/l  | 3                          |
| <b>Bicarbonates</b> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | mg/l  | 610                        |
| <b>Chlore</b>       | Cl <sup>-</sup>               | mg/l  | 1065                       |
| <b>Sulfates</b>     | SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>  | mg/l  | 960                        |

## TP 05: Le calcaire total

### Introduction

Le calcaire est une roche sédimentaire principalement organogène qui peut être détritique (contenant au moins 50% de  $\text{CaCO}_3$ ), ou chimique.

Un sol calcaire c'est un sol contenant du  $\text{CaCO}_3$  libre en quantité suffisante pour présenter une effervescence visible sous l'action d' $\text{HCl}$  dilué à froid, le  $\text{CaCO}_3$  est souvent accompagné de  $\text{MgCO}_3$ .

**But :** le dosage du calcaire total, par le calcimètre de BERNARD

**Principe :** On décompose par l'acide chlorhydrique le carbonate de calcium contenu dans l'échantillon de terre et on mesure le volume de gaz carbonique dégagé dans des conditions de pression et de température constantes (pression atmosphérique et température ambiante) par la réaction:



Le volume de gaz carbonique dégagé lors de la réaction est mesuré à l'aide d'un calcimètre.

Une opération semblable est effectuée sur un poids connu de carbonate de calcium pur, permet par comparaison des volumes obtenus, de déterminer la quantité de carbonate de calcium dans la pise d'essai à analyser (échantillon de sol).

### Réactif

- $\text{HCl}$  50% (ex : 50 ml  $\text{HCl}$  concentré + 50 ml d'eau distillée)
- $\text{CaCO}_3$  pur

### Mode opératoire

- Peser 1 g de sol (0.5 g pour les sols très calcaires).
- Introduire dans l'erlenmeyer de calcimètre.
- Préparer une solution de  $\text{HCl}$  50%.
- Remplir le tube avec  $\text{HCl}$  et l'introduire avec précaution dans l'erlenmeyer.
- Fermer l'erlenmeyer, et verser le tube de l' $\text{HCl}$  puis abaisser l'ampoule de calcimètre jusqu'à ce que le niveau de l'eau dans cette dernière soit dans un même plan horizontal que ce lui de l'eau située dans la colonne.

- Lire le volume V de gaz carbonique dégagé.
- Faire les même étapes, mais avec le CaCO<sub>3</sub> pur (0.3 g) à la place du sol et lire le volume V' de gaz carbonique dégagé (essaie témoin).

### Calcul

$$\text{CaCO}_3\% = \frac{P1}{V1} \times \frac{V2}{P2} \times 100$$

V1 = volume de CO<sub>2</sub> produit par 0,3g de CaCO<sub>3</sub> pur et sec.

V2= volume de CO<sub>2</sub> produit par la prise d'essai (sol).

P1= poids de CaCO<sub>3</sub> pur en gramme

P2 = poids de la prise d'essai de terre en gramme.

### Normes d'interprétation : Selon G.E.P.P.A in Baize 1988

|          |        |                         |
|----------|--------|-------------------------|
| 1%       | —————> | non calcaire            |
| 1 – 5%   | —————> | peu calcaire            |
| 5 – 25%  | —————> | modérément calcaire     |
| 25 – 50% | —————> | fortement calcaire      |
| 50 – 80% | —————> | très fortement calcaire |
| > 80%    | —————> | excessivement calcaire  |

### Remarque

- Par le dosage du calcaire total; on dose toutes les formes de carbonates qui se trouvent dans le sol : La calcite CaCO<sub>3</sub>, l'araganite CaCO<sub>3</sub>, la dolomite CaMg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, l'ankrite Ca (Mg. Mn.Fe) (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, la sédérite FeCO<sub>3</sub>, le carbonate de sodium Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, carbonate de potassium K<sub>2</sub> CO<sub>3</sub>, carbonate de magnésium MgCO<sub>3</sub>.
- Mais tous ces carbonates peuvent ne pas exister dans chaque type sol.

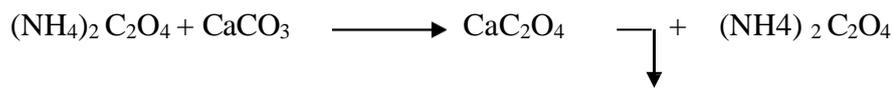
## TP 06: Le calcaire actif (Méthode Drouineau- Galet)

### Introduction

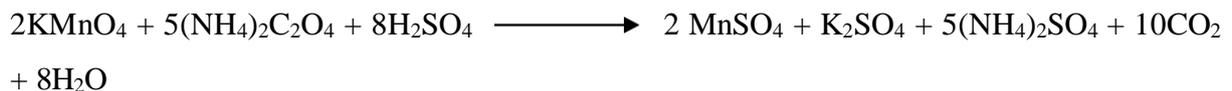
Le calcaire actif est la fraction du calcaire total susceptible de se dissoudre facilement et rapidement dans la solution du sol. Elle correspond peu ou prou à la fraction fine au plan granulométrique (taille des argiles, soit moins de 2  $\mu\text{m}$ ). Elle permet de maintenir une saturation calcique élevée de la CEC et, indirectement, un pH basique stable. La présence de calcaire actif peut induire, dans certains sols pauvres en fer libre, un risque de chlorose ferrique, auquel certaines productions sont sensibles.

**But :** le dosage du calcaire actif dans le sol.

**Principe :** Le calcaire actif correspond au calcaire fin facilement solubilisé. Au contact d'une solution d'oxalate d'ammonium ce calcaire fin se transforme en oxalate de calcium insoluble (qui se précipite) selon la réaction suivante :



L'excès de solution d'oxalate d'ammonium est ensuite dosé par une solution de permanganate de potassium en milieu sulfurique selon la réaction suivante.



### Réactif

- Oxalate d'ammonium  $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (0.2N)  $\longrightarrow$  14.2g/l
- Acide sulfurique concentré  $\text{H}_2\text{SO}_4$
- Permanganate de potassium  $\text{KMnO}_4$  (0.2N)  $\longrightarrow$  6,32g/l

### Mode opératoire

- Introduire dans un bécher 5g de sol (2.5 pour les sols calcaires, salée).
- Ajouter 250 ml de la solution d'oxalate d'ammonium.
- Agiter pendant 2 heures, puis filtrer.
- Prélever 25ml de la solution d'extraction (filtrée), les verser dans un bécher de 250ml.

- Ajouter 5ml d'acide sulfurique concentré.
- Chauffer jusqu'au l'ébullition.
- Titrer avec la solution de permanganate de potassium jusqu'à l'apparition d'une coloration rose persistante.
- Répéter les opérations précédentes mais sans sol, pour faire un témoin (25ml d'oxalate d'ammonium + 5ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> → chauffe → titrer avec le permanganate de potassium).

## Calcul

$$\text{CaCO}_3 \text{ (actif)\%} = (n' - n) \times 5$$

n' : volume de titration pour le témoin.

n : volume de titration pour le sol.

## Note bien

- Les valeurs brutes de calcaire actif, s'échelonnant couramment entre 2 et 25%.
- La détermination du calcaire actif a pour but de mieux cerner les risques de chlorose ferrique.
- L'indice de pouvoir chlorosant (IPC) selon Juste et Poujet 1972 in Baise (1988):

$$\text{IPC} = \frac{\text{CaCO}_3 \text{ « actif » en \%}}{(\text{Fer extractible})^2} \times 10^4$$

- La chlorose ferrique est due à une déficience en fer de la plante, cela ne veut pas forcément dire un manque de fer dans le sol. En fait, c'est le calcaire qui, dans certains sols, bloque l'assimilation du fer par la plante.

## Normes d'interprétation du calcaire actif et l'indice de pouvoir chlorosant (IPC)

|                     |                       |             |                        |            |            |  |                 |  |
|---------------------|-----------------------|-------------|------------------------|------------|------------|--|-----------------|--|
| Calcaire Actif en % | 5                     |             | 10                     |            | 20         |  |                 |  |
| Le sol est :        | Faible                | Assez élevé | Élevé                  | Très élevé |            |  |                 |  |
| IPC*                | 10                    |             | 20                     |            | 30         |  | 60              |  |
| Le sol est :        | Faiblement chlorosant |             | Moyennement chlorosant |            | Chlorosant |  | Très chlorosant |  |

\* Indice de Pouvoir Chlorosant

[https://wiki.aurea.eu/index.php/Le\\_calcaire\\_total\\_et\\_le\\_calcaire\\_actif](https://wiki.aurea.eu/index.php/Le_calcaire_total_et_le_calcaire_actif)

## TP 07: Le dosage du carbone organique (Méthode Walkley et Black)

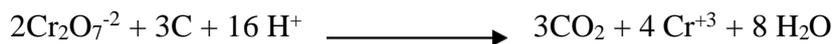
### Introduction

Le carbone organique est le principal constituant des matières organiques. Il représente environ 50% de celles-ci, suivi de l'oxygène (40%), de l'hydrogène (5%), de l'azote (4%) et du soufre (1%).

Dans les analyses de terre, la quantité de matières organiques du sol est connue à partir d'une mesure de teneur en carbone organique. Elle correspond à une concentration de carbone organique dans le sol.

**But :** le dosage du carbone organique dans le sol

**Principe :** le carbone organique est oxydé par du bichromate de potassium en milieu sulfurique. Le bichromate doit être en excès, la quantité réduite est en principe proportionnelle à la teneur en carbone organique.



L'excès de bichromate de potassium est titré par une solution de sulfate de fer, en présence de Barium diphénylamine sulfonate dont la couleur passe du bleu foncé au bleu vert.



### Réactifs

- Le bichromate de potassium ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) 1N : peser 49.04g de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , ajouter de l'eau distillée dans une fiole de 1l jusqu'à le trait de jauge.
- Acide sulfurique concentré ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).
- Acide orthophosphorique ou Acide phosphorique ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) concentré.
- Sulfate de fer d'ammonium  $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$  0.5 M: dissoudre 196g de Sulfate de fer d'ammonium dans une quantité d'eau distillée, ajouter 5ml  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , ajouter l'eau distillée jusqu'à un litre (trait de jauge de la fiole d'1L).
- Diphénylamine (indicateur coloré)  $(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{NH}$  : dissoudre 1g de diphénylamine dans 100ml d'acide sulfurique concentré.

### Mode opératoire

- Peser 1g de sol dans un bécher de 500ml.
- Ajouter 10 ml de bichromate de potassium 1N.

- Ajouter 20 ml de l'acide sulfurique concentré.
- Laisser reposer 30 min.
- Ajouter 200 ml d'eau distillée.
- Ajouter 10 ml de l'acide orthophosphorique concentré.
- Ajouter 10-15 gouttes de l'indicateur coloré diphénylamine.
- Titrer avec le sulfate de fer d'ammonium jusqu'à l'apparition d'une couleur verte.
- Préparer un témoin avec la même méthode mais sans sol.

### Calcul

$$C\% = \frac{(n' - n)}{p} * 1 * \frac{0.3}{0.77}$$

$$C\% = 1.334 * \frac{(n' - n) * 0.3 * M}{p}$$

n' : volume de témoin (volume de titrage)

n : volume de l'échantillon

p : poids de sol

M : molarité de sulfate de fer d'ammonium = 0.5

$$\text{La matière organique MO\%} = C\% * 1.72$$

**Normes d'interprétation : selon la** Source: Emerson (1991) et Charman and Roper (2000) in Hazelton et Murphy, (2007).

|            |        |                    |
|------------|--------|--------------------|
| < 0.70     | —————> | extrêmement faible |
| 0.70 –1.00 | —————> | Très faible        |
| 1.00 –1.70 | —————> | faible             |
| 1.70 –3.00 | —————> | modéré             |
| 3.00 –5.15 | —————> | élevé              |
| > 5.15     | —————> | très élevé         |

**Tableau 05:** Normes d'interprétation selon E.N.I.T.A. B (2000) ; **Gagnard et al (1988).**

| C/N          | Minéralisation de la MO                                   |
|--------------|---|
| < 8          | Minéralisation trop rapide, perte d'éléments fertilisants |
| Voisin de 10 | Bonne minéralisation                                      |
| > 15         | Minéralisation lente accumulation de matière organique    |

## **TP 08: Le phosphore assimilable (méthode Joret-Hebert)**

### **Introduction**

Le phosphore est un des éléments constitutifs majeurs des tissus végétaux comme des tissus vivants. Il joue un rôle important dans la synthèse et le métabolisme des glucides et se concentre dans les organes reproducteurs.

Les formes du phosphore dans le sol, sont multiples et variées et que celles-ci évoluent rapidement sous des influences diverses telles que les alternances humectation-dessiccation, l'acidité, la basicité et l'alcalinité ainsi que l'activité biologique.

Le phosphore assimilable ; appelé aussi < réserve assimilable > ou < fraction labile >, c'est le phosphore susceptible d'être absorbé par les racines.

La proportion de phosphore assimilable dans le sol est étroitement liée au pH du sol. Selon le pH, une fraction plus ou moins importante du phosphore assimilable se combine avec d'autres éléments du sol et devient indisponible pour la plante :

Combinaison avec le fer et l'alumine dans les sols acides

Combinaison avec le calcium et les carbonates libres dans les sols calcaires

**But :** dosage du phosphore assimilable par la méthode JORET – HEBERT, 1955.

### **Principe**

L'acide phosphorique est extrait par l'oxalate d'ammonium. Le rapport terre/solution est égal à 1/25.

Le dosage est basé sur la formation et la réduction d'un complexe de l'acide phosphorique et de l'acide molybdique. Dans la solution d'oxalate d'ammonium contenant un phosphate, l'addition d'un réactif sulfomolybdique et d'une solution d'acide ascorbique provoque, par chauffage, le développement d'une coloration bleue dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en orthophosphates.

## Réactifs

### Réactif sulfomolybdique

- Dissoudre 37.5g de molybdate d'ammonium  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  dans un bécher de 500ml contenant environ 150ml d'eau distillée
- Dans un bécher d'1l, ajouter 280ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pur ( $d = 1.84$ ) à 200ml d'eau. Après refroidissement, verser lentement et en agitant, la solution molybdique. Laisser refroidir, verser la solution dans un ballon jaugé de 1l et compléter à 1l

Le réactif contient 30g/l de  $\text{MoO}_3$  et sa normalité est de 10N. Il est conservé dans un flacon coloré et placé dans un réfrigérateur

### Solution d'acide ascorbique

- Peser 1g d'acide ascorbique, introduire dans un ballon jaugé de 1l, et compléter à 1l avec l'eau distillée.
- Conserver la solution au réfrigérateur, et à renouveler chaque semaine.

### Solution étalon d'orthophosphate

- Solution préparée à partir du phosphore monopotassique ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$  potassium dihydrogénorthophosphate). C'est une solution aqueuse contenant 50mg/l de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (50ppm).
- Peser 1.917g de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . Introduire dans un ballon jaugé de 1l. Dissoudre et compléter à 1l avec de l'eau distillée. Homogénéiser. La solution contient 1g/l (1000ppm) de  $\text{P}_2\text{O}_5$ .
- Dans un ballon jaugé de 200ml, mettre 10ml de la solution à 1g/l de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Compléter à 200ml avec de l'eau distillée. Homogénéiser cette deuxième solution contenant 50mg/l de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (50 ppm) est utilisé pour l'établissement de gamme.

### Solution d'extraction

- Peser 14.2g d'oxalate d'ammonium  $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$ . Introduire dans un bécher de 1l contenant 800 ml de l'eau distillée chaude. Agiter. Verser la solution dans une fiole jaugé de 1l et compléter à 1l.
- La solution est d'une concentration 0.2N. Vérifier le pH de l'oxalate d'ammonium qui doit être compris entre 6.5 et 7.0.

- Ajouter si besoin quelques gouttes d'ammonium, il faut accorder la plus grande attention au rinçage des électrodes du pH-mètre pour éviter d'introduire dans le milieu des traces d'acide phosphorique provenant de la solution tampon.

### Etablissement de la gamme

Les dosages sont effectués sur un volume de 10ml dans des tubes à essai en pyrex. Les points de la gamme sont obtenus en utilisant respectivement :

**Tableau 06:** La gamme du phosphore.

| N° tube   | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Solution $\text{KH}_2\text{PO}_4$ (ml) 50mg/l de $\text{P}_2\text{O}_5$ | 0   | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 |
| Oxalate d'ammonium (ml)   | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| Réactif sulfomolybdique (ml)  | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   |
| Acide ascorbique (ml)   | 6.5 | 6.4 | 6.3 | 6.2 | 6.1 | 6.0 |
| Concentration finale (ppm) de $\text{P}_2\text{O}_5$                    | 0   | 0.5 | 1   | 1.5 | 2   | 2.5 |

La réduction de l'acide phosphomolybdique est obtenue en maintenant les tubes au bain marie bouillant pendant 10 min. après refroidissement, les solutions sont dosées en colorimétries. Il faut noter que la réduction de l'acide phosphomolybdique exige un minimum de temps 5 min à 100°C et 12min à 80°C. De plus, il convient de préciser qu'après la réduction de la totalité de l'acide phosphomolybdique, la prolongation du chauffage ne modifie pas l'intensité de la coloration bleue.

### Mode opératoire

#### Extraction

- Peser 4 g de terre broyée et passée au tamis de 2 mm et introduire dans un flacon de 150/200 ml environ.
- Ajouter 100 ml d'une solution d'oxalate d'ammonium 0.2 N et de pH 6.5 à 7.0.
- Agiter pendant 2 heures ; puis filtré.
- Recueillir la solution dans un flacon de 100 ml.
- Prélever 1.5 ml de la prise d'essai dans un tube à essai.
- Ajouter 2 ml de réactif sulfomolybdique.
- 6.5 ml d'une solution à 1 g/l d'acide ascorbique.
- Passer les tubes au bain marie bouillant pendant 10 à 12 min
- Laisser refroidir
- Passer au colorimètre et colorimétrer à 650 nm.

## Calcul

$$\begin{aligned} \mathbf{P_2O_5 \text{ (ppm)}} &= \mathbf{x * U/v * V/P} \\ &= \mathbf{x * 10/1.5 * 100/4} \\ &= \mathbf{x * 1000/6} \end{aligned}$$

x : concentration lue sur le graphique en mg/l de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

U : volume colorimètre (10 ml)

v : volume de la prise d'essai (1.5 ml)

V : volume de la solution d'extraction (100 ml).

P : poids de la prise de terre (4g).

**Tableau 07:** Normes d'interprétation selon Calviet et Villemin (1986).

| <b>Taux de phosphore assimilable en ppm</b> | <30 ppm     | 30-50 ppm | 50-100ppm          | 100-200 ppm |
|---|-------------|-----------|--------------------|-------------|
|   | Très faible | Pauvre    | Moyennement pauvre | riche       |

## TP 09: La capacité d'échange cationique

### Introduction

La capacité d'échange cationique d'un sol est la quantité totale de cations (ions) que ce sol peut adsorber sur son complexe et échanger avec la solution environnante dans des conditions de pH bien définies.

En agronomie, la capacité d'échange cationique est très importante pour la détermination de la fertilité intrinsèque du sol, de la capacité de rétention des engrais, de la nutrition des plantes, etc...

**But :** la mesure de la capacité d'échange cationique d'un sol.

**Principe :** la détermination de la capacité d'échange cationique d'un sol consiste à saturer son complexe adsorbant par un ion assez efficace équilibrant la charge de l'échangeur et cependant assez facile à déplacer par suite, et finalement à doser.

### Réactifs

- Ethanol
- Acétate de sodium ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ ) 1N : 82.04g/1000ml
- Acétate d'ammonium ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ) 1N: 77.08g/1000ml

### Solution standard (mère)

- Dissoudre 2.5418g de chlorure de sodium sec, dans un litre d'eau distillée. Cette solution contient 1000ppm de Na.

### Solution fille

- Préparer une série de solution fille à partir de la solution standard : diluée 2, 4, 6, 8, 10, 15 et 20 ml de la solution standard dans 100ml d'eau distillée. Ces solutions contiennent 20, 40, 60, 80, 100, 150 et 200 ppm de Na

### Mode opératoire

- Peser 5g de sol et verser dans un tube à centrifuger, ajouter 33 ml d'acétate de sodium et centrifuger pendant 5 min à 3000 t/min.
- Répété cette opération 3 fois.
- Récupérer la solution dans une fiole de 100ml pour le dosage des bases échangeable  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ .

- Ajouter 33ml éthanol et centrifugé pendant 5min à 3000 t/min. Eliminer chaque fois le surnageant
- Répété cette opération 3 fois
- Ajouter au culot 33ml d'acétate d'ammonium à 3 reprises (33ml, 33ml ,33ml), doser la CEC dans cette solution par le dosage du Na par le spectrophotomètre à flamme.

### Calcul

$$\text{CEC meq/100g} = \frac{\text{meq Na}}{L} \times \frac{A}{Wt} \times \frac{100}{1000}$$

A : volume total de l'extrait (100ml)

Wt : poids de sol sec (5g)

**Tableau 08** : Normes d'interprétation de la CEC selon Metson (1961) in Hazelton et Murphy, (2007).

| Appréciation de la CEC | Valeurs de CEC (en cmol/kg) |
|------------------------|-----------------------------|
| Très faible            | < 6                         |
| Faible                 | 6-12                        |
| Moyenne                | 12-25                       |
| Elevée                 | 25-40                       |
| Très élevée            | > 40                        |

**Note bien** : 1 meq/100 g = 1 cmol/kg

## TP 10: Dosage de l'azote total (Méthode Kjeldahal)

### Introduction

L'azote est l'élément constitutif des plantes le plus important après le carbone. L'azote constitue 78% de l'air.

L'azote est un élément qui a une origine endogène (résidus de culture, exsudats racinaires). En général, même dans les champs fertilisés, la majorité de l'azote des plantes provient du recyclage par la minéralisation de l'azote du sol et des résidus organiques.

**But :** Dosage de l'azote total du sol par la Méthode Kjeldahal.

### Principe

Le sol finement broyé est chauffé avec de l'acide sulfurique concentré, qui à l'ébullition détruit par son action oxydante les matières organiques azotées.

Le carbone et l'hydrogène se dégagent à l'état de  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ , et l'azote transformé en ammoniac est fixé par l'acide sulfurique à l'état de sulfate d'ammoniac  $\text{SO}_4(\text{NH})_2$ .

Cette transformation nécessite l'emploi de catalyseurs.

Enfin, l'ammoniac formée est déplacée de ses combinaisons par la soude concentrée, distillée par entraînement de vapeur, recueillie dans une solution d'acide borique, et dosée par l'acide sulfurique titré.

### Réactifs

- Acide sulfurique.
- Acide borique 2% : 2g/100ml
- Catalyseur : - 0.25g de sélénium.
  - 1g de sulfate de cuivre.
  - 1g de sulfate de potassium.
- Hydroxyde de sodium NaOH (10N) : 400gde NaOH/l eau distillée
- Indicateur de Tashiro : le mélange de rouge de méthyle et le bleu de méthylène
  - ┌ 1 part de rouge de méthyle à 0.2 % dans l'éthanol (95%)
  - └ 1 part de bleu de méthylène à 0.1 % dans l'éthanol (95%)

### Mode opératoire

#### 1. La minéralisation

- Peser 5g de terre fine, passée au tamis à maille de 2mm.
- L'introduire dans un matras de Kjeldahal de 500ml.
- Ajouter 1g de catalyseur.

- Ajouter 20ml d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentré et homogénéiser par agitation.
- Porter à la rampe d'attaque sous hôte bien ventilée, chauffer d'abord à feu doux ; puis à feu vif jusqu'à l'obtention d'un liquide incolore. L'opération peut demander plusieurs heures. Chauffer encore ¼ h à ½ h après la décoloration.
- Laisser refroidir le matras.
- Récupérer la solution dans une fiole jaugée de 100ml
- Compléter avec l'eau distillée jusqu'à 100ml.

## 2. Distillation

- Prélever 20ml de la solution contenue dans la fiole pour la distillation. Verser ce prélèvement dans un matras.
- Ajouter 30ml NaOH (10N = 400g/l) et distiller en recueillant le distillat dans un bécher qui contient 10ml d'acide borique (2%) et un indicateur coloré mixte jusqu'à 80ml.
- Titrer avec l'acide sulfurique (0.05N)
- Faire un témoin avec la même méthode mais sans sol (minéralisation + distillation)

### Calcul

$$N\% = (n - n') * \frac{V}{V'} * 0.05 * \frac{1.4}{P}$$

n : volume de l'échantillon (lue sur la burette).

n' : volume de témoin (lue sur la burette).

V : volume de la solution d'extraction (100ml).

V' : volume prélevé pour la distillation (20ml).

P : poids du sol (5g).

### Normes d'interprétation : Selon Calvet et Villemin 1986

|                  |        |                 |
|------------------|--------|-----------------|
| N < 0.05%        | —————> | sol très pauvre |
| 0.05 > N > 0.1%  | —————> | sol pauvre      |
| 0.1 > N > 0.15%  | —————> | sol moyen       |
| 0.15 > N > 0.25% | —————> | sol riche       |
| N > 0.25%        | —————> | sol très riche  |

## TP 11: Dosage de gypse (méthode de l'acétone)

### Introduction

Le gypse est un sel soluble (sulfate de calcium hydraté). Sa solubilité est de 2.6 g/l dans l'eau pure à 25°C et à une pression de 1 atmosphère. Il constitue la forme la plus répandue du sulfate de calcium dans le sol.

La présence de gypse dans le sol affecte la plupart de leurs propriétés, causant des problèmes sévères d'ordre physiques, chimiques et des problèmes de fertilités.

**But :** le dosage du gypse dans le sol

**Principe :** le gypse est dissous dans l'eau par agitation, puis il est précipité par l'acétone. Après lavage, ce précipité est redissous dans une quantité d'eau connue. La conductivité de la nouvelle solution et la quantité de gypse est déterminée par comparaison avec une série standard.

### Réactifs

- Acétone

### Mode opératoire

- Peser 1g du sol, mettre dans un bécher de 1l, ajouter 500ml d'eau distillée, agiter pendant une heure, puis filtrer.
- Prélever 20ml, mettre dans un godet de la centrifugeuse, ajouter 20ml d'acétone concentré, puis centrifuger à 3000T pendant 5min.
- Jeter la solution et ajouter encore dans le godet 10ml d'acétone puis centrifuger à 3000T pendant 5min puis jeter la solution.
- Ajouter 40ml d'eau distillée dans le godet, mélanger avec une spatule et laisser en contacte pendant 10min.
- Mesurer la conductivité électrique de la solution.

### Calcul

Le taux de gypse est calculé par l'utilisation de la courbe standard qui relie la concentration de sulfate de calcium avec la CE.

**Tableau 09:** La relation entre la concentration de sulfate de calcium avec la CE.

| CaSO <sub>4</sub> (még/l) | Conductivité électrique à 25°C (dS/m) |
|---------------------------|---------------------------------------|
| 1.0                       | 0.121                                 |
| 2.0                       | 0.226                                 |
| 5.0                       | 0.500                                 |
| 10.0                      | 0.900                                 |
| 20.0                      | 1.584                                 |
| 30.5                      | 2.205                                 |

$$y = 0.0705 A + 0.118 \quad \text{donc} \quad A = \frac{y - 0.118}{0.0705}$$

$$R^2 = 0.9942$$

L'expression utilisée pour calculer le taux de gypse dans l'échantillon est la suite :

$$\text{Gypse\% dans le sol} = \frac{\text{Amég CaSO}_4}{1000\text{ml}} * \frac{\text{Bml}}{\text{Cml}} * \frac{1}{\text{Dg/ml}} * \frac{0.086\text{g}}{1\text{még gypse}} * 100$$

A : még CaSO<sub>4</sub> calculer de l'équation  $A = \frac{y - 0.118}{0.0705}$ .

B : volume de H<sub>2</sub>O pour apporter tout le précipité dans la solution ; 40ml.

C : volume de l'aliquote ; 20ml.

D : rapport sol/eau ; 1/500.

Y : la conductivité électrique

#### **Normes d'interprétation : Selon Barzanji, 1973 in FAO (1990)**

- <0.3      —————>    sol non gypseux
- 0.3 – 10    —————>    sol légèrement gypseux
- 10 – 15    —————>    sol modérément gypseux
- 15- 25     —————>    sol fortement gypseux
- 25-50     —————>    sol très fortement gypseux

## TP 12: La densité réelle (méthode de pycnomètre)

### Introduction

Cette densité est une moyenne ; c'est la moyenne pondérée des densités de ces différents constituants. Ainsi ce paramètre peut donner des indications sur la répartition des divers constituants dans les profils. La densité réelle varie peu au sein des profils et d'un type de sol à un autre (2,3 – 2,9).

**But :** la détermination de la densité réelle du sol par la méthode de pycnomètre

**Principe :** on effectue la mesure du poids et du volume de la phase solide d'un petit échantillon sec. La mesure du volume est réalisée par déplacement de liquide.

### 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 poids du pycnomètre vide (ou fiole de 100ml vide et sec).

b : le poids de pycnomètre contenant le sol à étudier (15g environ).

c : le poids de pycnomètre + sol + eau distillée dégagée.

d : le poids de pycnomètre rempli d'eau.

### Calcul

$$d_r = \frac{P_s}{V_s} \text{ g/cm}^3$$

$$d_r = \frac{b - a}{(b + d) - (a + c)} \text{ g/cm}^3$$

### Normes d'interprétation

La masse volumique réelle des éléments constituant le sol est fonction du type de matériaux selon Demolon:

Argile 2,52 g/cm<sup>3</sup>

Quartz et feldspath alcalin 2,60 -- 2,70 g/cm<sup>3</sup>

Mica 2.8—3.02 g/cm<sup>3</sup>

Sable 2.6--3 g/cm<sup>3</sup>

Matière organique du sol 1.5—1.6 g/cm<sup>3</sup>

Sol calcaire 2.45 g/cm<sup>3</sup>

Sol humifère 1.8—2.45 g/cm<sup>3</sup>

Sol de constitution moyenne 2.6 g/cm<sup>3</sup>

Les valeurs moyennes des masses volumiques réelles sont généralement comprises entre les

Valeurs suivantes :

Sols minéraux 2,60 -- 2,70 g/cm<sup>3</sup>

Sols organiques 1,40 -- 2,00 g/cm<sup>3</sup>

## TP 13: La densité apparente (méthode de cylindre)

### Introduction

La densité apparente est l'un des paramètres les plus importants dans les études portant sur la structure du sol. Elle est, en effet, liée à la nature et à l'organisation des constituants du sol. Elle permet, en outre, de calculer la porosité et d'apprécier ainsi indirectement la perméabilité, la résistance à la pénétration des racines, la cohésion des horizons et la réserve en eau du sol.

**But :** la détermination de la densité apparente du sol par la méthode du cylindre.

**Principe :** le prélèvement volumique ( $V_a$ ) est effectué avec un cylindre (volume connu) directement enfoncé dans le sol et dont les extrémités sont soigneusement arasées. L'échantillon est recueilli, séché et pesé ( $P_{sec}$ ).

La technique impose le creusement d'un profil pédologique avec au moins une face parfaitement dégagée pour échantillonner dans les différents horizons en enfonçant horizontalement les cylindres.

### Mode opératoire

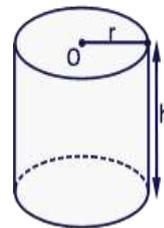
- Enfoncer horizontalement le cylindre dans le profil.
- A l'aide d'un couteau, enlever le cylindre remplie de terre.
- Mettre la totalité de l'échantillon de terre dans l'étuve à 105°C pendant 24h.
- Peser le poids sec de l'échantillon.
- Mesurer le volume du cylindre ( $V_t$ ) à l'aide d'un pied à colis :

$$V_t = \pi r^2 h$$

**Volume de la cylindre** =  $3.14 \times r^2 \times h$

$h$  : la hauteur de la cylindre

$r$  : le rayon interne de la cylindre



### Calcul

$$D_a = \frac{P_{sec}}{V_t}$$

$$\text{La porosité}\% = \frac{D_r - D_a}{D_r} * 100$$

## Normes d'interprétation de la densité apparente

**Tableau 10:** Echelle générale de densité apparente selon Harte (pers. comm) in Hazelton et Murphy, 2007).

| Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> ) | Évaluation  |
|--|-------------|
| <1.0                                   | Très faible |
| 1.0–1.3                                | faible      |
| 1.3–1.6                                | modérée     |
| 1.6–1.9                                | élevée      |
| >1.9                                   | très élevée |

**Tableau 11:** Effet de la densité apparente sur l'état du sol (Hunt et Gilkes, 1992 in Hazelton et Murphy, 2007).

| Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> ) | Sols sablonneux                  | Limoneux             | Sols argileux         |
|--|----------------------------------|----------------------|-----------------------|
| <1.0                                   | -                                | satisfaisant         | satisfaisant          |
| 1.0–1.2                                | -                                | satisfaisant         | satisfaisant          |
| 1.2–1.4                                | très ouvert                      | satisfaisant         | certain trop compact  |
| 1.4–1.6                                | satisfaisant                     | certain trop compact | très compact          |
| 1.6–1.8                                | la plupart du temps trop compact | très compact         | très compact          |
| >1.8                                   | très compact                     | extrêmement compact  | excessivement compact |

**Tableau 12:** Normes d'interprétation de la porosité (E.N.I.T.A.B, 2000).

| Porosité totale estimée | Porosité totale |
|-------------------------|-----------------|
| Non poreux              | < 2%            |
| Peu poreux              | 2 à 5%          |
| Moyennement poreux      | 5 à 15%         |
| Poreux                  | 15 à 40%        |
| Très poreux             | > 40%           |

## TP 14: Mesure de l'humidité des sols à un pF donné (Méthode par pression)

### Introduction

La teneur en eau du sol pour un état donné (l'eau de gravité, l'eau capillaire absorbable, l'eau capillaire non absorbable et l'eau hygroscopique), donc à un pF donné n'est pas identique pour tous les sols ; elle dépend énormément de sa constitution : structure, texture, matière organique...

Dans la pratique, deux états caractéristiques de l'eau sont retenus, vu leur intérêt :

- Le point de ressuyage ou capacité de rétention
- Le point de flétrissement

La différence des quantités d'eau retenue dans ces deux états est en effet la quantité d'eau réellement utilisable par la plupart des plantes. On l'appelle la réserve utile.

**Le but** : la détermination des humidités caractéristiques (la capacité de rétention et le point de flétrissement).

**Le principe** : les échantillons à étudier, préalablement saturés d'eau, sont soumis à une pression déterminée. L'eau en excès est donc éliminée jusqu'à la réalisation d'un équilibre entre la force appliquée et la force de rétention de l'eau par le sol.

**Tableau 13**: Correspondance des expressions de pression statique.

| Humidités              | Bars        | Kilo pascals | Atmosphère | mm de mercure | Hauteur équivalente en cm d'eau | pF         |
|------------------------|-------------|--------------|------------|---------------|---------------------------------|------------|
| Capacité de rétention  | <b>0.33</b> | 33           | 0.328      | 250           | 344                             | <b>2.5</b> |
| Point de flétrissement | <b>15</b>   | 1500         | 15.2       | 11251         | 15499                           | <b>4.2</b> |

### Mode opératoire

#### Mesure de la capacité de rétention (pF 2.5)

L'appareil utilisé comporte : - La chambre d'extraction proprement dite de 5bars,

- Une plaque de porcelaine poreuse de 1bar.

Les mesures sont généralement effectuées sur la terre tamisée, à 2mm.

- La plaque de porcelaine de 1bar est à tremper dans un plateau pendant une nuit. Ensuite, siphonner l'eau contenue.
- Placer les anneaux sur la plaque de porcelaine, les remplir de terre et tasser légèrement. Relever au fur et mesure les numéros des anneaux.
- Remettre de l'eau sur la plaque de porcelaine. Laisser les échantillons de terre s'imbiber par capillarité pendant 24h.
- Mettre en place, dans la presse, la plaque de porcelaine portant les échantillons. La connecter à l'extérieur par l'intermédiaire d'un ajutage de caoutchouc.
- Effectuer le serrage des boulons.
- Etablir progressivement la pression dans la chambre jusqu'à la valeur choisie (0,33bar).
- Arrêter l'appareil lorsque l'équilibre est établi, c'est-à-dire lorsqu'il ne se produit plus d'écoulement d'eau à l'orifice de sortie de la chambre d'extraction (cet équilibre est généralement atteint en 24).
- Ouvrir doucement le robinet de sortie du manomètre jusqu'à annulation de la pression à l'intérieur de la chambre. Ouvrir la chambre d'extraction.
- Peser les échantillons ; c'est le poids humide.
- Les mettre à l'étuve à 105 °C pendant 24 h.
- Les retirer de l'étuve et laisser refroidir dans un dessiccateur.
- Peser les échantillons ; c'est le poids sec.

#### **Mesure de l'humidité au point de flétrissement (pF 4.2)**

- Pour la mesure de l'humidité au point de flétrissement, nous suivent les mêmes étapes mais nous utilisons la chambre d'extraction et la plaque poreuse de 15 bars, puis on exerce une pression de 15 bars.

## Calcul

### 1- Le taux d'humidité a la capacité de rétention

$$\text{Le taux d'humidité en \%} = \frac{P_{\text{sol humide}} - P_{\text{sol sec}}}{P_{\text{sol sec}}} \times 100$$

### 2- Le taux d'humidité au point de flétrissement

$$\text{Le taux d'humidité en \%} = \frac{P_{\text{sol humide}} - P_{\text{sol sec}}}{P_{\text{sol sec}}} \times 100$$

### 3- La réserve utile en eau (RU) en %

RU% = taux d'humidité a la capacité de rétention – taux d'humidité au point de flétrissement

### 4- La réserve utile en eau (RU) en mm

RU mm = (taux d'humidité a la capacité de rétention – taux d'humidité au point de flétrissement) x da x P.

da : densité apparente en g/cm<sup>3</sup>

P : la profondeur en dm

**Normes d'interprétation :** Selon [CEMAGREF](#), (2012)

100 < RU < 150 mm sol à bonne réserve

50 < RU < 100 mm sol à moyenne réserve

20 < RU < 50 mm sol à faible réserve

## TP 15: L'analyse granulométrique (méthode de la pipette de Robinson)

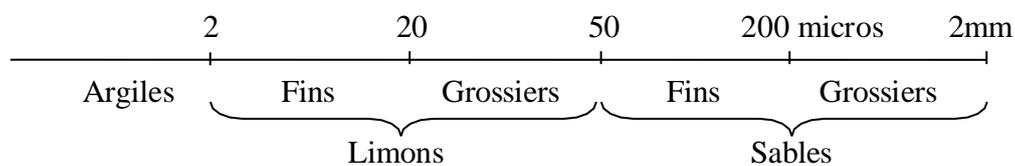
### Introduction

Le milieu sol est complexe, il comprend des constituants minéraux et organiques. Les constituants minéraux représentent 93 à 95% du poids total du sol. La fraction minérale du sol provient de la désagrégation et de l'altération des roches sous jacentes.

On sépare les constituants minéraux du sol selon leur taille ; c'est l'analyse granulométrique du sol. On distingue ainsi des graviers, des sables, des limons, et des argiles ; leur proportion relative définit la texture du sol.

**But :** la détermination de la texture du sol par la méthode de la pipette de Robinson

**Principe :** l'analyse granulométrique consiste à séparer la partie minérale de la terre en catégories classées d'après la dimension des particules minérales inférieures à 2mm et à déterminer les proportions relatives de ces catégories, en pourcentage de la masse totale du sol minéral. Les particules minérales ont été classées selon l'échelle internationale de la façon suivante :



### Réactifs

- Eau oxygénée
- Hexamétaphosphate de sodium (100g/l)
- Ethanol
- HCl (1N)

### Mode opératoire

- Peser 10g de sol (10g pour une terre argileuse, 20g pour une terre sableuse). Les mettre dans un bécher de 600ml.
- Verser dans le bécher 50ml d'eau oxygénée, agiter pour homogénéiser en tenant sous contrôle la formation de mousse, si le mousse risque de déborder ajouter un jet d'alcool éthylique.
- Couvrir le bécher d'un verre de montre et laisser réagir au moins 12h (une nuit).
- Mettre le bécher sur le bain de sable dont la température ne doit pas dépasser 85°C.

- Si une certaine effervescence se prolonge ajouter de en temps et par petites quantités de l'eau oxygénée.
- Laisser refroidir.
- Verser le HCl (1N) en quantité suffisante pour détruire les carbonates, attendre la fin de l'effervescence.
- Transvaser dans un flacon de sédimentation jaugé de 1000ml le contenu du bécher à l'aide d'un jet de pissette.
- Verser dans le flacon 10ml d'hexamétaphosphate de sodium.
- Compléter avec l'eau distillée jusqu'au traits de jauge (1000ml).
- Agiter le flacon pendant 1h au moins sur l'agitateur rotatif.
- Porter le flacon à proximité de la pipette de Robinson.
- Mettre le flacon dans un récipient contenant de l'eau maintenue à 20°C.
- Agiter à l'aide d'un thermomètre le liquide d'un flacon. Si la température indiquée est égale à 20°C, sortir le flacon, l'agiter immédiatement et violement par retournement répétés de manière à mettre en suspension toute la terre (environ 10 retournement).
- Poser très rapidement le flacon sous la pipette de Robinson.

1- Premier prélèvement : (argile + limon fin + limon grossier) < 50μ

Température de la solution : 20°C

Temps de sédimentation : 46 secondes

Profondeur 10cm

2- Deuxième prélèvement : (argile + limon fin) < 20μ

Température de la solution : 20°C

Temps de sédimentation : 4 min et 48 secondes

Profondeur 10cm

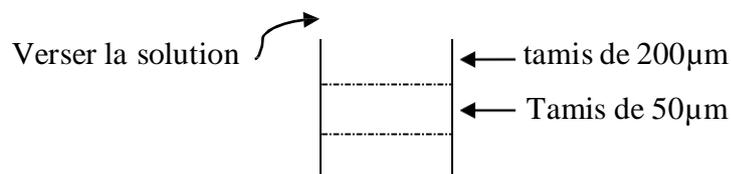
3- Troisième prélèvement : argile < 2μ

Température de la solution : 30°C

Temps de sédimentation : 6h et 21 min

Profondeur 10cm

4- Séparation des sables grossier et des sables fins par les tamis 200μm et 50μm



- Transvaser les prélèvements dans des capsules, les peser avant utilisation.

- Porter les capsules à l'étuve à 105°C jusqu'à 24h.
- Peser les capsules.

### Calcul

$$\text{Argile\%} = (P2 - ph) \times \frac{v2}{v1} \times \frac{100}{P - \left[ \frac{p}{100} (MO \% + CaCO3\%) \right]}$$

$$\text{Limon fin\%} = (P1 - P2) \times \frac{v2}{v1} \times \frac{100}{P - \left[ \frac{p}{100} (MO \% + CaCO3\%) \right]}$$

$$\text{Sable fin\%} = \frac{P3 \times 100}{P - \left[ \frac{p}{100} (MO \% + CaCO3\%) \right]}$$

$$\text{Sable grossier\%} = \frac{P4 \times 100}{P - \left[ \frac{p}{100} (MO \% + CaCO3\%) \right]}$$

$$\text{Limon grossier\%} = 100 - (A\% + LF\% + SF\% + SG\%)$$

Soit :

P : prise d'essai (10g)

P1 : poids d'argile + limon+ hexamétaphosphate de sodium prélevé et peser à sec

P2 : poids d'argile + hexamétaphosphate de sodium

Ph : poids hexamétaphosphate de sodium dans la suspension prélevée

P3 : poids des sables fins

P4 : poids des sables grossiers

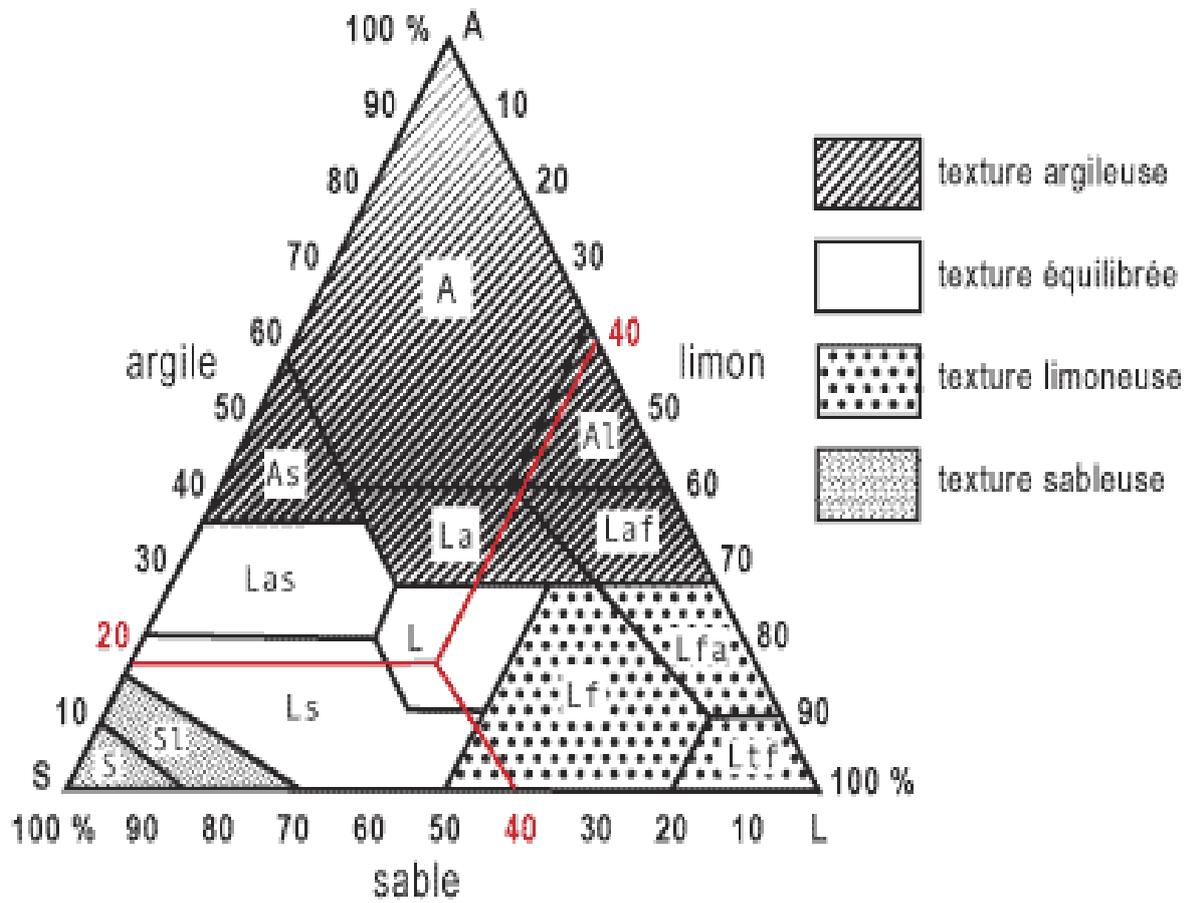
V2 : volume total de la suspension (1000ml)

V1 : volume de la pipette (10ml)

MO : pourcentage de la matière organique

CaCO<sub>3</sub> total : pourcentage du calcaire total

## Interprétation des résultats



A : argileux  
 As : argilo-sableux  
 Al : argilo-limoneux  
 La : limono-argileux  
 Laf : limono-argileux fins  
 Las : Limono-argileux sableux

L : limoneux  
 Ls : limono-sableux  
 Lfa : limoneux fins argileux  
 Lf : limoneux fins  
 Ltf : limoneux très fins  
 Sl : sablo-limoneux  
 S : sableux

**Exemple : 20% argile, 40% sable, 40% limon → texture limoneux**

## **TP 16: La stabilité structurale « méthode Henin »**

### **Introduction**

La stabilité structurale, aussi appelée stabilité des agrégats, est un indicateur de la cohésion des agrégats d'un sol. C'est un paramètre qui exprime la capacité des agrégats d'un sol à résister à une dégradation due en général à l'impact de la pluie ou un excès d'eau.

**But :** la mesure de la stabilité structurale du sol

### **Principe**

Il s'agit de déterminer le pourcentage d'agrégats supérieurs à 200  $\mu\text{m}$  qui ont résisté au contact avec Seau dans des conditions différentes, et parallèlement, de mesurer la quantité d'éléments fins (0-20  $\mu\text{m}$ ) qui, sans dispersion préalable, se sont mis en suspension au cours de ces manipulations.

### **Réactifs**

- Alcool
- Benzène
- Hexamétaphosphate de sodium 50g/l
- L'eau oxygénée

### **Mode opératoire**

#### **Préparation des échantillons**

- Tamiser la terre sur un tamis de 2 mm. La terre doit être forcée à la main à travers ce tamis
- Eliminer la terre inférieure de 200 $\mu\text{m}$  avec le tamis de 200 $\mu\text{m}$
- Prélever 10g de sol à 3 reprises

#### **Traitement de la terre**

- Chaque prise d'essai de 10 g est déposée dans un béccher de 300 ml
- Verser doucement dans le premier béccher 10ml d'alcool éthylique, dans le deuxième 10 ml de benzène et remplir le troisième avec 200ml l'eau distillée
- Après 5 minutes plus tard, compléter les béccher 1 et 2 avec 190 ml d'eau distillée
- Laisser reposer 30 nm
- Verser le contenu du béccher n°1 dans un erlenmeyer de 750 ml par l'intermédiaire d'un entonnoir et jaugé à 300ml. Rincer le béccher à la pissette en évitant d'envoyer le jet sur les agrégats

- Boucher l'erenmeyer et agiter en 20 retournements successifs et identiques pour tous les échantillons
- Verser le contenu de l'erenmeyer sur un tamis de 200 $\mu$ m, lui même placée dans un cristallisoir de 1 l à fond plat.
- Tapoter 5 à 6 fois le tamis contre le fond du cristallisoir pour éliminer les bulles d'air qui se sont formées sous le tamis
- Rincer l'erenmeyer à l'aide d'une pissette en évitant de diriger le jet sur les agrégats
- Tamiser avec un mouvement hélicoïdal allé – retour d'amplitude 120° environ, cela 30 fois en 30 secondes
- Recueillir dans une capsule de 500ml les agrégats restés sur la toile du tamis
- Transvaser le liquide de la capsule dans le cristallisoir, tout en évitant de faire passer les agrégats
- A l'aide d'un jet de pissette, récupérer les agrégats dans une capsule de 50ml préalablement tarée
- Transvaser à nouveau le liquide de la capsule dans le cristallisoir
- Porter la capsule contenant les agrégats à l'étuve à 105°C
- Après dessiccation, laisser refroidir à l'air
- Peser
- Opérer de la même manière pour les bécher n° 2 et n° 3
- Les poids obtenus multiplier par 10, donnent le % d'agrégats stables à l'eau, après prétraitement à l'alcool et au benzène
- Effectuer la moyenne des chiffres obtenus.

### **Détermination du taux maximum d'argile et de limon**

- Transvaser le contenu du cristallisoir dans une allonge de sédimentation de 1000ml
- ***S'il n'est pas de floculation***, Compléter à 1000ml avec l'eau distillée et agiter par retournement 6 à 7 fois, puis prélever à 10 cm et à une température de 20°C, 20ml de la fraction argile + limon fin
- Sécher à l'étuve à 105°C, puis peser
- ***S'il ya une floculation***, ajouter un dispersant (10ml l'examétaphosphate de sodium) et compléter à 1000ml avec l'eau distillée
- Agiter par retournement 6 à 7 fois, puis prélever à 10 cm et à une température de 20°C, 20ml de la fraction argile + limon fin
- Sécher à l'étuve à 105°C, puis peser

$$\text{Poids argile + limon (Pal)\%} = \text{Pal} \times \frac{1000}{20\text{ml}} \times \frac{100}{10\text{g}} = \text{Pal} \times 500$$

- Des trois chiffres obtenus pour (L+A), ne retenir que le plus élevée

### **Détermination du taux de sable grossier**

- Dans un même bécher, recueillir les agrégats issus des 3 traitements
- Détruire la matière organique par l'eau oxygénée
- Ajouter 15ml l'examétaphosphate de sodium
- Compléter à environ 100ml avec l'eau distillée déminéralisée
- Agiter puis laisser reposer pendant quelques heures
- Faire passer le contenu du flacon sur un tamis de 200µm
- Rincer le flacon et le tamis avec l'eau distillée
- Récupérer à l'aide d'un jet de pissette, les sables grossier ces derniers seront transvaser dans une capsule de 50ml.
- Faire évaporer l'eau mêlée aux sables en portant la capsule à l'étuve à 105°C
- Laisser refroidir la capsule à l'air
- Déterminer le poids Psg correspondant aux trois prises d'essais des 10g, puis le pourcentage de sables grossiers

$$\% \text{ de sables grossiers} = \frac{P_{sg}}{10 \times 3} \times 100$$

### **Calcul**

$$I_s = \frac{\% \text{ maximum (A + LF)}}{\% \text{ moyen des agrégats grossier} - 0.9 \% \text{ de sable grossier}}$$

## Norme d'interprétation : Selon Monnier et Stengel (1982)

| <b>Stabilité</b>   | <b>log 10 Is</b> | <b>évolution structurale probable</b>  |
|--------------------|------------------|--|
| Très stables       | < 1              | <ul style="list-style-type: none"><li>- aucune manifestation de désagrégation</li><li>- effet durable des sous solages et labours profonds</li><li>- réalisés en conditions sèches</li></ul>                                   |
| Stables            | 1.0 – 1.3        | <ul style="list-style-type: none"><li>- battance peu probable e peu intense</li><li>- prise en masse hivernale rare</li><li>- sensibilité à l'érosion faible, même sur pentes fortes</li></ul>                                 |
| Stabilité médiocre | 1.3 – 1.7        | <ul style="list-style-type: none"><li>- battance fréquente et accentuée en conditions pluvieuse</li><li>- prise en masse lors d'excédents hydriques prolongés</li><li>- érosion en rigole sur pentes fortes (&gt;3%)</li></ul> |
| Instables          | 1.7 – 2.0        | <ul style="list-style-type: none"><li>- battance et prise en masse fréquentes en conditions climatiques normales</li><li>- érosion fréquente sur pentes moyennes</li></ul>   |
| Très instables     | >2               | <ul style="list-style-type: none"><li>- battance et prise en masse généralisées</li><li>- imperméabilité totale en masse en fin d'hiver</li><li>- érosion sur pentes très faibles</li></ul>                                    |

## **TP 17: Mesure de la perméabilité par la méthode du double anneau d'infiltration « Méthode Muntz »**

### **Introduction**

La perméabilité  $K$  d'un sol est la capacité de ce dernier à infiltrer l'eau. Il s'agit d'une vitesse de circulation de l'eau libre entre les grains, l'eau « pelliculaire », « collée » autour des grains restant immobile. La perméabilité dépend de la *texture* du sol et de sa *structure* (homogène, fissures...). Plus un milieu est perméable ( $K$  grand), plus l'eau s'infiltré.

Un sol est considéré comme imperméable lorsque le coefficient  $K$  est inférieur à  $10^{-8}$  m/s ce qui correspond à 0,036 mm/h. A l'inverse, au delà de  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s ce qui correspond à 180 mm/h, le sol est considéré comme très perméable, son aptitude à l'infiltration est excellente.

La perméabilité d'un sol est la vitesse à laquelle un fluide pénètre les pores d'un solide. Si la terre a une grande perméabilité, elle adsorbera facilement l'eau de pluie ou l'eau d'irrigation. En cas de faible perméabilité, les liquides auront tendance à s'accumuler en surface ou à ruisseler si la surface n'est pas horizontale.

**But :** la détermination de la perméabilité sur terrain par la méthode de double anneau d'infiltration

### **Principe**

Les méthodes de mesure de l'infiltration in situ visent à connaître le flux vertical de l'eau en régime constant. Le principe repose sur la mesure du débit s'infiltrant au travers d'une surface bien délimitée d'un sol sous une charge hydraulique constante.

### **Matériels et méthode**

- Enfoncés dans le sol les 2 anneaux de quelques cm (en général 6 cm) bien verticalement à la masse, mais de préférence en posant une planche sur les cylindres afin d'amortir les coups et de protéger les bords supérieurs .
- Remplis les anneaux (extérieur et intérieur) avec l'eau.
- Mesurer le niveau d'eau descend par le temps (ex : chaque 3mn).
- Après chaque mesure, ajouter de l'eau dans l'anneau intérieure pour garder le même niveau d'eau de départ.
- Noter le volume ajouté dans l'anneau interne au cours du temps.
- Arrêter la mesure quand la valeur de la hauteur d'infiltration est constante (ou la même chose si l'eau ajoutée est constante).

- Calculer la vitesse d'infiltration

### Calcul

$$K \text{ (mm/h)} = \frac{\text{Volume d'eau introduit en mm (L)}}{\text{Surface d'infiltration (m}^2\text{) X durée du test (h)}}$$

Surface total interne du cylindre (S)

$$S = \frac{1}{2} r^2 \pi$$

r : rayon interne

### Normes d'interprétation

Les limites citées par Calvet (2003) sont généralement utilisées :

- Très petite perméabilité,  $K_s < 10^{-7}$  m/s
- Petite perméabilité,  $10^{-7}$  m/s  $< K_s < 10^{-6}$  m/s
- Perméabilité moyenne,  $10^{-6}$  m/s  $< K_s < 10^{-5}$  m/s
- Grande perméabilité,  $10^{-5}$  m/s  $< K_s < 10^{-4}$  m/s
- Très grande perméabilité,  $10^{-4}$  m/s  $< K_s$

Selon GEPPA commission cartographique, 1970-1981

| Unité de perméabilité | Seuils et appréciations du coefficient de perméabilité |                   |                          |               |                    |
|-----------------------|--|-------------------|--------------------------|---------------|--------------------|
| m/s                   | $10^{-7}$  | $10^{-6}$         | $10^{-5}$                | $10^{-4}$     |                    |
| cm/s                  | $10^{-5}$  | $10^{-4}$         | $10^{-3}$                | $10^{-2}$     |                    |
| cm/h                  | 0.036  | 0.36              | 3.6                      | 36.0          |                    |
| m/j                   | 0.0086   | 0.086             | 0.86                     | 8.64          |                    |
|                       | Sol non perméable<br>(imperméable)                     | Sol peu perméable | Sol modérément perméable | Sol perméable | Sol très perméable |

## Références bibliographiques

**Anonyme SD** - Caractériser la stabilité structurale et la battance. Théorie A4, 4p.

**Aubert G., 1978** - Méthodes d'analyses des sols. C.R.D.P. Marseille, 188p.

**Baize D., 1988** - Guide des analyses courantes en pédologie. Choix, expression, présentation, interprétation. I.N.R.A., Paris, 172p.

**Baize D et Girard B., 1995** - Guide pour la description des sols. INRA. Paris, 375p.

**Bertrand R., Gigou J., 2000** - La fertilité des sols tropicaux. ED Maisonneuve et Larose, Paris, 397p.

**Calvet G et Villemin P., 1986** - Interprétation des analyses des terres. Ed. SCPA, 25p.

**Calvet R., 2003** - Le sol: propriétés et fonctions, Volume 2. France Agricole Editions, 511 pages.

**C.A.T et ARVALIS, 2005** – Valeurs indicatives pour l'interprétation des analyses des terres. 2p. T:\p4-environnement\02A\_agronomie\ferti\plaquette-PK-2005\valeurs\_interpretation.sdw.

**CEMAGREF., 2012** – Guide pratique de l'irrigation. 3<sup>ème</sup> ED. 342p.

**Chambenoit C., Laurent F., Machet JM., Sceurer O., 2002** - Fertilisation azotée de la pomme de terre, guide pratique. Editions INRA, 128p.

**C.I.R.A.D., 2004** – Catalogue des analyses courantes. Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Copyright cirad) 28p.

**Delaunois A., Ferrie Y., Bouche M., Colin C et Rionde C., 2008** - Guide pour la description et l'évaluation de la fertilité des sols destiné aux agriculteurs et aux agronomes. Chambre d'agriculture Tarn. 37p.

**Dommergues Y ., Mangenot F., 1970:** Ecologie microbienne du sol. ED Masson, 796p.

**E.N.I.T.A.B , 2000** - Ecole nationale d'ingénieurs des travaux agricoles de Bordeaux, 2000 – Agronomie des bases aux nouvelles orientations. Synthèse agricole. Edition tec et doc 337p.

**Eswaran H., Ilaiwi M., Osman A., 1981** – Mineralogy and micromorphology of aridisols. Proc. 3ht. Int. Soil classification workshop. ACSAD, Damascus, pp 153 – 170.

**F.A.O., 1990** – Management of gypsiferous soils. Bulletin n°62, F.A.O Rome, 81p.

**FAO, 1996.** La qualité d'eau dans l'irrigation, Bulletin n°29 de l'Organisation Mondiale pour l'Alimentation et l'Agriculture.

**Gagnard J., Huguet C., Ryser J.P., 1988** - L'analyse du sol et du végétal dans la conduite de la fertilisation, le contrôle de la qualité des fruits, Secrétariat générale OILB/SROP, Edition - Diffusion ACTA., 87 P.

**Gray HB ., Haigh GP., 1985** - Principes de chimie. Edition française, 578p.

**G.E.P.P.A., 1981** – groupe d'étude de pédologie appliqué. Synthèse des travaux de la commission de cartographie (1970 – 1981). INRA – CESRPF. 20 p.

**Hazelton P et Murphy B, 2007** – Interpreting soil test results. What do all the numbers mean?. Department of Natural Resources, 152p.

**Herrero J., Porta J., 1990** – Micromorphology and genesis of soils enriched with gypsum. CIHEAM JAMZ (Zaragoza).

**I.T.A., 1977- Institut de technologie agricole., 1977** – Laboratoire du sol. Méthodes d'analyses physiques et chimiques du sol. 3 Ed. I.T.A. Mostaganem. 105p.

**LANO (laboratoire agronomique de Normandie)** – Calcaire total et calcaire actif. [http://www.lano.asso.fr/web/calcaire\\_actif.html](http://www.lano.asso.fr/web/calcaire_actif.html).

**Le première portail agronomique** -Le calcaire total et le calcaire actif ([https://wiki.aurea.eu/index.php/Le calcaire total et le calcaire actif](https://wiki.aurea.eu/index.php/Le_calcaire_total_et_le_calcaire_actif))

**Lexique - OvinAlp.** <http://www.ovinalp.fr/lexique/17>.

**Loz J et Mathieu C., 1990** - Dictionnaire de science du sol. 2<sup>ème</sup> édition. Lavoisier, 266 p.

**Mashali AM., 1996** – Soil management for gypsiferous soils. : A review. Proc. Int. Symposium on soils with gypsum. Lleida, Catalonia, Spain.

**Mathieu C, Pielain F., 1998** - Analyse physique des sols, méthodes choisies. Ed Tec et Doc Paris

**Mathieu C, Pielain F., 2003** - Analyse chimique des sols, méthodes choisies. Ed Tec et Doc Paris

**Monnier G et Stengel P., 1982** - Structure et état physique du sol, Ed. Techniques, Paris (coll. Techniques agricoles, Fasc. pp1140 et 1141).

**Nalovic LJ., E. Gavinuli E., Petard J.,** sans date- Les methodes d'analyses des sols et des eaux utilisees au laboratoire du centre d'adiopodoume. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer. Centre d'adiopodoumé- cote d'ivoire. 123p.

**Nicolardot B., Mary B., Houot S., Recous S., 1996** - La dynamique de l'azote dans les sols cultivés in Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes Reins (France), 10-20 novembre 1996. Edition INRA .Paris (les colloques, n° 83) pp 87-103.

**Pansu M., Gautheyrou J., 2006** - Handbook of Soil Analysis. Mineralogical Organic and Inorganic Methods. Berlin Springer France. 993p.

**Pauwels J.M., Van Ranst E., Verloo M., Mvondo ZE A., 1992** – Manuel de laboratoire de pédologie. Méthodes d'analyses de sols et plantes, équipement, gestion de stocks de verrerie et de produits chimiques. Publications agricoles -28. 265p.

**Rayan J., Estefan G., Rashid A., 2001** – Soil and plant analysis laboratory manual. Second Edition (ICARDA) Pakistan, Syria (NARC) Pakistan, 172p.

**Soltner D., 2005** – Les bases de la production végétale. Tome 1 : le sol et son amélioration. 24<sup>ème</sup> édition. 472p.

**SSC – ORSTOM- Bondy** - Méthodes d'analyses utilisées au laboratoire de physique des sols. 30p.

**Vigot M., 2012** - Le carbone organique des sols cultivés de Poitou-Charentes. Quantification et évolution des stocks. Etude méthodologique. Chambre d'agriculture Poitou – Charentes, 20p.