



**Manuel d'évaluation de la santé des sols**  
**Projet transversal sur les sols**  
**Communauté de pratique d'Afrique de l'Ouest**  
**Fondation McKnight**  
**Version 6.4, février 2020**

## **Manuel d'évaluation de la santé des sols**

Projet transversal sur les sols de la Fondation McKnight

Steven Vanek, *Colorado State University*, [stevanek4@gmail.com](mailto:stevanek4@gmail.com)

Steven Fonte, *Colorado State University*, [stevenfonte@gmail.com](mailto:stevenfonte@gmail.com)

Validation des méthodes : Blessing Magonziwa et Steven Vanek

Support d'édition pour la version française : Zobinou Mawusi, Isabelle Amsallem et John Abt

## **Table des matières**

### 1. Stratégies et principes d'échantillonnage des sols

1.1 [Aperçu de l'échantillonnage](#)

1.2 [Méthodes d'échantillonnage](#)

1.3 [Profondeur de l'échantillonnage](#)

1.4 [Combinaison de sous-échantillons représentatifs d'un parcelle](#)

1.5 [Préparation des échantillons de sol](#)

1.6 [Homogénéité des échantillons](#)

### 2. Matériel, matériaux et réactifs

2.1 [Équipement](#)

2.2 [Matériaux](#)

2.3 [Réactifs](#)

### 3. Méthodes d'analyse du sol

#### 3.1 Textures

3.1.1. [La méthode du toucher USDA](#)

3.1.2. [La méthode du toucher FAO](#)

3.1.3. [Visualisation du texture du sol par sédimentation](#)

3.2 [pH du sol](#)

3.3 [Stabilité des agrégats du sol](#)

#### 3.4 Matière organique

3.4.1. [Test/démonstration avec du peroxyde d'hydrogène](#)

3.4.2. [Matière organique particulaire \(MOP\)](#)

3.4.3. [Carbone du sol oxydable par permanganate \(POXC, « carbone actif »\)](#)

3.5 [Phosphore assimilable du sol \(méthode Olsen\)](#)

3.6 [Test de l'azote des sucres aminés pour déterminer l'azote du sol disponible](#)

3.7. [Évaluation de la macrofaune des sols](#)

## Bibliographie

## Annexes

[Annexe A : guide visuel et du toucher de l'humidité du sol](#)

[Annexe B : Clé simplifiée de la macrofaune](#)

## **Partie 1. Introduction et aperçu de l'échantillonnage et de la manipulation des sols**

Ce manuel vise à fournir des méthodes d'évaluation de la santé des sols dans les contextes des petits exploitants. Les méthodes présentées varient en complexité, mais l'idée est qu'elles peuvent toutes être réalisées par les agriculteurs eux-mêmes ou par les organisations qui travaillent avec eux au sein de réseaux de recherche et d'innovation. Il existe d'autres publications qui expliquent les concepts de la santé des sols et comment ces concepts se rapportent aux mesures présentées dans ce document. Dans ce manuel, nous nous concentrerons sur les aspects techniques des tests et sur quelques lignes directrices pour les interpréter. Les deux premières parties du manuel fournissent des indications sur l'échantillonnage des sols ainsi que sur les équipements et matériaux nécessaires pour effectuer les tests. Ensuite, chaque méthode d'évaluation du sol est décrite de façon détaillée dans la 3<sup>e</sup> partie de ce manuel.

**1.1 Aperçu de l'échantillonnage :** l'objectif de l'échantillonnage d'un sol est de représenter de façon précise une couche (ou des couches) de sol sur un site donné (p. ex. dans un champ) et de le préparer de façon adéquate pour les prochaines étapes de l'analyse. Pour les parcelles paysannes, nous nous intéressons généralement à la couche superficielle du sol où les racines des cultures sont les plus actives et nous avons affaire à des parcelles relativement petites. Ce guide présente des méthodes simples d'échantillonnage et d'analyse du sol, où le sol est séché à l'air et ne nécessite pas d'autre manipulation particulière. Pour d'autres analyses plus complexes qui ne figurent pas dans ce guide, comme les analyses des communautés microbiennes des sols, des types de nématodes ou de l'azote soluble du sol, une préparation spécifique et plus minutieuse des sols serait nécessaire ; celle-ci serait à définir via d'autres protocoles de mesure.

**1.2 Méthodes d'échantillonnage :** pour produire un échantillon qui soit représentatif d'un sol à différentes profondeurs, une sonde ou une tarière sont souvent utilisées, par exemple un tube aiguisé qui pénètre dans le sol et prélève un cylindre de terre (fig. 1). Il est également possible de remplacer cette sonde par une pelle, avec un couteau ou une machette, afin de découper une tranche à partir du bord du trou dans le sol. Cette tranche est ensuite taillée avec un couteau pour aboutir à une section carrée (fig. 1). Cette méthode d'échantillonnage utilisant une pelle est plus lente, mais tout autant rigoureuse qu'avec une sonde (qui peut coûter des centaines de dollars). Si la macrofaune du sol doit être évaluée (voir 3.7), des blocs de sol doivent alors produits et triés à la main afin de compléter l'évaluation. Ces blocs constituent ainsi une façon de collecter un échantillon. Si peu de blocs sont creusés ou si une plus grande couverture et représentation de la variabilité d'un sol est souhaitée, il peut alors être nécessaire de prélever des échantillons supplémentaires à l'aide d'une pelle pour compléter ces trois blocs (voir 1.4, nombre de sous-échantillons). La figure 3 présente les différentes façons d'échantillonner et de traiter des échantillons.



**Figure 1.** Deux méthodes pour un échantillonnage simple du sol. **À gauche** : sonde ou tube d'échantillonnage du sol ; **À droite** : Utilisation d'une pelle pour couper une tranche de sol, qui sera ensuite taillée en forme de colonne de section carrée égale.

**1.3 Profondeur de l'échantillonnage :** pour les parcelles agricoles, un échantillon est généralement prélevé à une profondeur de 15-20 cm, ce qui correspond à la couche de sol explorée par les racines des cultures. Cette profondeur de sol contient généralement la plupart des nutriments et une plus grande partie de leur cycle biologique via les microbes. Une fois la profondeur de l'échantillonnage choisie, il est important de ne pas la modifier lors d'une campagne d'échantillonnage ou lors d'un projet de recherche, car cela changerait les résultats sur le sol. Si l'on veut modéliser les processus dans le sol et les valider avec des données de terrain, il est conseillé de connaître la profondeur de référence pour le modèle de sol en question. À noter, la base de données pédologiques internationale et l'application cartographique de l'*International Soil Resources and Information Centre* (ISRIC) ([www.soilgrids.org](http://www.soilgrids.org)) prend en compte des profondeurs standardisées de 15 et 30 cm (et pas de 20 cm) de sorte que l'on pourrait choisir ces profondeurs dans de nombreux cas.

**1.4 Combinaison de sous-échantillons représentatifs d'un parcelle :** l'échantillonnage doit suffisamment représenter la variation d'un sol. Cinq à dix points d'échantillonnage sont généralement suffisants au sein de chaque parcelle, bien que, parfois, trois ou quatre seulement soient utilisés. Habituellement, ces points d'échantillonnage, ou sous-échantillons, sont combinés pour ne générer qu'un seul échantillon par parcelle. Une « parcelle » peut être un terrain, une expérience ou même une seule parcelle de traitement parmi d'autres (pour des essais de traitements par exemple). Cet échantillon permet de calculer la moyenne de la variabilité de la parcelle. S'il existe de grandes différences au sein d'une parcelle ayant une forte variabilité spatiale, plusieurs échantillons peuvent être prélevés afin de comprendre cette variation. Toutefois, utiliser différents échantillons engendre des travaux d'analyse supplémentaires ; si de nombreux terrains doivent être échantillonnés, cela ne serait pas pratique.

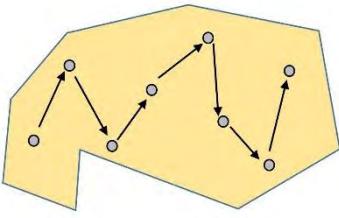
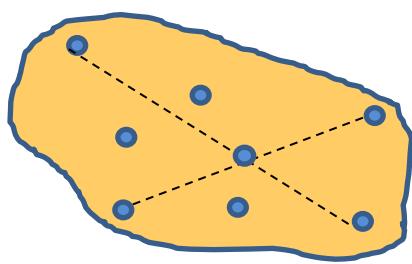


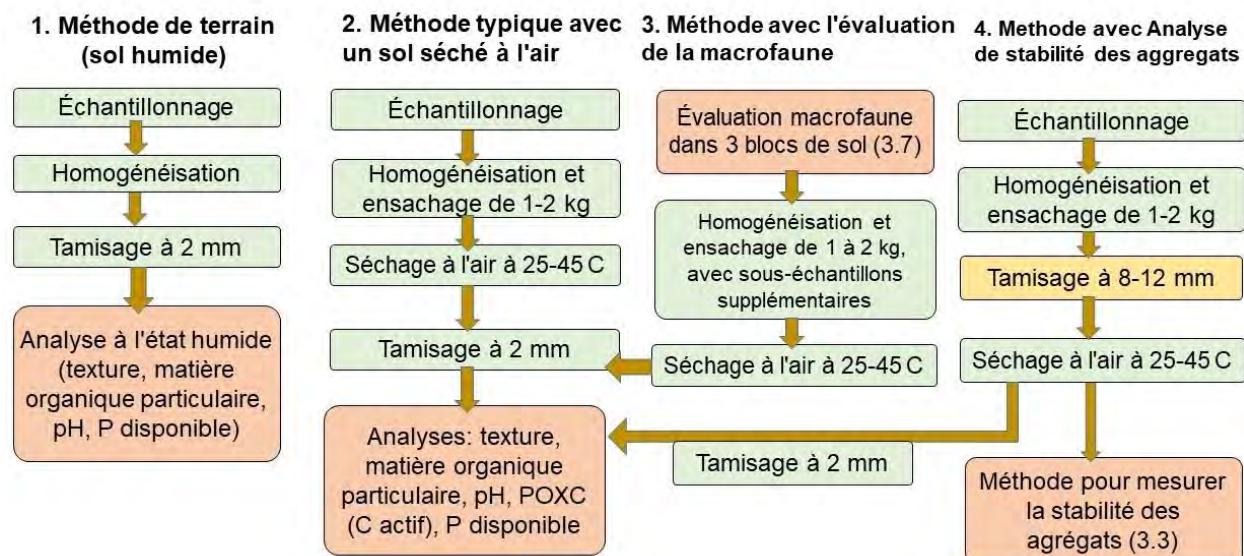
Figure 2. Schémas d'échantillonnage.

a. Une façon typique de prélever cinq à dix sous-échantillons sur une parcelle agricole, suivant un motif en zig-zag qui tente intentionnellement d'éviter les répartitions spatiales, telles que la récolte de plusieurs échantillons sur un même sillon ou en plein milieu de la parcelle.



b. Une autre méthode pour prélever des échantillons dans une petite parcelle consiste à échantillonner ses quatre coins, puis le milieu, de manière à former un X avec ces cinq sous-échantillons. Ensuite, trois ou quatre sous-échantillons supplémentaires sont prélevés au hasard pour compléter la couverture spatiale de la parcelle. Ce schéma permet de prendre en compte les nombreux « bords » et « coins » que les agriculteurs utilisent dans les petites parcelles.

**1.5 Préparation des échantillons de sol :** après l'échantillonnage, plusieurs étapes supplémentaires sont nécessaires pour que le sol puisse être stocké ou analysé. Ces étapes sont présentées dans la figure 3. Après l'homogénéisation des sous-échantillons sur le terrain (7 à 10 sous-échantillons par exemple), entre 1 et 2 kg sont généralement mis dans des sacs pour être ensuite séchés et analysés. Cette quantité permet de compenser les pertes dues au séchage et au tamisage et il y aura ainsi suffisamment de terre pour l'analyse. S'il existe des limitations spatiales ou liées au poids, il est nécessaire de prélever au moins 500 g de sol. En effet, à partir de ce minimum, le sol peut être directement tamisé et analysé, même dans un état partiellement humide (méthode 1 de la fig. 3). Plus généralement, cet échantillon est prélevé puis séché à l'air libre afin de le tamiser à une taille de 2 mm (méthode 2). Cette méthode typique peut également être combinée avec l'échantillonnage de la macrofaune (méthode 3). À noter, si des essais de stabilité des agrégats doivent être réalisés (voir méthode 3.3 plus loin), il est important de tamiser une partie de l'échantillon avec un tamis de taille plus importante afin de ne pas détruire les gros agrégats (par exemple avec un tamis de 8-12 mm, voir la méthode 4 de la figure 3 ainsi que la méthode 3.3 sur la stabilité des agrégats).



**Figure 3.** Différentes méthodes de traitement simple du sol selon les types d'analyse à réaliser :

**Méthode 1.** Certaines analyses peuvent être effectuées sur le terrain (ou dans le village voisin) le jour même de l'échantillonnage après tamisage et sans séchage à l'air.

**Méthode 2.** Plus typiquement, les échantillons de sol prélevés sur le terrain sont mis dans des sachets puis séchés à l'air pour être tamisés et analysés.

**Méthode 3.** Si la macrofaune est évaluée sur le terrain (méthode 3.8), l'échantillon prélevé pourra être séché à l'air, tamisé et analysé (des sous-échantillons supplémentaires devront être réalisés pour avoir au moins 5 sous-échantillons).

**Méthode 4.** Pour l'analyse de la stabilité des agrégats, au moins une partie de l'échantillon doit être tamisée à 8-12 mm de diamètre au lieu de 2 mm (voir méthode 3.3).

**Séchage à l'air des échantillons :** Alors que l'échantillon de sol prélevé est encore humide, il est préférable de le stocker dans un sac ouvert (papier ou plastique, de préférence papier jusqu'à ce que le sol soit sec) dans une zone ombragée à une température froide à moyenne (par exemple 5-15°C). Cela empêchera la condensation et l'accumulation du CO<sub>2</sub> qui pourraient fausser les résultats. Pour quasiment toutes les analyses, nous soulignons qu'il est **important de sécher les échantillons de sol à l'air dès que possible** (par exemple, dans des sacs en papier fermés ou dans des plats ou des bols sous couvercles). Sauf si nous souhaitons mesurer l'humidité du sol, ce dernier ne doit jamais être séché dans un four chaud (pas plus de 45 ou 50°C, par exemple). Si nous voulons mesurer l'humidité du sol, il est préférable de prendre des petites portions de l'échantillon total homogénéisé prélevé sur le terrain et de les sécher à 105°C, en les pesant avant et après séchage afin de déterminer la teneur en humidité (sur la base du changement de poids après séchage). Vous pouvez également consulter *l'annexe A* qui présente un guide visuel de l'humidité du sol, pour une mesure plus approximative de la teneur en eau du sol.

**1.6 Homogénéité des échantillons :** un principe important de la préparation d'un échantillon de sol est de bien le mélanger avant analyse, de sorte que le résultat obtenu soit le plus représentatif possible de l'échantillon prélevé sur le terrain ainsi que des propriétés moyennes

de la parcelle agricole À noter, cette méthode néglige les variations de terrain au niveau micro ; si nous nous intéressons à ce niveau micro, il est alors nécessaire d'échantillonner différemment. Dans tous les cas, définir une valeur moyenne pour un terrain constitue un point de départ pratique ; nous partons de ce principe dans ce manuel. Le tamisage élimine également ce qui n'est pas inclus dans les composantes d'un sol, comme les grandes racines ou la macrofaune, et qui peut biaiser les résultats. Le tamisage homogénéise le sol en fracturant et mélangeant les petites graines, et en créant une masse homogène qui garantit la représentativité des sous-échantillons ou des analyses.

## **Partie 2. Équipement, matériel et réactifs**

Cette partie décrit les équipements, matériaux et réactifs utilisés dans les méthodes d'analyse des sols présentées ci-dessous. Dans la mesure du possible, nous indiquons des sites Internet de vente de ces articles. Il existe d'autres vendeurs et d'autres modèles d'articles que ceux décrits ici et vous devriez être en mesure de trouver des substituts acceptables.

### **2.1 Équipement**

#### **2.1.1 pH-mètre de terrain, pH-mètre EXStik « ExTech »**



Il s'agit d'un appareil de lecture directe, avec une électrode à surface plane pour les mesures de pH des liquides et des boues tels ceux utilisés pour la méthode pH.

Vous pouvez rechercher un tel pH-mètre en tapant « EXTECH pH110 » ou « EXTECH pH100 » sur Internet ou encore sur le site suivant : [www.testequipmentdepot.com](http://www.testequipmentdepot.com).

Il existe des pH-mètres portables similaires à celui-ci-dessus pour des prix variant de 70 USD et 150 USD. Trois types sont présentés ci-dessous, trouvés sur différents sites et provenant de divers pays. Chacun devrait lire les critiques pour évaluer si ces pH-mètres sont faciles et précis dans leur étalonnage. Nous avons obtenu des résultats relativement bons et cohérents avec le modèle ExTech.



Apera Instruments AI311 PH60  
(Amazon.com, site américain)



Hanna PHeP+ meter, HI-98108, Hanna Instruments,  
magasin en ligne UK



Zerodis "3 en 1 testeur"  
(Amazon.fr, site français)

#### **2.1.3 colorimètre portable, « Hanna Checker » pour phosphate de gamme haute**

Il s'agit d'un modèle a terrain et est le même colorimètre pour le test du sol disponible P (méthode Olsen) et le test pour le carbone du sol actif (carbone oxydable par KMnO<sub>4</sub>, ou POXC). Le numéro de modèle de Hanna instruments est HI-717:

<http://hannainst.com/hi717-phosphate-hr.html>



**2.2 Matériaux** (d'autres articles standards de laboratoire ou domestiques peuvent également être nécessaires, comme des cuillères, des entonnoirs, etc., voir selon chaque test).

**2.2.1 Papier pH** : Il s'agit d'une bonne alternative pour évaluer le pH. Cependant, les coûts du papier et ceux d'un pH-mètre peuvent être similaires au fil du temps. Nous avons également rencontré des problèmes pour obtenir des résultats avec du papier pH qui soient alignés avec ceux mesurés à l'aide d'un pH-mètre (voir la méthode pH, 3.2).

**2.2.2 Cuvettes supplémentaires pour utiliser le colorimètre** (flacons de 11 ml, diamètre de 0,75 pouce ou 19 mm). Il est commode d'avoir 10 à 30 cuvettes environ par kit, voire plus, afin de réaliser de plus grands groupes de tests. Celles-ci sont vendues par *Hanna Instruments* qui fabrique également les colorimètres :

<https://hannainst.com/hi731315-glass-cuvettes-and-caps-for-checker-hc-colorimeters.html>

Elles sont moins chères sur le site américain de *Discount Vials* avec le numéro de catalogue CT15196525-C-F217-N (ainsi que les bouchons de fermeture en téflon pour l'utilisation avec les solutions de test) ou chez d'autres fournisseurs :

<https://www.discountvials.com/3-dram-glass-vial-w-cap-pkg-of-25>

Un lot de 144 cuvettes est également disponible.

**2.2.3 Papier filtre** : pour les sols faiblement argileux, des filtres à café coniques fins peuvent suffire pour filtrer les extraits de sol (fig. 4). Cependant, ils peuvent s'obstruer avec les sols riches en argile. Dans ce cas, des filtres de laboratoire sont nécessaires tels que les filtres Whatman de grade 5 ayant une taille des pores fine (2,5 microns) et un débit suffisant pour qu'ils s'obstruent pas lors du filtrage. COLE-PARMER fournit de tels filtres :

<https://www.coleparmer.com/i/Whatman-1005-090-qualitative-Filter-Papers-9-0-cm-dia-pore-Size-2-5-100-Box/0664822>

Une boîte de 100 filtres circulaires, de diamètre 9 cm, coûte approximativement 20 USD (numéro 1005-090 dans le catalogue de Whatman). Ces filtres de 9 cm de diamètre peuvent être également découpés en cercles plus petits (par exemple de 2,7 cm de diamètre, fig. 4) afin de filtrer des suspensions de sol avec une bouteille en plastique (voir la partie 3.5). De cette façon, quatre échantillons peuvent être filtrés par grand filtre, soit 400 échantillons filtrés par boîte de 100 filtres.



**Fig. 4. Gauche :** filtres à café coniques. **Droite :** filtres de qualité laboratoire, type Whatman #5 avec des pores de 2,5 microns. Des cercles de 3 cm de diamètre environ peuvent être découpés pour filtrer les sols.

#### 2.2.4 Tamis : tamisage général des sols, test de stabilité des agrégats et test de la matière organique particulaire (MOP)

- 1) **Tamis de 2 mm (2 000 microns)** : ce type de tamis est fondamental pour analyser les sols puisque cette dimension de 2 mm est un seuil pour la définition des sols. Par conséquent, il est souhaitable d'investir dans un tamis métallique de haute qualité (laiton ou acier inoxydable, 15 ou 20 cm de diamètre). Il existe aussi des tamis en plastique bon marché, avec des mailles en acier inoxydable et qui fonctionnent bien comme décrit ci-dessous :
  - a) **Tamis tout métal, mailles de 2 mm ou # 10** : il existe de nombreuses vendeurs de tels tamis. Vous pourrez peut-être les trouver sur les sites internet suivants :
    - [www.zoro.com](http://www.zoro.com), numéro de produit G3842894, environ 60 USD
    - [www.forestrysuppliers.com](http://www.forestrysuppliers.com), numéro de stock 53301, environ 60 USD
    - [www.retsch.com](http://www.retsch.com), fournisseur européen de tamis et d'équipements de tests : [www.retsch.com/products/sieving/test-sieves/](http://www.retsch.com/products/sieving/test-sieves/)
    - [www.amazon.com](http://www.amazon.com), [www.amazon.co.uk](http://www.amazon.co.uk), [www.alibaba.com](http://www.alibaba.com) et autres grands sites de vente au détail ; on y trouve divers tamis vendus de 20 USD à 70 USD, mais assurez-vous que le tamis acheté soit assez robuste pour répondre à vos attentes ; vous pouvez utiliser le mot clé « tamis de test de 2 mm » pour vos recherches.
  - b) **Tamis bon marché de 2 mm avec des mailles en inox** (fig. 5) : ce tamis peut être trouvé sur le site [www.forestry-suppliers.com](http://www.forestry-suppliers.com) (numéro de produit 53935) au prix de 9 USD. Ce tamis fonctionne bien surtout s'il est principalement utilisé pour le tamisage humide sans utilisation intensive : [www.forestry-suppliers.com/product\\_pages/ViewItem.php?item=53935](http://www.forestry-suppliers.com/product_pages/ViewItem.php?item=53935)
  - c) **Tamis de 2 mm fait maison** : Un tamis peut être fabriqué avec un tuyau ou le fond d'un seau. Le matériel nécessaire pour réaliser un tamis, tels que des mailles métalliques ou des plaques avec des trous d'une taille particulière, peut parfois être trouvé dans les points de vente des matériaux pour l'exploitation minière ou encore dans de plus

grandes magasins et quincailleries, bien que cela puisse coûter plus cher que d'acheter un tamis.



**Figure 5. Gauche :** tamis en plastique bon marché, taille de maille 2 mm.

**Droite :** tamis de maille 250 µm (micron), fait maison à l'aide d'une maille #60 utilisée pour la sérigraphie et un tube en plastique de grand diamètre. Les graduations sont en cm, les petites marques de graduation sont des millimètres.

- 2) **Tamis 250 µm (0,25 mm)** : il est possible d'acheter ce type de tamis ou de le fabriquer soit même comme décrit ci-dessous :

A. Un tamis 0,25mm peut être acheté sur Internet. Par exemple des tamis #60 (250 microns) sont disponibles sur les sites de « Forestry Suppliers » ou des autres fournisseurs cités auparavant pour les tamis de 2 mm. Par exemple, ce type de tamis se trouve avec le numéro d'article 53650 sur [www.forestry-suppliers.com](http://www.forestry-suppliers.com).



**Figure 6.** Fabrication d'un tamis de 250 microns avec la partie supérieure d'un seau de peinture de 5 litres et son couvercle amovible. La maille (utilisée pour la sérigraphie) de 250 microns est prise en sandwich entre le bord supérieur du seau et le couvercle. Lorsque le couvercle est enclenché, la maille est tendue et fournit ainsi une surface de tamisage très efficace.

B. Un tamis de 250 microns peut également être fabriqué avec le fond d'une cuve en plastique ou d'un seau de diamètre de 15 à 20 cm (fig. 5). Un autre moyen de fabriquer facilement un tel tamis consiste à couper la partie supérieure d'un pot de peinture de taille moyenne avec un couvercle amovible solide et de fixer la maille sous le couvercle pour créer la surface de tamisage (fig. 6 ci-dessus). Cette maille est vendue pour l'industrie de la sérigraphie ; le numéro de cette maille est 60 aux États-Unis et 24 ou 24T (soit 24 fils par cm) dans les systèmes britanniques et européens. Une telle maille peut parfois être trouvée dans les entreprises de sérigraphie sur tissu de grandes villes, ou chez les fournisseurs des

industries de la sérigraphie. Aux États-Unis, cette maille peut également être commandée à : *Holden Screen Supply Corp.*, New York City, NY, USA :

<http://www.standardscreen.com/mesh.aspx>, et coûte environ 15 USD pour 1 mx 150 cm, à partir de laquelle de nombreux tamis peuvent être fabriqués. Au Royaume-Uni, il existe deux fournisseurs : *Screen-stretch* à <http://www.screenstretch.co.uk/> et *Screen Color Systems* à [www.screencoloursystems.co.uk/](http://www.screencoloursystems.co.uk/).

### 2.3. Réactifs

Trouver des réactifs chimiques constitue un défi important dans de nombreuses régions. Commencer à identifier à l'avance les fournisseurs potentiels dans les grandes villes est important. Les principaux produits chimiques nécessaires pour réaliser les tests du phosphore (P) et du carbone (C) actif sont décrits dans cette partie.

**2.3.1 Tampons pH pour l'étalonnage d'un pH-mètre**, avec des pH de 4 et pH 7 (parfois des pH 4,01 et 7,01 sont vendus et qui sont équivalents). Les tampons pH sont habituellement trouvés chez les fournisseurs de laboratoires.

**2.3.2 Pour le test du carbone oxydable au permanganate (POXC ou « Carbone actif » ; partie 3.4) :**

- a. Permanganate de potassium ( $KMnO_4$ ) : seulement 64 mg sont nécessaires par test, soit 20 g pour 300 tests. Si besoin, un petit récipient en plastique peut servir à transporter du  $KMnO_4$ . Dans les Andes, le  $KMnO_4$  est considéré comme un constituant précurseur pour la fabrication de drogues illégales, mais il peut être trouvé en petites quantités chez les fournisseurs de laboratoires.
- b. Chlorure de calcium ( $CaCl_2$ , le chlorure de magnésium peut aussi être accepté) : le chlorure de calcium est utilisé en plus grande quantité pour réaliser le test POXC : 300 mg (0,3 g) par test, de sorte qu'il est préférable de s'approvisionner en  $CaCl_2$  localement. Dans ce test, l'ion  $Ca^{++}$  issu du chlorure de calcium sert de floculant pour les argiles et les aide ainsi à se déposer. Les ions  $Mg^{++}$  issus de  $MgCl_2$  peuvent aussi faire floculer les argiles, moins efficacement toutefois, de sorte que le chlorure de magnésium peut fonctionner. Environ 90 g de  $CaCl_2$  sont nécessaires pour 300 tests.
- d. **Acide citrique** (ou tout simplement le jus de citron) : il permet de nettoyer les récipients qui ont été utilisés pour le test avec du  $KMnO_4$ . En effet, les récipients deviendraient sinon teintés avec le temps à cause du permanganate. L'acide citrique n'est pas vraiment un réactif, de sorte que sa pureté peut être assez faible ; le jus de citron fonctionne aussi.

**2.3.3 Pour le test du phosphore (P) disponible (Olsen P ; partie 3.5)**

1. **Bicarbonate de sodium ( $NaHCO_3$ )** : le bicarbonate de soude provenant d'un supermarché peut bien fonctionner. Si ce bicarbonate de soude commun est utilisé, il devra être testé afin de connaître sa teneur en P (impuretés), par une analyse de la solution de bicarbonate de Olsen sans la faire réagir avec le sol et en utilisant le test décrit en 3.5. Si du bicarbonate de sodium de qualité « réactif » ou analytique est disponible chez un fournisseur de laboratoires, c'est aussi une excellente option. 1,05 grammes sont utilisés pour chaque analyse de sol (soit 42 g pour chaque litre de solution d'analyse Olsen nécessaire pour tester 40 échantillons). Un kit pour 300

échantillons nécessite donc environ 350 grammes de  $\text{NaHCO}_3$ , en arrondissant un peu pour couvrir les blancs et les tests de méthode qui peuvent aussi nécessiter du réactif.

2. **Hydroxyde de sodium ( $\text{NaOH}$ )**. La lessive commune trouvée en quincaillerie peut habituellement être employée. En effet, ses impuretés ne sont pas très importantes puisque ce réactif est utilisé en petites quantités pour ajuster le pH de la solution d'Olsen à 8,5. Ce réactif est couramment vendu par les fournisseurs de laboratoires. Entre 1 et 2 g par litre de solution sont utilisés, soit environ 10 grammes pour un kit de tests de 300 échantillons de sol.
3. **Bisulfate de sodium ou hydrogénosulfate de sodium ( $\text{NaHSO}_4$ ) ou acide de batterie ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )**. Le bisulfate de sodium est beaucoup plus sûr et plus facile à doser que l'acide sulfurique ou l'acide chlorhydrique. Il est très bon marché et il est vendu comme produit d'entretien des piscines aux États-Unis. Il peut donc être acheté comme produit d'entretien des piscines ou chez les fournisseurs de laboratoires dans des capitales comme Nairobi en Afrique par exemple. Chaque test utilise 450 mg de  $\text{NaHSO}_4$  (0,45 g, soit 150 g pour 300 tests) ; il peut donc être importé, mais peut aussi être recherché localement. L'acide sulfurique, acheté comme acide de batterie et dilué de moitié pour des raisons de sécurité, est également une alternative ; il peut être plus facilement trouvé dans de nombreux endroits (voir les instructions ci-dessous pour cette substitution dans la partie 3.5).
4. **Packs de réactifs pour l'analyse de P dans les solutions aqueuses** : voir, par exemple, le pack de réactifs sur le site internet de *Hanna Instruments* :  
<http://hannainst.com/hi93713-03-phosphate-low-range-reagents-300-tests.html>. À noter, il s'agit d'un pack de réactifs de « gamme basse », mais le colorimètre que nous utilisons est de « gamme haute » ; c'est intentionnel. Un pack de réactifs est utilisé par test. Au Royaume-Uni, en France et au Kenya, seul le pack de 100 réactifs est disponible chez les fournisseurs.

**2.3.4 Alcool (éthanol ou propènol)**. Il peut être utile pour l'évaluation de la macrofaune du sol (partie 3.7) au cas où il faille conserver les insectes ou les vers de terre pour une identification en laboratoire (plutôt que de faire une classification approximative et un comptage sur le terrain). L'alcool peut également être utile pour nettoyer les flacons du colorimètre qui ont été utilisés pour analyser le phosphore et le carbone actif. L'alcool peut généralement être acheté dans n'importe quelle pharmacie.

**2.3.5 Peroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )** : il s'agit du type normal de peroxyde (~3 %  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) qui est vendu en pharmacie, et qui est utilisé pour le test qualitatif simple / de démonstration de la matière organique décrit dans la partie 3.4.1.

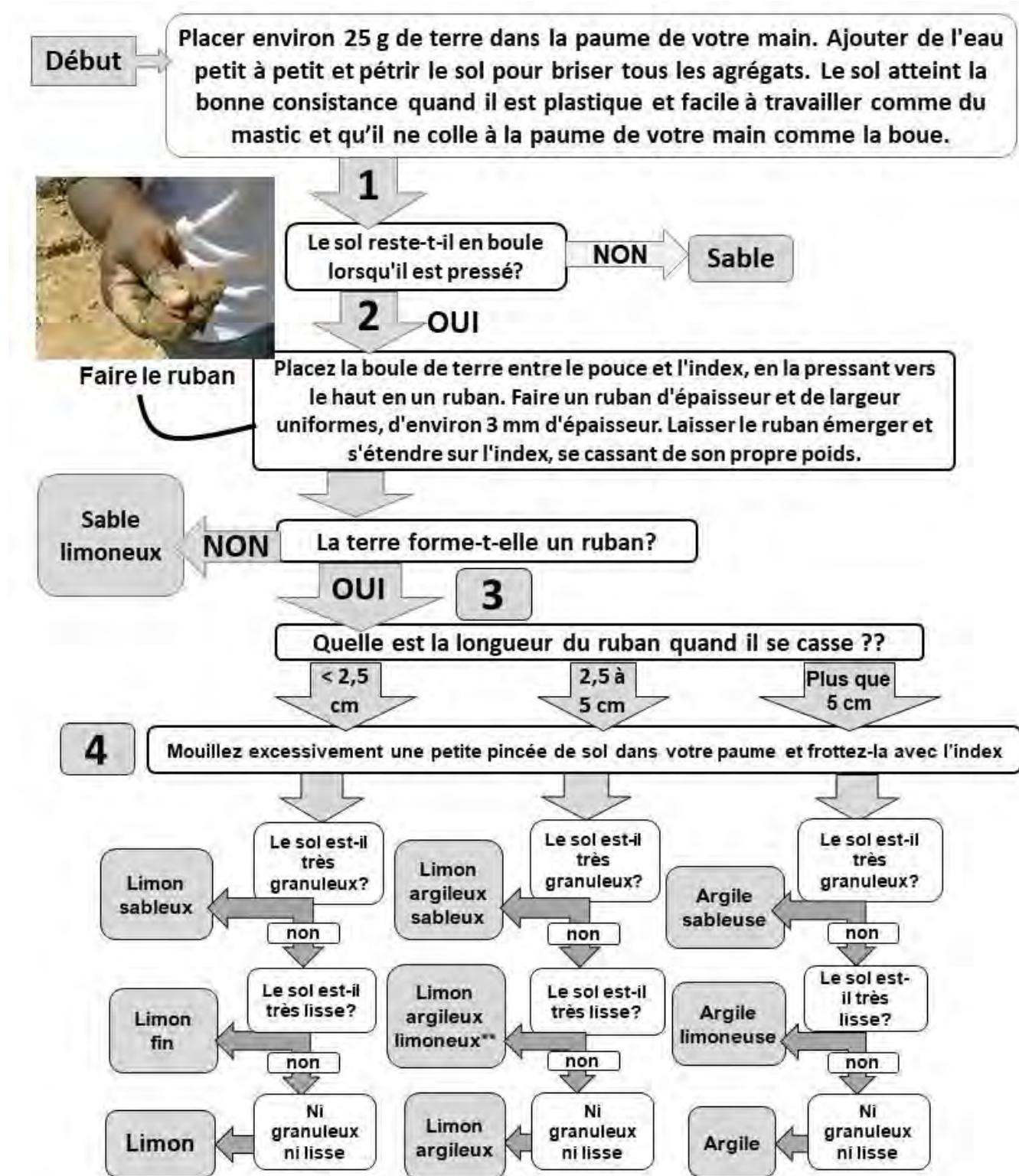
## **Partie 3 : méthodes d'analyse des sols**

**3.1 Texture du sol :** proportions de sable, de limon et d'argile dans le sol. Les sols riches en argile ont une « texture fine » et peuvent avoir des problèmes de compactage et de drainage. Cependant, grâce à une bonne gestion, les sols argileux peuvent stocker de grandes quantités de matière organique et avoir une bonne capacité de rétention en eau. Les sols sableux ont un bon drainage, mais ils sont vulnérables à la sécheresse et ont une faible teneur en matière organique. Entre ces deux extrêmes se trouvent les sols limoneux qui tendent à combiner les bonnes propriétés à la fois de des sols argileux et sableux (voir fig. 7).

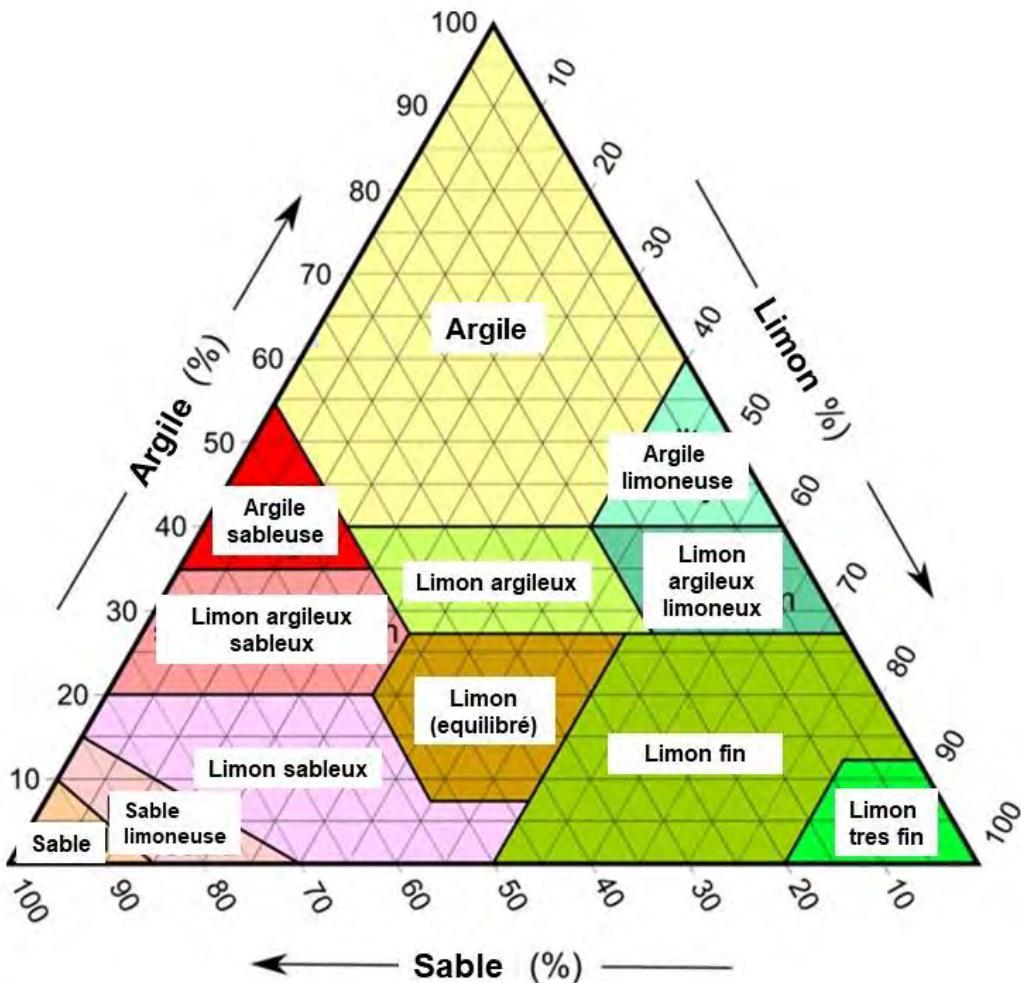
**3.1.1. La méthode du toucher USDA :** cette méthode a été élaborée par le Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA) ; voir la méthode alternative similaire ci-dessous en 3.1.2, développée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Celle-ci est assez rapide et pratique ; elle estime, avec une précision de +/- 5 % à 10 %, les proportions de sable, de limon et d'argile contenues dans un sol. Cette méthode consiste en plusieurs étapes décrites ci-dessous (voir aussi la fig. 6 à la page suivante) :

1. Il est préférable d'utiliser un sol tamisé (2 mm) ou d'enlever les pierres que vous sentez dans la boule de sol humide quand vous commencez à la pétrir. Formez une boule de sol humide en ajoutant de l'eau jusqu'à ce qu'elle ait une consistance de mastic. Pour humidifier facilement, vous pouvez utiliser une petite bouteille d'eau ou une pissette. Il est important d'être patient afin de former une masse uniforme sans pierres, qui soit plastique et qui ne colle pas trop à votre main. Si l'humidité du sol est suffisante et qu'une boule ne peut toujours pas être formée, le sol est alors classé comme « sable » (fig. 6).
2. Après s'être assuré que la boule est assez humide, essayez de former un « ruban » de sol humide entre le pouce et l'index, et drapez-le sur l'index (fig. 6). La longueur du ruban qui peut être atteinte avant qu'il ne se casse sous son propre poids permet de distinguer les sols limoneux, les sols limon-argileux et les sols argileux (fig. 6, voir les trois « colonnes » de possibilités à l'étape 4). Faites attention à l'humidité du sol, puisque si celui-ci est trop sec, il cassera seulement par manque d'eau ; si celui-ci est trop humide, il collera sur la main au lieu d'être modelé en ruban. Cette étape est importante afin de produire des résultats cohérents.
3. Enfin, prenez une pincée du sol de la boule et mouillez-la afin d'évaluer les proportions de sable *versus* limon du sol (étape 5 de la fig. 6). Ces proportions peuvent être utilisées pour compléter par les adjectifs « sableux » ou « limoneux » la description des principaux types de sols de l'étape précédente (limoneux, limon-argileux et argileux, fig. 6 et 7). Cette étape est celle qui nécessite le plus de pratique pour avoir une estimation correcte, en particulier en ce qui concerne l'adjectif « limoneux » car il peut être difficile de distinguer entre les doigts la sensation due aux argiles de celle due aux limons.
4. Il est ensuite possible d'estimer approximativement le pourcentage de sable, de limon et d'argile. Pour cela, il faut faire correspondre le type de texture défini avec cette procédure avec le triangle textural (fig. 7) qui indiquera alors la fourchette de pourcentages pour ce type. Par exemple, si le sol est évalué comme étant limon-argileux, les proportions seraient, selon le triangle textural, de 35 % de sable, 30 % de limon et 35 % d'argile. Pour les types limites (selon la façon dont le sol est ressenti par le toucher ou selon la longueur du ruban), vous pouvez placer les pourcentages à la frontière des deux types.

Figure 6 : diagramme de procédé pour évaluer les classes de texture du sol par la méthode du toucher de l'USDA



\*\* on parle aussi de limon argileux fin



**Figure 7.** Diagramme triangulaire de la texture des sols (triangle textural du sol). Les différentes zones du diagramme sont les types de texture des sols en fonction de leurs pourcentages de sable, de limon et d'argile. Faites attention aux graduations de chacun des 3 axes ainsi qu'à leur orientation (horizontale et en diagonale) ; l'ensemble de ces lignes permet de déterminer la proportion de chacun des trois composants (argile, limon, sable).

**3.1.2. Méthode de toucher de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) :** cette méthode complète celle du toucher développée par l'USDA et décrite dans la partie 3.1.1 ci-dessus. Elle peut être utilisée pour confirmer vos résultats ou bien comme méthode alternative. L'avantage de cette méthode est que ses étapes sont faciles à conceptualiser (fig. 8 ci-dessous) et elle est souvent préférée par ceux qui sont moins expérimentés. Cependant, celle-ci ne catégorise pas les sols dans tous les types inclus dans le triangle textural (fig. 7). Une double vérification avec la méthode USDA est utile pour déterminer plus finement ces gradations de texture.

#### 3.1.2.1. Procédure :

1. Comme pour la méthode de l'USDA, commencer par former une boule de diamètre de 3 cm environ, avec du sol et de l'eau pour avoir une consistance de mastic, sans pierres

qui pourraient interférer avec le test (en utilisant un tamis de 2 mm). La pâte obtenue doit juste avoir la quantité d'eau pour être modelée sans trop coller à la main. Il faudra pétrir avec patience pour mélanger le sol sec et l'eau afin d'obtenir la bonne consistance. Malgré cela, si la boule ne se forme toujours pas, alors c'est du « sable » (fig. 8).

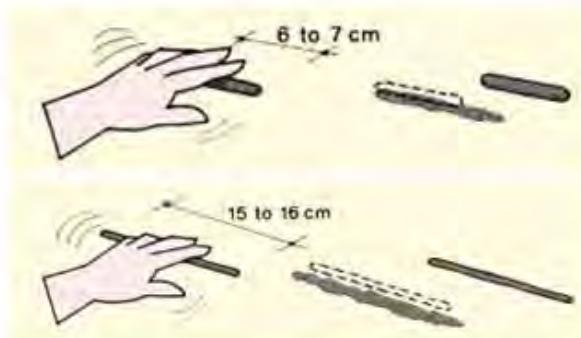
2. Si une boule est formée, roulez-la et donnez-lui la forme d'une saucisse de 6 à 7 cm de long. Si « la saucisse » ne garde pas cette forme, c'est un « sable limoneux ».
3. Si une saucisse de 6-7 cm peut être formée, continuez de la rouler jusqu'à ce qu'elle devienne un « crayon » de 15 à 16 cm. Si elle ne garde pas cette forme, c'est un « limon sableux ».
4. Si le crayon peut être formé, essayez de le courber en demi-cercle. Si celui-ci ne peut pas être formé ou se casse, le sol est un simple « limon ».
5. Si le demi-cercle peut être formé sans se casser, continuez à recourber le « crayon » pour former un cercle complet de diamètre approximatif 5 cm.
6. Si cet anneau ne peut pas être formé sans se casser, le sol peut être classé comme un « limon fin » ou « limon très fin ».
7. Si vous y parvenez et que l'anneau se fissure, le sol peut appartenir à un certain nombre de types à tendance argileuse, mais sans avoir toutefois assez d'argile pour être formellement classé comme « argileux », il s'agit des types « limon argileux », « argile limoneuse » ou « argile sableuse ». Ce sont tous les types qui entourent le type « argile » dans le triangle textural (fig. 7), ainsi que le type « limon argilo-sableux ». En réalisant le toucher d'une pincée de sol humide comme dans l'étape 5 de la méthode du toucher de l'USDA (fig. 6), ces types peuvent également être différenciés.
8. Si vous y parvenez, que l'anneau se fissure légèrement et qu'il ressemble plutôt à de l'argile de potier plutôt qu'à un sol, il est probable que c'est de l'argile.



1. Mouiller et pétrir le sol, enlever les petites pierres



2. Pouvez-vous former une balle?



3. Pouvez-vous former une "saucisse"?

4. . Pouvez-vous former un "crayon"?



5. Le crayon peut-il être transformé en **demi-cercle**?



6. Le demi-cercle peut-il être plié davantage en **cercle**?

**Figure 8.** Séquence de tests effectués sur une boule de sol humidifiée, utilisée pour déterminer la texture de sols dans la « méthode du toucher » de la FAO. Crédit image et source originale : [http://www.fao.org/fishery/static/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706e/x6706e06.htm](http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706e/x6706e06.htm)

### 3.1.3. Visualisation des tailles des fractions par sédimentation dans des bouteilles ou des bocaux :

contrairement à la méthode du toucher ci-dessus, celle-ci n'est pas vraiment un test rigoureux pour déterminer la texture d'un sol, mais elle permet aux agriculteurs entre autres de mieux visualiser les différentes tailles des sables, limons et des particules d'argile en observant leurs temps de sédimentation dans une colonne d'eau. Le sable (taille 50 microns - 2 mm) s'installe au fond du récipient en premier en 40-60 secondes. Les particules de limon (2 microns-50 microns) se déposent ensuite en 12 heures environ, et l'argile prend plus de temps à s'installer. Cependant, ces durées ne sont valables que

pour des suspensions de sol complètement dispersées, ce qui est difficile à obtenir juste en secouant un bocal, même à l'aide d'un mélangeur pendant plusieurs minutes. Une dispersion chimique des argiles est donc nécessaire, mais la durée de décantation des argiles peut atteindre plusieurs jours, ce qui rend le test un peu moins pratique. Ainsi, les argiles sont agrégées en particules de plus grande taille dans la plupart des sols de sorte que ces grosses particules se déposent comme si elles étaient du limon ou du sable, conduisant à une sous-estimation de la fraction argileuse. Pour cette raison, cette méthode est pertinente pour enseigner les différentes tailles des particules d'un sol, mais elle doit être combinée avec les autres méthodes tactiles ci-dessus qui peuvent estimer plus précisément les proportions de sable, limon, et d'argile.

### **3.1.3.1. Matériaux**

- 1. Bouteille ou bocal (verre ou plastique)**
- 2. Petit cylindre gradué ou appareil de mesure des liquides précis à 10 ml près (une balance peut également être utilisée pour mesurer 10 ml, soit 10 grammes, incrément).**
- 3. 100 à 200 ml de sol approximativement, selon la taille du bocal ou de la bouteille.**

### **3.1.3.2. PROCEDURE**

- 1. Graduer un bocal ou une bouteille pour mesurer le volume, en le(la) marquant tous les 10 ml. Une bouteille ou un bocal plus fin(e) fournira plus de précisions pour évaluer les pourcentages des fractions lorsqu'elles s'installent dans la colonne d'eau. Tamiser le sol à 2 mm.**
- 2. Ajouter le sol dans le bocal, puis 2 à 3 fois son volume d'eau. Mélanger bien le sol et l'eau en secouant ou en mélangeant énergiquement, pour essayer de casser complètement les agrégats (en pratique, il est très difficile de détruire complètement les micro-agrégats sans dispersant chimique, comme le métaphosphate de sodium, ce qui est l'une des raisons pour lesquelles ce test sous-estime presque toujours le pourcentage d'argile dans le sol et surestime le pourcentage de limon).**
- 3. Laisser le sol se décanter entre 4 et 24 heures. Différentes couches s'installent, d'abord le sable, puis le limon, et enfin les argiles, à partir de la partie trouble de la suspension. Enfin, le surnageant ou la partie supérieure de la suspension de sol deviendra transparent ou translucide.**
- 4. Identifier visuellement les différentes couches, quand cela est possible, depuis les plus grandes, les particules de sable visibles, le limon qui s'est déposé plus tôt, et l'argile fine qui s'est installée en dernier. Il peut être difficile de distinguer le limon de l'argile dans cette méthode. À ce stade, l'objectif de ce test est plus de discuter sur les différentes fractions plutôt que de les estimer avec précision, sinon nous suggérons il faut utiliser le test du toucher.**
- 5. Les fractions de sable, de limon et d'argile sont estimées selon l'épaisseur des couches. Cependant, en raison du manque de précision de la détermination de l'argile et du limon avec cette méthode, à ce stade, il serait surtout utile de comparer les proportions entre deux sols différents, plutôt que de définir des pourcentages absolus d'argile et de limon qui permettraient de définir un type de texture à partir du triangle textural.**

## 3.2 pH du sol

### 3.2.1 Matériaux et réactifs

1. **Un pH-mètre portatif** pour le type de champ, type stylo ou semblable, avec l'électrode placée dans sa solution de stockage si nécessaire (voir la section équipement, 2.1.1).
2. **Tampons ou solutions d'étalonnage** pour le pH-mètre. L'étalonnage doit être effectué avec des tampons pH 7 et pH 4, ce qui donne des informations sur la gamme de pH la plus importante pour les sols.
3. **Une autre alternative** : Bandelettes de papier pH avec une précision d'au moins une unité de pH, et mieux si elle peut indiquer le pH avec des gradations de 0,5 unités de pH. Dans tous les cas, le papier pH tend à être moins précis qu'un pH-mètre étalonné.
4. **Petites tasses ou récipients en plastique** pour entre 50 et 100 ml.
5. **Une balance** (1 g ou 0,1 g de précision) pour peser les sols et l'eau.
6. **De l'eau distillée**, ou de l'eau embouteillée testée pour l'impact sur la mesure du pH. Afin de ne pas interférer avec la mesure du pH, il convient d'utiliser de l'eau dont la teneur en minéraux est nulle ou faible, c'est-à-dire avec une teneur minérale telle que le calcium ou le magnésium au-dessous de 50 ppm (mg/kg) ou même mieux, moins de 10 ppm. La quantité totale des solides dissous (TDS) peut être vérifiée sur l'étiquette de l'eau. Dans certains pays, l'eau d'osmose inverse est vendue comme eau embouteillée et cette eau fonctionne bien. L'eau de pluie peut également être recueillie dans un récipient propre (verre ou plastique) et utilisée. Si nécessaire, les valeurs peuvent être validées dans environ 4 ou 5 sols, en utilisant une eau « candidate », par rapport à l'eau distillée connue, afin de vérifier si l'utilisation de l'eau embouteillée produit une différence pour la valeur du pH. Les petites différences de ~0,1 unité de pH ne sont pas un problème.

### 3.2.2. Procédure :

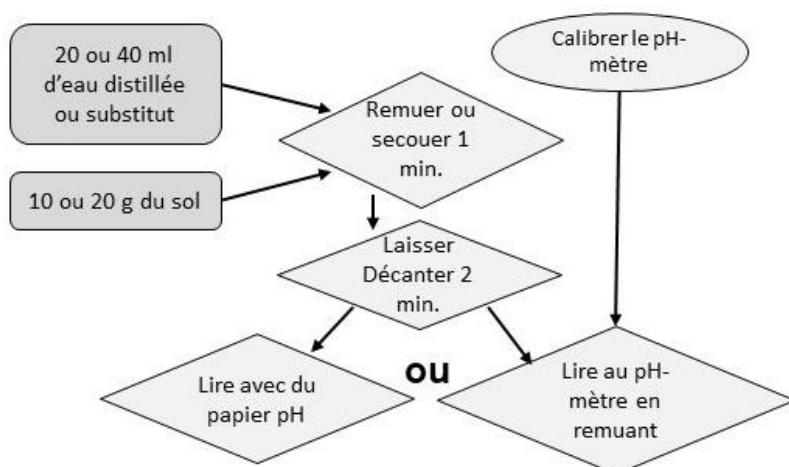


Figure 9. Schéma pour la mesure du pH du sol avec du papier pH ou un pH-mètre portatif

- 1. Pesar 20 +/-0,5 g** de sol dans un petit verre (ou seulement 10g si vous voulez économiser sur l'utilisation de l'échantillon de sol). S'il n'y a pas de balance, on peut aussi estimer qu'un volume de 14 à 16 ml de sol pèse environ 20 g, ou une autre mesure de volume peut être utilisée en fonction d'une densité approximative qui peut être connue pour les sols dans la zone où l'échantillonnage a été effectué. Cet ajustement de la méthode fonctionne parce que la mesure du pH du sol est moins sensible au rapport sol : eau que les autres mesures chimiques du sol. Dans tous les cas, quand une balance est disponible, il est préférable d'utiliser le poids indiqué et non le volume.
- 2. Ajouter 40 ml d'eau distillée**, de pluie ou d'alternative de faible teneur en minéraux ; voir liste des matériaux en 3.2.1 (ou 20 ml si seulement 10 g de terre ont été utilisés ; dans tous les cas, ajouter deux fois le poids du sol) .
- 3. Mélanger le sol et l'eau** et remuer rapidement ou agiter pendant 1 minute. Secouer avec de l'eau pendant une minute dans un récipient fermé peut être très efficace. Dans ce cas, il est ensuite transféré dans une petite tasse ou un bêcher.
- 4. Laisser reposer 2 minutes** ou plus, en mélangeant de temps en temps.
- 5. Mesurez avec le pH-mètre** : Placez l'électrode de pH dans la tasse et remuez lentement pendant la mesure, en gardant l'électrode de pH dans le surnageant ou la suspension supérieure dans la tasse. Enregistrer le pH après que la valeur se stabilise. L'objectif est de maintenir une valeur stable qui ne change pas de plus de 0,1 unité de pH en environ 30 secondes. La variation sur une échelle plus fine n'est pas importante. Toutefois, si le compteur change continuellement vers le haut ou vers le bas, sans stabilisation (par exemple > 0,1 unité en 10 secondes), il est possible que l'électrode soit maintenue car les électrodes peuvent devenir sales et bloquées ou obstruées avec le temps.
- 6. La mesure avec du papier pH** : après avoir permis à la solution de s'installer pendant quelques minutes (afin de ne pas excessivement tacher ou colorer les bandes de papier avec la couleur du sol) le liquide supérieur ou le surnageant de la suspension de sol peut être mesuré avec des bandelettes de test de couleur pH de l'intervalle approprié (par exemple, des bandelettes de papier pH de 0 à 14, 4 à 7 ou 5 à 8). Ce papier est ensuite comparé à un nuancier. Nous menons des tests pour établir à quel point cela est fiable et, jusqu'à présent, cela semble conduire à des valeurs qui sont 0,5 à 1,5 unités de pH différents (généralement plus bas) qu'avec un pH-mètre, ce qui peut être inacceptable. Cependant, si la différence entre les bandes de papier et le pH-mètre est relativement stable pour un ensemble de sols d'une zone ou d'une région donnée, il peut être acceptable d'appliquer cette différence ou conversion aux valeurs de bande de papier et de les utiliser comme un moyen de mesurer le pH. Toute alternative de papier pH devrait être testée contre un pH-mètre calibré pour les meilleurs résultats.

### 3.3. Stabilité des agrégats du sol

#### 3.3.1. Matériaux

1. Maille de grande taille avec une taille de trou de 8 à 12 millimètres pour effectuer tamisage au préalable des agrégats de sol et pour doucement casser de grandes mottes de sol et enlever les plus grandes pierres (Fig. 10).



**Figure 10.** Exemples de différents types de maille qui peuvent être utilisés pour le tamisage au préalable du sol sec, avec une taille de trou entre 8 et 12 mm

2. Tamis de sol avec maille de 2 mm (10 mailles) et 0,25 mm (250 microns, 60 mailles), avec un diamètre de tamis d'au moins 6 pouces (150 mm) (voir section 2.2.3 et Fig. 5). Le diamètre est important pour que l'écran ne devienne pas obstrué avec trop de matière pendant le tamisage humide. Comme précisé dans la section 2.2.3, les tamis de 250 microns peuvent être faits de tubes en plastique de grand diamètre ou du fond d'un seau en plastique, combinés à un maillage en plastique de 0,25 millimètres (taille #60) qui est utilisé dans la sérigraphie du tissu (Fig. 5).
3. Eau : l'eau potable de robinet propre est parfaitement suffisante, et n'importe quel approvisionnement en eau de village fonctionnera aussi bien.
4. Petits bassins ou baignoires où les tamis s'adaptent confortablement pour le tamisage dans l'eau (par exemple 25 cm de diamètre x 8 cm de hauteur, voir photos ci-dessous).
5. Balance pour peser les sols et les agrégats (précision 1g ou de préférence 0,1 g).
6. Application métronome sur un téléphone cellulaire, ou un fichier audio qui peut marquer un rythme de 50 battements par minute pour les étapes de lavage chronométré.
7. Rincer les flacons qui permettent au rinçage des tamis de bouger et de capturer le sol et les agrégats. Un bon (peut-être même meilleur) substitut est une bouteille en plastique jetable (d'eau ou d'autres) d'environ 500 ml, avec de petits trous percés dans le couvercle pour permettre à un petit flux d'eau, de style douche, de couler de la bouteille lorsqu'elle est pressée. Les trous du couvercle peuvent être réalisés avec une pointe de stylo, une épingle à nourrice ou un foret (pour réaliser des trous d'environ 1 mm de diamètre).
8. Un entonnoir de taille moyenne, de 10 à 20 cm de diamètre.
9. Carrés de tissu (tissu de draps, T-shirt, etc.) ou filtres en papier pour capturer, visualiser et peser les agrégats stables de l'analyse. Il est utile de peser ces tissus ou filtres à l'avance et de noter le poids de la tare sur chacun avec un marqueur indélébile (à 0,1 g de précision), ceci afin de faciliter la pesée des agrégats secs à la fin.

### **3.3.2. Vidéo et autres considérations**

- 1. Vidéo:** une vidéo illustrant cette méthode est disponible :

<https://www.youtube.com/watch?v=DucBmQBPX6Q>

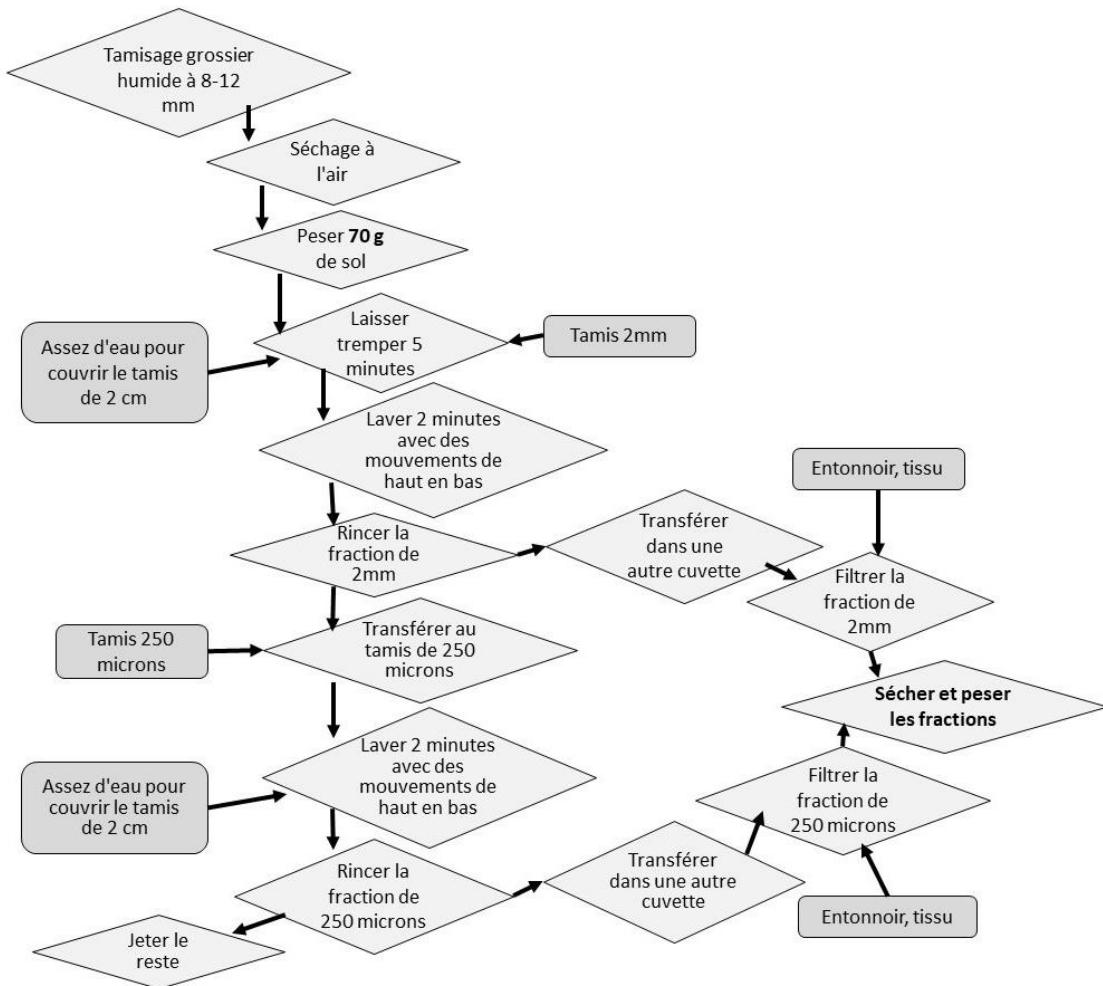
Pour voir une version plus complète de ce test, ainsi qu'une partie de la théorie derrière le test et pourquoi les agrégats sont stables dans l'eau, voir cette vidéo (note: la méthode implémentée ici est plus complexe que l'adaptation dans ce manuel) :

<https://www.youtube.com/watch?v=VOaae2bDDCY>

- 2. L'agrégation du sol ou la structure du sol dépend aussi de la texture du sol** – par exemple, une argile silteuse tend toujours vers des niveaux plus élevés d'agrégation qu'un loam sableux. Par conséquent, l'agrégation doit idéalement être comparée dans deux sols de texture similaires si nous voulons évaluer les impacts de la gestion sur la structure du sol. Par exemple, si nous comparons l'agrégation dans un sol de loam sableux (quantité inférieure d'argile) par rapport à l'argile limoneuse (plus d'argile), les différences que nous observons peuvent être plus liées aux différences dans le sable et la teneur en argile, et non la gestion du sol, de sorte que la comparaison peut être invalide.
- 3. Autres essais connexes** : il existe d'autres tests de structure possibles qui peuvent être effectués, par exemple les évaluations visuelles de « porosité du sol » et de « structure du sol et cohérence » décrites dans le Guide d'Évaluation Visuelle des Sols de la FAO par Shepherd et al. (voir Bibliographie). Il existe également une analyse de la stabilité du sol élaborée par le Service de Conservation des Ressources Naturelles (NRCS) du département de l'agriculture des États-Unis semblable à la procédure ci-dessous, qui produit une cote de stabilité avec de petits « paniers » de tamis de la maille de fenêtre. Cette méthode d'analyse apparaît dans le guide du test kit de qualité du sol du service de conservation des sols des États-Unis, page 20 du document suivant :

[https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/stelprdb1044790.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044790.pdf)

### 3.3.3. Procédure



**Figure 11.** Schéma pour le test de stabilité des agrégats.

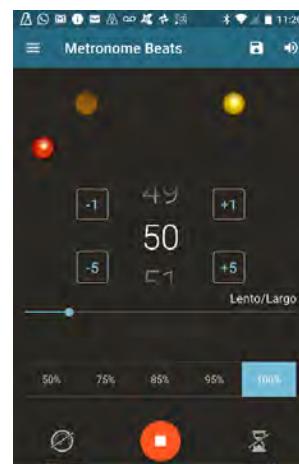
1. Préparer 70 g de sol séché à l'air (qui peut être séché au four, mais pas à plus de 45 °C) tamisé à une taille comprise entre 8 mm et 12 mm. Pour la plupart des sols, il est plus facile si le sol est tamisé grossièrement quand partiellement sec et ensuite complètement séché après. Pour effectuer le tamisage un maillage de 8 à 12 mm de taille peut être utilisé. Si aucun maillage n'est disponible, les agrégats de plus de 8-10 mm de diamètre peuvent être cassés et les roches visibles à l'œil nu enlevées manuellement. Au cours de ce processus, vous devriez dans tous les cas enlever les pierres qui ne passent pas le maillage. En outre, lorsque le sol est brisé à la main, des plans naturels de faiblesse doivent être trouvés dans les mottes et les gros agrégats, plutôt que de forcer le sol à travers la maille. De cette façon, au moins 300g de sol humide doit être tamisé (pour maintenir un sous-échantillon représentatif) pour ensuite prendre un 70 g comme une partie représentative pour l'analyse. Toutefois, s'il y a très peu de sol dans l'échantillon, 40 ou 50 g peuvent suffire.

2. Immerger le tamis de 2 mm dans une profondeur d'au moins 2 cm d'eau au-dessus de la maille, puis verser délicatement les 70 g de sol sur la maille submergée (Fig. 12).
3. Laisser le sol dans l'eau pour mouiller et décomposer les agrégats naturellement pendant 5 minutes.



**Figure 12.** Ajouter le sol grossièrement tamisé (tamisé à ~10 mm) au tamis de 2 mm dans un bassin d'eau.

4. Déplacez le tamis dans et hors de l'eau lentement, 50 fois en 2 minutes (Fig. 13). Cela doit être fait à l'aide d'une application de métronome sur un téléphone, ou d'un fichier audio (disponible à [www.smallholder-sha.org](http://www.smallholder-sha.org)) pour créer un rythme de 50 battements par minute, puis en soulevant le tamis hors de l'eau sur un battement et en l'abaissant dans l'eau sur le prochain, en répétant ce cycle 50 fois dans les deux minutes. Beaucoup d'apps de métronome mesureront également le temps depuis le début du rythme, ou vous pouvez également utiliser un chronomètre pour mesurer les deux minutes. Assurez-vous que vous ne faites pas cette action à deux fois le rythme : vous ne devez pas baisser et soulever l'écran sur chaque battement du rythme, ce qui serait 100 fois en deux minutes.



**Figure 13.** À gauche, abaissement et relèvement du tamis 50 fois en deux minutes. À droite, une application de métronome pour réguler le rythme de trempage du tamis dans l'eau.

5. Après cette action de lavage avec le tamis pendant 2 minutes, une bouteille de rinçage est utilisée pour laver les côtés du tamis et laver tout résidu de matière organique ou de petites particules d'argile à travers le tamis. Les agrégats ne doivent pas être rincés si fortement que des agrégats supplémentaires sont détruits, puisque ces agrégats ont déjà été définis comme stables pendant le lavage ; par exemple ne pas les pulvériser directement avec le flux de la bouteille
6. Ensuite, mettre la casserole inférieure avec de l'eau et tout le matériel (particules => 2 mm restant dans le tamis), à une nouvelle casserole ou un bassin sec, puis les capturer dans un chiffon ou un filtre. Cela se fait facilement en retournant simplement le tamis de 2 mm sur une casserole plus large, et en lavant tout le contenu de l'arrière du tamis vers l'avant dans cette casserole. Vous pouvez ensuite faire un rinçage final avec une bouteille de lavage pour vider complètement le tamis, en travaillant de l'arrière et de l'avant. Vous pouvez profiter de ce processus pour retirer tous les grands résidus organiques tels que des bâtonnets et des longs segments de racines de l'échantillon (ce ne sont pas des agrégats).
7. Lorsque tous les matériaux d'agrégats stables de 2 mm (et probablement quelques pierres) ont été déplacés vers le deuxième bassin, utiliser la bouteille de lavage pour déplacer ce matériau vers le tissu pré pesé placé à l'intérieur d'un entonnoir. L'entonnoir est lui-même placé dans une tasse ou un autre récipient pour attraper l'eau qui traverse, et en laissant les agrégats stables dans le tissu (voir la Fig. 15 pour un exemple de cette combinaison entonnoir/tissu pour la fraction d'agrégat plus petite). Ce tissu est mis de côté pour le séchage tandis que nous tournons notre attention à la fraction plus petite de microns de 250.



**Figure 14.** Rincer tout le matériel < 2 mm dans le tamis de micron 250 pour effectuer le prochain lavage des agrégats stables à la taille de micron de 250.

8. Nous considérons ensuite la fraction qui a passé le tamis de 2 mm, c'est-à-dire les agrégats < 2 mm et toutes les petits composantes du sol. Ce matériau est versé délicatement dans le tamis de 250 microns (0,25 mm) placé dans une autre petite casserole ou bassin semblable aux autres (Fig. 14). Le reste du sol est ensuite lavé du premier bassin au tamis. En outre, l'eau peut être ajoutée si nécessaire afin que le tamis micron 250 se retrouve avec environ 2 cm d'eau au-dessus de la maille, tout comme dans la première étape de lavage avec le tamis de 2 mm.

9. Répétez le mouvement de lavage du tamis à 250 microns dans le nouveau bassin, 50 fois en 2 minutes. Après cette étape, ce qui reste dans le tamis sera un mélange de sable et d'agrégats entre 0,25 et 2 mm de taille. Comme dans la première étape, cette fraction doit être rincée délicatement avec une bouteille de lavage avant la prochaine étape
10. Lavez le contenu du tamis (agrégats et sable) avec le flacon de lavage sur un filtre ou un chiffon. Pour plus de facilité ceci peut être fait d'abord dans un autre bassin pour le rendre plus facile, en lavant de l'arrière du tamis, puis dans l'entonnoir. La fraction peut également être transférée directement à l'entonnoir avec le chiffon (Fig. 15), bien que cela puisse entraîner plus de déversement d'eau.



**Figure 15.** Lavage d'une fraction d'agrégat stable du tamis à un entonnoir avec un chiffon pour conserver le sol pour le séchage et le pesage.

11. Ensuite, les deux fractions agrégées ( $> 2 \text{ mm}$  plus les pierres et la fraction entre 250 microns et 2 mm) sont séchées dans un endroit chaud ou un four de séchage avant le pesage et le calcul des résultats quantitatifs (jusqu'à 105 °C, puisque nous voulons seulement le poids sec et ne sommes pas intéressés par les propriétés chimiques). Toutefois, pour une comparaison plus simple et qualitative, comme lors d'un programme éducatif sur le terrain, vous pouvez comparer visuellement la quantité d'agrégats résultant de différentes pratiques de gestion ou de traitements expérimentaux, sans peser, ou prendre des photos pour comparer ensuite.
12. Après cela, nous considérons d'abord la fraction de  $> 2 \text{ mm}$ , où vous aurez besoin de mesurer deux poids (à une précision de 0,1 g ou 1 g) :
  - a. Après avoir ramassé ou tamisé les petites pierres  $> 2 \text{ mm}$  du sol sur le tissu, noter le poids sec de toutes les pierres  $> 2 \text{ mm}$  (prendre en compte que certains sols peuvent ne pas contenir de telles pierres) **ainsi que**
  - b. Le poids sec du tissu plus le sol, sans pierres, après le retrait ou le tamisage de ceux-ci. Il faut également noter le poids du tissu pris précédemment. Les pierres sont séparées pour corriger le poids des agrégats ainsi que le poids total du sol, puisque les pierres  $> 2 \text{ mm}$  ne sont pas considérées comme des agrégats ou une partie du sol qui peut être agrégée (voir 3.3.4. ci-dessous pour les calculs).
13. Pour les agrégats de petite taille, entre 250 microns et 2 mm, il suffit de peser le tissu avec son sol sec ; aucune séparation des pierres n'est nécessaire. Il faut également noter le poids du chiffon pris précédemment.

**3.3.4. Calculs pour obtenir des résultats :** comme indiqué ci-dessus, pour une évaluation approximative, il est possible de comparer simplement les agrégats qualitativement stables (des deux tailles, > 2 mm et > 250 microns) entre deux champs ou pratiques de gestion selon le volume approximatif d'agrégats stables qui sont observés dans le tissu. Dans tous les cas, gardez à l'esprit qu'il est plus valable de comparer la stabilité des agrégats dans deux sols qui ont des textures similaires. Pour un résultat plus rigoureux, vous pouvez obtenir le pourcentage d'agrégats secs stables qui ont été laissés dans les deux chiffons ou filtres :

1. Le pourcentage de sol dans les grands macros-agrégats (> 2 mm) est calculé à l'aide de l'équation suivante, avec tous les poids en g. (Notez que pour ce calcul, la tare du chiffon ou du filtre est nécessaire à l'avance) :

$$\frac{[(\text{Poids de la fraction } > 2 \text{ mm sans pierres} + \text{tissu ou filtre})] - \text{poids du filtre ou du tissu}}{70 \text{ g} - (\text{poids des pierres } > 2 \text{ mm})}$$

En ce qui concerne les poids prises dans l'étape de procédure 12 ci-dessus, il s'agit de :

$$\frac{[(\text{poids provenant de l'étape 12b})] - \text{poids du filtre ou du tissu}}{70 \text{ g} - (\text{poids de l'étape 12a})}$$

Comme indiqué ci-dessus, s'il y a des pierres > 2 mm dans cette fraction, celles-ci doivent être enlevées pour ne trouver que le poids du sol dans cette fraction. En option, le poids de ces pierres en proportion du sol de 70 g peut également être utilisé pour caractériser la teneur en petites pierres du sol.

2. Ensuite, considérez le tissu ou le filtre avec des agrégats de taille entre 250 microns et 2 mm. Dans ce cas, vous n'avez pas besoin de supprimer les petites pierres des agrégats plus petits, mais nous prenons toujours la proportion de la masse sans pierres du sol comme ci-dessus pour la fraction de > 2 mm.

$$\frac{[(\text{Poids de la fraction de } 250 \mu\text{m à } 2 \text{ mm plus le tissu ou le filtre})] - \text{poids du filtre ou du tissu}}{70 \text{ g} - (\text{poids des pierres } > 2 \text{ mm})}$$

Ou, se référant aux procédures ci-dessus dans les étapes 12 et 13,

$$\frac{[(\text{poids provenant de l'étape 13})] - \text{poids du filtre ou du tissu}}{70 \text{ g} - (\text{poids provenant de l'étape 12a})}$$

3. La valeur de 70 g est placée parce que nous avons utilisé 70 g de sol au départ. Si le poids initial du sol a été modifié, ce poids différent doit être utilisé à la place des 70 g indiqués.

4. Interprétation des résultats : le tableau suivant donne des indications approximatives pour interpréter les résultats, exprimés comme la somme des pourcentages entre les deux fractions, 250 microns à 2 mm et > 2 mm. Le tableau est séparé en trois catégories différentes de types de texture du sol. Nous soulignons à nouveau que la mesure dans laquelle un sol peut se développer et maintenir la structure par l'activité des racines, des microbes et de la macrofaune ayant beaucoup à voir avec sa texture et d'autres facteurs, il est préférable de comparer entre les parcelles qui ont le même type de sol et de différents types de gestion, ou d'essayer de mesurer l'impact de la gestion sur la structure au fil du temps. De façon générale, le plus l'agrégation dans l'eau est stable le mieux.

**Score qualitatif, basé sur des agrégats stables  
à l'eau, % 250 µm +% 2 mm**

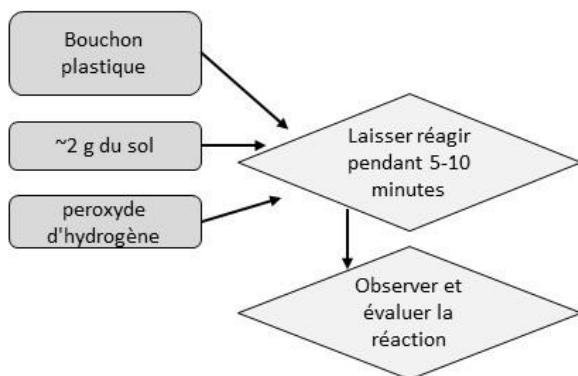
Type de texture du sol	Très faible	Faible	Moyen	Élevé
<b>Sols très grossiers</b> : Sables et sables limoneux	La stabilité des agrégats est d'une utilité limitée : on peut remarquer l'agrégation dans un sol sec, mais cette structure ne devrait pas être stable à l'eau			
<b>Sols grossiers et à texture moyenne</b> (limons sableux, limons, limons fins) ; <35% d'argile)	<15%	15% - 30%	30% - 45%	>45%
<b>Sols à texture fine</b> (argiles, argiles sableuses, loams limono-argileux, c.à.d.> 35% d'argile)	<20%	20% - 40%	40% - 55%	>55%

**3.4 Matière organique du sol (MOS) :** trois tests sont présentés ci-dessous qui visualisent la matière organique du sol de différentes manières. Les trois méthodes ont différents niveaux de rigueur et se réfèrent à différentes fractions ou processus dans le sol. Ils peuvent cependant tous être employés afin de favoriser l'apprentissage de la matière organique du sol.

**3.4.1. Test/démonstration avec du peroxyde d'hydrogène :** ce test est basé sur la réaction obtenue entre le peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) et la vie microbienne et ses enzymes dans le sol. Il génère des bulles qui forment une mousse. En théorie, la réaction du peroxyde est proportionnelle aux phénomènes biologiques dans le sol. Par conséquent, ce n'est pas un test direct sur la quantité de résidus organiques ou d'humus dans le sol (formes de MOS), mais il est vraisemblablement proportionnel à la matière organique **à condition** qu'il y ait des microbes actifs dans le sol. Lorsque les sols sont secs, par exemple, nous avons remarqué que cette démonstration ne fonctionne pas très bien et donne une impression de MOS inférieure à celle d'analyses plus rigoureuses ou de ce qui peut être observé concernant la couleur du sol. Néanmoins, il peut être utilisé dans les activités d'apprentissage pour démontrer que le sol contient « des êtres vivants » à travers l'analogie à la blessure d'un être humain qui forme également des bulles au contact du peroxyde. C'est un moyen rapide de démontrer les aspects biologiques du sol et de sa santé sur le terrain, sans aucune procédure plus compliquée. Nous déterminons actuellement si une relation approximative existe entre ce test de peroxyde et le test de permanganate ci-dessous, qui est déjà établi comme une mesure du MOS disponible (et donc du carbone organique du sol).

#### 3.4.1.1. Matériaux et réactifs

1. Peroxyde d'hydrogène (de type acheté dans une pharmacie pour le nettoyage des plaies ; l'idéal est de le trouver dans d'une bouteille équipée d'un compte-gouttes)
2. Un bouchon de bouteille en plastique provenant d'une bouteille de boisson ou d'eau (~2 cm de diamètre)
3. Du sol humide est utilisé, car il s'agit d'une démonstration sur le terrain



**Figure 16.** Schéma pour la démonstration et le test simple de l'activité biologique du sol avec le peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ).

### **3.4.1.2. Procédure :**

- 1.** Placer une couche de sol de 4 à 5 mm de profondeur au bas du bouchon de bouteille. Si le sol n'est pas tamisé pour l'homogénéiser et enlever les pierres, alors les pierres devraient être enlevées à la main puisqu'elles ne contribuent pas de matière organique (MOS) ou de biomasse microbienne à l'échantillon. Avant de prendre cette petite quantité pour les essais, assurez-vous de bien mélanger le sol pour l'homogénéiser et représenter la parcelle de terrain adéquatement.
- 2.** Au moyen du compte-gouttes, ajouter juste assez de peroxyde d'hydrogène pour tremper le sol, ou jusqu'à ce qu'une surface liquide brille à la surface du sol à l'intérieur du couvercle.
- 3.** Au fil du temps, des bulles apparaîtront. Elles formeront souvent une mousse, qui s'élèvera à l'intérieur du bouchon de la bouteille.
- 4.** Après 5 minutes, vous pourrez évaluer la quantité de bulles et la vitesse de la réaction, cette vitesse de réaction étant un paramètre important de ce test. Un échantillon humide de compost ou de fumier peut être utilisé pour la comparaison comme un « contrôle positif » représentant une valeur très élevée, ce qui permettra également de valider que le peroxyde d'hydrogène est encore assez frais pour être utilisé. Bien qu'il s'agisse d'un test, ou d'une démonstration encore en cours de validation, une échelle de 5 niveaux (0 à 4) est proposée, qui peut être ajusté avec l'expérience, comme suit :

**Tableau de notation pour le test de sol de peroxyde d'hydrogène**

<b>Note</b>	<b>Caractéristiques de la réaction du peroxyde d'hydrogène</b>
<b>0</b>	Très peu de réaction, pas ou presque pas de bulles (comme le sable propre, par exemple)
<b>1</b>	Bulles seulement à la surface du sol ou réaction très lente
<b>2</b>	Couche de bulles d'une profondeur de 1-2 mm, ou une réaction lente avec une couche plus épaisse de bulles, mais seulement au bout des 5 minutes
<b>3</b>	Couche de bulles d'une profondeur de 5-10 mm, réaction visible après seulement 30 secondes
<b>4</b>	Mousse de bulles d'une profondeur de > 10 cm, et une réaction rapide dans les 30 secondes, proche de la réaction d'un fumier humide de la ferme ou de compost humide.

### 3.4.2. Matière organique particulière (MOP)

Ce test peut être utilisé pour montrer d'une manière très visuelle ce qu'est la matière organique du sol, aux agriculteurs ou à d'autres publics. La MOP, rincée à partir du sol avec de l'eau, peut être notée qualitativement ou pesée afin de servir de mesure quantitative des apports récents d'intrants organiques dans les sols agricoles et ainsi donner une idée de ce qui s'y décomposera prochainement en libérant des nutriments pour les cultures.

À noter, il existe une version simplifiée ou rapide de ce test, voir la vidéo sur YouTube :  
[https://youtu.be/cL\\_nWS\\_xWAw](https://youtu.be/cL_nWS_xWAw)

#### 3.4.2.1. Matériels

1. Si vous effectuez **la version simplifiée** (voir ci-dessous les étapes R1 à R8), vous aurez besoin de ce qui suit **À LA PLACE** des tamis décrits au point 2 :



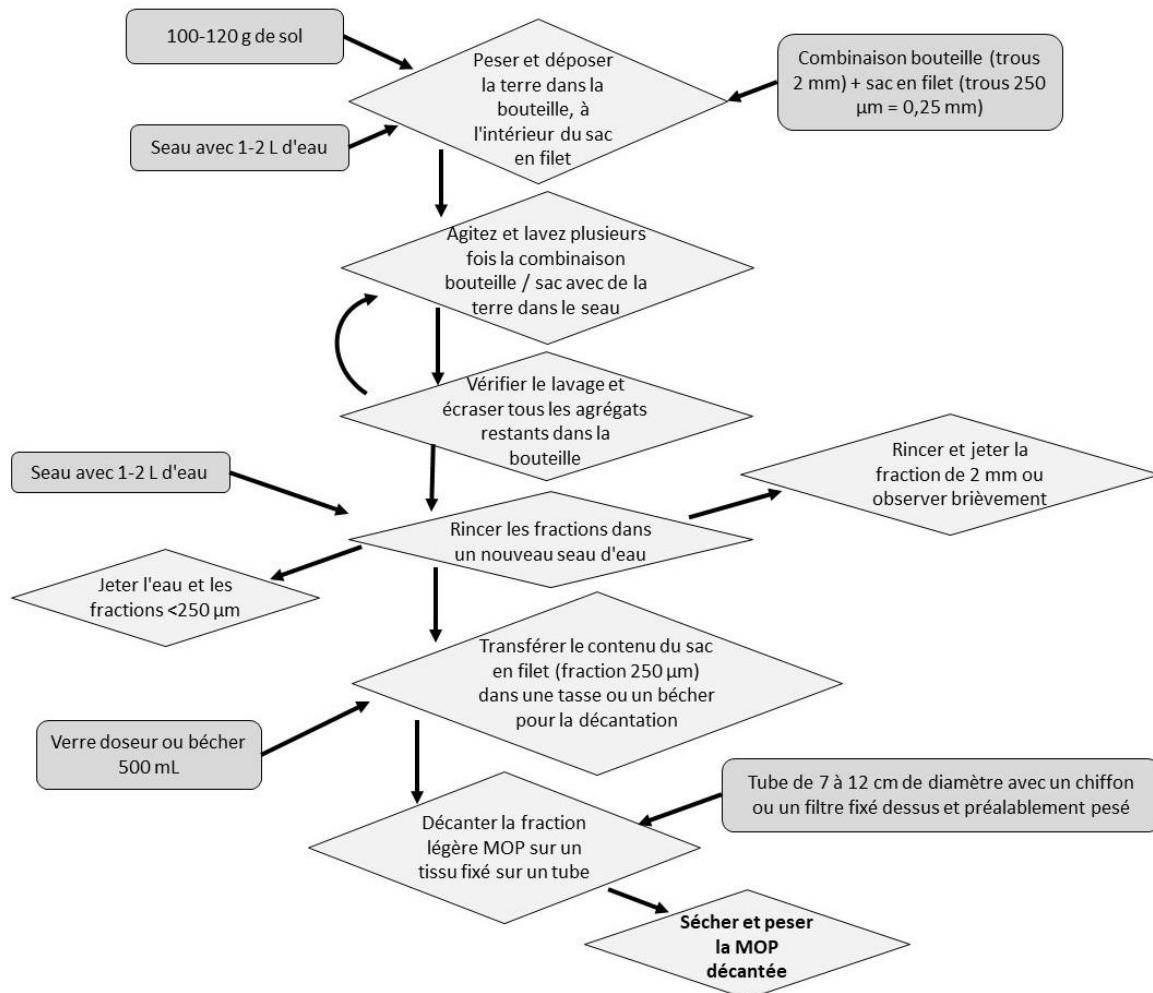
**Figure R1.** Un sac de mailles 250 microns et une bouteille assez grande pour tamiser 100 g de terre, percée de trous de 2 mm sur le côté à l'aide d'une perceuse ou d'un clou chauffé.

- a. Une bouteille en plastique de 200 à 400 ml environ, avec des trous de 2 mm percés (avec un foret de 2 mm) ou fondus (avec des clous chauffés de taille appropriée). Environ 200 trous doivent être percés ou fondus sur le côté de la bouteille près du fond (voir fig. R1 à gauche). Cette bouteille ainsi modifiée remplace le tamis de 2 mm.
- b. Un sac cousu en 250 microns (ou maille # 60), assez grand pour que la bouteille du point a ci-dessus puisse y rentrer. Un sac de 13 x 20 cm est généralement assez grand pour accueillir la plupart des bouteilles. Celui-ci remplace le tamis de 250 microns ci-dessous.
- c. Les bassines pour tamisage humide du point 4 de cette liste sont remplacées dans la méthode simplifiée par des seaux de 5 à 8 litres (des seaux de plus grandes tailles conviennent aussi). Des seaux profonds sont mieux pour secouer vigoureusement cette combinaison « bouteille / sac » lors du tamisage humide.

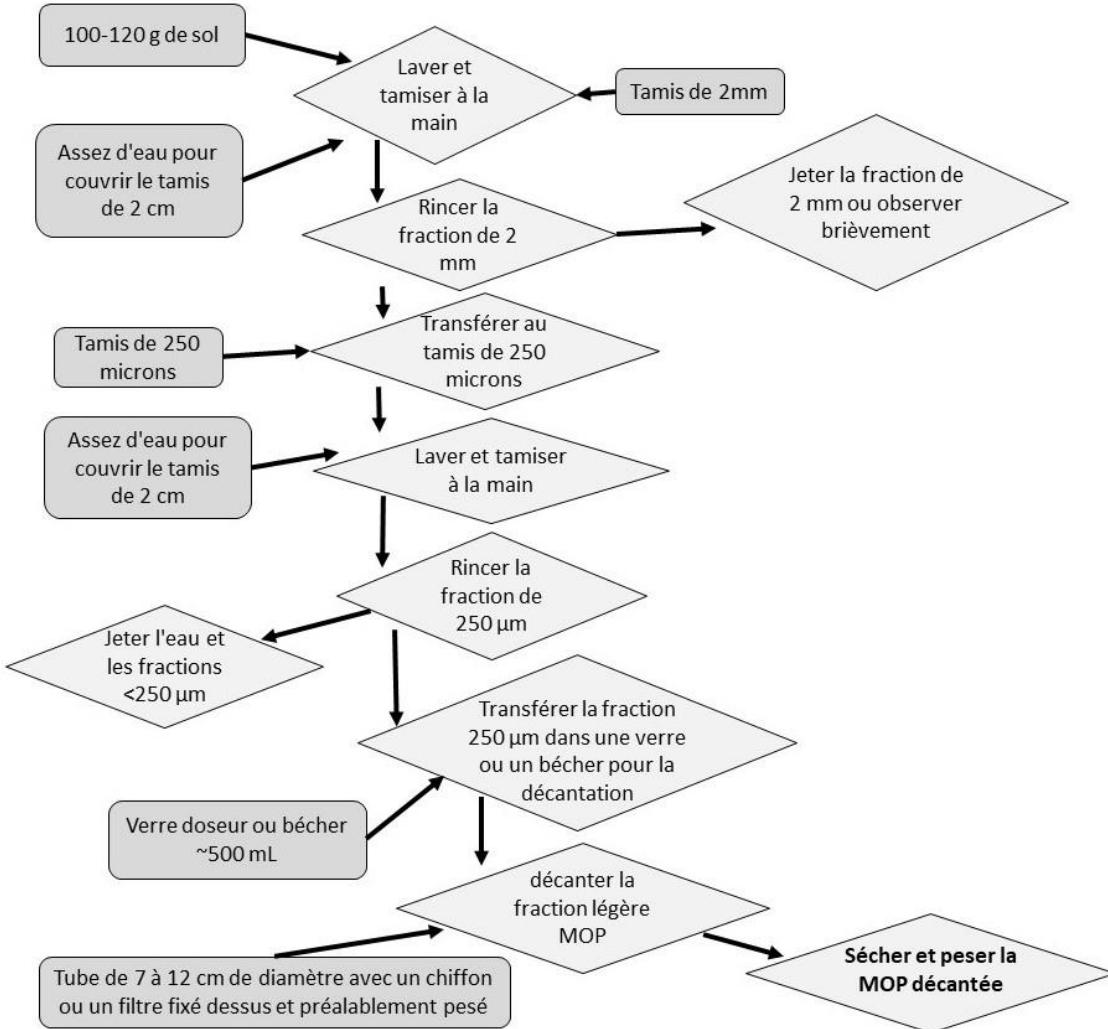
2. Des tamis 2 mm et 0,25 mm (250 microns) d'au moins 150 mm de diamètre sont utilisés. Ces tamis relativement larges sont utilisés pour éviter le colmatage s'il y a trop de matière lors du tamisage humide. Concernant l'achat et/ou la fabrication des tamis, consultez le chapitre 2.2.3. Vous n'avez pas besoin de ces tamis si vous effectuez la procédure simplifiée des étapes R1 à R8 ci-dessous (voir point 1 ci-dessus).
3. Eau : de l'eau potable et propre du robinet ou encore provenant de l'approvisionnement en eau du village est suffisant.
4. Des bassines ou des casseroles dans lesquelles les tamis s'intègrent facilement, et qui permettent le tamisage et le lavage du sol grâce à un tamis immergé dans l'eau (par exemple, des bassines ou des casseroles de 25 cm de diamètre x 6 cm de hauteur, voir fig. 17 ci-dessous) ; ou des seaux si vous effectuez **la version simplifiée**.
5. Une balance pour peser le sol et la MOP. Une précision de 1 g à 0,1 g est nécessaire pour peser la quantité initiale de sol. Pour peser avec précision la MOP, une échelle plus

fine (0,001 g ou 1 mg) est habituellement utilisée, et une notation visuelle peut être mieux adaptée et plus facile en fonction du contexte (voir le barème de notation à la fin, chapitre 2.5.3). Néanmoins, si nécessaire, la MOP peut être conservée sous forme de petits échantillons dans de petites enveloppes pour un pesage ultérieur.

6. Des pissettes qui permettent le rinçage des tamis afin de transférer et de capturer le sol et les agrégats. Ces flacons peuvent être fabriqués à partir d'une bouteille d'eau ou de soda en plastique souple commune (500 ml) en perçant des trous dans le bouchon avec une aiguille épaisse, une punaise ou un foret fin ( $\sim 1$  mm de diamètre).
7. Un bécher ou un verre doseur ( $\sim 500$  ml) utilisés pour décanter la matière organique en suspension dans l'eau (voir la procédure ci-dessous).
8. Un entonnoir en plastique, de diamètre 8 à 15 cm environ.
9. Des morceaux de tissu ou des filtres pour capturer, visualiser et sécher les particules de matière organique à la fin de l'évaluation, tout comme ceux utilisés pour le test de stabilité des agrégats (voir 3.3.1). Le tissu peut provenir d'un drap de lit ou d'un vieux T-shirt.



**Figure R2.** Schéma de la méthode MOP simplifiée, voir les étapes R1 à R8 ci-dessous.



**Figure 17.** Schéma de la méthode originale pour mesurer la matière organique particulaire, voir les étapes 1 à 14 ci-dessous.

### 3.4.2.2. PROCEDURE

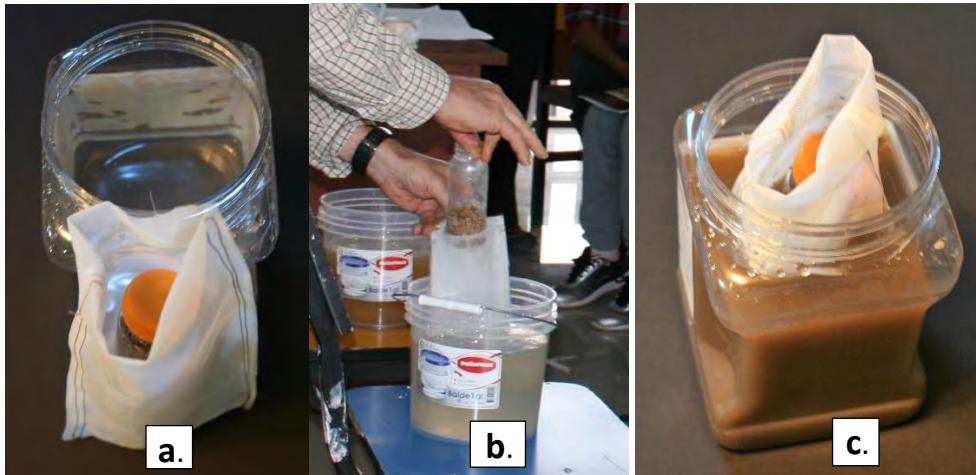
**Méthode simplifiée et étapes révisées :** nous avons revu cette méthode afin de simplifier de manière significative le tamisage humide décrit dans les étapes R1 à R8 ci-dessous :

Une vidéo de la version simplifiée est disponible à : [https://youtu.be/cL\\_nWS\\_xWAw](https://youtu.be/cL_nWS_xWAw)

**R1.** Placez la bouteille trouée (trous de 2 mm) dans le sac de maille 250 microns pour former deux « couches » filtrantes à travers lesquelles le sol devra passer (fig. R3, image a).

**R2.** Travaillez au-dessus du seau d'eau ou tout autre endroit où le sol peut tomber sans problème. Pesez et versez 100 g de sol dans la bouteille trouée. Si le sol n'a pas été préalablement tamisé et qu'il y a de grosses pierres (> 5 mm), il est préférable de les retirer afin qu'elles ne biaissent pas le poids initial du sol. En versant le sol dans la bouteille, une

petite partie pourrait sortir à travers les trous et la maille, ce qui n'est pas un problème car nous ne nous soucions pas de la fraction de sol < 250 microns.



**Figure R3.** Images de la méthode simplifiée de tamisage de la MOP. (a) et (b) montrent comment le sol est lavé à l'intérieur de la combinaison « bouteille / sac », tandis que (c) montre l'argile et le limon qui sortent à travers le sac de maille 250 microns lors du lavage.

- R3.** Tout en tenant la bouteille à l'intérieur de la maille, plongez et secouez vigoureusement la « bouteille / maille / sol » dans le seau d'eau (fig. R3). Le limon et l'argile commenceront à sortir du sac. Veillez à ce que le sol ne sorte par du goulot de la bouteille. Le sol est ainsi lavé pendant 3 à 5 minutes.
- R4.** Après environ 3 minutes, examinez le matériau à l'intérieur de la bouteille. Il ne doit contenir que de grosses racines et / ou des pierres > 2 mm pour pouvoir passer à l'étape suivante. S'il y a encore de gros agrégats ou des mottes, il est nécessaire de les casser doucement en insérant un bâton dans la bouteille ou simplement en continuant à secouer la bouteille dans le seau. À ce stade, le sol ayant déjà été pesé, des pierres de type gravier peuvent également être insérées dans la bouteille pour briser les mottes lors des secousses, mais cela n'est généralement pas nécessaire.
- R5.** Rincez la combinaison « sac / bouteille » dans un nouveau seau avec de l'eau propre.
- R6.** Une fois qu'il n'y a que des petites pierres, des bouts de bois et des grosses racines dans la bouteille, retirez-la du sac et rincez-la avec de l'eau (pissette) dans le sac maintenu ouvert en haut, de sorte que tout matériau compris entre 250 microns et 2 mm sera conservé dans le sac et ne sera pas perdu.
- R7.** Lavez le contenu du sac dans un bêcher, ou un verre doseur ou tout autre récipient pour faire décanter la matière organique ou la MOP (verre de 300-500 ml, voir fig. 21).
- R8.** Vous pouvez maintenant passer à l'étape 10 de la méthode originale ci-dessous afin de faire décanter la matière organique en suspension (MOP) à partir du bêcher ou du verre doseur, puis passer aux résultats. Voir la note à la fin de l'étape 11 pour accélérer la décantation et le piégeage de la MOP, car avec cette méthode, il n'est pas nécessaire de décanter en premier la MOP sur le tamis.

**Méthode originale** (seule l'étape de tamisage humide est différente de celle de la méthode simplifiée ci-dessus)

1. Une vidéo décrivant cette méthode est disponible à :

<https://www.youtube.com/watch?v=zOrG3Ma2cea>



**Figure 18.** Préparation du tamisage humide de la matière organique particulière (MOP) hors du sol, avec le tamis de 2 mm immergé dans une bassine d'eau.

1. Pesez 100 g de sol séché à l'air ou 120 g de sol humide sur la balance (fig. 18). Vous pouvez augmenter la quantité de MOP dans un sol dans lequel elle est peu présente, en utilisant plus de sol, 150 ou 200 g. Dans ce cas, il sera nécessaire d'ajuster la notation qualitative en fin d'analyse. Si le sol n'a pas été tamisé à 2 mm, les petits cailloux doivent être enlevés à l'œil nu avant la pesée.
2. Placez le sol dans le tamis de 2 mm à l'intérieur d'une bassine d'eau, de sorte que le sol soit recouvert de 2 cm d'eau (comme pour le test de stabilité des agrégats, voir 3.3.3). Notez qu'ici, il n'est pas nécessaire d'attendre et de tremper le sol avant d'effectuer le tamisage, comme c'est le cas pour le test de stabilité des agrégats.
3. Commencez le tamisage humide du sol, en le remuant dans le tamis en faisant des mouvements de va et vient hors et dans l'eau. Les agrégats peuvent être cassés délicatement à la main, car ils peuvent contenir des particules de matière organique. Veillez à ne pas être trop agressif avec votre main sur le tamis pour ne pas casser les morceaux de matière organique et les forcer à travers le tamis.
4. Suite à ce tamisage humide, un mélange relativement propre de pierres et de MOP de grosse taille (> 2 mm) sera obtenu en peu de temps.
5. Rincez le tamis de 2 mm (intérieur et extérieur) avec une pissette, afin de laver cette fraction et de passer toute particule < 2 mm à la prochaine étape de filtrage.



**Figure 19.** Ajout de l'eau dans le tamis et le sol avant de procéder au tamisage humide (à noter, l'éprouvette est juste un récipient commode mais il n'est pas nécessaire de mesurer précisément la quantité d'eau).

6. Mettez de côté la fraction > 2 mm qui se trouve toujours sur le tamis. En général, cette fraction est jetée, mais elle peut être traitée comme une fraction séparée ou encore utilisée pour illustrer la décomposition des résidus organiques en morceaux de plus en plus petits.
7. Ensuite, versez l'eau et le mélange sol/MO contenus dans la bassine (fraction < 2 mm) sur le tamis de 0,25 mm (250 microns) dans une autre bassine ou bac, en prenant bien soin de transférer tout le matériau et de rincer la première bassine à travers ce tamis de 250 microns. Ensuite, si nécessaire, de l'eau peut être ajoutée pour immerger complètement le tamis et le sol à 2 cm de profondeur dans la nouvelle bassine.



**Figure 20.** Transfert du matériau tamisé à 2 mm sur le tamis de 250 microns.

8. Répétez l'étape de tamisage humide, mais maintenant en utilisant le tamis de 250 microns dans l'eau, en cassant doucement tous les agrégats à la main. Après quelques minutes de tamisage, il est préférable de remplacer l'eau dans la bassine avec de l'eau propre et d'écartez tous les matériaux < 250 microns qui se trouvent sous le tamis, et ce afin de rincer la fraction > 250 microns.
9. Rincer le contenu du tamis de 250 microns (extérieur et intérieur, y compris éventuellement vos mains) et versez la fraction (sable fin et MOP > 250 microns) dans un bêcher ou un autre récipient pour décantation (300-500 ml, fig. 21).
10. Décantez ensuite tout les matériaux en suspension dans ce récipient sur un bord du tamis de 250 microns, de sorte que cette MOP s'accumule dans un coin du tamis (fig. 21, à droite). ***Si vous utilisez la méthode simplifiée***, la MOP en suspension peut être directement décantée sur un tissu ou un filtre. Ce tissu ou ce filtre peut être fixé à l'extrémité d'un tube ; l'eau de décantation y sera versée afin de capturer la MOP très facilement (voir fig. 22 à droite et, pour plus de détails, la vidéo postée sur YouTube sur la méthode simplifiée). Le sable restera au fond du bêcher ou du verre doseur. Le bêcher est rempli et mélangé avec de l'eau à plusieurs reprises. Ce décantage répété aura également pour effet de laver la suspension de l'argile restante.
11. Lorsque vous avez fini de décanter plusieurs fois, vous verrez quelques particules qui semblent organiques (plus foncées) sur le dessus de la couche de sable (c'est-à-dire que leur densité se situe entre celle du sable et du reste de la MOP). Ce sont généralement des complexes de matière organique et d'argile avec d'autres formes mixtes de matière organique, avec peut-être un peu de charbon. Si possible, ces complexes doivent également être capturés avec le tamis 250 microns. Cependant, il y aura toujours

quelques grains de ce type et l'évaluation devra toutefois être déclarée comme finie à un moment donné.

12. Continuez ce processus de décantage jusqu'à ce que l'eau au-dessus du sable lavé dans le bécher soit claire ; près de 100 % de la MOP sera alors capturée dans le tamis.



**Figure 21. Gauche** : transfert du matériau du tamis 250 microns (minéral et MOP en mélange) dans un verre doseur afin de décanter la matière organique. **Droite** : décantation de la MOP 250 microns sur un côté du tamis de 250 microns (sur un bord du tamis afin de faciliter le déplacement de la MOP vers un entonnoir pour le séchage).

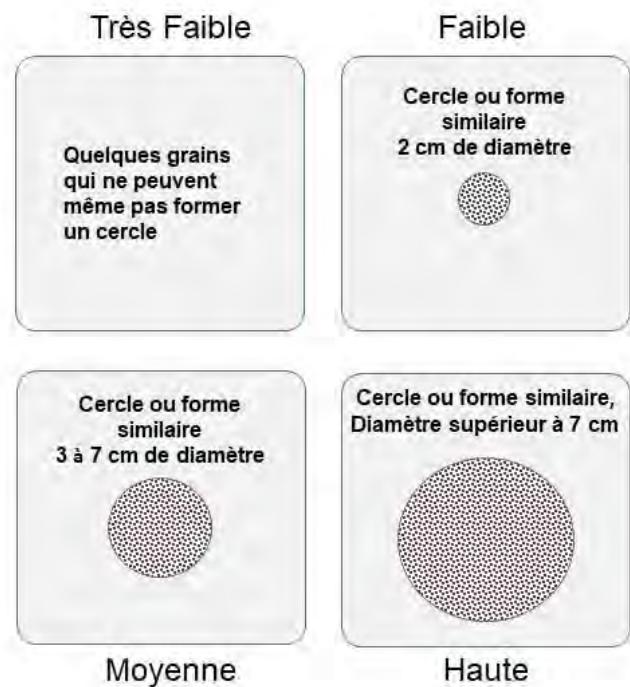
13. Transférez le contenu du tamis de 250 microns (fig. 22, à gauche) sur un papier-filtre ou un tissu à l'intérieur d'un entonnoir (fig. 22, au centre). Cette étape peut être facilitée si le contenu du tamis est d'abord rincé (avec de l'eau) dans une bassine ou un bol vide, puis ensuite versé du bol (ou de la bassine) sur le filtre ou le tissu. Le tissu ou le filtre doit être pesé à l'avance ; ce poids sec sera ensuite utilisé dans les calculs finaux. Un tissu de couleur claire permettra également de noter visuellement la matière organique (partie suivante), de montrer la MOP aux participants d'ateliers si nécessaire, ou encore de la photographier pour comparaison avec celle d'autres sols.



**Figure 22. Gauche** : MOP décantée sur le côté du tamis de 250 microns. **Centre** : rinçage de la MOP sur un chiffon ou sur un filtre dans un entonnoir, pour séchage ou notation de la quantité capturée. **Droite** : un tube provenant d'une bouteille en plastique coupée, avec un tissu ou un filtre fixé avec un élastique, constitue un moyen très pratique pour décanter en une seule étape en utilisant la méthode simplifiée.

### 3.4.2.3. Observations et calculs des résultats :

- Pour produire des données sur les matières organiques particulières (MOP), une stratégie consiste simplement à évaluer la quantité de MOP visuellement, en utilisant un guide « visuel » basé sur l'expérience et la comparaison avec d'autres sols (p. ex. fig. 23).



**Figure 23.** Guide pour la notation visuelle de la densité de la MOP du sol. À noter, si vous utilisez plus de sol au départ pour faire le test (plus que les 100 g suggérés), vous devrez peut-être ajuster l'interprétation du test vers le haut ou vers le bas.

- En plus de cette notation visuelle, vous pouvez garder les petits échantillons de particules de MOP dans les tissus ou les filtres, les sécher à l'air ou dans un four (40° à 60°C) et les peser avec une balance de précision (0,001 g ou encore plus précis), ce qui produira un résultat quantitatif plus précis.
- Si le poids de la MOP est obtenu, ainsi que celui du tissu ou du filtre, la fraction de matière organique particulière est alors calculée comme suit :

$$\frac{[\text{poids de la POM décantée} + \text{poids du tissu ou du filtre}] - \text{poids du tissu ou du filtre (mg)}}{\text{poids initial du sol (g)} (\text{p. ex. } 100 \text{ g}) \times 10}$$

Ce résultat sera exprimé en pourcentage (%) et pourra être comparé entre parcelles agricoles ou pratiques au sein d'une expérience.

- Une alternative est de mesurer le volume de la MOP sèche, et de développer un facteur de conversion entre le volume de la MOP et son poids sec au cours du temps, basé sur un ensemble d'échantillons de poids et de volumes connus. Pour cela, une méthode cohérente de mesure du volume de la MOP doit être utilisée.

### **3.4.3. Carbone du sol oxydable par permanganate (Carbone « actif » ; POXC)**

#### **3.4.3.1. Matériaux et réactifs.**

**L'Eau** : contrairement aux préoccupations concernant l'eau sans phosphore dans le test de phosphore disponible (section 3,5 ci-dessous), il n'y a généralement pas d'impuretés substantielles de carbone organique dans les approvisionnements en eau publics, et l'eau du robinet peut être utilisée. Toutefois, l'utilisation de l'eau embouteillée (pour la solution  $\text{KMnO}_4/\text{CaCl}_2$  ci-dessous) qui est faible en sels et en matière organique n'augmentera pas considérablement les coûts et est recommandée.

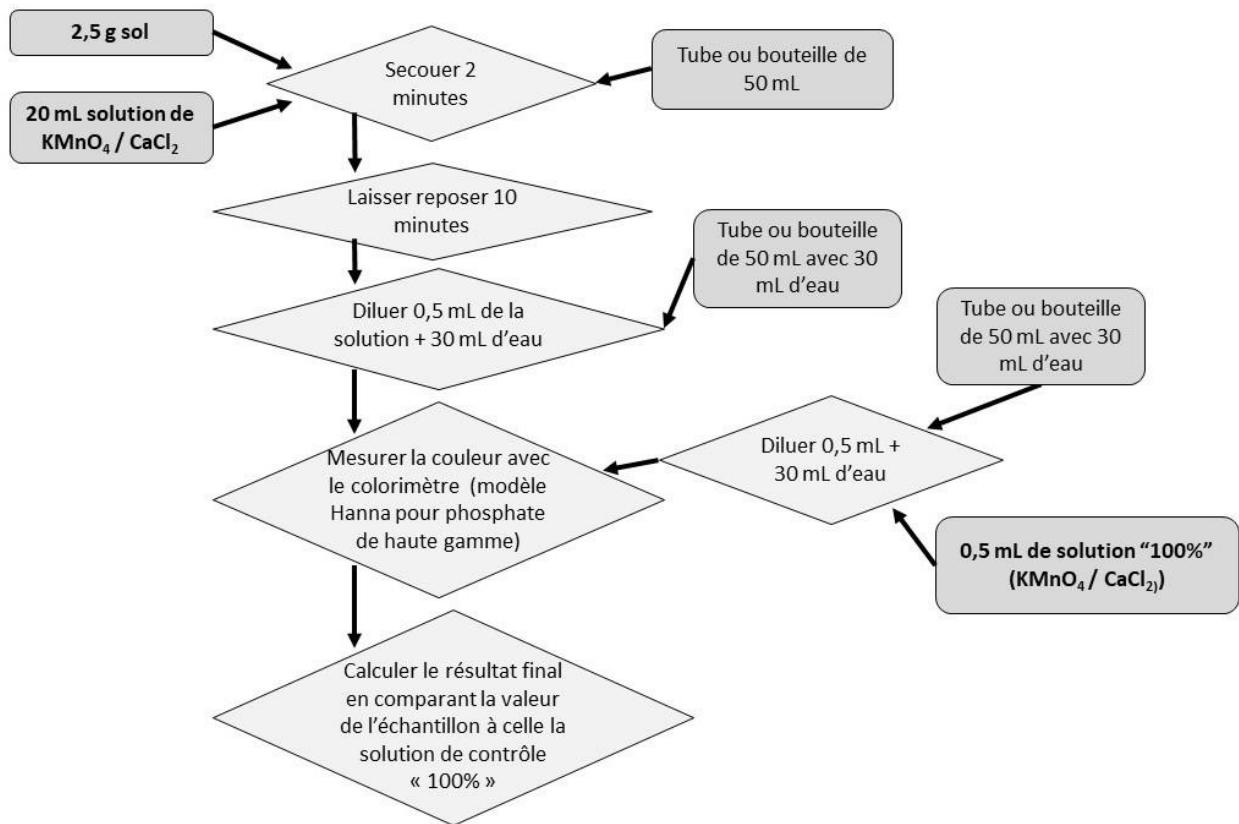
1. **Permanganate de potassium ( $\text{KMnO}_4$ )** – Celui-ci est acheté localement ou peut être expédié en petites quantités. Il est important de tester le  $\text{KMnO}_4$  acheté dans les pharmacies ou d'autres lieux moins formels pour s'assurer qu'il se comporte de la manière indiquée dans cette méthode, puisque le  $\text{KMnO}_4$  se détériore (à l'exposition à la lumière et d'autres facteurs environnementaux) en d'autres formes d'oxydes de K-mn (avec une couleur verdâtre, qui est une façon de voir si le réactif est expiré) et ne mènera dans ce cas pas à une mesure fiable. Une façon de vérifier la source de  $\text{KMnO}_4$  dans la pratique est de faire l'analyse sur le même échantillon avec un lot « pur » ou fiable, par rapport à un lot de  $\text{KMnO}_4$  à tester.
2. **Chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ )** – Celui-ci est parfois plus facile à trouver que les autres réactifs (par exemple, dans les maisons d'approvisionnement pour l'industrie alimentaire locale). Ceci est seulement utilisé dans la solution comme un flocculant de sol et il est possible que le chlorure de magnésium fonctionne également (c'est l'ion divalent  $\text{Ca}^{++}$ , ou au contraire l'ion  $\text{Mg}^{++}$ , qui est important).
3. **Acide citrique ou jus de citron** : l'acide citrique n'est pas nécessaire pour l'analyse, mais il est utile pour nettoyer la coloration permanganate brune des récipients utilisés dans la méthode, en les trempant pendant quelques heures suivies d'un lavage normal.
4. **Tubes à centrifuger (50 ml)** ou d'autres petits contenants de 50 à 100 ml pour agiter la solution de digestion avec le sol, puis laisser la suspension s'installer. Un récipient étroit est souhaitable pour permettre le pipetage du haut de la suspension.
5. **Sol tamisé à 2 mm et séché à l'air** (s'il est nécessaire d'utiliser un sol humide, une correction pour la teneur en eau doit être appliquée, voir fin de la méthode).
6. **Solution de digestion** : 0,015 M de permanganate de potassium ( $\text{KMnO}_4$ ) + 0,1 M chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) *dans la même solution*. Voir la recette ci-dessous.
7. **Flacons en verre transparent** avec un volume de 11 ml et un diamètre de 0,75 pouces, pour effectuer la lecture des couleurs avec le colorimètre Hanna (voir les photos ci-dessous et la section équipement 2.1.3).
8. **Tubes à centrifuger (50 ml)** ou tout autre petit récipient (volume environ 50 ml), pour diluer la solution  $\text{KMnO}_4$  digérée avant la lecture.
9. **Pipette graduée ou de transfert** gradué avec mesures de volume. Ceux-ci peuvent être achetés avec des graduations de 0,5 ml. Vous pouvez également créer un compte-gouttes gradué à un volume de 0,5 ml avec un balance de précision pour marquer le niveau auquel le compte-gouttes contient 0,5 ml (égal à un poids d'eau de 0,5 g).

### **3.4.2.2.** Recette pour la solution de **digestion KMnO<sub>4</sub>/CaCl<sub>2</sub>** :

Il s'agit d'une solution de 0,015 M de KMnO<sub>4</sub> et 0,1 M de CaCl<sub>2</sub> dans la même solution. La méthode originale publiée par Weil et coll. (disponible [ici](#)) utilise une solution de 0,02 M de KMnO<sub>4</sub>, mais nous essayons d'économiser sur les réactifs et, par conséquent, utilisons une solution légèrement plus diluée.

**Pour chaque 100 ml de solution (multiplier en cas de volumes plus importants) :**

1. Mesurer avec un cylindre gradué, ou peser, 100 ml (ce qui équivaut à 100 g d'eau) dans une bouteille transparente ou un bécher (pour être en mesure de voir que les réactifs sont complètement dissous).
2. À chaque 100 ml d'eau, ajouter 1,11 g de CaCl<sub>2</sub>. Pour les volumes supérieurs à 100 ml, multipliez la quantité de CaCl<sub>2</sub> proportionnellement au volume, par exemple pour 1000 ml ou 1 L, multipliez par 10 à 11,1 g de CaCl<sub>2</sub>.
3. Bien mélanger la solution jusqu'à ce que tout le chlorure de calcium soit dissous. Si la solution est faite à l'intérieur d'une bouteille, vous pouvez couvrir la bouteille et secouer ou tourbillonner pour la dissoudre rapidement.
4. À cette même solution, ajouter 0,237 g de KMnO<sub>4</sub> (permanganate de potassium) par 100 ml de solution (ou 0,24 g s'il n'y a qu'une balance de précision 0,01 g). Bien mélanger à nouveau, jusqu'à mélanger complètement les particules KMnO<sub>4</sub>. Cette quantité (0,24 g) est une petite quantité pour de nombreuses balances non-précision, et il peut être préférable de faire un plus grand volume, par exemple 500 ml (avec 1,185 g de KMnO<sub>4</sub>), afin d'atteindre une plus grande précision dans le pesage du permanganate. D'autres quantités de solution sont également possibles.
5. Il est préférable de faire juste assez de cette solution, plus une petite marge, pour analyser un lot de sols, calculant 20 ml pour chaque analyse. Si la solution doit être stockée entre les évaluations (moins d'une semaine), la bouteille doit être recouverte (avec du ruban adhésif ou du papier d'aluminium par exemple) afin que le KMnO<sub>4</sub> ne se décompose pas à la lumière.
6. Si vous voulez stocker cette solution de quelques semaines à un mois, vous pouvez ajouter une petite quantité de NaOH pour ajuster son pH à 7,2 (juste après le mélange, et en supposant une eau distillée ou très pure, il aura un pH d'environ 5,7). Cela aidera à préserver le KMnO<sub>4</sub> en solution. La solution peut être conservée pendant quelques semaines dans un réfrigérateur, dans une bouteille recouverte pour empêcher la lumière d'entrer. Cependant, il est préférable de mélanger la solution en petits lots et d'utiliser la solution entière en une semaine.



**Fig. 24.** Schéma pour le test de carbone oxydable au KMnO<sub>4</sub> (« carbone actif » ou POXC).

#### 3.4.2.3. Procédure (voir le schéma en la Fig. 24)

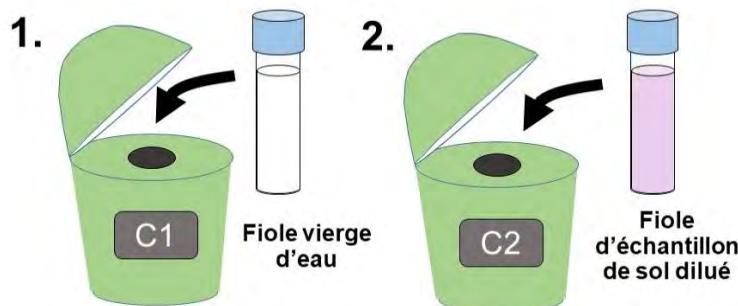
1. Une vidéo de cette méthode est disponible à l'adresse suivante :

<https://www.youtube.com/watch?v=89Bn5P4y3n4&t=601s>

2. Mélanger 2,5 g de sol dans 20 ml de solution de digestion (recette ci-dessus). Enregistrer le poids exact des calculs décrits ci-dessous, par exemple « 2,61 g ». Plus de sol peut être pesé (par exemple 3,5 g) s'il est estimé au départ que le sol contient de très faibles niveaux de MOS, ou moins de sol pour les sols très élevés en MOS.
3. Secouer 2 minutes, manuellement ou avec une machine à secouer.
4. Laisser reposer 10 minutes. Le CaCl<sub>2</sub> fera floculer et agréger l'argile, pour laisser une solution claire à l'exception de la couleur du KMnO<sub>4</sub>. La chronologie de ces deux étapes est relativement importante, par exemple pas plus de 20 secondes d'imprécision dans le secouement et pas plus d'une minute d'imprécision dans le temps d'agrégation.
5. Pendant ce temps, si cela n'a pas été préparé à l'avance, remplir un deuxième tube ou une bouteille de centrifugeuse avec 30 ml ou 30 g d'eau, pour préparer une dilution de 0,5 ml de KMnO<sub>4</sub> à 30 ml d'eau. Cette dilution permettra la lecture de la couleur dans le colorimètre.
6. Diluer la solution agrégée de KMnO<sub>4</sub> dans le tube avec 30 ml d'eau (la solution de KMnO<sub>4</sub> sans dilution sera trop sombre pour être lue). Prendre 0,5 ml de cette solution agrégée avec un goutte-à-goutte gradué ou transférer par pipette de la couche supérieure de liquide dans le flacon, en prenant soin de s'assurer qu'il y a exactement 0,5 ml dans le

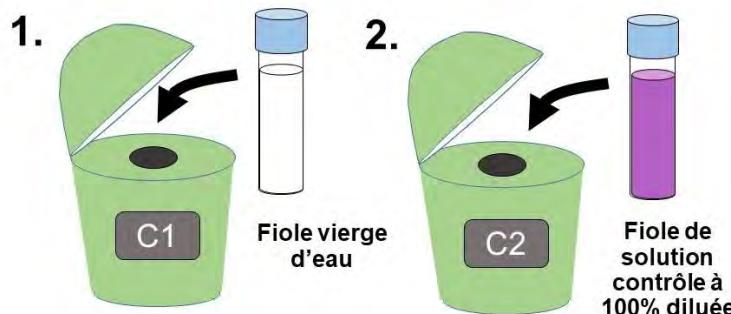
flacon. Ajouter ces 0,5 ml aux 30 ml d'eau dans le tube, puis rincer la pipette ou le goutte-à-goutte avec les 30 ml (aspirer et expulser) pour transférer toute la couleur au tube.

7. Un tube de « contrôle » contenant une solution 100% KMnO<sub>4</sub>, directement de la bouteille et sans avoir réagi avec le sol, est également nécessaire pour la comparaison avec l'échantillon de sol. Pour ce faire, diluer 0,5 ml de la solution directement à partir de la bouteille de réactif où elle a été préparée et diluer en ajoutant à 30 ml d'eau.
8. La dernière étape de la mesure est de lire la couleur de la solution diluée (étape 5) par rapport à la couleur de la solution 100% diluée (étape 6). La mesure avec le colorimètre se fait de la manière suivante (voir les figures 25 et 26) :
  - a. Insérer une fiole dans le colorimètre avec de l'eau propre comme valeur vierge.
  - b. Appuyer sur le bouton pour allumer et attendre « C1 » à l'écran (Fig. 25)



**Figure 25.** Mesure de la valeur de l'échantillon pour la solution de permanganate ayant réagi avec le sol.

- c. Appuyer à nouveau sur le bouton pour mesurer le flacon vierge et attendre « C2 » à l'écran
- d. Verser environ 10 ml de la solution diluée avec du sol et diluée (étape 5) dans une autre fiole propre pour lecture dans le colorimètre. Appuyer sur le bouton.
- e. Attendre la valeur du résultat à l'écran, qui sera habituellement entre 0 et 22.
- f. Pour mesurer le contrôle à 100 %, répéter les étapes de (a) à (e), répéter la fiole vierge comme C1 et insérer une fiole avec la solution diluée à 100 % (à partir de l'étape 6) au lieu de la solution ayant réagi avec le sol comme C2 ; voir la figure 26.



**Figure 26.** Mesure de la valeur du contrôle à 100 % de la solution de KMnO<sub>4</sub> non réagie.

g. Il n'est pas nécessaire de répéter la mesure de la solution à 100 % pour chaque échantillon de sol. La solution de contrôle à 100 % peut n'être remesurée que tous les 3 ou 4 échantillons. Dans les calculs ci-dessous, pour la valeur de 100%, les deux mesures les plus proches de 100% peuvent être utilisées, en utilisant leur valeur moyenne.

#### **3.4.2.4. Calculs pour déterminer le carbone oxydable au permanganate (POXC) ou le carbone actif :**

1. Trois éléments d'information provenant de chaque échantillon sont utilisés ensemble pour calculer ce résultat : le poids du sol introduit au test (environ 2,5 g, par exemple), la valeur de l'échantillon ayant réagi avec le sol dans le colorimètre, et la valeur de la solution de KMnO<sub>4</sub> à 100% (sans avoir réagi avec le sol). Noter que si l'échantillon de solution perd beaucoup de sa couleur et que la valeur de l'échantillon sur le colorimètre est faible, cela signifie qu'il y avait beaucoup d'oxydation du carbone dans le sol et la valeur du carbone activé sera élevée. Quand il n'y a pas beaucoup de changement de couleur, le niveau de carbone actif est faible.
2. Exemple : Disons qu'exactement 2,50 g de sol ont été pesés pour analyser, que la valeur de la solution à 100 % est de 17,6 et que celle de l'échantillon de sol est de 13,2. Le résultat de carbone actif ou POXC serait calculé de cette façon :

- a. Tout d'abord, le changement dans la concentration de la solution KMnO<sub>4</sub> est calculé :

$$\text{Changement de la concentration de KMnO}_4 =$$

$$\left( 1 - \frac{\text{valeur de l'échantillon}}{\text{valeur de la solution contrôle à 100\%}} \right) \times 0,015 \text{ M}$$

- b. Pour cet exemple, nous obtenons le changement de concentration [1-13,7/17,6]  $\times 0,015 = 0,00375 \text{ M}$ , où M représente les moles par litre.

- c. Dans l'étape suivante, nous utilisons le volume de la solution de permanganate pour déterminer le changement dans la quantité réelle de permanganate basée sur ce changement :

$$\text{Changement du montant de KMnO}_4 = \text{changement de la concentration} \times 0,02 \text{ L}$$

Puisque la solution de 20 ml utilisée est égale à 0,02 litre.

- d. Pour cet exemple nous obtenons : Changement de quantité de KMnO<sub>4</sub> = **0,00375 M**  $\times 0,02 \text{ L} = 0,000075 \text{ moles de KMnO}_4$

- e. Pour convertir cette quantité en moles en mg de carbone activé dans le sol oxydé par le KMnO<sub>4</sub>, les auteurs de ce test ont déterminé qu'un facteur de conversion de 9000 peut être utilisé :

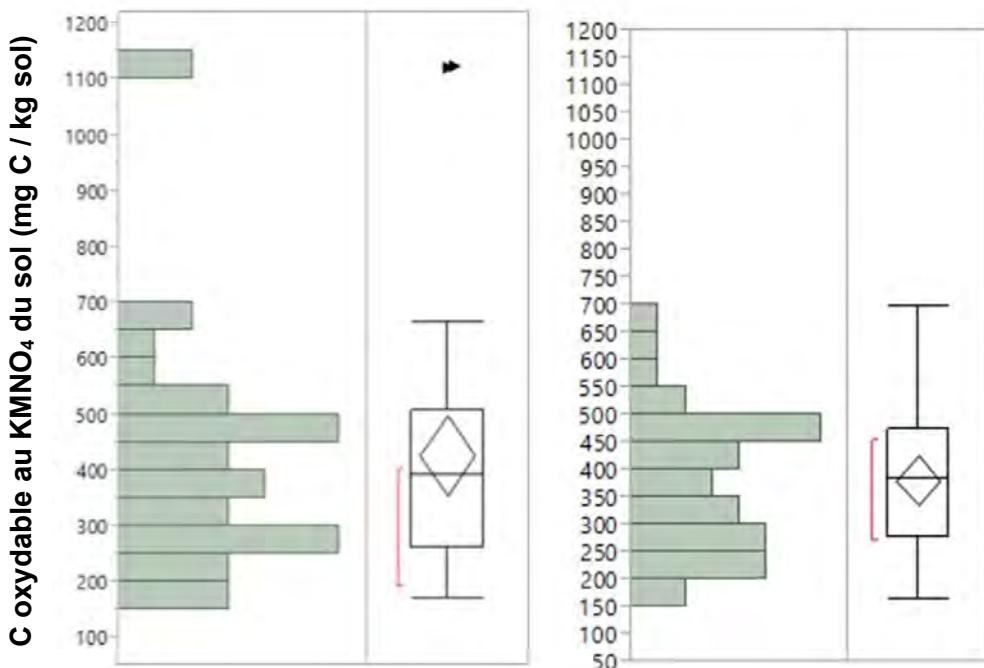
$$\text{Carbone oxydé du sol (mg)} = \text{changement du montant de KMnO}_4 \times 9000$$

- f. Dans cet exemple, le carbone oxydé du sol =  $0,000075 * 9000 = 0,675 \text{ mg}$   
 g. Cette quantité de carbone oxydé du sol (en mg) est ensuite divisée par la quantité initiale de sol utilisée (en kg) pour produire un résultat en mg/kg ou en parties par million (ppm) :

$$\text{POXC ou carbone "actif" (mg/kg)} = \frac{\text{C oxydé du sol (mg)}}{\text{poids initial du sol (kg)}}$$

- h. Dans l'exemple, POXC =  $0,675 \text{ mg} / 2,50 \text{ g de sol}$  qui est égal à  $0,675 \text{ mg} / 0,0025 \text{ kg}$ , ce qui devient enfin en faisant le calcul, **270 mg/kg de sol**.  
 i. En comparant l'histogramme des valeurs de la figure 27 et le tableau de notation en pages suivantes, nous pouvons voir que cela représente un niveau très faible à faible de POXC.

Dans la fig. 27, une gamme de valeurs typiques de POXC ou C actif du sol est indiquée, dans un graphique qui montre la répartition des valeurs des hautes terres de Bolivie ainsi que de l'ouest du Kenya.



**Figure 27.** La fréquence de répartition des valeurs pour le carbone actif mesuré avec cette méthode, à partir de 17 petits champs dans une région montagneuse de Bolivie à gauche, et 36 champs de l'ouest du Kenya à droite (comtés de Nandi et Vihiga) avec une boîte à moustaches à droite de chaque parcelle. La plage des données représente la gamme complète du test POXC décrit ici (0-1200 ppm). Dans les données de la Bolivie, les deux valeurs aberrantes élevées au sommet sont des sols de tourbe de haute altitude, cependant, ces valeurs pourraient également se produire dans les sols qui sont fréquemment modifiés avec du compost et du fumier. Données kenyanes avec l'aimable autorisation du projet CCRP *Multipurpose Legumes* et de Blessing Magonziwa.

**Tableau de notation pour interpréter les résultats du test de « carbone actif » ou de carbone oxydable au permanganate (POXC) :**

Gammes de POXC (mg/kg)	Score ou qualificatif	Description
<b>Moins de 250</b>	<b>Très faible</b>	Indique les sols qui n'ont pas reçu de contributions organiques importantes depuis de nombreuses années, ou où le sous-sol est présent en raison de l'érosion. Ces valeurs se produiront également plus fréquemment dans les sols chauds et légers texturés (sable) où les résidus organiques se décomposent rapidement et où il y a des particules de sable abondantes et denses qui diluent les valeurs de matière organique.
<b>250-400</b>	<b>Faible</b>	Indique un sol qui peut encore avoir besoin de gestion pour augmenter la matière organique afin de favoriser les microbes, la rétention d'eau et la construction de la structure du sol.
<b>400-600</b>	<b>Moyen</b>	La matière organique probablement disponible soutient la bonne fonction du cycle microbien des éléments nutritifs, de la capacité de rétention d'eau, etc. Ces valeurs peuvent également se produire dans les sols à texture lourde qui emmagasinent plus de carbone, même lorsque la matière organique du sol est sous-optimale. En revanche, dans un sol sablonneux, cette gamme de valeurs peut déjà indiquer de très bonnes concentrations de carbone organique.
<b>600-1000</b>	<b>Élevé</b>	Le sol a des niveaux élevés de matières organiques résiduelles provenant de la conversion des forêts, et/ou des efforts substantiels ont été faits pour fournir des résidus de cultures et du fumier à ces sols.
<b>Plus de 1000</b>	<b>Très élevé</b>	Ces valeurs se retrouvent dans les jardins familiaux intensément alimentés en fumier ou compostés, dans les sols récemment convertis de la forêt, ou dans les sols de tourbe des hautes terres. Elles sont bonnes pour de nombreux types de cultures, mais peuvent rarement être atteintes dans des champs céréaliers plus étendus où les intrants organiques disponibles sont limités.

#### **3.4.2.2. Exemple de table de données et de programme pour effectuer des évaluations de plusieurs échantillons en séquence :**

1. Souvent, plusieurs échantillons doivent être analysés en séquence (10 échantillons ou plus). Pour cela, il est important de se rendre compte de l'importance de maintenir le minutage exact de l'analyse (secouer 2 minutes, laisser décanter 10 minutes de la même manière pour tous les échantillons). Le tableau suivant montre un exemple de façon d'enregistrer les données sur le carbone actif et donne également des indices pour les temps suggérés pour chaque échantillon, par exemple le « temps de démarrage » lorsque le sol est ajouté à la solution, le « temps de décantation » deux minutes plus tard lorsque les tubes sont laissés après avoir été secoués, et le « temps de mesure » quand ils doivent être lus avec le colorimètre.

2. Comme le montre le tableau, si deux personnes travaillent ensemble, 5,5 minutes entre les échantillons séquentiels laissent suffisamment de temps pour toutes les différentes étapes nécessaires pour secouer et lire les échantillons, et ainsi évaluer les échantillons en série l'un après l'autre. Toutefois, ce temps de séquence peut être ajusté une fois qu'une équipe a de l'expérience. Il est particulièrement important que les échantillons soient lus 10 minutes après qu'ils ont été laissés décanter. Ceci peut prendre un peu d'entraînement , mais essayer de ne pas avoir plus d'une minute de retard (ou d'avance) car ceci fournira les meilleures données. S'il s'agit de données rigoureuses et comparables comme dans le cas d'une expérience, il est préférable de s'entraîner avec des échantillons séquentiels qui ne sont pas importants (par exemple un lot de 3-4 échantillons « jetables ») avant de commencer à utiliser des échantillons dont les données sont importantes.

**Exemple de tableau des données pour le test POXC (carbone actif), y compris les moments où les différentes étapes pour plusieurs échantillons doivent être effectuées.**

ID d'échantillon	Poids du sol en (g)	Temps de début (min)	Temps de décantation (min)	Temps de mesure (min)	Lecture dans le colorimètre
101	2.52	0	2	12	13.7
102	2.47	5.5	7.5	17.5	5.2
Contrôle de solution à 100%	--				17.4
Etc.	2.54	11	13	21	etc.
	etc.	etc.	etc.	etc.	

### **3.5. Phosphore assimilable du sol (méthode Olsen)**

Voir la vidéo sur YouTube :<https://www.youtube.com/watch?v=R1lFrMjoraE>

#### **3.5.1. Matériels et réactifs**

- 1. Eau « sans phosphore » :** en général, l'eau du robinet (approvisionnement publique) aura trop de phosphore (P) pour être utilisable. Nous avons testé différentes marques d'eau embouteillée dans plusieurs pays et généralement il y a une ou deux marques qui ont une teneur en P inférieure à 0,5 ppm (mg / l), ce qui les rend acceptables pour ce test (il y a certaines marques qui n'ont pas de P détectable, ce qui est encore mieux). Certaines entreprises publient l'analyse chimique de l'eau sur l'étiquette de la bouteille ; si la teneur en phosphore (P) est de 0,5 ppm ou moins, alors l'eau peut être utilisée.

#### **Test de la teneur en phosphore (P) de l'eau :**

Si vous voulez tester la teneur en phosphore (P) de l'eau, la méthode suivante peut être utilisée avec les mêmes réactifs et colorimètre qui sont utilisés pour le test du sol :

- Placez 10 ml d'eau à tester dans un tube pour colorimètre, et 10 ml dans un autre tube pour une mesure à blanc, sans couleur.
  - Ajoutez un paquet de réactif dans un des tubes comme indiqué dans la méthode ci-dessous (étape 14) ; **À noter:** il n'est pas nécessaire de neutraliser l'échantillon d'eau avec du bisulfate de sodium comme dans le test du sol, et vous pouvez ajouter directement le réactif.
  - Fermez le tube du réactif, bien le secouer et attendre 10 minutes. En général, l'eau prendra une couleur bleu très légère, ou pas de couleur du tout.
  - Lisez la couleur du tube avec le colorimètre tel que décrit à l'étape 17 ci-dessous, en utilisant l'eau sans réactif ajouté (blanc C1). La valeur qui apparaît dans le colorimètre doit être soustraite à l'estimation du phosphore à partir de l'extrait de sol avant de calculer la concentration de P dans le sol (voir 3.5.5 pour les calculs).
- Si la valeur est nulle, alors aucune correction ne devra être appliquée.

- 2. Bicarbonate de sodium ( $\text{NaHCO}_3$ ) :** celui-ci doit également avoir une teneur assez faible en P afin d'éviter d'introduire des erreurs dans le test, comme décrit ci-dessus. Des tests effectués au Malawi, par exemple, ont montré que le bicarbonate de sodium acheté dans les supermarchés avait de faibles teneurs en P et pouvait donc être utilisé. Ainsi, les options locales peuvent fonctionner si elles sont testées en préparant la solution Olsen et en la testant avec la procédure ci-dessous, mais sans la faire réagir avec le sol. Le bicarbonate de qualité réactif sera généralement assez pur sans test.

- 3. Hydroxyde de sodium ( $\text{NaOH}$ ) :** il n'est pas présent en grandes quantités dans la solution, de sorte qu'il ne contribuera généralement pas à de grandes impuretés en phosphore.

- 4. Bisulfate de sodium ou hydrogénosulfate de sodium ( $\text{NaHSO}_4$ ) :** utilisé pour acidifier l'extrait de sol en préparation de la réaction colorée ; approximativement 0,45 g par échantillon. Il est possible de le remplacer par de l'acide de batterie, voir pour cela la recette de la solution de bisulfate de sodium ainsi que les instructions ci-dessous pour acidifier l'extrait de sol (étape 8).

- 5. Paquet de réactif phosphate de gamme basse** (Hanna Instrument, produit n° 93713-01, voir les matériels et réactifs au début de ce manuel) ; un paquet par analyse.
- 6. Balance** : avec au moins une précision de 0,01 g.
- 7. Solution d'extraction Olsen** (voir la recette ci-dessous) : cette solution ne conserve pas ses propriétés et il est préférable de la préparer peu de temps avant de faire l'analyse (au maximum 1 semaine si elle est stockée au réfrigérateur).
- 8. Colorimètre de terrain Hanna** de gamme haute (voir la partie sur les matériels dans la partie 2 au début). Notez que nous utilisons intentionnellement des réactifs de gamme basse le colorimètre de gamme haute.
- 9. Une éprouvette** de 25 ml avec des graduations de 1 ml au moins (voir les photos ci-dessous dans le manuel).
- 10. Une bouteille ou un tube** pour agiter et extraire le sol avec la solution Olsen. Ce peut être une bouteille en plastique, bien lavée et de 250 ml (<300 ml par exemple) ou un tube pour centrifugeuse de 50 ml.
- 11. Une deuxième bouteille pour filtrer**, avec un goulot plus large, par exemple de 4 cm de diamètre, et qui peut contenir 300 à 500 ml, comme par exemple une bouteille de lait ou de yogourt liquide. Cette deuxième bouteille est percée au niveau de son bouchon avec une aiguille à coudre. Si l'intérieur du bouchon n'est pas complètement plat et inclut un anneau de maintien au goulot de la bouteille, il est nécessaire d'enlever cet anneau. Voir la vidéo qui décrit l'ensemble de l'équipement de filtration de l'extrait de sol à : [https://www.youtube.com/watch?v=FEcQOSA\\_ur4](https://www.youtube.com/watch?v=FEcQOSA_ur4)
- 12. Important** : les deux bouteilles doivent être soigneusement lavées à l'eau et rincées à l'eau propre ou à l'eau distillée, afin de ne pas contaminer l'échantillon avec du P soluble.
- 13. Des filtres à papier** : filtres à café coniques pour y découper des cercles, ou filtres de laboratoire (Whatman n° 5, voir le matériel au début du manuel). Pour les sols très argileux, les filtres à café s'obstruent et sont trop lents ; dans ce cas, les filtres de laboratoire n° 5 doivent être utilisés.
- 14. Des flacons transparents de 11 ml, de 19 mm de diamètre** : ces flacons sont utilisés avec le colorimètre Hanna afin de lire la couleur bleue due à la réaction avec le phosphate ; ce sont les mêmes flacons que ceux utilisés pour le test POXC ci-dessus, voir 3.4.2.
- 15. Des petites tasses en plastique** pour recueillir l'extrait filtré et pour l'acidifier (2 tasses par test, d'environ 6 cm de large et de 8 cm de hauteur).
- 16. Une pissette** avec une buse afin de faciliter le rinçage et l'addition précise d'eau pour obtenir des dilutions au volume souhaité.

### **3.5.2. Préparation de la solution Olsen :**

1. Définition standard de la solution d'extraction Olsen constituée de 0,5 M (moles par litre) de NaHCO<sub>3</sub> tamponnée à pH 8,5 par NaOH :
2. Pour chaque 100 ml de solution, mettre 100 ml d'eau « sans P » dans une bouteille propre (rincée avec de l'eau sans P) et ajouter 4,20 +/- 0,01 g de NaHCO<sub>3</sub> (0,05 moles). Il est préférable de faire exactement la quantité suffisante (plus une petite marge) pour

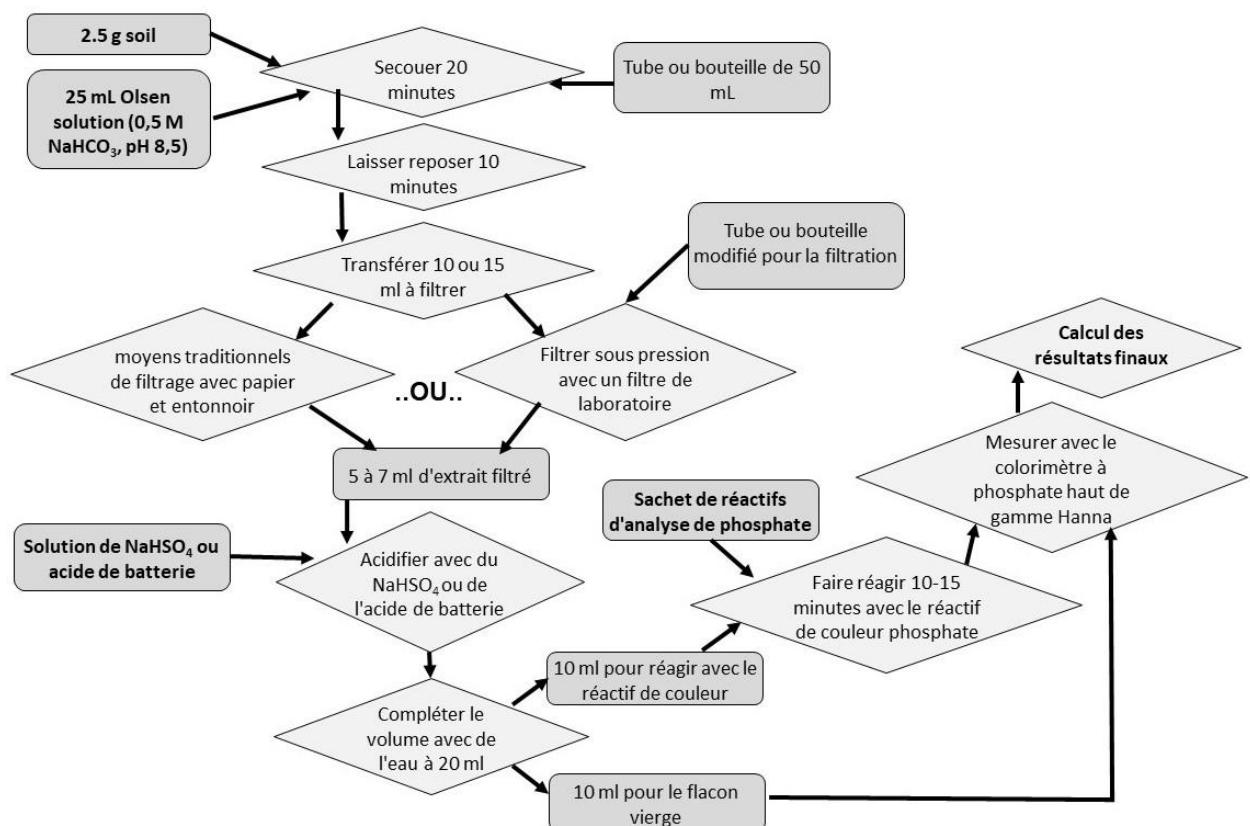
chaque analyse, celle-ci devra être utilisée en quelques jours. Chaque analyse utilise 25 ml de solution.

3. Remuer ou secouer la solution jusqu'à ce que le NaHCO<sub>3</sub> se dissolve. Cela peut prendre 5 à 10 minutes car le bicarbonate n'est pas un sel très soluble.
4. Le pH de cette solution devra être de 7,7 à 7,9 environ. Après avoir mesuré le pH de la solution à l'aide d'un pH-mètre calibré ou de papier pH, ajoutez de petites quantités de NaOH (p. ex. 0,1 g s'il s'agit de 100 ml ; 0,2 à 0,5 g s'il y a plus de solution) et remuez à l'aide d'une spatule ou d'une petite cuillère, ou en faisant tournoyer la bouteille. Mesurez le pH et ajoutez du NaOH jusqu'à ce que la solution atteigne un pH de 8,5 +/- 0,05 (toute valeur comprise entre 8,45 et 8,55 est acceptable).

### **3.5.3. Préparation de la solution de neutralisation/acidification à base de hydrogénosulfate de sodium (bisulfate de sodium)**

1. Mélangez 15,0 g (0,2 g) de hydrogénosulfate de sodium (NaHSO<sub>4</sub>) dans 100 ml d'eau, en mesurant l'eau par pesée ou avec une éprouvette.
2. Conservez-la dans une bouteille en plastique et éviter tout contact avec la peau et les yeux. Cette solution acide se conserve très bien et peut être utilisée pendant plusieurs mois. Vous aurez besoin de 3 ml pour chaque analyse et il faudra donc mélanger 100 ml à chaque fois pour 33 échantillons au maximum.
3. ***Si vous souhaitez utiliser l'acide dilué de batterie comme produit de substitution :*** soigneusement, avec des gants et des lunettes, dans un espace bien ventilé ou à l'extérieur, diluez avec précision l'acide de batterie avec de l'eau (v:v 3+1 : ajoutez 3 parts d'eau « sans P » pour une part d'acide de batterie). Cette concentration d'acide (7,5 %) peut maintenant être manipulée dans une bouteille en plastique et avec un goutte-à-goutte, sans représenter de risques d'inhalation. Il faut être attentif dans la mesure où cette solution peut détruire les vêtements et brûler la peau si elle n'est pas rincée rapidement avec de l'eau. L'annexe du chapitre 3.5.6 présente la méthode pour tester cet acide de batterie dilué afin de connaître quel volume est à utiliser pour neutraliser les extraits provenant des échantillons de sol.

### 3.5.4. Procédure (fig. 28)



**Figure 28.** Schéma pour l'analyse du phosphore assimilable du sol (P).

1. Pesez 2,5 g de sol tamisé (2 mm) dans un tube pour centrifugeuse ou une autre bouteille.
2. À l'aide d'une éprouvette, ajouter 25 ml de solution Olsen à l'échantillon de sol dans la bouteille ou le tube pour centrifugeuse (fig. 29). Pour gagner du temps, lorsque de nombreux échantillons doivent être analysés, la solution Olsen peut être mesurée ou pesée au préalable dans des bouteilles avant d'ajouter le sol.



**Figure 29.** Ajout de 25 ml de solution Olsen sur le sol dans une bouteille de jus réutilisée pour commencer l'extraction.

3. Fermez le bouchon de la bouteille et secouez-la pendant 10 minutes. Si c'est fait à la main, il est possible d'alterner cette tâche avec d'autres tâches en posant brièvement la bouteille.
4. Laissez la suspension se déposer 10 minutes. Certaines argiles se déposeront pendant ce laps de temps, mais une solution transparente n'est pas nécessaire.
5. Il existe ensuite différentes alternatives pour la filtration : (1) par filtrage traditionnel avec du papier filtre plié en cône; (2) en utilisant du papier filtre de laboratoire et un filtre-presse pour accélérer le filtrage de chaque échantillon et (3) en utilisant un filtre-presse et du papier filtre provenant de filtres à café coniques, ce qui est généralement efficace pour les sols aux textures légères et limoneuses. Pour créer un filtre-presse, une bouteille est utilisée pour la filtration sous pression, avec un filtre inséré dans le couvercle de la bouteille avec des trous pour permettre au filtrat de passer. Voir la vidéo qui décrit l'installation nécessaire pour la filtration des extraits de sol à :  
[https://www.youtube.com/watch?v=FEcQOSA\\_ur4](https://www.youtube.com/watch?v=FEcQOSA_ur4). Dans tous les cas, il est important de pratiquer cette étape pour produire en toute confiance un extrait filtré sans turbidité (argiles en suspension), ce qui invaliderait la mesure de la couleur bleue et donc l'estimation de la teneur en phosphore :

**Si vous utilisez du papier filtre de laboratoire traditionnel plié dans un entonnoir :**

- i. Pliez le papier filtre n° 5 Whatman (pore de taille 2,5 microns) en quatre pour produire un filtre en forme de cône. Certaines personnes fabriquent ainsi un entonnoir très large et peu profond qui peut être placé facilement dans un gobelet en plastique et qui laisse passer le filtrat directement dans ce dernier (fig. 30).
- ii. À l'aide d'une pipette ou en versant l'extrait Olsen, transférez celui-ci dans l'entonnoir en papier filtre.
- iii. Attendez 20 ou 30 minutes pour que 5 à 7 ml soient filtrés (idéalement 7 ml).



**Fig. 30.** L'utilisation directe de papier filtre, plié dans un large entonnoir sur un gobelet en plastique, pour filtrer l'extrait de sol

**Si vous utilisez du papier de filtres à café et un filtre-presse :**

- i. Transférer le surnageant (suspension d'argile dans la partie supérieure de la bouteille) à partir de la bouteille d'extraction vers une autre bouteille de filtration. Cette dernière doit avoir un bouchon dont la surface interne est plane afin de pouvoir placer un filtre en forme de cercle, et de faire des petits trous dans le bouchon (trous de diamètre de 1 mm) pour que le liquide filtré puisse couler. Voir la vidéo sur YouTube mentionnée ci-dessus.

- ii. Une double couche de papier de filtre à café découpé en cercles est insérée dans le bouchon perforé de cette bouteille. Ensuite, à la main ou avec une presse en bois (voir les figures 32 et 33), appuyez sur la bouteille jusqu'à ce que vous voyiez des gouttes sortir.
- iii. Ne collectez pas ces premières gouttes car elles sortiront avec un peu d'argile et avec de la turbidité. Au fur et à mesure, les gouttes deviennent plus transparentes, bien que la solution transparente ait toujours une couleur brun clair, mais ce qui est convenable.
- iv. Après avoir jeté les premières gouttes si elles sont troubles, commencez à recueillir les gouttes claires dans un verre propre jusqu'à ce que vous ayez un volume compris entre 5 et 7 ml. Le volume de 7 ml est indiqué s'il n'y a aucun problème dans la collecte de cette solution. Ce processus peut prendre jusqu'à 10 minutes, il est donc recommandé d'utiliser la presse en bois (fig. 33) pour être libre d'effectuer d'autres travaux, surtout s'il y a beaucoup d'échantillons à analyser.



**Figure 31.** Placer une double couche de papier de filtre à café sous le bouchon de la bouteille.



**Figure 32.** Appuyer sur la bouteille à la main pour créer l'extrait de sol filtré.

#### **Si vous utilisez des filtres en papier de laboratoire Whatman 5 et un filtre-presse :**

- i. La bouteille d'extraction ne doit pas être trop déplacée afin de ne pas déranger les argiles qui s'y sont déposées.
- ii. À l'aide d'une pipette ou d'un compte-gouttes, transférez 10 à 15 ml de la partie supérieure de la suspension de sol depuis la bouteille d'extraction vers la nouvelle bouteille pour la filtration. Cette suspension sera encore trouble, mais l'idée est d'avoir le moins d'argile possible afin de ne pas trop obstruer le papier filtre. Voir la vidéo mentionnée ci-dessus sur le matériel pour plus de détails sur la méthode de filtration.
- iii. Placez un seul cercle (pas deux) de papier filtre à l'intérieur du bouchon troué et le placer soigneusement, mais fermement, sur la bouteille pour filtration. Un serrage excessif du bouchon peut déchirer le papier filtre, et il ne doit donc pas être trop serré. Par tâtonnement vous saurez si l'étanchéité est correcte.
- iv. Retournez la bouteille et pressez-la à la main ou avec un filtre-presse qui peut être fabriqué à cet effet (fig. 33 ci-dessous)

- v. Les gouttes qui sortent du filtre doivent être claires et sont collectées directement dans un verre propre (contrairement aux premières gouttes avec l'option « filtre à café » décrit précédemment). Si elles sont troubles, vous devriez vérifier s'il n'y ait pas des déchirures ou des fissures dans le filtre.
- vi. Continuez à collecter les gouttes jusqu'à obtenir entre 5 et 7 ml pour les prochaines étapes (7 ml est mieux).



**Figure 33.** Une presse à bouteille pour aider à la filtration avec des bouteilles et du papier filtre dans les bouchons, ce qui permet de maintenir la pression sur les bouteilles et d'utiliser un filtre de laboratoire ou un filtre à café pour extraire les argiles de l'extrait. Cette approche permet de gagner du temps car tout en pressant les bouteilles, on peut faire d'autres tâches.

6. Indépendamment de la méthode de filtration ci-dessus (filtres à café ou de laboratoire), continuez à filtrer les gouttes claires dans le gobelet jusqu'à ce que vous ayez 7 ml ou un peu plus. Si la filtration est très difficile, vous pouvez réduire le volume à une valeur comprise entre 5 et 7 ml, mais vous devrez alors réduire proportionnellement la quantité de solution de bisulfate de sodium lors de l'étape d'acidification décrite ci-dessous (voir tableau ci-après).
7. Versez exactement 7 ml de filtrat (ou moins si le filtrage a été difficile) dans une éprouvette propre ou récemment rincée (enlever tout excès d'eau en cas de rinçage).

Volume (ml) d'extrait de sol filtré	Volume (ml) de solution de bisulfate ou hydrogénosulfate de sodium de sodium à ajouter pour acidifier la solution	Alternative : volume (ml) d'acide dilué de batterie (3+1) à ajouter
5	2,25	1,1
6	2,75	1,3
7	3,10	1,5

8. Versez les 7 ml de la solution de sol dans un gobelet en plastique propre, puis à l'aide d'une pipette propre ou d'un compte-gouttes gradué, ajouter 3,1 ml de la solution de bisulfate de sodium à 15 g/100 ml préparée précédemment (étape 3.5.3 au début du protocole).
9. Si vous souhaitez utiliser l'acide dilué de batterie comme produit de substitution : ajoutez 1,5 ml (au lieu de 3,1 ml) d'acide de batterie dilué pour 7 ml d'extrait filtré. Vous pouvez ajouter moins de solution de bisulfate ou d'acide dilué de batterie si vous avez obtenu moins de filtrage (voir le tableau ci-dessus pour le bisulfate et les quantités d'acide de batterie diluée avec un rapport acide-eau de 1-3). Avec des échantillons de sol très calcaires, vous pouvez ajouter quelques gouttes supplémentaires de solution de bisulfate ou d'acide de batterie afin de neutraliser les carbonates supplémentaires de la solution.
10. La solution bouillonne au fur et à mesure que les bicarbonates sont neutralisés (fig. 34). Le bisulfate de sodium ou hydrogénosulfate de sodium (ou l'acide dilué de batterie) abaisse le pH de l'extrait de 8,5 à 6 environ, de sorte que quand les réactifs sont ajoutés, ceux-ci peuvent abaisser le pH jusqu'à 1 ou 2 environ, valeur à partir de laquelle apparaît la couleur bleue due au complexe d'acide molybdate-ascorbique. Sans ce faible pH, la couleur bleue (proportionnelle à la concentration de phosphore) ne pourrait pas apparaître.



**Figure 34.** Mélange de 3 ml de hydrogénosulfate de sodium (dans une solution de 15 g de NaHSO<sub>4</sub> par 100 ml) pour acidifier 7 ml d'extrait filtré. Notez le bouillonnement de l'extrait de sol alors que le bicarbonate réagit avec l'acide bisulfate.

11. Tout en laissant la solution bouillonner du fait du CO<sub>2</sub> du bicarbonate, afin de gagner du temps, un pack de réactif peut déjà être versé dans un flacon de colorimètre propre et sec pour l'étape 14 ci-dessous (fig. 36).
12. Quand le bouillonnement s'est estompé, versez l'extrait acidifié du gobelet vers l'éprouvette de 25 ml. Rincez le gobelet avec un peu d'eau (4 ml à chaque rinçage) avec la pissette et ajoutez cette eau de rinçage dans l'éprouvette. Ensuite, remplissez l'éprouvette jusqu'à un volume final de 20 ml +/- 0,2 ml (fig. 35). Vous disposerez ainsi de 10 ml d'extrait dilué pour le flacon avec le réactif, et de 10 ml comme contrôle sans

réactif à placer dans le colorimètre (l'extrait sans réactif sera jaune à brun et cette couleur servira de « blanc » dans le colorimètre pour corriger l'extrait avec réactif).



**Figure 35.** La solution extraite et filtrée a été acidifiée et portée à un volume standard de 20 ml. Elle est prête à réagir avec le réactif pour développer la couleur bleue, qui sera ensuite lue par le colorimètre.

13. **Important** : mélangez bien l'échantillon avant de le placer dans le flacon pour effectuer la réaction colorimétrique, en en faisant plusieurs fois des va-et-vient du gobelet à l'éprouvette.
14. Ajoutez le contenu du sachet de réactif dans un flacon propre et sec (fig. 36). Vous pouvez couper le paquet directement sur le dessus, puis ouvrir l'emballage en forme de carré ou de diamant, et versez le contenu en plusieurs fois, pour s'assurer que tout le réactif a bien été versé dans le flacon.



**Figure 36.** Sachet de réactif au phosphate versé dans un flacon propre et sec.

15. Ajouter 10 ml des 20 ml de l'extrait contenus dans l'éprouvette dans le flacon avec les réactifs. Marquez une ligne de 10 ml à l'avance ou versez jusqu'à ce que l'espace entre le ménisque (surface du liquide) et le bouchon soit le même que l'épaisseur du bouchon, ce qui équivaut à 10 ml.

16. Ajoutez la solution restante dans le tube à essai dans un flacon de contrôle « blanc », sans réactif. Pour les échantillons de même type de sol, la même solution de contrôle peut être utilisée pour plusieurs échantillons car la couleur jaune ou brune de l'extrait sera identique. Lorsque de grandes différences de matière organique existent entre les échantillons, le flacon de contrôle sera plus sombre pour les sols possédant plus de matière organique ; un flacon de contrôle différent devra alors être utilisé pour chacun de ces différents sols.

17. Bouchez et secouez le flacon avec le réactif. Vous devrez peut-être le dévisser une ou deux fois pour libérer les bulles. Si, lors de l'apport du réactif, de nombreuses bulles se forment comme dans l'étape d'acidification ci-dessus, c'est le signe que la quantité de bisulfate n'a pas été suffisante pour acidifier, peut-être parce que le sol est trop calcaire. Dans ce cas, il faudra peut être ajouter encore quelques gouttes de solution de bisulfate (jusqu'à 0,2 ml) avant de lire le résultat. Cependant, notez qu'il est normal que la solution libère des bulles en présence du réactif.

18. Une couleur bleue devrait apparaître dans le flacon avec réactif (fig. 37). Lisez cette couleur bleue grâce au colorimètre de gamme haute Hanna phosphate après environ 10 à 15 minutes comme suit :

- Allumez le colorimètre.
- Lorsque C1 apparaît, placez le flacon de contrôle (couleur brun clair ou clair, pas de réactif) et appuyez sur le bouton.
- Lorsque C2 apparaît, mettez le flacon avec le réactif à la place de celui de contrôle (de couleur bleue, s'il y a du phosphate présent) et appuyez sur le bouton.
- Notez la lecture en ppm de phosphate. Rappelez-vous que cette lecture n'est pas le résultat final parce que vous devez encore effectuer les étapes d'étalonnage et les calculs finaux.



**Figure 37.** Une couleur bleue se développe dans l'extrait avec le réactif. L'autre flacon de couleur jaune sert de contrôle pour le colorimètre.

19. Il est possible que, lorsque le test est effectué les premières fois, vous souhaitez répéter les lectures après 20, 25 et 30 minutes, afin de voir si la coloration continue.

- La couleur bleue devrait atteindre un maximum après 15 à 20 minutes, mais change peu après 15 minutes.
20. Dans de nombreux sols, après 30 minutes environ, la couleur bleue se combine avec la matière organique (MO) dissoute par l'extraction Olsen et produit des particules bleues ainsi qu'un précipité. À partir de là, il ne faut pas faire de lecture avec le colorimètre car la couleur bleue commence à s'estomper. Dans les sols très riches en matière organique, ce processus de précipitation peut compliquer la lecture dès 20 minutes, et il est alors nécessaire de présumer quel est le meilleur moment pour faire la lecture, et de le noter dans les observations.
  21. Si le niveau de lecture dépasse la limite étalonnée ci-dessous, c.-à-d. supérieure à 20 ppm lus par le colorimètre, il est conseillé d'utiliser moins de sol dans l'analyse (par exemple 1,5 g au lieu de 2,5 g) afin de réduire le niveau de phosphate qui sera lu par le colorimètre.

22. Manipulation des déchets issus de la réaction : mettre les réactifs dilués dans un sol infertile ou dans un compost ne causera probablement pas d'effets indésirables ou toxiques ; le molybdène peut même agir comme nutriment pour les plantes. Il peut également être éliminé dans un système d'assainissement public. Les extraits lus par le colorimètre (qui sont acides) peuvent être neutralisés avec un peu de cendres d'un foyer ou de cuisine.

### **3.5.5. Calcul du phosphore (P) assimilable Olsen dans le sol :**

1. Tout d'abord, la concentration brute de phosphore dans la solution finale placée dans le colorimètre est calculée au moyen d'une courbe d'étalonnage précédemment développée :

$$\text{Conc. brute de } P = P_{brute} = 0,0559 \times \text{lecture du colorimètre} - 0,0052$$

2. Si une valeur « blanche » a été enregistrée lorsque les réactifs sont vérifiés pendant la préparation de ce test, celle-ci reflèterait une légère contamination de l'eau ou du bicarbonate de sodium utilisé (voir 3.5.1, partie sur le test de la teneur en phosphore de l'eau). Dans ce cas, cette équation est légèrement modifiée afin de refléter la valeur « contrôle ») :

$$\begin{aligned} \text{Conc. brute de } P &= P_{brute} \\ &= 0,0559 \times (\text{lecture du colorimètre} - C_{blanc}) - 0,0052 \end{aligned}$$

3. Où  $C_{blanc}$  est la valeur du « blanc » mesuré avec le colorimètre pour un échantillon d'eau propre. Si le bicarbonate utilisé a été acheté dans un supermarché, il est préférable de supposer qu'il existe un certain niveau de contamination et d'utiliser la valeur  $C_{blanc} = 0,2$ .

4. La concentration de P dans l'extrait original est calculée après avoir mélangé la solution Olsen avec le sol :

$$\text{Conc. P dans l'extrait} = [P_{extrait}]$$

$$= P_{brute} \times \frac{20 \text{ ml}}{\text{ml de solution de neutralisation}} (\text{mg/l})$$

5. Où « ml de solution de neutralisation » fait généralement référence aux 7 ml mesurés pour la neutralisation avec du bisulfate de sodium ; cette valeur peut varier entre 5 et 7 (voir l'étape 6 ci-dessus)
6. Où  $[P_{extrait}]$  est la concentration (mg/l) de phosphore dans l'extrait à partir de laquelle nous pouvons calculer la quantité (mg) de phosphore dans l'extrait, de la façon suivante :

$$\text{Quantité } P \text{ dans l'extrait (mg)} = P_{extrait}(\text{mg}) = [P_{extrait}] \times 0,025 \text{ l}$$

en se rappelant que 25 ml d'extrait du sol ont été créés au total, soit l'équivalent de 0,025 l.

7. Enfin, pour calculer la quantité de phosphore disponible dans le sol, nous divisons cette quantité en mg par le poids initial du sol en kg :

$$P_{disponible \text{ dans le sol (mg/kg)}} = \frac{P_{extrait}}{\text{poids initial du sol (kg)}}$$

8. Ne pas oublier que le poids en grammes du sol doit être divisé par 1 000 afin d'obtenir le poids en kg : par exemple 0,0025 kg équivaut à 2,50 g ou encore 0,00243 kg équivaut à 2,43 grammes de sol sec.
9. Dans le cas où nous utilisons un sol humide, nous devons ajuster les résultats à l'humidité du sol, ce qui se fait en divisant le résultat par [1 - teneur en eau de l'échantillon]. L'humidité doit être mesurée séparément, ou évaluée approximativement grâce à une classification visuelle comme celle de l'annexe A.

#### **Exemple de calcul des résultats :**

10. 2,63 g de sol sont initialement pesés. Puis 7 ml d'extrait sont filtrés pour la neutralisation ; l'analyse de la couleur par le colorimètre a donné une intensité de 14,5 unités. De l'eau distillée et un réactif en bicarbonate ont été utilisés qui n'ont aucune teneur en phosphore détectable. La concentration en P disponible est calculée comme suit :

- a.  $P_{brute} = 0,0559 \times 14,5 - 0,0052$  (sans correction pour la valeur blanche) = **0,8503 mg/l**
- b.  $[P_{extrait}] = 0,8503 \times (20/7) = 2,429 \text{ mg/l}$
- c. La quantité de P extraite est de :  $2,249 \text{ mg/l} \times 0,025 \text{ l} = 0,06074 \text{ mg}$
- d. La concentration de P disponible dans le sol est donc :

$$P \text{ disponible} = 0,06074 \text{ mg} / 0,00263 \text{ kg} = \mathbf{23,1 \text{ mg/kg}}$$

- e. Cela correspond à un niveau élevé de P disponible selon le tableau d'interprétation des résultats ci-après. Gardez à l'esprit qu'en réalité ce résultat correspond au « P assimilable » selon une certaine méthode (celle Olsen). Cette estimation du P disponible rend possible la comparaison de différents sols et l'évaluation de leur fertilité en P ; ce n'est pas la définition absolue du P disponible pour les plantes qui dépend de nombreux autres facteurs.

**Tableau de notations qualitatives pour le P assimilable selon la méthode Olsen :**

Teneur du Phosphore assimilable selon Olsen (mg/kg)	Notation	Description
0 à 5	<b>Très faible</b>	La biomasse, la vigueur et la maturité de la plupart des cultures seront sévèrement limitées et des symptômes de carence peuvent se produire, surtout lorsque le P est le seul nutriment qui soit limité ; si les cultures sont multipliées, la croissance peut être globalement limitée (faible biomasse).
5 à 10	<b>Faible</b>	Les cultures peuvent présenter une réponse maximale puisque du P est présent, mais pas suffisamment, pour alimenter la croissance des cultures et leur vigueur.
10 à 20	<b>Moyenne</b>	Beaucoup de cultures réagiront encore à des apports supplémentaires de fumier, de compost ou d'engrais P, en particulier les légumineuses et de nombreux légumes à fleurs et à fruits. Certaines céréales « efficientes pour le P » peuvent atteindre la suffisance.
20 et au-delà	<b>Élevée</b>	La plupart des cultures ne seront pas limitées par la fertilité en P. Certains légumes et mauvaises herbes peuvent cependant continuer à mieux réagir à des niveaux toujours plus élevés de P, par exemple de 30 à 50. Les valeurs supérieures à 50 indiquent une allocation inefficace et excessive du phosphore dans ces champs, une pollution nutritive des sols et, éventuellement, des bassins versants.

**3.5.6. Annexe :** vérification de la quantité d'acide de batterie dilué nécessaire pour neutraliser les solutions d'extrait Olsen :

1. Si vous souhaitez remplacer le bisulfate de sodium par de l'acide de batterie dilué (voir les matériels dans le chapitre 3.5.3), vous pouvez utiliser 1,5 ml d'acide de batterie dilué comme suggéré à l'étape 9 de la procédure, mais vous pouvez également vérifier que cette quantité neutralise correctement l'extrait de sol. L'acide de batterie est dilué dans de l'eau (v:v 3+1 : 3 parts d'eau « sans P » pour une part d'acide de batterie). Avoir sous la main une pipette ou une petite éprouvette afin de pouvoir ajouter des quantités précises d'acide dilué à la solution Olsen, cette dernière également préparée selon ce qui est décrit le chapitre sur les matériels

- 2.** Vous aurez également besoin d'un pH-mètre ou de papier pH pour vérifier le pH de la solution Olsen.
- 3.** Placez 70 ml de solution Olsen (sans ajouter de sol ou autre matériel) dans un bécher ou un récipient. Mesurez le pH de cette solution, qui devra être de 8,5 environ.
- 4.** Ajoutez de petites quantités d'acide de batterie dilué dans le bécher ou le récipient contenant la solution Olsen, en commençant par 1 à 2 ml, tout en vérifiant que le pH baisse.
- 5.** Mesurez la quantité d'acide de batterie diluée nécessaire pour abaisser le pH de la solution Olsen jusqu'à une valeur comprise entre 6,0 et 6,2. Il s'agira probablement d'environ 15 ml d'acide dilué.
- 6.** Étant donné que 70 ml de solution Olsen ont été utilisés pour ce test d'étalonnage et que 7 ml seulement sont neutralisés lors de la procédure principale (voir les étapes 8 et 9 de la procédure principale), vous devez diviser la quantité d'acide dilué que vous avez mesurée dans cet exercice par 10. Donc si 17 ml ont été nécessaires, vous ajouteriez 1,7 ml à l'étape 9, au lieu des 1,5 ml suggérés.

### 3.6. Test de l'azote des sucres aminés pour déterminer l'azote du sol disponible du sol à moyen terme



**Figure 38.** Un bocal où le test a lieu, avec du sol digéré par une solution basique ci-dessous (couleur foncée) et une tasse d'acide borique avec un indicateur de couleur rouge suspendu au-dessus.

#### La méthode en bref – Azote contenu dans les sucres aminés (*Amino Sugar Test, Khan et al., 2001*)

##### 3.6.1. Matériel :

- Une plaque chauffante pouvant maintenir la température entre 45 et 50° C (48 à 50° C serait l'idéal)
- Des bocaux en verre modifiés pour permettre de suspendre un petit gobelet de 5 ml à l'intérieur
- Eau distillée pour la solution d'indicateur (10 ml au total par test)
- Acide borique ( $\text{HBO}_3$ )
- Une balance numérique de précision 0,01 g (10 mg) : celle-ci peut être remplacée par des pipettes graduées. Toutefois, elle sera nécessaire dans tous les cas pour peser une quantité exacte de sol. Cette balance facilitera beaucoup le titrage à la fin et il est donc très utile d'en avoir une.
- Rouge de méthyle et vert de bromocrésol - Indicateurs de pH
- Hydroxyde de sodium ( $\text{NaOH}$ , pour que la solution de digestion réagisse avec le sol, une petite quantité suffit pour ajuster la solution d'acide borique)
- Acide sulfurique (une solution diluée est préparée pour le titrage)
- Sol sec tamisé à 2 mm



**Figure 39.** Conception d'un bocal de 500 ml contenant un petit gobelet en plastique suspendu à l'intérieur avec la solution de piégeage à l'acide borique. Le sol digéré par la solution d'hydroxyde de sodium à 2M à 48°C est placé au fond du bocal sous le gobelet.



**Figure 40.** Schéma pour l'évaluation de l'azote des sucres aminés.

### 3.6.2. Présentation de la procédure (fig. 40)

Tout d'abord, regardez l'installation expérimentale nécessaire pour réaliser ce test (figs. 38 et 39) :

- À l'intérieur d'un bocal fermé, un petit gobelet est suspendu qui contient la solution d'acide borique avec deux indicateurs de pH colorés. En dessous du pH 4,2 environ, la solution devient rouge vif et au-dessus de ce pH, elle devient violette puis bleu-vert (fig. 43).
- Au-dessous, au fond du bocal, se trouve 1 g de sol en mélange avec une solution basique forte ( $\text{NaOH à 2M}$ ). Placée sur une plaque chauffante à  $48\text{-}50^\circ \text{C}$ , cette solution basique hydrolyse l'azote organique du sol et crée de l'ammoniac (de l'ammonium inorganique dans le sol sera également libéré).

- Cet ammoniac est ensuite piégé par la solution d'acide borique indicateur. Le pH et la couleur de cette solution changeront et, en ramenant son pH et sa couleur à ceux initiaux, il sera alors possible de déterminer la quantité d'ammoniac produite.
- Cette quantité d'ammoniac libérée est un indicateur de l'azote disponible à moyen terme dans le sol.
- À noter, le bocal étant sur la plaque chauffant, sa partie supérieure ainsi que la solution de piégeage suspendue au couvercle sont donc plus froides que le fond du bocal qui contient le mélange sol / NaOH. Ceci est essentiel pour effectuer la mesure. En effet, si le bocal était placé dans un four qui chaufferait le bocal entier uniformément à 50° C, cela ne marcherait pas.

### 3.6.3. Préparation des réactifs

1. Préparez la solution de piégeage / indicatrice d'ammoniac avec 40 g/l d'acide borique, avec deux indicateurs de pH : le vert de bromocrésol et le rouge de méthyle (fig. 41). Les quantités de ces indicateurs de pH sont si petites qu'il est préférable de préparer une solution mère plus concentrée de ces indicateurs, puis de la diluer dans de l'eau avant de préparer la solution d'acide borique de piégeage, comme précisé dans les étapes suivantes (**a** à **e**) :



**Fig. 41.** Les indicateurs colorés, le rouge de méthyle et le vert de bromocrésol. De très petites quantités sont nécessaires pour fabriquer les solutions d'indicateur.

- a. Préparez une solution-mère dans de l'eau, avec 0,35 g par litre de rouge de méthyle et 0,50 g par litre de vert de bromocrésol (ou une concentration équivalente, par exemple respectivement 0,17 g et 0,25 g de chaque indicateur coloré dans 500 ml). Notez que ce sont de très petites quantités qui seront diluées au 1:50<sup>e</sup> dans la solution finale. Ainsi, la solution mère (500 ml) durera très longtemps et devra si possible être congelée pour être conservée.
- b. Maintenant, pour préparer 200 ml de solution d'acide borique indicateur, ajoutez **d'abord** 4 ml de solution mère d'indicateurs colorés à 196 ml d'eau distillée (fig. 42). Cela diluera les indicateurs colorés jusqu'à leur concentration finale.



**Figure 42.** Addition de 4 ml de solution mère colorée à 196 ml d'eau pour obtenir la concentration finale de l'indicateur de pH, avant d'ajouter l'acide borique.

c. À ces 200 ml d'eau et indicateurs colorés, ajoutez 8 g d'acide borique et mélangez bien. Si ce mélange se fait dans une bouteille en verre, cela vous permettra de secouer la solution et de la chauffer dans un bain marie pour dissoudre plus rapidement l'acide borique. En effet, cette proportion d'acide borique dans l'eau est proche de sa solubilité limite. Ainsi, le fait de chauffer légèrement cette solution (à 50° C par exemple) aidera nettement à dissoudre l'acide borique.



**Figure 43.** Couleur de la solution d'acide borique indicateur à différents pH.

d. Ajustez le pH de cette solution à 4,2 avec des gouttes de solution de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (0,1 M) ou de NaOH (avec une concentration de 0,1 M de l'un ou l'autre, par exemple). Notez que le pH peut déjà être très proche de cette valeur, il n'est peut-être donc pas nécessaire de l'ajuster beaucoup. Lorsque cette solution a un pH inférieur à 4,2, elle prend une teinte orange en raison de la combinaison du bromocrésol (jaune) et du méthyle (rouge). À un pH plus élevé, la solution devient violette puis bleue lorsque le rouge de méthyle disparaît et que le bromocrésol change de couleur (fig. 43).

e. Refroidissez et conservez cette solution avant utilisation (pendant quelques jours ou une semaine, par exemple). 200 ml suffisent pour 40 tests, alors faites en moins si vous n'en avez pas besoin autant.

2. Préparez la solution de NaOH à 2M (10 ml par analyse). Pour chaque 100 ml de solution, ajoutez 8 g de NaOH (hydroxyde de sodium) à de l'eau propre. Il n'est pas nécessaire que ce soit de l'eau distillée, de l'eau propre en bouteille suffit. Mélangez bien et laissez refroidir. N'en fabriquez pas plus que la quantité nécessaire car cette solution est assez caustique et mieux vaut ne pas en stocker de grandes quantités.

3. Une concentration de 0,01 M de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  est nécessaire pour le titrage. Il est important que cette concentration soit la plus précise possible. Cette préparation peut se faire à partir d'acide sulfurique à 1 M ou autre concentration standard, acheté dans le commerce (si la concentration

est de 1 M, diluez l'acide sulfurique 100 fois avec de l'eau distillée). Cette préparation peut également se faire à partir d'acide sulfurique concentré, qui doit alors être manipulé avec beaucoup de précautions (gants résistants aux produits chimiques, lunettes de protection, ajouter l'acide à l'eau et pas l'inverse, travailler à l'extérieur ou sous une hotte pour éviter l'exposition aux fumées). Pour fabriquer du  $H_2SO_4$  à 0,01 M, faites d'abord une petite quantité de solution mère à 1 M : versez 30 ml d'eau distillée dans un récipient en verre - une éprouvette, une fiole jaugée ou encore une bouteille étroite et marquée au préalable par un trait à 50 ml exactement. Ensuite, ajoutez 2,7 ml d'acide sulfurique concentré à l'aide d'une pipette (ou pesez 5 grammes exactement). Ajoutez de l'eau jusqu'à la ligne indiquant un volume de 50 ml et mélangez bien, par exemple en versant plusieurs fois la préparation dans une bouteille de stockage propre. Vous devez manipuler l'acide avec précaution et porter des gants en caoutchouc ainsi que des lunettes de sécurité durant cette manipulation. Avec une pipette, ajoutez 1,0 ml exactement de cette solution mère (à 1 M) à 99 ml d'eau afin d'obtenir de l'acide sulfurique à 0,01 M. Cette solution standard peut également être préparée à partir d'acide de batterie commercial : tout d'abord en mesurant sa concentration puis en préparant une solution à 0,01 M en fonction de cette concentration, voir l'annexe 3.6.6 à la fin de cette méthode.

4. De l'eau distillée est également nécessaire à la fin de la procédure afin de diluer les solutions de piégeage avant le titrage. Il est important que cette eau soit aussi pure que possible, car tout effet qu'elle aurait sur le pH de la solution de piégeage serait interprété comme si de l'azote était contenu dans les échantillons, ce qui induirait donc des erreurs.

#### **3.6.4. Procédure**

1. Préchauffez une plaque chauffante à 48°C +/- 2°C (la température de la plaque chauffante peut être vérifiée avec un thermomètre digital ou un thermomètre à alcool traditionnel).
2. Dans le petit gobelet en plastique qui sera ensuite suspendu dans le bocal, ajoutez 5,00 ml de la solution d'indicateur. Une façon précise de procéder consiste à peser 5,00 g (+/- 0,03 g) de cette solution pour chaque test. Cela peut aussi être réalisé avec une pipette graduée si l'on prend soin de la remplir de façon précise ; si une pipette de précision est disponible, c'est aussi une bonne méthode.
3. Ce petit gobelet peut être temporairement stocké sur la table ou sur la paillasse de laboratoire, ou encore d'ores et déjà suspendu et « stocké » dans le bocal en le fixant à une vis pliée (ou à tout autre dispositif) sous le couvercle.
4. Ajoutez 1 g de sol au fond d'un bocal propre. Pour effectuer de nombreux tests en parallèle, les bocaux peuvent être préparés en une seule fois sans ajouter la solution de NaOH à 2M à ce stade. Assurez-vous d'étiqueter chaque bocal avec l'identification de l'échantillon.
5. Pour commencer le test, ajoutez 10 ml de la solution basique de NaOH au 1 g de sol dans le bocal et agitez doucement pour suspendre le sol.
6. Bouchez immédiatement le bocal avec le couvercle et le petit gobelet contenant la solution d'indicateur (suspendu en dessous du couvercle), puis serrez le couvercle pour bien fermer le

bocal. Placez soigneusement le couvercle sans renverser la solution d'indicateur à l'intérieur du bocal.

7. Chauffez le (ou les) bocal(aux) sur la plaque chauffante pendant 4 heures. S'il y a plusieurs bocaux, ils doivent être soigneusement changés de position sur la plaque chauffante, environ toutes les heures, pour pallier à toute inégalité de température de la plaque.

8. Entre-temps, une solution de  $H_2SO_4$  à 0,01 M peut être préparée, en diluant une solution de  $H_2SO_4$  à 1 M (préparée précédemment) avec de l'eau distillée au 1: 100<sup>e</sup>. Pour ce faire, mélangez 1 ml de  $H_2SO_4$  (1 M) avec 99 ml d'eau distillée.

9. Juste avant la fin de l'incubation de quatre heures, préparez un gobelet « témoin » de solution d'indicateur afin de le comparer avec les couleurs des solutions d'indicateur des bocaux :

- a. Pesez ou pipetez 5,00 ml de solution d'indicateur dans un petit gobelet en plastique propre du même type que celui que vous utilisez dans les bocaux. Cela permettra une comparaison plus précise de la couleur de l'indicateur dans tous les gobelets.
- b. Pour ce faire, ajoutez 5,00 ml d'eau distillée ; pesez 5,00 g d'eau +/- 0,04 g. La solution changera légèrement de couleur pour devenir de plus en plus violette à mesure que le pH augmentera en ajoutant de l'eau.
- c. Tarez de nouveau la balance avec le gobelet contenant ce mélange de solution d'indicateur et d'eau, et ajoutez des gouttes de  $H_2SO_4$  à 0,01 M, en pesant ce qui est ajouté jusqu'à ce que la couleur d'origine de la solution soit restaurée (rouge avec une légère teinte orangée, voir le gobelet à pH 4,2 de la fig. 43). Cela définira la couleur témoin pour le titrage, et vous connaîtrez ainsi la quantité (grammes) d'acide dilué ( $H_2SO_4$ ) nécessaire pour établir une lecture « témoin », sans incubation de sol. Vous devez enregistrer cette quantité en tant que  $T_{\text{témoin}}$  ou « solution titrée témoin » et soustraire cette quantité d'acide « témoin » des lectures avec les échantillons, voir l'étape 11 ci-dessous. Habituellement, cette valeur témoin est relativement petite : quelques gouttes seulement.

10. Ensuite, lorsque l'incubation est terminée, retirez les bocaux de la plaque chauffante et mettez-les soigneusement de côté. Un par un, ouvrez ces bocaux et titrez la solution d'indicateur qui aura probablement changé de couleur. Le titrage signifie ajouter suffisamment de solution  $H_2SO_4$  à 0,01 M pour restaurer le pH d'origine, mesuré en examinant sa couleur. Cela est fait pour chaque bocal, en répétant essentiellement ce qui a été réalisé ci-dessus pour la solution témoin (étape 9) :

- a. Retirez du bocal, délicatement, le gobelet avec la solution d'indicateur, en le soulevant avec le couvercle puis en le détachant. Soyez prudent lorsque vous faites cela de sorte que la condensation du couvercle du bocal ne tombe pas dans le gobelet contenant la solution d'indicateur. Pour éviter ce problème, vous pouvez utiliser un chiffon ou une serviette en papier pour transporter le couvercle vers l'endroit où vous allez détacher le gobelet en plastique.

- b. Ensuite, ajoutez 5 ml supplémentaires d'eau distillée dans le gobelet contenant la solution d'indicateur (cela fixera l'ammoniac dissous et empêchera toute perte). Il peut alors y avoir un changement de couleur. Pour ce faire, placez le gobelet sur la balance, tarez-le, puis ajoutez 5,00 g d'eau distillée.
- c. Ensuite, tarez à nouveau la balance et commencez à ajouter des gouttes de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  à 0,01 M à l'aide d'une pipette ou d'un compte-gouttes et en notant le poids d'acide ajouté (ici, grammes = ml de solution, car il s'agit d'une solution d'acide très diluée). Tournez doucement le gobelet après avoir mis quelques gouttes d'acide dilué et observez le changement de couleur de la solution qui devra, au final, ressembler à celle de la solution témoin de l'étape 11.
- d. Quand la couleur de la solution commence à ressembler à celle du témoin de l'étape 9 après avoir versé quelques gouttes, remuez bien le gobelet afin de vous assurer que l'acide est complètement mélangé et que la couleur est stabilisée. Habituellement, la couleur correcte est obtenue avec 1 ou 2 gouttes seulement.
- e. Grâce à la balance numérique, notez le poids de l'acide dilué ajouté comme valeur de titrage de l'échantillon,  $T_{\text{échantillon}}$ , en ml - vous en aurez besoin pour les calculs lors de l'étape 11 ci-dessous.

### **3.6.5. Calcul des sucres aminés (azote hydrolysable) du sol**

11. La quantité d'azote hydrolysable dans le sol est estimée à l'aide des calculs suivants :

$$\text{Quantité N libéré par hydrolyse (microgrammes)} = 280 \times (T_{\text{échantillon}} - T_{\text{témoin}})$$

Où :  $T_{\text{échantillon}}$  est la quantité (ml ou g) de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  à 0,01 M ajoutée lors de l'étape 10 ci-dessus pour titrer le gobelet incubé avec le sol, et  $T_{\text{témoin}}$  est la quantité de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  à 0,01 M ajoutée à l'étape 9 pour titrer le gobelet témoin.

12. À partir de cette quantité d'azote (N) libéré et connaissant la quantité de sol sec utilisée dans le test, la concentration de cette fraction de N est calculée de la façon suivante :

$$\text{Teneur en N du sol} = \frac{\text{Quantité N rejetée (microgrammes)}}{\text{sol utilisé (g)}}$$

avec pour unité ppm ou parties par million, ou encore mg/kg. Habituellement, la quantité de sol utilisée est de 1 g seulement, ce qui rend ce calcul particulièrement facile. Cependant, le poids du sol peut être mesuré précisément à 1,05 g par exemple ; dans ce cas, vous devez utiliser cette valeur plus précise.

13. **Notation de l'azote disponible à l'aide de ce test** : il existe peu d'expériences d'utilisation de ce test dans les petits systèmes agricoles. Néanmoins, des recherches menées par ceux qui ont développé ce test ont abouti à une valeur critique de la teneur en azote des sucres aminés à partir de laquelle la croissance des cultures ne réagit plus à un apport supplémentaire en engrains azotés, à savoir environ 230 mg/kg (Khan et al., 2001<sup>1</sup>) ; cette valeur peut servir pour partager de façon pratique d'un côté les sols à faibles teneurs azotées (<230 mg/kg) et ceux à

---

<sup>1</sup> Khan, S.A., Mulvaney, R.L. et Hoeft, R.G., 2001. A simple soil test for detecting sites that are nonresponsive to nitrogen fertilization. Soil Science Society of America Journal, 65(6), pp.1751-1760.

fortes teneurs en azote ( $> 230 \text{ mg/kg}$ ) susceptibles d'être disponibles pour des cultures au cours des trois à six prochains mois.

### **3.6.6. Annexe : évaluation de la molarité de l'acide de batterie afin de préparer une solution mère de $\text{H}_2\text{SO}_4$ à 1 M pour le titrage**

#### **Matériel :**

- Hydroxyde de sodium (NaOH)
- Acide de batterie pour les tests (il s'agit généralement d'acide sulfurique à une concentration de 30 % environ)
- Bécher et pipette graduée pour transférer avec précision des quantités de 1 ml
- Éprouvettes pour mesurer les quantités de liquide nécessaires pour diluer les solutions
- Des gants et des lunettes de sécurité sont recommandés pour toutes les manipulations, en particulier la dilution de l'acide de batterie au début de la procédure.

1. Préparez une petite quantité d'hydroxyde de sodium à 4 M qui servira à neutraliser l'acide de la batterie, en diluant 8 g de NaOH dans 50 ml d'eau. Le mélange peut être fait dans une petite bouteille en verre qui sera secouée ou agitée afin de dissoudre NaOH. La solution va chauffer et doit être refroidie à température ambiante afin de s'assurer que sa densité soit correcte, avant de connaître la concentration d'acide de batterie grâce à la neutralisation (titrage) comme indiqué ci-dessous.
2. Ajoutez 1 ml de la solution de NaOH 4M à 39 ml d'eau dans une bouteille séparée, pour obtenir du NaOH à 0,1 M qui pourra ensuite être utilisé pour la neutralisation finale de l'acide de batterie dès que son pH est supérieur à 2.
3. Assurez-vous d'avoir un pH-mètre étalonné ou assez de bandelettes pH à portée de main afin de mesurer à la fois des pH en dessous et au-dessus de 7.
4. Ajoutez 10 ml d'acide de batterie à 20 ml d'eau distillée dans un bécher (dilution 3x), pour éviter d'être exposé aux fumées d'acide pur de batterie. Vous pouvez maintenant trouver la concentration ou la molarité de cet acide de batterie dilué en neutralisant son pH à 7 environ.
5. Pour cela, ajoutez 15 ml de la solution de NaOH à 4 M dans le bécher contenant l'acide de batterie dilué. De fortement acide avec un pH inférieur à 1, la solution devra ensuite devenir progressivement neutre. Mesurez le pH de la solution à ce stade. Ne laissez pas la sonde trop longtemps dans la solution, vérifiez simplement que le pH est inférieur à 1 puis remettez-la rapidement dans de l'eau de rinçage. Si le pH a déjà dépassé 7, l'acide de batterie n'était pas très fort. Recommencez et ajoutez alors seulement 10 ml avant de mesurer le pH et de passer à l'étape suivante.
6. Si le pH mesuré à l'étape 5 est toujours inférieur à 1, ajoutez 5 ml supplémentaires de NaOH à 4 M.
7. Puis ajoutez 1 ml de NaOH (4M) à la fois avec la pipette graduée, aussi précisément que possible. Vérifiez le pH après chaque ml ajouté. Lorsque le pH commence à augmenter sensiblement au-dessus de 1 ou 1,5 par exemple, notez les millilitres de NaOH 4M ajoutés. Passez ensuite au NaOH à 0,1 M fabriqué à l'étape 2 pour neutraliser, en ajoutant 1 ml à la fois,

jusqu'à ce que vous atteigniez un pH compris entre 6 et 8 (plus de précision n'est pas nécessaire et n'ajouterait rien à l'exactitude de la méthode).

8. Si vous allez trop loin et que le pH dépasse 8, estimez la quantité (millilitres) de NaOH à 0,1 M nécessaire pour atteindre un pH compris entre 6 et 8, ou bien ajoutez 0,5 ml d'acide de batterie et 1 mL d'eau distillée pour abaisser à nouveau le pH (à savoir 1 volume de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 2 volumes d'eau distillée).

9. Vous pouvez maintenant calculer le nombre total de moles de NaOH ajoutés, ce qui est équivalent aux moles de OH<sup>-</sup> ajoutées pour neutraliser les ions H<sup>+</sup> de l'acide sulfurique. La molarité est exprimée en moles par litre :

$$\text{Moles de NaOH} = (\text{ml de solution } 4\text{M} / 1000) * 4 + (\text{ml de solution } 0,1\text{M} / 1000) * 0,1$$

Puisque chaque mole de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> produit 2 moles de H<sup>+</sup>, nous devons diviser cette quantité d'ions OH<sup>-</sup> par 2 pour connaître approximativement le nombre de moles d'acide sulfurique contenues dans l'acide d'origine, ainsi que la molarité, sachant que 10 ml d'acide sulfurique se trouvent dans l'acide de batterie dilué 3 fois. Si vous avez dû corriger le dépassement de pH (étape 8) en ajoutant 0,5 ml supplémentaire d'acide de batterie dilué, assurez-vous de corriger cela en utilisant 0,01017 l (soit 30,5/3) au lieu de 0,01 l comme volume dans le calcul ci-dessous :

$$\text{Concentration de l'acide de batterie original} = (\text{Moles NaOH ci-dessus} / 2) / 0,01 \text{ litres}$$

Où 0,01 litres équivaut à 10 ml.

10. **Exemple** : En utilisant la procédure ci-dessus pour de l'acide de batterie acheté aux États-Unis, nous avons calculé que 24 ml de NaOH à 4M étaient nécessaires que le pH commence à augmenter vers 7 ; puis 7 ml supplémentaires de NaOH à 0,1 M ont été ajoutés pour amener le pH à 6,5, puis nous nous sommes arrêtés.

En suivant les calculs de l'étape 9 ci-dessus, nous trouvons :

$$\text{Moles de NaOH} = 24/1000 \times 4 + 7/1000 * 0,1 = 0,0967 \text{ moles}$$

$$\text{La molarité de 10 ml d'acide de batterie est de } 0,0967 / 2 / 0,01 = 4,835$$

(La division par 2 est due à la différence « 1 OH<sup>-</sup> de NaOH versus 2 H<sup>+</sup> de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> », aussi, 0,01 L = 10 ml)

Cette molarité est alors estimée à 4,835 et arrondie à 4,8 (ce qui explique pourquoi le pH est neutralisé entre 6 et 8, sans plus de précisions).

Donc, pour préparer la solution mère initiale à 1 M de la méthode principale, pour une dilution ultérieure à 0,01 M qui sera utilisée pour le titrage de la solution colorée d'acide borique indicateur (étape 8 de la méthode principale ci-dessus), nous devrions diluer cette solution 4,8 fois, soit 100 ml d'acide de batterie + 380 ml d'eau distillée pour un volume total de 480 ml.

### **3.7. Évaluation de la macrofaune des sols :**

L'évaluation des communautés d'invertébrés du sol offre une option simple et peu technologique pour étudier la biologie du sol, et cette méthode offre un certain nombre d'avantages clés. La macrofaune des sols est sensible aux changements dans leur environnement et les changements dans leur structure communautaire offrent une évaluation intégrative (c'est-à-dire combinant les changements dans les propriétés multiples du sol en une seule mesure) des impacts de l'écosystème au fil du temps. En outre, la macrofaune du sol, en particulier les ingénieurs écosystémiques (par exemple des fourmis, des vers de terre), peut avoir des influences importantes sur le fonctionnement du sol et des écosystèmes et, par conséquent, ses populations reflètent des processus écologiques clés dans les sols et les écosystèmes. Enfin, les grands invertébrés du sol sont relativement simples à mesurer, omniprésents et familiers aux gestionnaires des terres, puisqu'on les rencontre fréquemment lors des activités de gestion des sols.

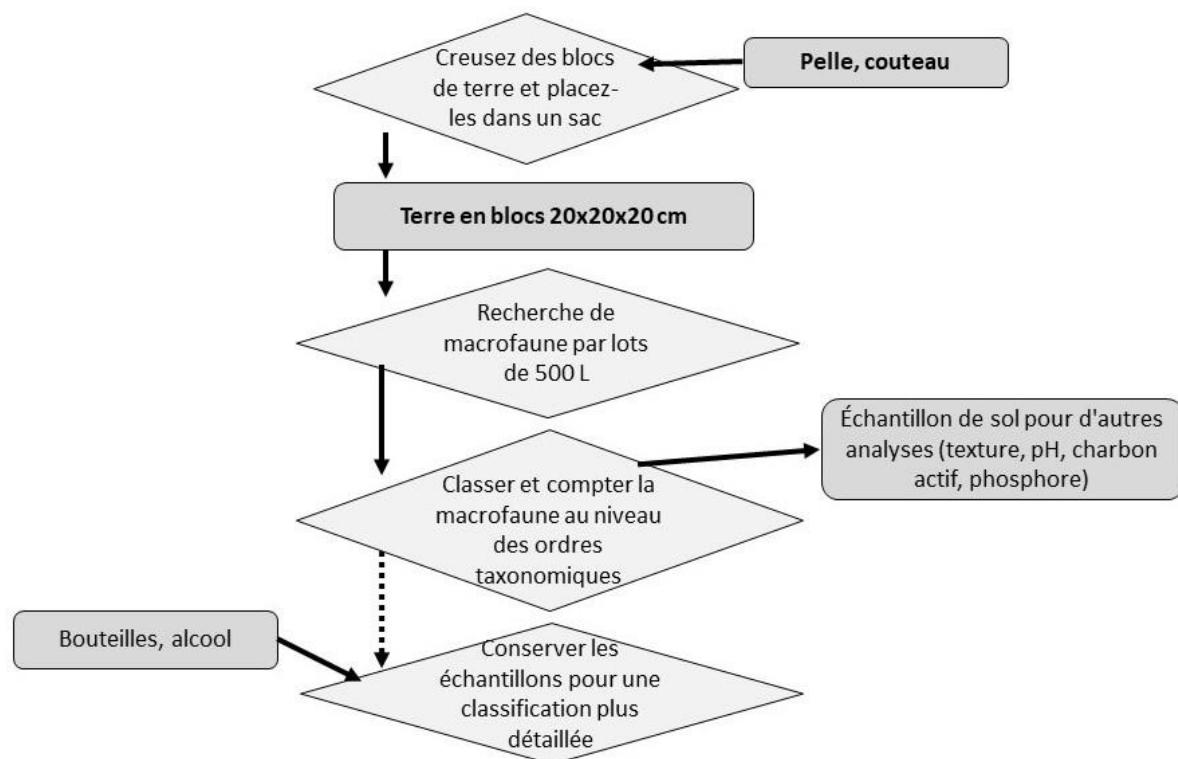
Cette procédure prend plus de temps que d'autres évaluations. Il est bon d'effectuer l'évaluation en équipe, de partager le travail avec un groupe et aussi de favoriser l'apprentissage de groupe et les observations sur la vie dans le sol. L'évaluation exige que le sol soit dans un état productif, généralement pendant la saison des pluies et auprès de la culture active des plantes et des cultures. Bien qu'elle apparaisse à la fin de ce manuel, elle peut être un excellent point de départ pour observer et apprendre sur un sol parce que la vie du sol peut être observée et parce que le sol est largement manipulé, conduisant à un sens général de ses qualités tangibles avant de poursuivre les autres tests chimiques et physiques. De plus, comme décrit dans l'introduction du manuel (voir les figures 1 et 3), cette procédure générera un échantillon de sol « propre » à utiliser dans les essais chimiques tels que le pH, le carbone activé et le P disponible, et peut être considérée comme une méthode d'échantillonnage. Comme nous l'avons mentionné précédemment, toutefois, cette procédure ne devrait pas être utilisée pour créer un échantillon pour la stabilité des agrégats (section 3.3), car dans l'évaluation de la macrofaune, nous détruisons délibérément les agrégats naturels à la recherche de la macrofaune, invalidant ainsi la méthode de stabilité des agrégats.

#### **3.7.1. Matériaux**

- 1. Pelle à pointe carrée** pour creuser un trou carré régulier.
- 2. Couteau ou machette** pour couper les bords d'un trou.
- 3. Règle**, d'au moins 20 cm de long, pour mesurer les dimensions du trou. Parfois, deux règles de 20 cm pourront être scotchéées pour former un angle droit, ce qui facilitera la mesure précise du trou.
- 4. Sacs en toile de jute** ou autres sacs lourds similaires pour recueillir le sol avant de chercher la macrofaune
- 5. Plateaux** à utiliser pour la distribution et la fouille de sol pour la macrofaune
- 6. Fioles, tubes ou bouteilles** (50 à 100 ml) pour stocker des échantillons de macrofaune (si vous voulez effectuer une classification détaillée)
- 7. Pinces ou forceps** pour transférer la macrofaune en flacons ou en bouteilles.

8. Alcool pour conserver la macrofaune, et peut-être du formaldéhyde pour le stockage à long terme, mais ce dernier seulement dans le cadre du travail de laboratoire pour éviter de transporter cette substance toxique dans la nature

### 3.7.2. Procédure :



**Fig. 44.** Schéma pour l'évaluation de la macrofaune du sol.

1. À l'aide d'une règle ou d'un petit quadrant, marquer une zone carrée de 25 x 25 cm à l'aide de drapeaux ou d'un marqueur similaire. Essayer d'éviter de laisser de lourdes traces de pas, certaines macrofaunes (en particulier les grands vers de terre anémiques, avec des terriers verticaux profonds) pouvant s'échapper assez rapidement. En général, la macrofaune est hétérogène dans sa distribution spatiale, il est donc bon de recueillir au moins 3 échantillons par parcelle de traitement en cours d'évaluation.
2. À l'aide d'une pelle ou d'une bêche, excaver le sol rapidement dans un grand sac en plastique tissé (Fig. 45 ci-dessous). Essayer de s'assurer dès le départ que les parois de la fosse soient verticales et excaver la fosse en aussi peu de charges de pelle que possible pour éviter d'endommager la macrofaune. Il est possible de réduire légèrement le volume de l'échantillon à des fins de démonstration ou lorsque le travail ou le temps est rare (par exemple, 20 x 20 cm), mais il est important de reconnaître que cela introduit un plus grand risque d'erreur et peut entraîner l'endommagement d'une plus grande proportion de macrofaune (ce qui peut rendre le comptage plus difficile dans les étapes ultérieures).



**Figure 45a.** Excavation d'un trou carré (20x20x20cm de profondeur) pour évaluer la macrofaune dans ce volume.



**Figure 45b.** Le sol est rapidement transféré du trou au sac pour empêcher la macrofaune de s'échapper.

**3. Tri manuel de la macrofaune du sol (fig. 46)** : Trouver un endroit confortable pour travailler avec une lumière adéquate, abrité du soleil, de la pluie et du vent. Déposer des portions d'environ 500 ml sur des plateaux pour trier le sol, utiliser une pince à épiler pour choisir délicatement toutes les « bestioles » qui sont de 2 mm de taille (en pratique, la plupart de tout ce qui est facilement visible sera inclus, tels que les vers de terre, fourmis, termites, coléoptères, araignées, et larves d'insectes). Remplir deux tasses à spécimens (à peu près 120 ml) environ 1/4 pleines avec 70 % d'éthanol et les étiqueter selon l'échantillon prélevé. Placer les organismes à corps mou (ce sont des organismes sans exosquelette ; généralement limités aux vers de terre, aux limaces et aux cocons de vers de terre) dans une tasse à spécimen (fig. 47). Tout le reste va dans une autre tasse à spécimen (ce sont tous des arthropodes, et ont des jambes). S'il y a beaucoup de petites fourmis ou termites (plus fréquents pour les sols tropicaux chauds), il peut être utile d'utiliser un petit pinceau trempé dans de l'éthanol pour recueillir la macrofaune qui se déplace rapidement (car elles collent généralement à la brosse lorsqu'elles sont mouillées). Une équipe d'au moins 3 à 4 personnes manipulant chaque sac d'échantillon devrait être en mesure de terminer le tri d'un échantillon en 20 à 40 minutes, selon le nombre d'organismes rencontrés. L'un des défis consiste à ne pas sous-compter (c'est-à-dire de se presser ou de vouloir bâcler) alors que l'on se lasse de trier.

4. De retour en laboratoire, la macrofaune peut être triée et comptée. En règle générale, le tri à la classe ou à l'ordre (c.-à-d. coléoptères, fourmis, araignées, etc.) est suffisant pour comprendre la composition fonctionnelle des communautés de macrofaune du sol, mais une identification plus poussée est utile pour mieux comprendre les impacts sur la diversité. Trier à la classe ou à l'ordre peut souvent être fait à l'œil nu, mais il est utile d'avoir un microscope disséquant ou une loupe de main pour certains spécimens. De plus, pour le stockage à plus long terme (2 semaines), il est important de jeter l'ancien éthanol et de le remplacer par de l'éthanol propre à 70 % pour les arthropodes. Les organismes à corps mou peuvent être stockés dans du formol si la conservation à long terme est souhaitée. Les vers de terre peuvent devenir difficiles à identifier s'ils sont stockés dans de l'éthanol pendant plus de quelques

semaines ; le remplacement de l'éthanol sale par de l'éthanol propre et le stockage d'échantillons dans le réfrigérateur peuvent prolonger considérablement ce délai, mais il faut utiliser des flacons étanches à l'air pour éviter un possible risque d'incendie.



**Figure 46.** Tri à la main de la macrofaune à partir d'un plateau. Noter les flacons de collecte pour la macrofaune à droite, si cela est souhaité pour l'identification précise et l'archivage des échantillons.

**Figure 47.** Arthropodes recueillis dans 70% d'éthanol

5. Il est important de noter que les données de macrofaune peuvent souvent être assez « bruyantes » et les conclusions ne sont pas toujours absolues ou claires. Pour cette raison, les analyses sont souvent mieux menées au niveau des ordres et/ou avec les groupes taxonomiques les plus abondants (souvent les vers de terre, les fourmis et les coléoptères). Les résultats sont généralement rapportés sur la base des individus par mètre carré (il faut donc multiplier les nombres d'abondance par 16 si l'on utilise une fosse de 25 x 25 cm).
6. Un excellente guide simplifié pour capturer la plupart des ordres de macrofaune des sols est disponible à partir des ressources préparées par l'IRD / FAO. Ce guide est reproduit comme annexe B de ce manuel et est également disponible à <http://www.fao.org/3/a-i0211e.pdf> ; ou encore <http://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0211e/i0211e.pdf>.

### 3.7.3. Calcul des résultats :

Après le tri dans les ordres ou les classes, qui peuvent inclure des morphotypes communs à un site avec une photo pour aider à les enregistrer, chaque compte d'un organisme ou d'un groupe pourra être exprimé comme un nombre par mètre carré. À noter que si un bloc de 20x20x20 cm a été excavé, alors cela signifie multiplier toutes les numérations brutes dans les données par  $25 = 5 \times 5$  puisque chaque côté du bloc a une longueur d'un cinquième de mètre (20 cm) de sorte que 25 de ces blocs s'adapteraient dans un mètre carré. Si un bloc de 25x25cm est excavé, les nombres doivent être multipliés par 16, et non par 25.

## Bibliographie

Cock, J.H., Álvarez, D.M., Estrada, M. 2010. **RASTA Rapid Soil and Terrain Assessment: Guía práctica para la caracterización del suelo y del terreno.** Versión 2. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Corporación BIOTEC.

Corina D., Laura S, Paredes R., 2017. "**Maletín de Herramientas para analizar suelos y buenas prácticas agroecológicas**". 2da Edición La Paz - Bolivia: PROSUCO

Moebius-Clune, B.N., D.J. Moebius-Clune, B.K. Gugino, O.J. Idowu, R.R. Schindelbeck, A.J. Ristow, H.M. van Es, J.E. Thies, H.A. Shayler, M.B. McBride, K.S.M Kurtz, D.W. Wolfe, and G.S. Abawi, 2016. **Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework, Edition 3.2**, Cornell University, Geneva, NY. Available at:  
<https://soilhealth.cals.cornell.edu/training-manual/> y también:  
[www.bit.ly/SoilHealthTrainingManual](http://www.bit.ly/SoilHealthTrainingManual)

Musumba, Mark, Grabowski, Philip, Palm, Cheryl, and Sieglinde Snapp. 2017. Sustainable Intensification Assessment Methods Manual. available at : [http://www.k-state.edu/siil/documents/docs\\_siframework/Sustainable%20Intensification%20Assessment%20Methods%20Manual%20-%2010.24.17c.pdf](http://www.k-state.edu/siil/documents/docs_siframework/Sustainable%20Intensification%20Assessment%20Methods%20Manual%20-%2010.24.17c.pdf)

Shepherd G., Stagnari, F., Pisante, M., and J. Benites. 1993. Visual Soil Assessment (VSA) Guides – Annual Crops. available at: <http://www.fao.org/3/a-i0007e.pdf>

## Annexes

### **Annexe A : Guide visuel et du toucher de l'humidité du sol :**

Ici, les estimations sont présentées pour l'humidité en fonction de la façon dont les sols typiques regarder et se sentir. Ces estimations peuvent être utilisées pour ajuster les mesures de la teneur en éléments nutritifs ou en carbone à ce que la mesure aurait été dans le sol entièrement séché à l'air, qui est la meilleure façon normalisée d'exprimer ces mesures. L'ajustement au sol séché à l'air peut être calculé en multipliant par le facteur [1/(1% d'humidité)]. Par exemple, si une teneur en humidité de 9 % est estimée, les résultats chimiques utilisant cette humidité du sol seraient multipliés par [1/(1-0,09)] - 1/0,91 et 1,10 qui utilise les facteurs du tableau ci-dessous. Si de nombreux échantillons doivent être évalués dans une seule région, il est probablement préférable de créer un guide local en associant l'apparence et la sensation des sols locaux à leur teneur réelle en humidité.

**Tableau 1.** Contenu d'humidité de différents sols texturés à différents stades (% d'humidité donnée)

	I. Très humide	II. Humide	III. la plupart des miettes humides	IV.la plupart des miettes sèches	V. air sec	VI. Air sec, plusieurs jours ou chauffé (45 C)
<b>Sables et sables limoneux</b>	9%	7%	5%	3%	2%	1%
<b>Sable riche en terreaux</b>	13%	10%	8%	5%	3%	2%
<b>l'argile sablonneuse, limons, limons</b>	18%	14%	10%	6%	3%	2%
<b>Argiles sablonneuses, limons d'argile, limons limoneux, argiles humides, argiles</b>	23%	18%	14%	7%	4%	2%
<b>Sols riches en matière organique (p. ex. 5 % SOM; voir note ci-dessous)</b>		+3%	+2%	+2%	+1%	+1%

### **Niveaux d'humidité (voir images correspondantes ci-dessous) :**

**I. Très humide.** Le sol est suffisamment humide pour que lorsqu'il est manipulé, des amas se forment qui sont plus gros que les agrégats normaux de la taille de la mie du tamisage (5-15 mm), et il est très difficile de tamiser à 2 mm sans obstruer l'écran. Avec juste un peu plus d'eau, nous commencerions à voir un sol scintillant (l'eau libre n'est pas retenue dans les agrégats); lorsqu'il est pressé avec les doigts et le pouce, le sol forme presque une motte enduite ensemble, mais montre encore une certaine structure de grain des miettes individuelles.

**II. Humide.** De plus grandes touffes (5-15 mm) ne se forment plus à partir du sol manipulé, mais toutes les miettes sont encore visiblement humides. Le tamisage est encore difficile à partir de l'humidité, mais faisable. Lorsqu'il est pressé avec les doigts et le pouce, le sol tient ensemble lâchement, mais ne s'enduit pas ensemble, et l'amas formé est relativement facilement cassé. Dans le sol le plus sableux, l'amas avec les doigts et le pouce ne tient déjà pas tout à fait ensemble.

**III. La plupart des miettes humides.** Le sable limoneux n'adhère plus lorsqu'il est pressé, tandis que le limon d'argile et le sol riche en matière organique adhèrent encore un peu, environ la moitié des bâtons ensemble. Le tamisage est maintenant relativement facile.

**IV. La plupart des miettes sèches :** Les agrégats sont encore humides à l'intérieur. Lorsqu'ils sont pressés ensemble, il n'y a pas d'adhérence entre les miettes tamisées. Le tamisage est maintenant très facile sans que le sol obstrue le tamis.

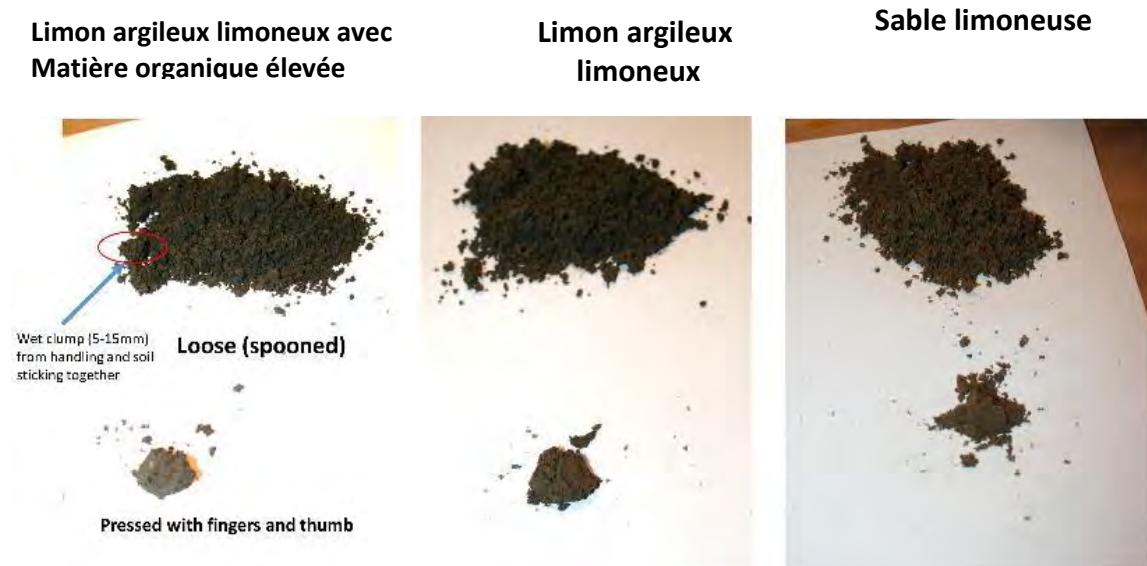
**V. Séché à l'air :** Les échantillons ont séché jusqu'à ce qu'ils semblent complètement secs, bien que de nombreux jours ou semaines ne soient pas passés, et que le sol n'ait pas été séché à des températures plus élevées.

**VI. Séché à l'air, plusieurs jours ou chauffé :** Le sol est sec depuis de nombreux jours à plusieurs mois, ou a été chauffé pour le séchage, à 40 à 45 degrés C par exemple. Habituellement, aucun ajustement n'est fait pour l'humidité.

**Ajout pour les sols à haute teneur en matière organique :** pour les sols très visibles en matière organique, avec une couleur foncée notable ou une matière organique supérieure à 5 %, les quantités indiquées dans le tableau en fonction de la texture devraient être augmentées de quelques points de pourcentage, comme le montre la dernière ligne de la table.

#### Photos des différentes étapes:

##### i. Très humide



## **II. Humide**

**Limon argileux limoneux avec  
Matière organique élevée**



**Limon argileux  
limoneux**



**Sable limoneuse**



## **III. La plupart des miettes humides**



**IV. La plupart des miettes sèches**



**V. Séché à l'air:**



## Annexe B : Clé simplifiée de la macrofaune.

Adapté du manuel de terrain macrofaune FAO/IRD, vérifiez le lien pour l'original :  
<http://www.fao.org/3/i0211e/i0211e00.htm>

La clé identifie la plupart des macrofaunes au niveau de l'ordre :

### SANS JAMBES:

#### 1. SANS pattes, NON-SEGMENTÉES, tête claire avec des antennes; Mollusca

- a) Avec Coquille: Escargots (Fig. 1)
- b) Sans coquille : Limaces (Fig. 2)



Fig. 1. Escargots



Fig. 2. Limaces

#### 2. SANS JAMBES, SEGMENTÉES

##### a) Ver de Terre - COMME,

Plus de 15 segments du corps, pigmentés (colorés) :

**Vers de terre** (plus de 20 mm de long) (Fig. 3)

Ventouses aux deux extrémités d'un corps aplati :

**Hirudinea (sangues)** (Fig. 4)



Fig.3: Ver de Terre



Fig.4: Hirudinea (sangues)

b) Pas comme Le Ver de Terre, moins de 15 segments

Larve de coléoptère (**Coléoptères**), généralement avec la capsule de tête fortement développée (structure coronale bien développée). Souvent en forme de U et plus ou moins gonflé. (Fig. 5)

Les larves de mouche (**Diptera**), souvent sans capsule de tête fortement développée. Long et mince, pas en u (Fig. 6)



Fig.5: Larves de coléoptères (coleoptera)



Fig.6: Larves de mouches (diptera)

**AVEC LES JAMBES:**

**1. SANS AILES:**

3 Paires de jambes (INSECTS).

A. Caterpillar- Comme, Corsé doux

Avec pseudo-jambes (quatre paires ou moins) :

Larves de lépidoptères (larves de papillons et de papillons de nuit, fig. 7) ces chenilles lépidoptères ont les deux vraies pattes trouvées sur le thorax et les pseudos pattes (prolegs) trouvées sur les segments abdominaux :

Sans pseudo-jambes, et 3 paires de pattes sur le thorax :

Larve de Coleoptera (coléoptères; fréquemment en forme de U "grubs") - (Fig. 8))



**Fig.7:** Larves de lépidoptères (papillons et papillons de nuit) **Fig.8:** Larves de coléoptères "grubs"

#### B. Abdomen 6 segments et 4 antennes segmentées

Pronotum remarquable (la plaque dorsale supérieure du premier segment du thorax) :  
Pronotum en forme de selle, ne se projetant pas vers l'avant :

Orthoptera (sauterelles) (Fig. 9)

ii. Pronotum pas en forme de selle, projetant vers l'avant au-dessus de la tête :  
Blattaria (cafards) (Fig. 10)



**Fig.9:** Orthoptera



**Fig.10:** Blattaria

Pronotum n'est pas visible (la plaque dorsale supérieure du premier segment du thorax) :

i. Les parties de la Bouche formées en tube tenu sous le corps, pas de palpes: Hemiptera (comme les insectes de dentelle, les pucerons et les boîs (Fig. 11)



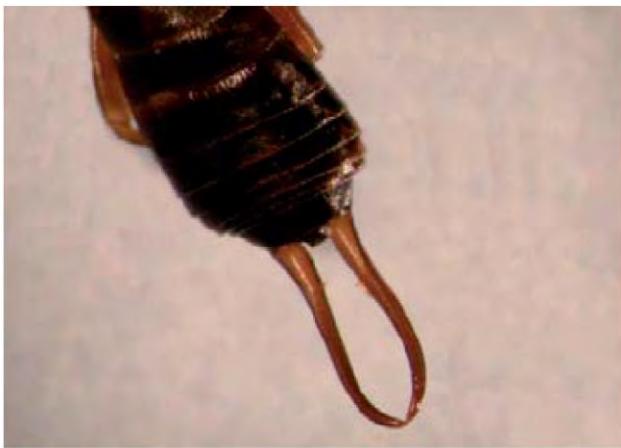
**Fig.11: Hemiptera, remarquez le tube de succion**

ii. Pas de tube, palpes: Abdomen se termine par un certain nombre de cerci (appendices appariés sur les segments les plus arrières de nombreux arthropodes)

Cerci soit:

**a) 2 cerci**

- Courbé en pinces : Dermaptera (perce-oreilles) (Fig.12)
- Long et mince, au moins 1/3 longueur de l'abdomen, projetant de la pointe, Antenne courte: < 2 à largeur de la tête: larves de coléoptères (Fig. 13)



**Fig. 12. Dermaptera (perce-oreilles)**

Cerci court et peut être situé à l'avant de la pointe de l'abdomen:

o Antenne longue, 8 segments:

Isoptera (changé en Blattaria, récemment) aveugle mal pigmenté, parfois avec de grandes mandibules [soldats], jambes entièrement développées, tropiques et subtropicaux) (Fig. 14)

o Antenne courte, 6 segments : larves de coléoptères, antennes plates et courtes (segments 8) (fig. 15)



**Fig.13: Coleoptera Larves**



**Fig.14: Isoptera (maintenant Blattaria)**



**Fig.15: Larves de Coleoptera - cerci (coléoptères)**

b. Sans cerci; avec un certain nombre de segments d'antennes : (voir nombre de segments ci-dessous) :

6 segments d'antennes, avec 3 segments thoraciques clairs : Larves de coléoptères (coléoptères; Fig. 16)



**Fig.16: Thorax de coléoptère (coléoptère) (trois segments clairement définis derrière la tête)**

Plus de 10 segments en antennes, avec une taille de type guêpe (très étroite) :

Taille avec 1 à 2 pétioles : **Fourmis** (Fig. 17)

Taille sans pétioles : **autres Hyménoptères** (abeilles et guêpes)

Plus de 10 segments dans les antennes, sans taille étroite de type guêpe

- Long et mince : **Phasmida** (bâtons de marche et insectes foliques) (Fig. 18)

Petits insectes, avec des antennes relativement longues : **Psocoptera** (poux d'écorce) (Fig. 19)

Avec des antennes courtes : larves de coléoptères ou adultes sans ailes (Fig.20)



**Fig.17: Fourmis; à droite, un ou deux pétioles relient le thorax et l'abdomen**



**Fig.18: Phasmida**



**Fig.19: Psocoptera**



**Fig.20 : Larves de coléoptères ou adultes sans ailes**

4 paires de jambes: Arachnida

(Parfois les pédipalpes, la deuxième paire d'appendices de la tête et du thorax, ressemblent à une paire de jambes supplémentaire)

A. Thorax et abdomen séparés par une taille resserrée, pédipalpes sans griffes:

Araignées (Fig. 21)

B. Thorax et l'abdomen fusionnés en un seul, sans pédipalpes-  
Corps clairement segmenté, avec ocularium (partie oculaire de l'œil) :  
Opilions (très semblables aux araignées) (Fig. 22)  
Corps non segmenté, sans ocularium : Acarina (acares et tiques) (Fig. 23)



**Fig.21:** Araignée



**Fig.22:** Opilions



**Fig.23:** Acarina (acares y ticks)

C. Pedipalpes avec griffes ou pinces  
Grandes griffes, telon (piqûre) : Scorpion (Fig. 24)  
Petites griffes, sans telon (piqûre) : Pseudo scorpions (Fig. 25)



Fig.24: Scorpions



Fig.25: Pseudo scorpion

6 ou 7 paires de pattes : Isopoda (fig. 26)



Fig.26: Isopoda

Plus de 15 paires de pattes :

A. Une paire de jambes par segment de corps : Chilopoda (centipèdes, corps généralement aplati) (Fig. 27)



Fig.27: Chilopoda



A. Deux paires de pattes par segment de corps : Diplopoda (mille-pattes), généralement le corps est plus rond que plat, habituellement 30 paires de jambes (Fig. 28)



**Fig.28:** Diplopoda

## 2. AVEC DES AILES

A. Seulement deux ailes, pas d'appendice: Diptera adultes (mouches)  
(Avec haltères et petites structures jumelées boutonnées près des ailes) (Fig. 29)



**Fig.29:** Diptera

## B. 4 ailes

Les pièces à la bouche modifiées en tube, sans palpes : Hemiptera (fig. 30)



**Fig.30:** Hemiptera

Pièces buccales mordantes, palpes :

Les ailes antérieures durcies pour former un étui d'aile :

o Longues Pattes de derrière:

- i. Pattes de derrière modifiées pour sauter, tête non partiellement couverte par le pronotum: Orthoptera (Fig. 31)
- ii. Pattes de derrière non modifiées pour sauter, tête couvrant partiellement pronotum: Blattaria (Fig. 32)



Fig.31 Orthoptera



Fig.32: Blattaria

o Jambes courtes de derrière :

- i. Abdomen avec pinces terminales : Dermaptera (fig. 33)
- ii. Sans pinces terminales : Coleoptera (coléoptères) (fig. 34)



Fig.33: Dermaptera



Fig.34: Coleoptera (image gauche et droite)



- Avant-ailes non durcies - pattes postérieures modifiées pour sauter ; pronotum en forme de selle : Orthoptera (Fig. 31)

D'autres groupes ailés sont rarement trouvés dans des échantillons de sol triés à la main, mais l'exemple est montré : Hyménoptères : abeilles et guêpes (fig. 35) et lépidoptères (papillons et papillons).



**Fig.35: Hyménoptères (Pas couramment trouvé dans les sols)**