

## Fertilité des sols et fertilisation organique – SOLORGA

# Etat de l'art des indicateurs d'évaluation des composantes de la fertilité des sols : physique, chimique et biologique



**Organisme :** Institut Technique Tropical (IT<sup>2</sup>)

**Rédaction :** Chloé QUIMEBY

**Validation :** Loïc NORMAND

**Date :** 15 Janvier 2022

# Table des matières

<b>La fertilité des sols .....</b>	<b>3</b>
Qu'est-ce qu'un sol ? .....	3
Fertilité physique d'un sol.....	4
Fertilité chimique d'un sol .....	5
Fertilité biologique d'un sol.....	6
<b>Les indicateurs d'évaluation des composantes de la fertilité des sols.....</b>	<b>7</b>
Qu'est-ce qu'un indicateur ? .....	7
Indicateurs d'évaluation de la fertilité physique du sol .....	8
Pierrosité (ou Charge en éléments grossiers) .....	8
Texture du sol.....	9
Résistance à la pénétration (ou Compaction) .....	12
Densité apparente sèche.....	13
Vitesse d'infiltration de l'eau .....	14
Réserve utile du sol .....	16
Couleur du sol .....	17
Hydromorphie.....	18
Profondeur du sol.....	19
Structure du sol.....	19
Stabilité structurale du sol .....	20
Battance .....	22
Indicateurs d'évaluation de la fertilité physico-biologique du sol .....	23
Développement racinaire : conformation des racines, profondeur de l'enracinement, répartition spatiale des racines.....	23
Indicateurs d'évaluation de la fertilité biologique du sol .....	24
Macrofaune du sol .....	24
Populations de lombriciens : diversité, abondance, activité des lombriciens .....	25
Communautés de nématodes libres .....	27
Biomasse microbienne .....	28
Respiration microbienne .....	29
Vitesse de dégradation de la MO .....	30
Indicateurs d'évaluation de la fertilité biologico-chimique du sol.....	32
Caractérisation de la MO (ou Fractionnement de la MO) .....	32
Taux de MO .....	34
Bilan humique.....	35

C/N du sol .....	35
Statut acido-basique du sol (pH).....	36
Indicateurs d'évaluation de la fertilité chimique du sol.....	39
Capacité d'échange cationique (CEC) .....	39
Calcaire total et calcaire actif .....	40
Teneur en azote : N total, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> .....	41
Teneur en éléments nutritifs majeurs : P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> O, CaO, MgO.....	42
Teneur en oligoéléments : Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo .....	44
<b>Bibliographie .....</b>	<b>46</b>

## La fertilité des sols

### Qu'est-ce qu'un sol ?

D'un point de vue pédologique, le sol peut être défini comme une formation superficielle issue de l'altération de substrats de diverses origines. Ces substrats peuvent être des roches (roches mères) ou des matériaux non-consolidés (dépôt d'alluvions, colluvions, loess, dépôts glaciaires...). Le sol correspond donc au compartiment entre l'atmosphère et le substrat. Il est structuré en couches horizontales successives, nommées horizons. Chacune de ces couches est composée de minéraux de différents degrés d'altération, d'air, d'eau, de matières organiques (MO) mortes plus ou moins dégradées et d'êtres vivants. Il existe une diversité de sols se distinguant par leur matériau de base, leur texture, leur structure, leur couleur, et leurs caractéristiques chimiques, biologiques et physiques (Cabidoche 2011 ; Gobat, Aragno et Matthey 2010 ; Fox, 2008 ; FAO 2021).

Le processus de formation d'un sol se nomme pédogénèse. Il s'agit d'un processus lent, variant de centaines d'années à plusieurs centaines de milliers d'années, influencé par divers facteurs. L'action de la topographie, du climat et des êtres vivants (végétaux et organismes vivants dans le sol) va engendrer des altérations physiques et chimiques du substrat d'origine. Ces altérations entraînent des fracturations du matériau d'origine, desquelles résulte la formation d'éléments d'origine minérale de différentes tailles : éléments grossiers (cailloux, graviers) et terre fine (sables, limons, argiles). Des réactions chimiques ont lieu dans le sol, comme des réactions d'hydrolyse ou de solubilisation de certains minéraux. Les êtres vivants occupent une place très importante dans la formation et l'évolution d'un sol. En plus de leur rôle dans l'altération physique des substrats initiaux, les êtres vivants vont permettre d'enrichir le sol en MO (par exsudation ou décomposition) et en minéraux (minéralisation de la MO). Le sol est donc à la fois le support et le produit du vivant (Cabidoche 2011 ; Gobat, Aragno et Matthey 2010 ; Fox, 2008 ; FAO 2021).

D'un point de vue agricole, le sol est principalement vu comme un support de production, animale ou végétale, à des fins de satisfaction des besoins humains. Il s'agit d'un milieu complexe et multifonctionnel : un support pour les êtres vivants, un habitat pour la biodiversité, un réservoir de matières organiques et minérales, un régulateur des échanges et des flux des écosystèmes et un système d'épuration des substances toxiques (Gobat, Aragno et Matthey 2010 ; Arrouays et al. 2012).

Afin de pouvoir répondre à sa fonction de support de production, il est important qu'un sol soit doté d'une certaine fertilité. De ce fait, un sol fertile doit pouvoir répondre aux besoins des végétaux en termes de conditions d'enracinement et d'alimentation en eau et en minéraux. Ainsi, les propriétés des sols doivent permettre l'infiltration et la rétention de l'eau, le stockage des minéraux et le développement de la faune du sol. Trois composantes de fertilité du sol peuvent être ainsi identifiées : physique, chimique et biologique (Figure 1) (Arrouays et al. 2012).

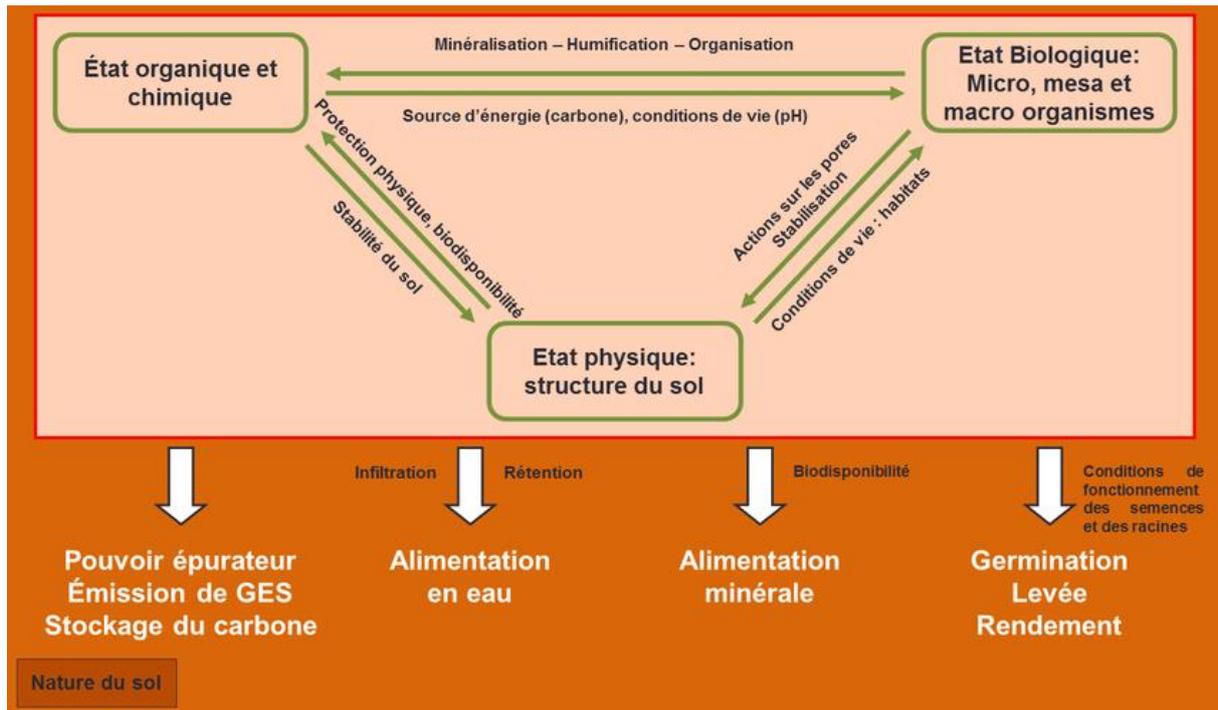


Figure 1 : Triptyque de fertilité des sols et fonctions supportées par le sol (Peigné 2018)

## Fertilité physique d'un sol

La fertilité physique peut se définir comme la qualité de la structure d'un sol. Celle-ci va conditionner l'aération, l'infiltration et la rétention de l'eau, l'enracinement. Ainsi, un sol fertile d'un point de vue physique sera capable de stocker, mais aussi de rendre disponibles l'eau et les minéraux aux plantes (Arrouays et al. 2012 ; Lesbegueris, Gourdien et Sarthou 2018). Cette qualité structurale dépend de plusieurs facteurs comme la texture d'un sol et sa charge en éléments grossiers, la porosité d'un sol, la teneur en MO, l'activité biologique ainsi que les pratiques culturales (Lesbegueris, Gourdien et Sarthou 2018 ; Fox, 2008).

La structure d'un sol doit pouvoir permettre l'aération du sol et à la fois une infiltration et une rétention de l'eau dans le sol. La porosité joue ici un rôle important. L'eau est stockée par la microporosité ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ) et la mésoporosité ( $0,2 - 50 \mu\text{m}$ ), alors que la percolation se fait par la macroporosité ( $> 50 \mu\text{m}$ ) (Lesbegueris, Gourdien et Sarthou 2018). L'exploration racinaire est favorisée par la macroporosité organisée verticalement. Elle permet à la plante d'atteindre de façon directe l'eau et les minéraux se trouvant dans la mésoporosité. Cette macroporosité est due à des fractures ou fissures présentes dans le sol, mais également à l'action du système racinaire des plantes et à l'activité biologique, notamment celle des vers de terre. La fertilité physique du sol est donc directement liée à sa fertilité biologique (Lesbegueris, Gourdien et Sarthou 2018). De même, la fertilité biologique du sol est liée à sa fertilité physique. En effet, un sol fertile doit pouvoir fournir les conditions favorables (accès à l'air, à l'eau, à la MO) au développement et à la vie des organismes du sol qui jouent

un rôle majeur dans la minéralisation des MO (Delahaie et al. 2016 ; Chaussod 1996 ; Jeffery et al. 2010).

Les éléments minéraux présents dans le sol sont issus du substrat d'origine du sol et des apports extérieurs (amendement, fertilisation, restitution des cultures et des couverts). Ces minéraux se retrouvent dans la solution du sol et sont ainsi plus ou moins sujets à une mobilité. Ils sont notamment retenus dans le sol par le complexe argilo-humique (CAH). Le CAH est une structure formée par l'association entre les argiles du sol et la MO stable ou « humus ». Ces complexes vont participer à la structuration du sol. Ils sont chargés négativement et permettent ainsi la fixation des cations présents dans le sol. La capacité de fixation d'un sol, appelée capacité d'échange cationique (CEC), dépend donc de la quantité et du type d'argile, du taux de MO, mais aussi du pH. La fertilité physique du sol est donc également liée à sa fertilité chimique (Interbio Franche-Comté s.d. ; Lesbegueris, Gourdien et Sarthou 2018 ; Fox 2008).

### Fertilité chimique d'un sol

La fertilité chimique du sol renvoie à la capacité d'un sol à fournir aux plantes tous les éléments nécessaires à leur croissance, c'est-à-dire l'eau et les différents éléments minéraux. Elle traduit la capacité des sols à soutenir une forte productivité végétale, tout en minimisant les apports externes (Arrouays et al. 2012 ; Lesbegueris, Gourdien, et Sarthou 2018).

Les éléments minéraux du sol se distinguent en deux catégories : les macro-éléments (azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium, soufre, chlore, sodium) et les oligo-éléments (manganèse, fer, zinc, cuivre, molybdène, nickel, cobalt, sélénium, iode). Les plantes absorbent exclusivement des éléments minéraux, au travers de la solution du sol pour la majorité d'entre eux. Ces minéraux sont nécessaires à la croissance et au développement des plantes. Un sol fertile sera donc un sol capable d'offrir les conditions permettant aux plantes d'assurer une nutrition végétale optimale. Il est nécessaire que le sol présente un équilibre chimique entre les minéraux, un pH favorable, une disponibilité en eau pour favoriser l'absorption. La fertilité chimique du sol est donc directement liée à sa fertilité (Lesbegueris, Gourdien, et Sarthou 2018 ; Denoroy et al. 2019 ; Félix-Faure, Fabre et al. 2009). Les matières organiques (MO) présentes dans le sol ont un rôle primordial dans la fertilité chimique du sol. Les MO du sol représentent généralement entre 1 et 10% de la masse des sols et regroupe l'ensemble des constituants organiques présents dans les sols. Ces constituants peuvent être morts ou vivants, d'origine végétale, animale ou microbienne, transformés ou non (Hubert et Schaub 2011 ; Saenger 2013 ; Chambre d'Agriculture Occitanie 2011b).

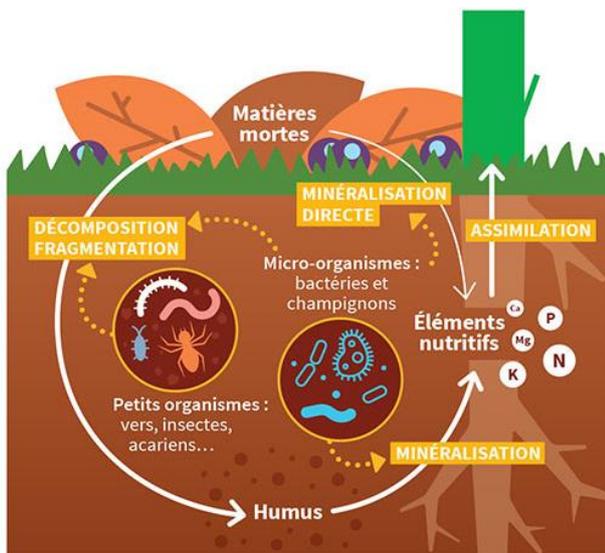


Figure 2 : Cycle de la matière organique dans le sol (ADEME 2021)

La MO « stable » ou « humus » modifie la structure du sol et améliore la rétention d'eau, d'où son rôle dans la fertilité physique du sol. La MO « libre » ou « active » est dégradée par les organismes du sol, les molécules complexes étant transformées en molécules simples, minérales, assimilables par les végétaux. Il s'agit de la minéralisation. Il y a donc un lien entre fertilité chimique du sol et fertilité biologique. L'action des êtres-vivants du sol va permettre d'augmenter le stock de minéraux disponibles pour les plantes (Hubert et Schaub 2011 ; Saenger 2013).

### Fertilité biologique d'un sol

La fertilité biologique d'un sol peut se définir comme l'aptitude des sols à apporter les éléments essentiels à la croissance des végétaux par l'action des organismes vivants. Il existe une grande diversité parmi ces organismes vivants (animaux, bactéries, champignons). L'ensemble de ces organismes contribue à la chaîne de dégradation des MO et donc à la libération des éléments nutritifs nécessaires à la plante. Il y a donc un lien direct entre fertilité biologique et fertilité chimique des sols. Leur contribution peut se faire de manière directe par le fractionnement le brassage et la minéralisation des MO (Figure 2) ou de manière indirecte par différentes relations intra et interspécifiques (symbioses, parasitismes, relations trophiques, etc.). L'équilibre du ratio entre dégradation et stabilisation de la MO détermine la fertilité biologique des sols (Delahaie et al. 2016 ; Chaussod 1996 ; Jeffery et al. 2010).

En plus de la minéralisation de la MO, d'autres fonctions peuvent être rendues par la diversité des organismes vivants dans le sol. La fertilité biologique favorise l'aération du sol et la disponibilité en eau grâce à la création de pores permettant la circulation (macropores) et la rétention (micropores) d'eau. Les vers de terre sont des organismes dits ingénieurs du sol, ils sont connus pour leur brassage, recyclage des MO ainsi que pour leur création de galeries dans le sol (Delahaie et al. 2016 ; Jeffery et al. 2010). La fertilité physique d'un sol est donc dépendante de la fertilité biologique de celui-ci. De plus, la fertilité du sol contribue à la protection des végétaux. En effet, un sol fertile est un sol possédant une diversité importante d'organismes vivants. Ces organismes peuvent aider à la régulation biologique de l'écosystème agricole (Delahaie et al. 2016).

## Les indicateurs d'évaluation des composantes de la fertilité des sols

### Qu'est-ce qu'un indicateur ?

Un indicateur correspond à une information quantitative ou qualitative et caractérise un phénomène souvent complexe. Il doit pouvoir répondre à plusieurs critères. Il se doit d'être synthétique, avoir une signification et sa portée doit dépasser celles des données et variables qui le constituent. La signification de l'indicateur est souvent donnée par sa comparaison avec des valeurs de référence, qui peuvent consister en une moyenne sur certains territoires, une valeur historique, un objectif, un seuil réglementaire ou une norme scientifique (Trochery 2003 cité par Fardeau 2015 ; Ghouil 2014). Il est possible que la base de valeurs de références soit inexistante ou non utilisable dans un contexte donné. Dans ces cas-là, il sera nécessaire de créer une nouvelle base de référence à part entière, correspondante au contexte donné. Un indicateur peut également avoir un caractère comparatif et permettre de discriminer une situation d'une autre.

Le tableau 1 ci-dessous reprend différents indicateurs d'évaluation de fertilité des sols.

Tableau 1 : Liste non exhaustive des indicateurs d'évaluation de la fertilité des sols

Indicateur	
Pierrosité (ou Charge en éléments grossiers)	Communautés de nématodes libres
Texture du sol	Biomasse microbienne
Résistance à la pénétration (ou Compaction)	Respiration microbienne
Densité apparente sèche	Vitesse de dégradation de la MO
Vitesse d'infiltration de l'eau	Caractérisation de la MO (ou fractionnement de la MO)
Réserve utile du sol	Taux de MO
Couleur du sol	Bilan humique
Hydromorphie	C/N du sol
Profondeur du sol	Statut acido-basique du sol (pH)
Structure du sol	Capacité d'échange cationique (CEC)
Stabilité structurale	Calcaire total et Calcaire actif
Battance	Teneur en azote : N total, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Développement racinaire : conformation des racines, profondeur de l'enracinement, répartition spatiale des racines, état sanitaire des racines	Teneur en éléments nutritifs majeurs : P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> O, MgO, CaO
Macrofaune du sol	Teneur en oligoéléments : Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo
Populations de lombriciens : diversité, abondance, activité des lombriciens	

## Indicateurs d'évaluation de la fertilité physique du sol

### Pierrosité (ou Charge en éléments grossiers)

#### Description et intérêts :

La pierrosité est le pourcentage d'éléments grossiers (> 2 mm) d'un sol. Ces éléments sont classés selon leur diamètre : 2 à 5 mm pour les gravillons, 5 mm à 2 cm pour les graviers, 2 à 20 cm pour les cailloux, 20 à 50 cm pour les pierres, et au-delà pour les blocs (Interbio Franche-Comté s.d. ; Chambre d'agriculture Hérault, Centre Agrométéo Hérault, Département Hérault 2011).

Un sol pierreux peut limiter le développement des cultures, rendre le travail du sol plus difficile ou encore user le matériel agricole. Une forte présence superficielle de cailloux entraîne une diminution de la surface utile d'humectation (Interbio Franche-Comté s.d. ; Chambre d'agriculture Hérault, Centre Agrométéo Hérault, Département Hérault 2011).

Le drainage est augmenté en présence de pierres, ce qui peut être un atout dans les sols à risque de saturation en eau (base argileuse ou limoneuse). En revanche, cela constitue une difficulté supplémentaire dans les sols grossiers à faible pouvoir de rétention en eau. De même, cet effet sera souvent positif en saison humide (augmentation de la portance, drainage) mais négatif en période sèche (faible réserve hydrique, assèchement). La pierrosité participe aussi à une certaine structuration du sol en réduisant en partie les phénomènes de compaction (micromouvements continus des éléments grossiers) (Interbio Franche-Comté s.d. ; Fülleman et al. 2019 ; Delaunois et al. 2013).

#### Méthode d'évaluation :

L'estimation de la pierrosité se fait visuellement à la surface du sol ou sur chacun des horizons d'un profil cultural, à l'aide d'une grille d'estimation du pourcentage en éléments grossiers (Figure 3) (Interbio Franche-Comté s.d. ; GLOBE® 2003-2005). Il s'agit d'une estimation grossière de la pierrosité. En effet, les éléments de petites tailles comme les gravillons peuvent être difficilement perceptibles.

L'estimation de la pierrosité peut également s'effectuer par prélèvement de sol et tamisage afin de prélever et de peser les éléments grossiers, et de les ramener au poids total du prélèvement (Centre Agrométéo Hérault, Département Hérault 2011 ; GLOBE® 2003-2005).

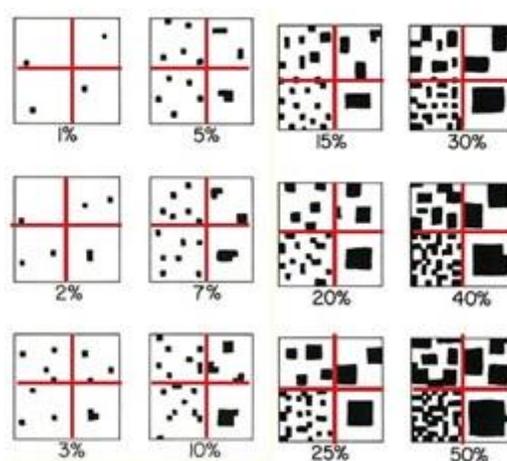


Figure 3 : Grille d'estimation de la pierrosité du sol (d'après Revised Standard Soil Chart et David Hammonds)

La précision de l'estimation visuelle de la pierrosité est soumise à l'expertise de l'opérateur réalisant cette estimation. Dans le cas des observations visuelles, cette précision peut cependant être augmentée par l'utilisation de logiciel de traitement d'image qui effectuerait un comparatif entre des photographies et des grilles d'estimation.

### Facteurs influençant l'indicateur :

La quantité de roches ou cailloux présente dans le sol est le fruit de la pédogenèse et du processus d'altération des roches ; il est donc difficile de faire évoluer ce paramètre à échelle de temps humaine (Fox 2008 ; FAO 2021). Cependant, certaines opérations anthropiques peuvent permettre de réduire la quantité d'éléments grossiers du sol. C'est le cas de l'épierrage par exemple, qui est une opération visant à sortir les pierres d'une parcelle pour limiter l'usure prématurée des outils de travail, avoir un lit de semence de meilleure qualité, etc. (Préfecture de la Réunion 2016).

## Texture du sol

### Description et intérêts :

La texture correspond à la caractérisation de la dimension des particules minérales du sol (granulométrie). Parmi ces particules, il est possible de distinguer les éléments grossiers avec un diamètre supérieur à 2 mm (cailloux, pierres, ...) et la terre fine avec un diamètre inférieur à 2 mm. La terre fine est composée de sables (2 mm – 50 µm), de limons (50 µm – 2 µm) et d'argiles (< 2 µm). Le nom de la classe texturale de la terre fine s'exprime par combinaison des particules dominantes. Par exemple, un sol peut être argileux, limono-argileux, argilo-caillouteux, limoneux, limono-sableux ou limono-sablo-argileux. Le premier nom correspond à la classe texturale dominante (Delaunois et al. 2013 ; Interbio Franche-Comté s.d.).

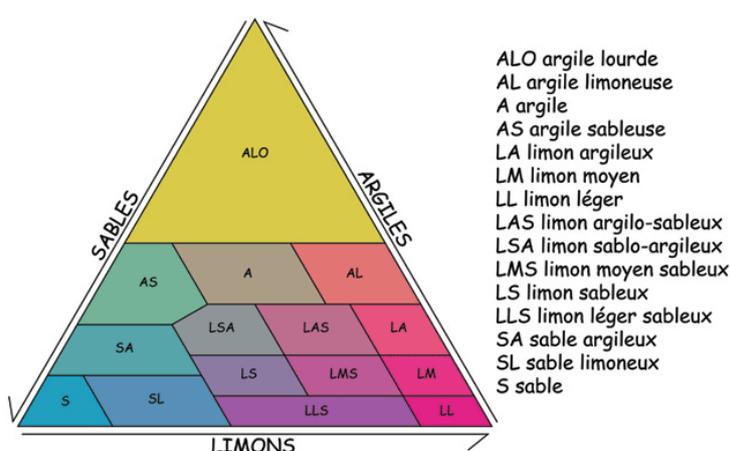


Figure 4 : Triangle de texture de l'Aisne (Paul van dijk 2013)

Les sols présentent des comportements différents selon leur texture. La texture a des conséquences sur la gestion de l'eau, le travail du sol ou encore la gestion de la fertilité.

Les argiles ont une bonne capacité de rétention en éléments nutritifs et stockent facilement l'eau. Elles possèdent une bonne capacité d'auto structuration. Elles sont cependant difficiles à travailler et demandent une attention particulière pour le choix des conditions du travail du sol pour ne pas détériorer la structure (risque de lissage et de destruction des argiles minéralogiques). L'équilibre fertile de ces sols argileux repose sur une teneur en MO suffisante pour se complexer avec les argiles et favoriser la disponibilité cationique (Interbio Franche-Comté s.d. ; Füllemann et al. 2019 ; FIBL et Biosuisse 2013).

Les limons possèdent une bonne capacité de rétention d'eau et une capacité de rétention en éléments nutritifs moyenne. Cependant, ils sont très fragiles et sont peu résistants aux agressions climatiques et mécaniques. Ils présentent un risque de battance, d'érosion et de compaction. Il est donc nécessaire de veiller à ne pas affiner trop la terre lors du travail du sol (Interbio Franche-Comté s.d. ; Füllemann et al. 2019).

Les sols sableux sont peu sensibles à la compaction et se réchauffent rapidement. Ils ont cependant une faible capacité de rétention des éléments nutritifs et sont très usants pour le matériel agricole. L'équilibre fertile de ces sols nécessite le maintien d'un certain taux de matières organiques stables afin d'améliorer la stabilité structurale du sol et la rétention en eau et éléments. Ils sont en effet très drainants ce qui peut entraîner des risques en période de sécheresse (Interbio Franche-Comté s.d. ; Füllemann et al. 2019).

### **Méthode d'évaluation :**

#### *Tests empiriques de terrain :*

L'évaluation se fait de manière empirique dans chacune des couches identifiées dans un profil cultural ou une tête de bêche. L'évaluation de la texture de chaque horizon se fait en prélevant de petits échantillons de terre (quelques grammes). Des tests tactiles (écrasement de terre entre le pouce et l'index, formation d'un boudin, etc.) sont effectués sur ces échantillons afin de déterminer la texture de l'horizon (Interbio Franche-Comté s.d. ; Füllemann et al. 2019).

La texture du sol peut également être estimée à l'aide d'un test de sédimentation. Un échantillon représentatif de sol ainsi que de l'eau sont introduits dans un bocal. Le bocal est ensuite agité et laissé au repos (2-3 jours). Différentes strates sont obtenues, elles correspondent aux différentes particules du sol. Le sable se dépose dans le fond, le limon se situe au milieu et l'argile en haut. La matière organique flotte à la surface de l'eau. L'épaisseur de chacune des couches permet de calculer les pourcentages de chaque élément à l'aide des formules suivantes (Fédération Départementale des CIVAM du Gard 2020) :

% de sable = (épaisseur de la couche de sable en cm X 100) ÷ épaisseur totale du sol en cm.

% de limon = (épaisseur de la couche de limon en cm X 100) ÷ épaisseur totale du sol en cm.

% d'argile = (épaisseur de la couche d'argile en cm X 100) ÷ épaisseur totale du sol en cm.

Chacun des pourcentages est ensuite reporté sur le triangle de texture (Figure 4) afin de déterminer la texture de l'échantillon de sol (Fédération Départementale des CIVAM du Gard 2020).

#### *Analyses en laboratoire :*

Il est aussi possible de comparer les résultats d'estimation de la texture issus de tests effectués sur le terrain, aux résultats donnés dans des analyses de terre (Fülleman et al. 2019).

Un test au bleu de méthylène permet d'évaluer la surface spécifique d'échange (ou surface active suivant la fraction de sol utilisée pour l'essai) d'un matériau argileux. Cette mesure permet d'avoir une indication sur la texture d'un échantillon de terre. Ce test considère que la valeur de bleu de méthylène VBS (Valeur Bleu du Sol) exprime globalement la quantité et la qualité de la fraction argileuse contenue dans ce sol (ARVOR Géotechnique 2011). Le test consiste à procéder à des injections successives de solution de bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenue en agitation et à prélever périodiquement une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier chromatique. L'apparition d'auréole indique la fin de l'absorption de bleu de méthylène par les particules d'argile (ARVOR Géotechnique 2011).

La VBS (Valeur Bleu du Sol) s'exprime en gramme de bleu pour 100g de matériau.  $VBS = (B/m_0) \times 100$  avec  $m_0$  la masse sèche de l'échantillon et B la masse de bleu introduite. Plus la VBS se rapproche de 0, plus la texture de l'échantillon sera sableuse. Plus la VBS augmente, plus la texture sera argileuse. L'activité argileuse se traduit par :  $ACB = VBS / C_2$  avec  $C_2$  la teneur en particules inférieure à 2  $\mu m$  (ARVOR Géotechnique 2011).

Dans le cas des tests de terrain, les résultats dépendent fortement de l'opérateur. Ils permettent d'avoir une estimation plus ou moins grossière de la texture d'une couche, suivant l'expertise. Les analyses en laboratoire permettent d'avoir des estimations bien plus fines.

#### **Facteurs influençant l'indicateur :**

La texture du sol est issue de la pédogenèse et des matériaux d'origine des sols. Elle n'évolue pas sur une échelle de temps humaine (Interbio Franche-Comté s.d. ; Fox 2008). Cependant, des événements ponctuels peuvent entraîner une modification de la texture en surface d'un sol. C'est le cas du phénomène d'érosion qui engendre une déstructuration de surface par arrachement et déplacement des particules d'un sol sous l'action d'un agent extérieur naturel (eau, air, froid, chaleur, hygrométrie, gel, dessiccation, etc.) (Tuan Long Pham 2008 ; Labreuche et Bousquet 2009).

## Résistance à la pénétration (ou Compaction)

### **Description et intérêts :**

Le tassement, ou compaction du sol est un phénomène physique de déformation des couches de sol plus ou moins en profondeur. Cette modification de la structure du sol peut être un phénomène naturel, cependant, il résulte souvent d'une pression exercée par un objet sur le sol. Il est principalement dû aux passages d'engins agricoles. Il peut également résulter d'un piétinement de troupeaux d'animaux dans le cas des élevages. La résistance à la pénétration d'une couche permet d'évaluer de manière empirique l'état de compaction d'un sol (Leneveu 2017 ; Tsague 2021).

Une zone compactée entraîne une diminution de la fertilité du sol. En effet, cette zone possède une porosité plus faible. La circulation de l'air et de l'eau y est donc réduite. Cette zone sera très lentement recolonisée par les organismes du sol. Les zones compactes sont également difficilement accessibles, voir inaccessibles, par les racines (Füllemann et al. 2019 ; Leneveu 2017). Ces horizons très compacts sont appelés horizons limitants. Dans le cas d'horizons profonds et très compacts, il est possible d'effectuer un décompactage en profondeur (sous-solage). Une autre solution est basée sur l'action plantes à système racinaire puissant pouvant pénétrer les zones compactées. Les crucifères, par exemple, ont un système racinaire en pivot qui pénètre le sol en profondeur, jusqu'à 30 cm pour le radis chinois. Les racines qui descendent en profondeur correspondent à des racines à fonction de support et de nutrition hydrique. Cependant, ce type de décompactage reste moins efficace que l'utilisation d'outils mécaniques (Füllemann et al. 2019 ; Leneveu 2017 ; Tsague 2021).

### **Méthode d'évaluation :**

L'évaluation de la compacité se fait de manière empirique dans chacune des couches identifiées dans un profil cultural ou un test bêche. Elle peut être réalisée par un expert, par le test de résistance à la pénétration du couteau (Delaunois et al. 2013 ; Füllemann et al. 2019). Il est aussi possible de tester la compacité d'un sol en évaluant la pénétrabilité du sol grâce à un pénétromètre (Delaunois et al. 2013 ; Tsague 2021).

Dans le cas des tests de terrain comme le test au couteau, les résultats dépendent fortement de l'opérateur. Ils permettent d'avoir une estimation empirique de la compaction d'une couche. L'utilisation d'un appareil comme un pénétromètre permet d'améliorer la précision de l'estimation de la compaction.

### **Facteurs influençant l'indicateur :**

Les sols ne possèdent pas tous la même sensibilité au tassement. Leur sensibilité fluctue avec le temps, selon plusieurs facteurs. Un de ces facteur est la texture du sol. Les limons sont les particules les plus sensibles au tassement. Les sables quant à eux, ont un faible pouvoir structurant, et prennent facilement en masse. Les argiles sont les plus résistantes au tassement, hors condition humide (Champart 2012 cité par Leneveu 2017 ; Interbio Franche-Comté s.d. ; Füllemann et al. 2019). Le taux de pierrosité a également une influence sur la sensibilité du sol au tassement. En effet, les éléments

grossiers permettent de conserver une certaine porosité par l'encombrement qu'ils engendrent et absorbent en partie la pression exercée par les engins agricoles (Leneveu 2017 ; Interbio Franche-Comté s.d.). L'humidité du sol est également importante. L'eau retenue par le sol provoque une diminution de la cohésion des particules entre elles et donc une augmentation des risques de compaction (Roger-Estrade 2017 cité par Leneveu 2017). Un passage sur un sol mal ressuyé provoque donc plus de modifications de la structure du sol que lorsqu'il est sec. De même, selon les types de sol, le travail du sol peut favoriser l'émiettement des mottes de terre et l'apparition de terre fine. Cette terre fine peut s'infiltrer dans les fissures et cavités du sol et augmenter les phénomènes de tassement (Leneveu 2017 ; Tsague 2021). Enfin, les taux de MO et de calcium dans le sol interviennent également dans sa sensibilité au tassement. Ce sont des facteurs de stabilité structurale qui permettent de maintenir les éléments du sol entre eux, grâce à la formation de complexes argilo-humiques et de ponts calciques (Leneveu 2017 ; Guerin 2016).

## Densité apparente sèche

### **Description et intérêts :**

La densité apparente permet de calculer la porosité et d'apprécier indirectement la perméabilité, la résistance à la pénétration des racines (Maertens 1964 cité par Yoro et Godo 1989), la cohésion des horizons (Yoro 1983) et la réserve en eau du sol (Henin, Monnier et Gras 1969 cité par Yoro et Godo 1989). Elle donne une appréciation absolue de la perméabilité, mais n'apporte pas d'information quant à l'organisation spatiale de cette perméabilité (Yoro et Godo 1989 ; Nsanzimfura 2015).

La densité apparente est faible dans les sols à structure grumeleuse stable (Duchaufour 1970 cité par Yoro et Godo 1989). Dans les sols tropicaux, les horizons humifères relativement structurés ont des densités apparentes plus faibles que celles des horizons minéraux sous-jacents à structure massive (Yoro 1983 ; de Boissezon 1965 cité par Yoro et Godo 1989). La densité apparente peut permettre de déterminer ou d'orienter les travaux de préparation du sol tels que le labour, le sous-solage, le pulvérisage, le hersage, etc. (Yoro et Godo 1989).

### **Méthode d'évaluation :**

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la densité apparente. La méthode au cylindre (C), la méthode au sable (S) et la méthode au densitomètre à membrane (M) sont fondées sur la détermination du poids spécifique apparent d'un volume de sol prélevé. Le volume est estimé immédiatement sur le terrain et le poids est évalué au laboratoire après un séchage et une pesée. La densité apparente se calcule de la manière suivante :  $da = P/V$  où P est le poids sec de l'échantillon, V le volume de l'échantillon prélevé et séché (Yoro et Godo 1989 ; Nsanzimfura 2015).

En ce qui concerne la méthode par gammamétrie (G), le principe se fonde sur la mesure de l'intensité atténuée  $N$  qui s'exprime selon la formule :  $N = N^{\circ} e^{-UPt}$ ,  
Où :  $N$  = intensité atténuée (nombre de photons gamma émis dans le sol) ;  $N^{\circ}$  = intensité initiale (nombre de photons initiaux) ;  $u$  = coefficient massique d'atténuation du matériau (coefficient d'absorption massique du sol) ;  $P$  = masse volumique du matériau ;  $l$  = longueur du parcours (épaisseur du sol traversée par les photons) ;  $e$  = base des logarithmes népériens. La connaissance de  $u$ ,  $l$  et  $N^{\circ}$  permet de calculer  $P$ , la densité apparente (Yoro et Godo 1989).

Il existe une forte interaction entre le sol et la méthode, ainsi pour un sol donné, les quatre méthodes de mesure de terrain donnent des résultats statistiquement différents. Les méthodes au densitomètre à membrane (M) et au sable (S) permettent d'obtenir des valeurs des densités apparentes relativement faibles, plus ou moins en relation avec la morphologie des sols, alors que les méthodes au cylindre (C) et par gammamétrie (G) donnent des valeurs élevées dues probablement à une surestimation. La méthode au densitomètre à membrane (M) se révèle plus précise que les autres et permet de mieux traduire les différences entre les propriétés densitométriques des sols. Elle présente cependant des limites et ne peut pas être conseillée dans le cadre d'un suivi de l'évolution de la densité apparente d'un sol sous culture mécanisée. Elle est difficilement utilisable dans les horizons trop meubles (Audry et al. 1973 cité par Yoro et Godo 1989 ; Dupouey, Thimonier et Behr 1997).

#### **Facteurs influençant l'indicateur :**

La densité du sol dépend de plusieurs facteurs tels la texture, la structure du sol, le taux de MO, le développement racinaire, les galeries et la fissuration du sol (porosité). Ainsi, les pratiques culturales comme le travail du sol et le type de culture vont influencer la densité du sol (Boyer 1982 ; Labreuche, Duparque et Boizard 2013).

### Vitesse d'infiltration de l'eau

#### **Description et intérêts :**

La vitesse d'infiltration de l'eau est un indicateur de la capacité d'infiltration d'un sol. L'infiltration dépend des caractéristiques de la matrice du sol (texture, structure, densité apparente) et est favorisée par l'activité des organismes du sol ainsi que les pratiques culturales (Capowiez, Parveaud et al. s. d. ; Labreuche, Duparque, Boizard 2013). La capacité du sol à infiltrer l'eau est importante dans les agrosystèmes, elle permet de limiter les processus d'érosion et de saturation en eau lors de fortes précipitations (Ilstedt et al. 2007 cité par Brauman et Thoumazeau 2020). La vitesse de déplacement de l'eau dans le sol affecte également le cycle des nutriments et leur disponibilité pour la plante (Brauman et Thoumazeau 2020 ; Capowiez, Parveaud et al. s. d.).

Une faible vitesse d'infiltration traduit des phénomènes de dégradation des sols comme la présence d'une croûte de battance ou un phénomène de compaction. Cette compaction du sol peut causer une réduction de l'activité biologique. En effet, les zones imperméables sont déficitaires en eau et en air ce qui limite le développement des organismes vivants dans le sol. De plus, une faible vitesse d'infiltration peut traduire un phénomène d'accumulation et de ruissellement lors de forte pluie. Phénomène qui augmente les risques d'érosion et de lessivage (Chambre d'Agriculture Gironde 2018 ; Leneveu 2017).

### **Méthode d'évaluation :**

La vitesse d'infiltration correspond à la quantité d'eau, par unité de surface et unité de temps qui pénètre dans le sol. Ce taux peut être calculé sur la base des résultats de mesures sur le terrain et/ou sur la base de la loi « Loi de Darcy ». Il existe différents dispositifs terrain permettant de mesurer la vitesse d'infiltration de l'eau dans un sol. Il est possible d'utiliser un infiltromètre à double anneau par exemple, ou un simple cylindre (Mbilou et al. 2016). La méthode « Beerkan » est une méthode très répandue. Elle a pour but de mesurer le potentiel d'infiltration du sol in situ. Elle consiste à mesurer la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol, en condition de sol humide et ressuyé. Un volume déterminé d'eau est versé dans un cylindre enfoncé à la surface du sol. Le temps nécessaire à l'infiltration complète du volume d'eau versé est noté. L'opération est répétée jusqu'à ce que le temps d'infiltration se stabilise (Brauman et Thoumazeau 2020 ; Capowiez, Parveaud et al. s. d.).

Il est possible d'ajouter du bleu de méthylène afin d'observer les galeries de vers de terre. Le bleu va colorer les galeries qui sont directement connectées avec les pores de la surface. Cette méthode permet d'apporter une information supplémentaire quant à l'organisation spatiale de la porosité du sol et donc de visualiser le mode d'infiltration de l'eau (Capowiez, Parveaud et al. s. d.).

Dans le cas du test de terrain, la précision des résultats va dépendre du nombre de répétitions du test réalisé par l'expérimentateur. Compte tenu de la variabilité des mesures dues à l'hétérogénéité naturelle du sol, un nombre minimal de 6 répétitions est conseillé (Capowiez, Parveaud et al. s. d. ; Mbilou et al. 2016).

### **Facteurs influençant l'indicateur :**

La vitesse d'infiltration de l'eau dans un sol dépend de la topographie, de l'état textural et structural du sol (texture, état de surface, structure, compaction, porosité, etc.), de la teneur initiale en eau et du débit d'alimentation en eau. Plusieurs pratiques culturales vont influencer ainsi la vitesse d'infiltration de l'eau. C'est le cas du travail du sol ou du type de culture implantée (Boyer 1982 ; Abdallah 1999).

### Description et intérêts :

La Réserve Utile (RU) d'un sol équivaut à la quantité d'eau utilisable par la plante qui est retenue autour des particules de terre ou dans les fines fissurations du sol. La RU peut être divisée en deux parties : la RFU (Réserve Facilement Utilisable) et la RDU (Réserve Difficilement Utilisable) qui engendre du stress hydrique. Lorsque que la RU est épuisée, le point de flétrissement permanent est atteint. La capacité de rétention ou capacité au champ correspond à la réserve utile à laquelle s'ajoute l'eau inutilisable par les plantes. L'utilisation de l'eau par les plantes est possible tant que la force de succion des racines est supérieure à celle exercée par le sol. Quand la force exercée par le sol devient supérieure à celle des racines, le point de flétrissement est atteint, les racines n'arrivent plus à absorber l'eau. Ainsi, plus la RU est grande, plus la quantité d'eau disponible pour les plantes sera importante (Gendry 2018 ; Poudou s.d.).

### Méthode d'évaluation :

La RU d'un sol équivaut à la somme des RU de chacune des couches présentes dans le sol (Goulet et al. 2004 ; Poudou s.d.). Il existe différentes méthodes de calcul ou d'estimation de la réserve utile d'un sol.

La RU d'une couche peut se calculer de la manière suivante :

$RU = (1 - EG\%) * (W_{cc} - W_{pfp}) * \rho_d * Z$  avec RU la réserve utile (mm), EG% le pourcentage en éléments grossiers,  $W_{cc}$  l'humidité à la capacité au champ,  $W_{pfp}$  l'humidité au point de flétrissement,  $\rho_d$  la densité apparente du sol et Z l'épaisseur ou profondeur du sol (dm) (Goulet et al. 2004).

Deux types de sondes permettent d'obtenir des indications sur la réserve hydrique des sols : (1) Les sondes capacitatives qui indiquent une estimation de la RFU ainsi qu'une visualisation de la prospection racinaire (Gendry 2018). (2) Les sondes tensiométriques qui mesurent la tension en eau du sol, elles indiquent la force de succion nécessaire aux racines pour prélever l'eau (Gendry 2018).

Une approche simplifiée du calcul de la réserve utile permet d'estimer celle-ci à partir de la texture de la couche, de l'épaisseur de la couche (Z en cm), du pourcentage en éléments grossiers (%EG) de la couche :  $RU = (RU \text{ estimée selon la texture}) * Z * (1 - \%EG)$  (Delaunois, Boucher et Plence 2014). Les valeurs de RU estimées selon la texture de la couche sont les suivantes (Gendry 2018) :

- 0.9 à 1.2 mm/cm de sol pour un sable.
- 1.3 à 1.6 mm/cm de sol pour un limono-argileux.
- 1.8 à 2 mm/cm de sol pour un sol argileux, argilo-limoneux, argilo-sableux.

La valeur de la RU varie en fonction de la méthode de détermination choisie. Elle peut varier en fonction des seuils d'humidité maximale et minimale choisis pour le calcul de la RU, et selon les profondeurs d'enracinement retenues (Combres et al. 1999 ; Poudou s.d.).

### **Facteurs influençant l'indicateur :**

La réserve Utile (RU) du sol varie selon plusieurs facteurs. La structure et la texture du sol jouent un rôle important. La structure du sol influence la circulation de l'eau, l'infiltration de l'eau, la remontée capillaire et la qualité d'enracinement de la culture. La texture influence la capacité de rétention du sol. Les argiles possèdent une capacité de rétention plus forte que les limons, et les limons que les sables. La MO stable possède un pouvoir de rétention en eau important. Le taux de MO contribue aussi à améliorer la stabilité structurale du sol, à limiter la formation de croûte de battance qui limite l'infiltration. L'augmentation du pourcentage d'éléments grossiers (graviers, cailloux...) réduit l'espace pouvant être occupé par l'eau. L'enracinement des plantes est également un facteur important. Plus l'enracinement sera développé verticalement et horizontalement, plus la plante pourra utiliser l'eau présente en profondeur (Gendry 2018 ; Poudou s.d.).

### Couleur du sol

#### **Description et intérêts :**

La couleur du sol est un indicateur utilisé dans les études de terrain ainsi que dans les systèmes de classifications des sols. La couleur d'un sol permet d'obtenir des indications sur la composition du sol. Les teintes des sols dépendent de la présence des calcaires, des composés organiques et de la quantité de fer. Les couleurs plus foncées (noirâtres) sont généralement dues aux MO. Elles peuvent ainsi renseigner sur certaines pratiques agricoles comme par exemple la profondeur de labour, la fertilisation organique. Les couleurs plus claires (blanchâtres) sont souvent associées au calcaire. Le brun correspond à la brunification des sols causé lors de la pédogenèse. La couleur rouge est généralement due à l'oxydation du fer (Escadafal, Girard, et Courault 1988 ; Delaunois et al. 2013).

#### **Méthode d'évaluation :**

La couleur d'un sol peut être évaluée en réalisant des observations visuelles, lors de tests de terrain ou profil cultural, grâce à la charte de Munsell. Il s'agit d'une référence internationale pour la classification des sols, basée sur la couleur. Les notations de cette charte permettent de comparer les échantillons de terre entre eux de manière précise. Chaque notation de la charte porte un nom correspondant à un système à trois dimensions : la teinte (Hue), la clarté (Value), la pureté (Chroma). La teinte donne des indications sur les couleurs (rouge, jaune, vert, bleu et violet). La pureté donne des indications sur la saturation de la couleur (Munsell Color 1994).

La précision de cette méthode dépend de l'expérimentateur. Les conditions d'observation doivent être contrôlées au mieux. Sur le terrain, il est préférable d'opérer sous un ciel clair, en s'orientant vers le nord et en évitant les heures de début et de fin de journée. Des vêtements et du matériel de couleur neutre sont préférables afin de ne pas fausser la couleur du prélèvement de terre. Une autre possibilité est l'observation au laboratoire, sous un éclairage artificiel normalisé (Escadafal, Girard, et Courault 1988).

**Facteurs influençant l'indicateur :**

Différents facteurs vont influencer la couleur du sol : la cohésion chimique des particules, la quantité de MO et l'humidité du sol. La quantité de MO aura tendance à rendre la couleur du sol plus foncée. L'humidité influence aussi la couleur du sol. Plus le sol est humide, plus il est foncé. L'hydromorphie va également causer des changements de couleur à certains endroits du sol (GLOBE® 2003-2005 ; Escadafal, Girard, et Courault 1988 ; Delaunois et al. 2013).

## Hydromorphie

**Description et intérêts :**

L'hydromorphie correspond à la manifestation morphologique de l'engorgement, temporaire ou permanent, d'un sol. Elle se présente sous forme de taches colorées. La forme de ces taches, leurs concentrations, leurs colorations, résultent de la dynamique du processus d'oxydo-réduction. Le fer et le manganèse vont créer une coloration plutôt rouille ou rougeâtre en milieu oxydé (présence d'oxygène) et une coloration plutôt bleue en milieu réducteur (pauvre en oxygène) (Delaunois et al. 2013 ; Interbio Franche-Comté s.d.).

Un sol présentant des caractéristiques d'hydromorphie indique une accumulation d'eau. Cette accumulation est due à l'incapacité de drainage du sol. L'excès d'eau non évacuée peut restreindre le développement biologique des racines par asphyxie (Interbio Franche-Comté s.d.).

**Méthode d'évaluation :**

L'évaluation des traces d'hydromorphie se fait par des observations visuelles dans un profil de sol ou d'un test bêche. La notation d'hydromorphie peut être effectuée par la classification du GEPPA qui répartit les sols en 6 classes selon leur seuil d'hydromorphie (Delaunois et al. 2013 ; Interbio Franche-Comté s.d.).

La précision de l'estimation visuelle de la présence d'hydromorphie est soumise à la précision de l'opérateur réalisant l'estimation.

**Facteurs influençant l'indicateur :**

La présence d'hydromorphie d'un sol dépend de la texture et de la structure d'un sol, mais aussi de l'activité des microorganismes anaérobies dont la respiration repose sur la réduction de certains composés comme le fer et le manganèse (Vizier 1984 cité par Baize et Ducommun 2014). La rapidité l'expression de l'hydromorphie dépend des propriétés du sol (pH, MO, etc.) et liée aux conditions météorologiques (température, périodes d'engorgement) (Vizier 1971 cité par Baize et Ducommun 2014 ; Interbio Franche-Comté s.d.).

## Profondeur du sol

### **Description et intérêts :**

La profondeur du sol définit le volume de sol dans lequel les racines peuvent potentiellement se développer. Cet espace est également important pour le stockage de l'eau et la vie du sol (Interbio Franche-Comté s.d. ; Delaunois et al. 2013).

Plus un sol est profond plus sa capacité à stocker l'eau, et donc à résister aux épisodes de sécheresse, sera importante. De même, un sol profond permet un meilleur développement racinaire (Interbio Franche-Comté s.d. ; Delaunois et al. 2013).

### **Méthode d'évaluation :**

La mesure de la profondeur peut se faire avec un pénétromètre, ou à l'aide d'un mètre lors de l'observation d'un profil culturale (Interbio Franche-Comté s.d. ; Delaunois et al. 2013).

La précision de la mesure de la profondeur d'un sol va dépendre de la précision de l'outil de mesure utilisé et de la lecture de la mesure par l'expérimentateur.

### **Facteurs influençant l'indicateur :**

La profondeur du sol, ou épaisseur, est due à la quantité d'éléments issue de l'altération de la roche mère, des apports en biomasse organique et de la topographie. Le temps de formation du sol se compte en milliers d'années. L'épaisseur du sol peut être augmentée par des apports de terre extérieurs réalisés par l'homme. Elle peut aussi diminuer à cause des phénomènes d'érosion (Fox 2008 ; Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales 2022).

## Structure du sol

### **Description et intérêts :**

La structure correspond à l'architecture du sol, au mode d'agencement de ses composants. La structure du sol exprime son mode de fonctionnement et détermine ses qualités agronomiques (Delaunois et al. 2013 ; Gautronneau et Manichon 1987).

Un sol bien structuré permettra un équilibre entre mouvement et rétention de l'eau, ainsi qu'une circulation de l'air optimale. La structure du sol influence les conditions de l'enracinement des plantes et de leur alimentation en eau et nutriments (Fox 2008). L'évaluation de la structure de sol permet de détecter un éventuel problème de compaction et de prendre les bonnes décisions en termes de travail du sol (Interbio Franche-Comté s.d. ; Delaunois et al. 2013).

### **Méthode d'évaluation :**

L'évaluation de la structure peut se faire à l'aide d'un profil culturel ou d'un test bêche. Il existe différentes méthodes de caractérisation de la structure du sol.

Le mode d'assemblage des horizons peut être identifié avec les dénominations Ouvert (O), Bloc (B), Continue (C). Les mottes peuvent être classées selon les terminaisons mottes delta, mottes phi ou mottes gamma. Chaque terminaison donne une indication sur l'organisation de la motte (présence de discontinuités, cavités, fissures) (Labreuche et al. 2013 ; Gautronneau et Manichon 1987). D'autres terminologies peuvent être utilisées pour caractériser les agrégats : grumeleux, polyédriques, anguleux, massifs, laminaires (Delaunois et al. 2013 ; Füllemann et al. 2019).

Une autre méthode d'évaluation de la structure du sol est la méthode VESS (Visual Evaluation of Soil Structure) originellement appliquée sur le test à la bêche. La méthode VESS se base sur une description visuelle de la structure des différentes couches de sol entre 0 et 25 cm. Elle propose d'évaluer la structure du sol en lien avec l'activité biologique et la culture étudiée (racines) en considérant la forme, la taille, la facilité à briser les agrégats de différentes profondeurs d'un bloc de sol. La description est guidée par une fiche descriptive comprenant des photos de différentes typologies d'agrégats et de mottes. Cette description permet d'attribuer un score global entre 1 (sol très friable sans structure) et 5 (sol très compact) (Guimarães, Ball, et Tormena 2011 cité par Brauman et Thoumazeau 2020 ; Füllemann et al. 2019).

Les différentes méthodes de classification de la structure d'un sol sont basées sur des appréciations visuelles, la précision de l'estimation de la structure d'un sol dépend donc de l'opérateur, mais aussi de la méthode choisie.

### **Facteurs influençant l'indicateur :**

Plusieurs facteurs influencent la structure du sol. Tout d'abord le travail du sol, qui vise à améliorer la structure du sol afin d'optimiser la croissance et le développement des cultures. Les amendements (matières organiques et apports calciques) sont aussi destinés à favoriser la structure du sol. Le développement racinaire joue également un rôle au niveau de la structure du sol. En général, une densité racinaire plus importante permet une amélioration de la structure du sol. La texture du sol, et plus particulièrement la teneur en argile, ainsi que la teneur en humus sont aussi importantes. Ces deux composantes favorisent le développement d'une bonne structure (Fox 2008 ; Interbio Franche-Comté s.d.).

## Stabilité structurale du sol

### **Description et intérêts :**

La stabilité structurale permet de mesurer la résistance des agrégats à la désagrégation. Un sol dont les agrégats ont une forte cohésion possède une bonne stabilité structurale (Fox 2008 ; Le Bissonais et Le Souder 1995).

Une faible stabilité structurale conduit à une désagrégation plus intense. Les produits de la désagrégation (sédiments et micro-agrégats) sont plus petits et donc plus facilement détachés et transportés. Le phénomène d'érosion est donc plus important. Un autre phénomène pouvant être causé par une faible stabilité structurale est la

formation d'une « croûte de battance ». Il s'agit d'une couche fine à la surface du sol où la porosité est très réduite et la densité apparente est plus importante. Cette couche est créée par la désagrégation des agrégats à la surface du sol. Les sols à faible stabilité structurale forment des croûtes très rapidement sous l'impact des gouttes de pluie (splashing). Les sols à forte stabilité les forment plus lentement. Les sols pauvres en argile et riches en limons ou sables fins sont très sensibles à la battance (Fox 2008 ; Le Bissonais et Le Souder 1995).

#### **Méthode d'évaluation :**

La méthode utilisée pour mesurer la stabilité structurale repose sur l'attribution d'un score lié à la stabilité des agrégats dans l'eau (slack test). Les agrégats sont prélevés à deux profondeurs : 0-2 cm et 2-10 cm. Le score est attribué en fonction de la désagrégation ou de la dispersion de l'agrégat dans l'eau au cours du temps à travers deux étapes successives d'immersion des agrégats sous l'eau (Herrick et al. 2001 cité par Brauman et Thoumazeau 2020).

Le Bissonais et Le Souder (1995) effectuent une comparaison de différentes méthodes de mesures de la stabilité structurale. Leur objectif est de proposer une méthodologie donnant une description et un classement du comportement structural des sols sous l'action de l'eau. La méthodologie proposée prend en compte les mécanismes de la désagrégation et les paramètres physico-chimiques de cette désagrégation. Elle intègre une série de trois traitements complémentaires. Il est important d'intégrer le fait que la stabilité structurale n'est pas le seul paramètre influant sur la battance et l'érosion. D'autres facteurs comme la couverture du sol et la pente jouent un rôle également (Le Bissonais et Le Souder 1995).

#### **Facteurs influençant l'indicateur :**

La stabilité des agrégats est liée à différents facteurs. Pour un contexte pédoclimatique donné, la stabilité des agrégats dépend de la texture du sol, de la teneur en MO et des interactions des organismes vivants du sol qui, par leur métabolisme, agrègent les particules organiques et minérales. Les sols avec des textures faibles en argiles ont une faible cohésion et donc une faible stabilité structurale. En effet, les minéraux argileux ont une charge électrostatique négative, les cations en solution ont une charge électrostatique positive. L'attraction entre argiles et cations permet aux argiles de former des agrégats par des « ponts cationiques ». Le calcium est un cation particulièrement bénéfique pour la structure du sol et favorise la formation d'agrégats stables (Fox 2008 ; Amézketa 1999 cité par Brauman et Thoumazeau 2020).

### **Description et intérêts :**

Le phénomène de battance est caractérisé par la destruction des agrégats à la surface de certains sols, notamment à texture limoneuse, sous l'impact des gouttes de pluie (effet « splash »). Les gouttes de pluie causent l'éclatement des agrégats et le détachement de particules de terre fine de la surface de ces agrégats. Ce phénomène est suivi par la formation d'une croûte de surface à structure plus ou moins feuilletée, plus ou moins continue (Labreuche et Bousquet 2009 ; Le Bissonnais et Le Souder 1995).

La croûte de battance entraîne un ralentissement de l'infiltration d'eau dans le sol et donc une augmentation des risques de ruissellement et d'érosion. Cette croûte peut également compromettre la levée des plantules qui n'ont pas assez d'énergie pour la traverser (Labreuche et Bousquet 2009 ; Le Bissonnais et Le Souder 1995).

### **Méthode d'évaluation :**

La battance peut être estimée par observation visuelle de la surface du sol. Elle peut également être calculée en laboratoire à partir des résultats d'analyses de terre. Un « indice de battance » (IB) est calculé. Il permet d'approcher la sensibilité a priori d'un sol vis à vis de ce phénomène (Rémy et Marin-Laflèche 1974 cité par Ancelin et al. 2007) :

$$IB = \frac{(1,5 \times \% \text{ de limons fins}) + (0,75 \times \text{limons grossiers})}{(\% \text{ argile} + 10 \times \% \text{ de matière organique})} - C$$

Sur le terrain, la battance peut être évaluée par de simples observations visuelles (Fülleman et al. 2019 ; Delaunois et al. 2013).

Dans le cas des observations visuelles, les résultats dépendent fortement de l'opérateur.

### **Facteurs influençant l'indicateur :**

Pour un sol de composition granulométrique donnée, l'indice de battance diminue avec une augmentation de la teneur en MO de la couche de sol travaillée. L'adoption de techniques sans labour conduit en général à un enrichissement relatif de la couche superficielle du sol en MO. Pour certaines, elles favorisent le maintien des résidus de cultures en surface. Ces techniques peuvent ainsi contribuer à limiter la sensibilité du sol à la battance (Ancelin et al. 2007).

## Indicateurs d'évaluation de la fertilité physico-biologique du sol

Développement racinaire : conformation des racines, profondeur de l'enracinement, répartition spatiale des racines, état sanitaire des racines

### **Description et intérêts :**

Le système racinaire assure de multiples fonctions comme l'approvisionnement de la plante en eau et en éléments nutritifs, le maintien de la structure du sol et de son statut organique, ou encore la réduction des risques d'érosion. La rhizosphère constitue une niche écologique particulière où l'activité biologique du sol y est intense. L'étude du développement racinaire est un indicateur de fertilité du sol. La conformation des racines et la profondeur de l'enracinement sont des indicateurs de la structure du sol. Ils permettent de mettre en évidence les zones creuses ou cavités, ainsi que les zones compactées (Azevedo, Chopart, et Medina 2011 ; Delaunois et al. 2013).

Les racines ne descendront pas profondément dans le sol si cela n'est pas nécessaire ou si elles sont entravées par une zone compacte. Les racines peuvent également privilégier l'utilisation de chemins préexistants tels que les galeries de vers de terre, fissures entre les mottes, fentes de retrait, etc. La répartition spatiale des racines permet également d'identifier les zones les plus riches en éléments nutritifs (Füllemann et al. 2019 ; Delaunois et al. 2013).

### **Méthode d'évaluation :**

L'étude du développement racinaire peut être effectuée grâce à différentes méthodes.

Il existe la méthode par lavage et tri suivi du séchage et de la pesée des racines. Elle est appliquée sur le prélèvement de la totalité du système racinaire ou sur des carottages représentatifs (Pearson et Jacobs 1985 cité par Zante 1993).

Le développement racinaire (évaluation de la conformation des racines, la profondeur de l'enracinement, la répartition spatiale des racines, l'état sanitaire des racines) peut également être apprécié lors de l'étude d'un profil cultural (Delaunois et al. 2013 ; Füllemann et al. 2019 ; Gautronneau et Manichon 1987). Cette méthode est basée principalement sur des observations visuelles. Ainsi, les résultats obtenus dépendent fortement de l'opérateur.

### **Facteurs influençant l'indicateur :**

Différents facteurs vont influencer le développement racinaire. L'état structural du sol (structure du sol, compaction, porosité) joue un rôle important. La présence en éléments nutritifs est également un déterminant de la répartition spatiale et de la densité des racines (Füllemann et al. 2019 ; Delaunois et al. 2013).

## Indicateurs d'évaluation de la fertilité biologique du sol

### Macrofaune du sol

#### **Description et intérêts :**

La macrofaune du sol comprend tous les invertébrés du sol mesurant plus de 2 mm, c'est-à-dire ceux qui sont facilement visibles à l'œil nu. Les principaux organismes du sol et leurs fonctions sont : les prédateurs (araignées, scolopendres, carabes), les rhizophages (vers blancs), les phytophages (limaces, escargots), les ingénieurs de la litière et détritivores (cloportes, iules...), ingénieurs du sol (vers de terre, termites) (AFES, Mairie de Paris, et Educagri 2014 ; Blanchart, Peigné, et Vian 2021).

Les vers de terre jouent un rôle majeur dans la fertilité des sols. Ils ingèrent la terre et redéposent la terre digérée dans le sol ou à la surface sous forme de turricule. Cette terre digérée est structurée et riche en éléments nutritifs. Les myriapodes (ou 1 000 pattes) vivent généralement en surface du sol. Ils sont détritivores et consomment donc des débris végétaux en décomposition. Les fourmis occupent un large éventail de niches écologiques (herbivores, prédateurs, charognards, mutualistes, parasites, mais aussi éleveurs de plantes, de champignons, et même d'insectes). L'importance de leur biomasse (15-20% de la biomasse terrestre) fait qu'elles influent sur la disponibilité des ressources nutritives et sont souvent définies à ce titre comme des ingénieurs écologiques. Les cloportes sont très présents en surface du sol, dans les litières de feuilles par exemple. Ce sont de décomposeurs de MO. Les termites sont particulièrement abondants dans les régions tropicales et subtropicales. Leur intestin leur permet de digérer la ligno-cellulose, un composé du bois indigeste pour pratiquement tous les animaux. Ils jouent donc un rôle primordial dans le recyclage de la MO et dans la fabrication des sols qu'ils drainent, stabilisent et enrichissent grâce à des galeries souterraines. Une modification dans la présence et l'abondance de tous ces organismes vivants, va influencer les différentes fonctions qu'ils effectuent et notamment la dégradation de la MO, l'aération et la structuration du sol (AFES, Mairie de Paris, et Educagri 2014 ; Peigné 2018 ; Jeffery et al. 2010).

#### **Méthode d'évaluation :**

L'évaluation de la macrofaune du sol peut se faire grâce à des dispositifs de captures, suivis de l'utilisation d'une clé de détermination. Ce test permet de se familiariser avec la reconnaissance des insectes et autres organismes et d'avoir une première vision du type et de la diversité de la macrofaune. La diversité des insectes peut être estimée par le nombre de familles représentées. La méthode d'échantillonnage et le nombre d'échantillons jouent un rôle important dans l'étude de la macrofaune du sol. Le nombre d'échantillons détermine la puissance et la robustesse des tests statistiques, mais aussi le nombre d'espèces observées (Chambre d'Agriculture Gironde 2018 ; Mathieu 2004).

### **Facteurs influençant l'indicateur :**

Différents facteurs biotiques et abiotiques vont jouer sur la diversité, l'abondance et l'activité de la macrofaune du sol. Parmi ces facteurs, le climat, les propriétés physico-chimiques des sols, les propriétés physico-chimiques des ressources (végétales ou animales), et les interactions entre la macrofaune du sol et la microflore influencent fortement la macrofaune du sol (Lavelle 1987 cité par Mathieu 2004 ; Six 2014).

### **Populations de lombriciens : diversité, abondance, activité des lombriciens**

#### **Description et intérêts :**

Les vers de terre sont présents dans tous les sols et jouent un rôle majeur dans le maintien de leur fertilité. Ces espèces sont généralement regroupées en 3 groupes écologiques correspondant à leur distribution dans le sol et leur morphologie : les épigées, anéciques et endogées. Les épigées, 1-5 cm de long, vivent à la surface du sol et peuvent se retrouver dans les premiers centimètres du sol. Ils ne construisent pas de galeries et se nourrissent de la MO morte ou en décomposition à la surface du sol (organismes saprophages), activité importante pour le recyclage de la MO. Les anéciques, entre 10 et 110 cm de long, vivent dans des galeries permanentes verticales à subverticales connectées à la surface du sol et pouvant atteindre 5 à 6 m de long. Ils remontent à la surface du sol généralement la nuit pour se nourrir de MO morte (litière en décomposition, feuilles, etc...) qu'ils enfouissent et mélangent avec le sol (organismes saprogéophages). Leurs déjections, déposées sous forme de turricules à la surface du sol, jouent un rôle important dans l'enrichissement organique du sol. Enfin, les endogées, entre 1 et 20 cm de long, vivent tout le temps dans le sol et ne remontent quasiment jamais à la surface : ils peuvent être localisés dans les premiers centimètres du sol jusqu'aux horizons de profondeur. Ils ingèrent le sol (organismes géophages) et en consomment la MO humifiée. Ces organismes creusent des réseaux de galeries temporaires, horizontaux et très ramifiés dans lesquels ils déposent leurs déjections, générant ainsi une structure grumeleuse (Jeffery et al. 2010 ; Blouin et al. 2013).

Une quantité élevée de vers de terre dans un sol traduit généralement une forte activité biologique. Cependant, il peut être erroné de poser le postulat qu'un sol pauvre en vers de terre indique une faible activité biologique. En effet, certains sols sont naturellement dépourvus de vers de terre du fait de leur composition. De plus, les vers de terre ne sont pas toujours visibles. Quand le sol est trop sec, ils se réfugient en profondeur dans le sol, s'enroulent sur eux même dans une cavité, entrent en diapause et attendent des conditions plus propices à leur activité (Capowiez, Loricat et al. s. d.). L'appréciation de l'activité des vers de terre en profondeur dans le sol présente un intérêt pour comprendre l'enracinement ou l'infiltration de l'eau dans le sol. En effet, les macropores d'origine biologique sont des voies préférentielles de passage des racines dans la partie non travaillée du sol (Peigné et al. s. d. ; Peigné 2018).

### **Méthode d'évaluation :**

#### *Diversité et abondance des lombriciens :*

Le prélèvement et la détermination simplifiée de vers de terre reposent sur un test simple. Il s'agit du prélèvement d'un volume de sol frais suivi d'un tri des vers de terre, d'une phase d'identification de leur classe écologique puis de la mesure de l'abondance (comptage) et de la biomasse (pesée) de chacune des classes (Capowiez, Loridat et al. s. d.).

#### *Activité des lombriciens :*

L'activité des vers de terre est un bon indicateur du fonctionnement biologique du sol. Diverses méthodes permettent d'évaluer l'activité des vers de terre. Elles peuvent être réalisées par observations visuelles et comptage au niveau d'un profil cultural ou d'un test bêche. Une de ces méthodes est basée sur la densité de galeries de vers de terre. La densité des grosses galeries ou macropores (diamètre de 5 à 13 mm) est un indicateur de la quantité de lombriciens présents. La densité des petites galeries (diamètre de 0,5 à 1 mm) est un indicateur de la qualité structurale du sol (Delaunois et al. 2013). D'autres méthodes considèrent la taille d'un macropore comme étant supérieure à 3 mm (Peigné et al., s. d.).

Brauman et Thomazeau (2020) quant à eux proposent d'utiliser la masse de turricules à la surface du sol comme un indicateur de l'activité des vers de terre. Les turricules sont collectés dans une surface donnée (quadra) et en pesant la masse sèche de ces turricules. L'observation des turricules à la surface des sols nécessite, dans certaines conditions, une expertise pour reconnaître les turricules des agrégats de sols issus d'autres transformations. Des travaux de validation sont cependant encore nécessaires concernant cette méthode (Brauman et Thaumazeau 2020).

Pour l'instant, aucun lien entre la population de vers de terre et le nombre d'orifices n'a été mis en évidence. Toutefois, le nombre de galeries de vers terre associé avec la fissuration d'origine climatique et/ou lié aux racines, tendent à expliquer le développement racinaire sous le fond de labour (Peigné et al., s. d.). Dans le cas du comptage des vers de terre, les résultats obtenus sont fortement conditionnés par la méthode d'échantillonnage.

### **Facteurs influençant l'indicateur :**

Les vers de terre sont sensibles aux facteurs anthropiques, abiotiques et biotiques. Les facteurs anthropiques correspondent aux pratiques agricoles, tandis que les facteurs abiotiques sont relatifs au climat (précipitations, température...) et aux propriétés du sol (structure, texture humidité...). Les facteurs biotiques reposent sur les interactions des communautés lombriciennes avec leur écosystème (compétitions inter et intra-spécifiques, relations avec d'autres règnes) (Six 2014 ; Jeffery et al. 2010).

### **Description et intérêts :**

Les nématodes sont des organismes vermiformes appartenant à l'embranchement des Nematoda, qui mesurent environ 1 mm de longueur pour un diamètre de 20 µm (Chauvin et Villenave 2018 ; Jeffery et al. 2010). Les nématodes sont classifiés selon leur mode de vie entre nématodes libres (terrestres ou marins), zooparasites (de vertébrés ou invertébrés) et phytoparasites. Ces organismes généralement aquatiques ont colonisé quasiment tous les milieux. Dans le sol, ils vivent et se déplacent dans les films d'eau qui entourent les particules de sol (Lavelle, Chauvel, et Fragoso 1995). Les nématodes libres se nourrissant de bactéries, de champignons, d'autres nématodes ou du contenu des cellules végétales. Il existe huit groupes trophiques dont les cinq principaux sont les bactérivores, les fongivores, les omnivores, les phytoparasites et les prédateurs (Garcia 2018 ; Jeffery et al. 2010 ; Hedde 2018).

Les nématodes du sol renseignent sur le fonctionnement global du sol, ils reflètent l'abondance des autres groupes d'organismes de la microchaîne trophique du sol. De fait, si un problème de nématodes phytophages apparaît, c'est que les pratiques ont engendré un déséquilibre qui les a favorisés. L'objectif va donc être de maintenir un milieu et des pratiques permettant de préserver une abondance et une diversité des individus afin qu'il y ait une autorégulation, un état d'équilibre qui s'instaure (Riou et Ceremonie 2017 ; Cadet 1998).

### **Méthode d'évaluation :**

Il est possible d'extraire et de déterminer le nombre de nématodes libres dans un échantillon de sol par un tamisage, élutriation et piégeage actif avant d'effectuer un comptage de ceux-ci à la loupe binoculaire. Il peut exister des difficultés à identifier les nématodes. Il existe un grand nombre de méthodes d'extraction des nématodes selon le matériel à partir duquel les nématodes sont extraits, mais également en fonction des espèces de nématodes. Extraire les nématodes à partir de matières organiques peut être réalisé avec les méthodes suivantes : « l'entonnoir de Baermann », la méthode « Funnel spray » ou les méthodes dites « Blender filter ou centrifugal flotation ». A partir du sol, les nématodes peuvent être extraits avec la méthode « cotton wool filter method », la méthode « decanting and sieving de Cobb » ou en utilisant « l'élutriation d'Oostenbrink ». Pour les nématodes à kystes, les méthodes suivantes peuvent être utilisées : « Baunacke », « Fenwick can », « Kort's cyst extraction elutriator » ou la plus courante « Seinhorst cyst extraction elutriator » (Andriamampianina et al. 2018).

Il existe différentes méthodes de d'extraction des nématodes. Les résultats obtenus peuvent varier d'une méthode à l'autre, d'où l'importance du choix de la méthode utilisée et d'un échantillonnage adapté.

### **Facteurs influençant l'indicateur :**

La diversité, l'abondance et l'activité des nématodes dépendent de différents facteurs abiotiques (climat, propriétés physico-chimiques du sol), biotiques (interactions intra et interspécifiques) ou anthropiques (pratiques agricoles) (Cadet 1998 ; Jeffery et al. 2010 ; Lavelle, Chauvel, et Fragoso 1995).

## **Biomasse microbienne**

### **Description et intérêts :**

Le terme de biomasse microbienne désigne la masse de l'ensemble des microorganismes du sol (bactéries, champignons, actinomycètes) (Ancelin et al. 2007).

Parmi les organismes vivants dans le sol, les microorganismes sont les plus nombreux. En effet, les microorganismes tels que les bactéries et les champignons représentent respectivement plusieurs milliards et plusieurs millions d'entités par gramme de sol. Ce réservoir est à l'origine de la plupart des fonctions biologiques du sol et possède un rôle central dans la fertilité biologique, la fertilité physique et la santé des sols (Gobat, Aragno et Matthey 2010 ; Ranjard et al. 2010).

Les champignons sont fréquents dans les sols, notamment les sols riches MO. Ils peuvent constituer une part importante de la biomasse souterraine, environ 3500 kg/ha. Les champignons jouent des rôles majeurs et variés dans le fonctionnement des sols : ils participent au recyclage des éléments grâce à leur capacité à attaquer de nombreux matériaux organiques. Ils sont considérés comme des décomposeurs primaires. Ils peuvent également libérer ou rendre plus disponibles des éléments essentiels à la nutrition des plantes. Ils réalisent de nombreuses interactions biologiques, notamment des associations mutualistes comme les mycorhizes où le champignon absorbe des nutriments qu'il transfère à la plante et reçoit des sucres et des vitamines de la plante (Gobat, Aragno et Matthey 2010 ; Jeffery et al. 2010).

Il existe une diversité d'espèces de bactéries dans les sols, elle est de l'ordre d'1 million d'espèces par gramme de sol, soit environ 1500 kg/ha (Gobat, Aragno et Matthey 2010). Les bactéries du sol consomment des molécules organiques en sécrétant des enzymes dans l'espace extracellulaire permettant de les hydrolyser en molécules simples, absorbables au travers de leur paroi et de leur membrane plasmique (Riou et Chemidlin Prevost Bourre 2018 ; Karimi et al. 2018). Avec les champignons, les bactéries du sol sont considérées comme les ingénieurs chimiques du sol. Elles réalisent un très grand nombre de fonctions impliquées par exemple dans la minéralisation des matières organiques (exemple des bactéries cellulolytiques), le cycle de l'azote (bactéries ammonifiantes, nitrifiantes et fixatrices d'azote), la disponibilité du phosphore, le maintien de la structure du sol (grâce aux sécrétions de mucilages permettant de stabiliser les microagrégats et donc d'avoir une structure du sol grumeleuse, moins sensible à l'érosion et avec une capacité à stocker l'eau) ou encore la dégradation de molécules phytosanitaires. Par ailleurs, elles peuvent être impliquées dans la régulation de la croissance racinaire (bactéries PGPR) (Riou et Chemidlin Prevost Bourre 2018 ; Karimi et al. 2018).

La biomasse microbienne d'un sol est un indicateur précoce et sensible des changements d'usage ou de gestion des sols (Powlson 1987 cité par Ancelin et al. 2007). Il est donc possible de supposer qu'elle constitue un bon indicateur de la fraction active du carbone du sol (Ancelin et al. 2007 ; Jeffery et al. 2010).

#### **Méthode d'évaluation :**

La biomasse microbienne est mesurable en laboratoire. Les microorganismes sont tués afin de mesurer le carbone organique les composant. Une méthode possible afin de réaliser cette mesure est la technique de « fumigation extraction ». La différence entre le carbone extrait d'un échantillon de sol fumigé et d'un échantillon du même sol non fumigé est mesurée. Le supplément de carbone rendu extractible par la fumigation est directement proportionnel à la biomasse microbienne présente dans le sol étudié. Cette méthode s'applique à tous les types de sol. Les échantillons de terre doivent cependant être traités frais et prélevés hors de périodes de déficit hydrique ou de stress thermique (Chaussod et Nouaïm 2001 cité par Ancelin et al. 2007 ; Nicolardot et Chaussod 1986).

Il existe différentes méthodes de détermination de la biomasse microbienne d'un sol. Les résultats obtenus peuvent varier d'une méthode à l'autre, d'où l'importance du choix de la méthode utilisée et d'un échantillonnage adapté aux conditions pédoclimatiques de la zone d'étude (Chaussod et Nouaïm 2001 cité par Ancelin et al. 2007 ; Nicolardot et Chaussod 1986).

#### **Facteurs influençant l'indicateur :**

La biomasse microbienne dépend de différents facteurs abiotiques (climat, propriétés physico-chimiques du sol), biotiques (interactions intra et interspécifiques) ou anthropiques (pratiques agricoles) (Chaussod 1996 ; Jeffery et al. 2010).

## Respiration microbienne

#### **Description et intérêts :**

Cet indicateur permet une quantification de l'activité biologique d'un échantillon de sol, et notamment la décomposition de la matière organique (AgroEnviroLab 2021 ; Jeffery et al. 2010).

#### **Méthode d'évaluation :**

Pour mesurer la respiration du sol, AgroEnviroLab a mis au point une méthode ayant recours aux sondes Solvita® qui captent le CO<sub>2</sub> émis par les microorganismes de l'échantillon analysé. Un référentiel permet de caractériser l'activité respiratoire comme étant faible, moyenne ou élevée (AgroEnviroLab 2021).

La respiration basale du sol peut également être évaluée par la technique SituResp®. Un gel coloré, contenant un indicateur pH (rouge de crésol), va changer de couleur suite à l'acidification par le CO<sub>2</sub> émis par le sol. La lecture de la densité optique du

gel, effectuée par spectrophotométrie, permet une évaluation de l'activité métabolique des microorganismes du sol (Thoumazeau et al. 2017 ; Brauman et Thoumazeau 2020).

### **Facteurs influençant l'indicateur :**

La respiration microbienne dépend directement de l'abondance et de l'activité des microorganismes du sol. Les facteurs abiotiques (pluviométrie, température) ont également un rôle important (Groupe de travail « état et activités biologiques des sols » 2002 ; Jeffery et al. 2010)

## Vitesse de dégradation de la MO

### **Description et intérêts :**

La décomposition de la matière organique correspond à une série de réactions chimiques qui entraîne la transformation des composés organiques complexes (comme la cellulose, la lignine, les protéines...) en composés minéraux simples (comme le NO<sub>3</sub>-...), assimilables par les plantes (Roger-Estrade 2004 ; Saenger 2013).

### **Méthode d'évaluation :**

#### *Tests de terrain :*

La méthode des *bait lamina* permet de mesurer le degré d'activité de consommation d'un substrat organique par la mésofaune du sol (organismes de 200 µm à 2 mm), qui possède un rôle est majeur dans le cycle du carbone (Wall et al. 2008). Les *bait lamina* sont des languettes en PVC composées de seize trous remplis avec un substrat organique. Sept *bait lamina* par point d'échantillonnage sont enfouies dans le sol durant une période d'incubation à déterminer en fonction des conditions environnementales. L'activité des organismes du sol est évaluée à travers la consommation de ce substrat, en comptant le nombre de trous ayant subi une dégradation visible du substrat suite à la période d'incubation dans le sol (Brauman et Thoumazeau 2020).

Une autre méthode semblable est le test du slip. Ce test consiste à enterrer un morceau de coton dans le sol sur une période de 90 jours (en zone tempérée). Il correspond à la capacité de dégradation de la matière organique du sol. Pour ce test il est possible d'utiliser n'importe quel tissu 100% coton (T-shirt, drap...). Cependant, il est nécessaire de s'assurer qu'il y ait une partie non-dégradable accrochée à ce tissu afin de le retrouver lors du déterrement du tissu. C'est pourquoi un slip est utilisé dans la majorité des cas, l'élastique étant non-dégradable (Chambre d'Agriculture Gironde 2018).

La méthode des Tea bag permet également de mesurer le taux de décomposition de la matière organique du sol par des activités microbiennes (microorganismes et microfaune). Pour ce test, des sachets de thé sont placés dans le sol pendant 2 mois (en zones tropicales). Les microorganismes et la microfaune du sol décomposent la matière contenue dans le sachet. Deux thés (thé vert et rooibos), de qualités différentes, permettent un accès à la largeur fonctionnelle des communautés de microorganismes (Andriamampianina et al. 2018).

#### *Analyses en laboratoire :*

Des analyses en laboratoire peuvent permettre d'évaluer la vitesse de dégradation de la matière organique. Les indices d'oxydation et d'humification apparaissent comme des outils simples de caractérisation du degré d'évolution (minéralisation, humification) de la matière organique dans les sols naturels. Ils permettent d'estimer le degré de maturité de la matière organique naturelle qui sera susceptible de fixer ou non des composés organiques ou minéraux. Une méthodologie basée sur le couplage US/UV, permet de caractériser de manière globale la matière organique des sols et son degré d'évolution (Junqua, Touraud et Thomas 2004).

#### **Facteurs influençant l'indicateur :**

La vitesse de dégradation des matières organiques dépend du type de matière organique introduite dans le sol et de l'activité biologique du sol (Roger-Estrade 2004 ; Saenger 2013 ; Ancelin et al. 2007). Les matières organiques issues des êtres vivants (macrofaune, biomasse microbienne) ont un temps de résidence entre 6 mois et 2 ans en moyenne dans le sol. Les matières d'origine végétale comme les résidus organiques « libres » ou « labiles » résident entre 2 et 30 ans dans le sol. Les matières organiques stables ou « Humus » peuvent rester jusqu'à 1 000 ans dans le sol. D'autres facteurs, telles que les conditions climatiques, vont influencer la vitesse de dégradation des matières organiques. Par exemple, la vitesse de minéralisation augmente avec la température (Chambre d'Agriculture Occitanie 2011b).

### Caractérisation de la MO (ou Fractionnement de la MO)

#### **Description et intérêts :**

Au sens large, la matière organique (MO) du sol comprend les composés organiques résultant de la décomposition des résidus végétaux et animaux, les composés néo-synthétisés par les organismes vivants, ainsi que l'ensemble des organismes vivants du sol (Saenger 2013 ; Huber et Schaub 2011).

La biomasse vivante du sol représente entre 2 et 12% de la MO du sol (Gobat, Aragno, et Matthey 2010). Au sein de la MO « non-vivante » (nécromasse), il existe plusieurs catégories de composés : les MO dissoutes, les « substances non-humiques », les « substances humiques » et les MO réfractaires (Saenger 2013).

Les MO dissoutes (MO extractibles à l'eau) regroupent l'ensemble des molécules à structure carbonée contenues dans l'eau du sol. Ce pool de carbone labile peut constituer un substrat important pour l'activité microbienne et conditionner fortement la formation du sol et le transport des métaux et polluants à travers le sol. Cette fraction représentant souvent moins de 0,25% de la MO totale du sol (Kalbitz et al. 2000 cité par Saenger 2013).

Les « substances non-humiques » sont des composés provenant de résidus organiques végétaux ou animaux récemment apportés au sol ou partiellement décomposés (cellulose, hémicelluloses et lignines, mais aussi lipides, composés azotés, tannins) (Gobat, Aragno et Matthey 2010). Ces substances non-humiques regroupent également des molécules synthétisées par les organismes du sol, tels que les polysaccharides microbiens ou les exsudats racinaires (Saenger 2013).

Les « substances humiques » correspondent à une catégorie de molécules dont l'identification est strictement opérationnelle et ne repose sur aucune réalité biologique. Les définitions restent vagues et désignent les substances humiques comme une série de composés aux structures hétérogènes, de masse moléculaire élevée, formés d'un réseau de noyaux aromatiques reliés par des chaînes aliphatiques et des groupements acides et alcools. Ces molécules sont résistantes à la dégradation et hautement réactives du fait de leurs nombreuses fonctions hydrophiles et hydrophobes (Aiken et al. 1985 cité par Saenger 2013 ; Huber et Schaub 2011).

Les MO réfractaires (« black carbon », charbon, carbone pyrolysé ou carbone inerte) sont des produits issus de la combustion incomplète de la biomasse. Cette MO réfractaire est présente dans de nombreux sols où elle peut constituer une part significative de la MO du sol. Du fait de sa structure chimique hautement récalcitrante (Pessenda et al. 2001 cité par Saenger 2013) et de possibles mécanismes de protection physique (Brodowski et al. 2007 cité par Saenger 2013), ce pool de MO a un temps de résidence dans le sol extrêmement long, de l'ordre du millénaire, sans implications à court terme dans le cycle du carbone (Czimczik and Masiello 2007 cité par Saenger 2013).

Ainsi, ces types de matières organiques vont donc intervenir de manière différente dans les sols, d'où la nécessité d'une caractérisation des matières organiques lors des analyses de terre.

#### **Méthode d'évaluation :**

Godin et al. (2011) présente différentes méthodes d'analyses des polysaccharides structuraux des biomasses lignocellulosiques. La méthode aux détergents neutre et acide de Van Soest et al. (1985) est très connue. Elle fractionne les fibres de la biomasse lignocellulosique par des extractions successives par voie chimique et quantifie par gravimétrie les fibres insolubles sèches récupérées après filtration (Godin et al. 2011).

Saenger (2013) reprend les principales méthodes de caractérisation du carbone organique du sol. Des méthodes basées sur le fractionnement physique, le fractionnement chimique, la méthode isotopique, les méthodes thermiques, la spectroscopie et la résonance magnétique nucléaire sont comparées. Une méthode sélectionnée par Saenger (2013) repose sur le fractionnement granulométrique de la MO du sol. Il s'agit d'une méthode normalisée (NF X 31-516, 2007) qui constitue une technique de référence, largement utilisée pour l'évaluation de la dynamique et de la stabilité du carbone organique du sol. Elle reste relativement simple à mettre en œuvre et abordable pour l'étude d'un grand nombre d'échantillon. Le fractionnement granulométrique de la MOS a pour but de séparer des pools homogènes de MO en termes de propriétés et de turnover. Cette méthode se base sur l'hypothèse que le temps de résidence de la MO du sol dépend principalement de son association aux particules du sol de différentes granulométries (Saenger 2013).

Les avantages et des inconvénients de chacune des méthodes sont décrits par Saenger (2013).

#### **Facteurs influençant l'indicateur :**

La répartition des MO dans chacune des fractions organiques dépend de la vitesse de dégradation de la MO, et donc de l'activité des organismes vivants dans le sol et des conditions pédoclimatiques. Le type et la composition chimique des MO influencent également cette répartition (Roger-Estrade 2004 ; Saenger 2013 ; Ancelin et al. 2007 ; Chambre d'Agriculture Occitanie 2011b).

### **Description et intérêts :**

La matière organique est au centre du fonctionnement du sol. Elle correspond au substrat de base des organismes du sol. Ils se nourrissent en métabolisant la MO puis servent eux même de substrat à leurs prédateurs. La MO constitue également un réservoir d'éléments nutritifs indispensables aux plantes cultivées. Elle influe sur la capacité du sol à retenir les éléments nutritifs et contribue à la structuration du sol, en participant à la formation du complexe argilo-humique et à la formation de macroporosité. Elle permet ainsi un bon fonctionnement racinaire et l'infiltration de l'eau. Enfin, elle contribue à l'augmentation de la réserve utile en eau. Les nombreuses fonctions de la MO et sa nécessité pour les plantes cultivées font que la teneur en MO d'un sol est un indicateur pertinent (Interbio Franche-Comté s.d. ; Huber et Schaub 2011).

Lorsque la teneur en matière organique est inférieure à 15g/kg de terre (1.5%), le sol n'a plus de réserves de nutriments. Il y a donc une limitation de la biomasse du sol, impliquant une baisse de fertilité du sol et son incapacité à s'adapter aux conditions de culture. Lorsque la teneur en matière organique est supérieure à 45g/kg de terre (4.5%), une grosse partie de la matière organique n'évolue plus ou pas. Attention, ces valeurs constituent des repères, mais le taux de MO varie selon la texture du sol. Il est plus élevé en sol argileux qu'en sol sableux (Interbio Franche-Comté s.d. ; Huber et Schaub 2011).

### **Méthode d'évaluation :**

La teneur en MO du sol ne se mesure pas directement sur un échantillon de terre. Un laboratoire d'analyses peut déterminer la teneur en carbone organique de la terre par la méthode Anne ou la méthode Dumas. La teneur en MO est ensuite estimée en appliquant à la teneur en carbone organique déterminée par l'analyse, un coefficient multiplicateur compris entre 1,7 et 2 :  $MO \text{ (g/kg)} = C \text{ organique (g/kg)} \times \text{coefficient}$ . Le coefficient de 1,72 est couramment utilisé en France (taux de carbone de la MO =  $1/1,72 = 58\%$ ) (Ancelin et al. 2007 ; Chambre d'Agriculture Occitanie 2011a).

### **Facteurs influençant l'indicateur :**

Le taux de MO présent dans le sol à un instant t dépend de la vitesse de dégradation de la MO, et donc de l'activité des organismes vivants dans le sol et des conditions pédoclimatiques. Les apports de MO dans le sol jouent également un rôle important. Ces apports peuvent être exogènes (apports d'engrais et/ou amendements organiques) ou provenir des restitutions des végétaux et animaux in situ (Roger-Estrade 2004 ; Saenger 2013 ; Ancelin et al. 2007 ; Chambre d'Agriculture Occitanie 2011b).

## Bilan humique

### Description et intérêts :

Le bilan humique permet d'évaluer l'impact des systèmes de culture et des pratiques agricoles (notamment la gestion des résidus de culture et des amendements humiques) sur l'évolution à long terme du stock de carbone organique du sol (Ancelin et al. 2007 ; Duparque et al. 2011).

Un bilan négatif indique que le stock de carbone organique du sol tend à baisser jusqu'à un état d'équilibre théorique où les pertes (« sorties ») sont compensées par les restitutions (« entrées ») (Ancelin et al. 2007 ; Duparque et al. 2011).

### Méthode d'évaluation :

Le bilan humique correspond à une comparaison, sur une période donnée, des « entrées » et des « sorties » d'humus. Les quantités d'humus « entrantes » résultent de la transformation dans le sol (humification ou stabilisation de la MO) des matières organiques apportées ou restituées (résidus de cultures, amendements organiques, engrais verts, ...). Les quantités « sortantes » proviennent de la minéralisation. Ce calcul se fait à partir de modèles issus de la recherche. Le modèle Hénin-Dupuis a été le plus utilisé jusqu'à présent. Ce modèle est progressivement remplacé par une variante de ce modèle, mieux adapté et appelé « modèle AMG » (Andriulo et al. 1999 cité par Ancelin et al. 2007 ; Duparque et al. 2011).

### Facteurs influençant l'indicateur :

Le bilan humique dépend des « pertes » (minéralisation) et des « entrées » (humification, amendements organiques) en MO stables (Ancelin et al. 2007).

## C/N du sol

### Description et intérêts :

Le rapport C/N (carbone organique/azote total) est utilisé pour caractériser l'évolution des matières organiques dans le sol. Pour un sol donné, le rapport C/N du sol est un indicateur du degré de décomposition de la matière organique du sol (Interbio Franche-Comté s.d. ; Ancelin et al. 2007).



Figure 5 : Lien entre C/N et décomposition de la MO (Interbio Franche-Comté s.d.)

Comme indiqué en figure 5, un rapport C/N faible (inférieur à 8) indique une décomposition rapide de la MO. Elle se minéralise rapidement, libère de l'azote et

participe peu à l'humification (Interbio Franche-Comté s.d. ; Ancelin et al. 2007). Un rapport C/N élevé (supérieur à 12) indique une activité biologique du sol faible et en général, des mauvaises conditions de décomposition de la matière organique (Interbio Franche-Comté s.d. ; Ancelin et al. 2007). Des MO à C/N très élevé (supérieur à 25), se transforment et se minéralisent peu. Elles sont rapidement stabilisées si elles sont riches en lignine. Si elles sont plutôt riches en cellulose, leur rendement en humus stable est plus faible et leur dégradation dans le sol. Cela peut provoquer une phase d'organisation de l'azote minéral (Ancelin et al. 2007).

### **Méthode d'évaluation :**

C/N est le rapport entre le carbone organique et l'azote total.

Il existe plusieurs méthodes de mesure des MO. Une de ces méthodes est la méthode Perte Au Feu (PAF). Il s'agit d'une détermination pondérale basée sur la calcination (550 °C) de la MO totale en conditions sèches. La PAF correspond à la perte de poids d'un échantillon après calcination, rapportée au poids initial. Cette mesure permet de déduire un taux de carbone organique par convention. Carbone organique estimé = MO par PAF/2. Il est exprimé en g/kg (‰) de produit sec et/ou de produit brut. L'azote est présent sous deux formes principales dans les matières organiques, essentiellement d'azote organique et un peu d'azote minéral. La mesure de la teneur en azote total correspond à la teneur en azote organique, NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, azote uréique. La méthode Kjeldahl permet de mesurer la teneur en azote organique et minéral d'une matière organique (excepté les formes oxydées de l'azote NO<sub>x</sub>) (Chambre d'Agriculture Occitanie 2011a).

Les résultats peuvent varier selon les méthodes utilisées pour déterminer les teneurs en carbone et en azote (Fahd-Rachid 1990).

### **Facteurs influençant l'indicateur :**

Le C/N dépend du type de MO. Des matières riches en lignine ou cellulose auront un C/N plus élevé que des matières riches en protéines animales. De même, les apports en engrais azotés permettent de réduire le C/N (Chambre d'Agriculture Occitanie 2011a ; Ancelin et al. 2007).

## Statut acido-basique du sol (pH)

### **Description et intérêts :**

Le pH est une mesure de la concentration en ions H<sup>+</sup> dans le sol. Il se calcule de la manière suivante :  $\text{pH} = -\log [\text{H}^+] = \log 1/[\text{H}^+]$ . Un pH de 7 indique la neutralité (valeur de l'eau pure). En dessous de 7, le sol devient acide. Au-dessus de 7, le sol devient alcalin ou basique (Fox 2008 ; Félix-Faure, Fabre et al. 2009).

Le pH du sol joue sur la disponibilité en éléments nutritifs et la toxicité des métaux. La majorité des éléments nutritifs sont plus assimilables par les plantes lorsque le pH du sol s'approche de la neutralité. Dans le cas du phosphore par exemple (Figure 6), dans les sols acides, le phosphore se complexifie avec le fer et devient insoluble. Dans les sols

basiques, il se complexe avec le calcaire. Il peut donc avoir du phosphore dans le sol, mais ce phosphore est non-prélevable. Il devient soluble et donc assimilable dès que le pH est ajusté vers la neutralité (Fox 2008 ; Félix-Faure, Fabre et al. 2009 ; Briat et Job 2017).

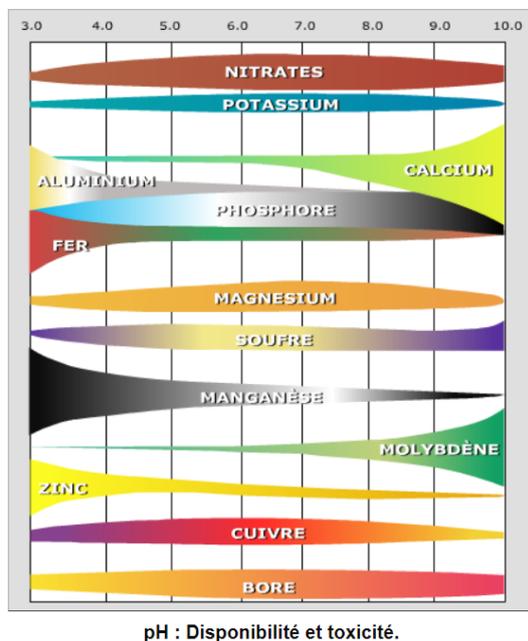


Figure 6 : Disponibilité des éléments nutritifs et toxicité des métaux (Fox 2008).

Contrairement aux éléments nutritifs, les métaux sont plus solubles et donc assimilables à des pH acides (Figure 6). Par exemple dans les pH plus élevés, l'Aluminium est non soluble et donc n'entre pas dans la solution du sol. En pH plus faible, il est en solution et est prélevé avec les autres cations/anions et peut être toxique pour les cultures. Il s'agit du phénomène de toxicité aluminique. Ainsi, plus le pH est acide, plus la présence de H<sup>+</sup> (et éventuellement Al<sup>3+</sup>) fixés sur les sites échangeables des complexes agrilo-humiques. Il y a donc moins de cations Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, et Na<sup>+</sup> fixés (Fox 2008 ; Félix-Faure, Fabre et al. 2009).

Ainsi, un sol trop acide a de nombreuses conséquences sur la fertilité chimique, comme le blocage des engrais phosphatés, la diminution de l'efficacité des engrais, le taux de saturation insuffisant, la solubilisation d'éléments toxiques (Al<sup>3+</sup>), le risque de carence en molybdène. Un sol basique peut impacter la disponibilité de certains éléments, comme le bore, le manganèse, le zinc ou le cuivre. Un sol trop acide entraîne également une réduction de la faune utile du sol, l'activité bactérienne est limitée, ce qui implique une mauvaise dégradation des résidus de récolte et un développement de parasites est possible. De même, au niveau de la fertilité physique, les sols acides montrent une diminution dans leur stabilité structurale (due à la réduction des Ca<sup>2+</sup> dans le sol), une diminution de la porosité et une terre plus difficile à travailler (Interbio Franche-Comté s.d. ; Félix-Faure, Fabre et al. 2009).

### Méthode d'évaluation :

La mesure du pH peut se faire sur le terrain à l'aide de papier pH, d'un pH-mètre, ou être réalisée par le laboratoire. Les valeurs peuvent correspondre au pH eau ou au pH KCl, selon la solution utilisée (Interbio Franche-Comté s.d. ; Félix-Faure, Carrière et Kalt 2013).

Le schéma d'échantillonnage et le nombre d'échantillons vont avoir un rôle sur la justesse et la précision de la valeur de pH. La répétition des mesures de pH sur la

parcelle permet d'avoir une moyenne de pH se rapprochant de la valeur réelle (Interbio Franche-Comté s.d.).

### **Facteurs influençant l'indicateur :**

Le pH du sol varie dans le temps. Il peut varier au cours de l'année, les conditions pédoclimatiques jouant sur l'amplitude de cette variation. L'abaissement du pH d'un sol correspond aux périodes à forte activité biologique. Les pratiques culturales, comme les apports d'engrais et amendements (effet acidifiant des engrais ammoniacaux et uréiques), influent également sur le pH, tout comme la présence de cultures (Félix-Faure, Fabre et al. 2009). Ainsi, sur le long terme, tous les sols ont tendance à s'acidifier par le lessivage des eaux de pluie, l'apport des acides présents dans les eaux de pluies, la décomposition de la matière organique ainsi que les apports de certains engrais (ex : ammonitrates) (Fox 2008 ; Dambrine 2000).

Le pH peut varier dans l'espace, à la fois horizontalement et verticalement. La caractérisation de cette variabilité de pH dans les sols est importante dans le processus d'agriculture de précision. Au niveau de la variabilité verticale du pH, le pH varie selon un gradient déterminé principalement par les apports d'engrais, d'amendements et la restitution des résidus de cultures qui s'effectuent à la surface du sol. S'y ajoutent également les effets induits par l'activité biologique. Dans un sol labouré régulièrement, on peut observer une acidification de surface sur de courtes périodes, ce qui n'est pas forcément le cas en non-labour. Ces variations spatiales de pH peuvent avoir une influence sur la nutrition des végétaux et notamment sur leur capacité à prélever les éléments nutritifs (Félix-Faure, Fabre et al. 2009 ; Douzals 2000 ; Auernhammer 2001).

## Indicateurs d'évaluation de la fertilité chimique du sol

### Capacité d'échange cationique (CEC)

#### **Description et intérêts :**

La CEC est une mesure du nombre de sites électronégatifs sur le complexe argilo-humique (CAH). Ces sites sont les lieux d'échanges de cations entre la particule chargée et la solution du sol. Elle s'exprime en centimoles de charges positives par kilogramme de terre fine. Les cations échangés dans le sol sont également appelés « bases ». Il s'agit des cations suivants :  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Na}^{+}$ . Le taux de saturation en bases correspond au pourcentage des sites électronégatifs (la CEC) occupé par ces bases (Fox 2008 ; Fox 2008 ; Interbio Franche-Comté s.d. ; Ancelin et al. 2007).

La CEC est une indication de la fertilité du sol. Plus la CEC est élevée, plus les cations sont retenus dans le sol. Ces cations peuvent servir à améliorer la structure du sol ( $\text{Ca}^{2+}$ , par exemple) ou à alimenter les végétaux ( $\text{NH}_4^{+}$ , par exemple) (Fox 2008 ; Félix-Faure, Fabre et al. 2009).

#### **Méthode d'évaluation :**

La CEC peut être déterminée avec une solution à pH 7, grâce à la Méthode Metson. La méthode à la cobalthexamine peut également être utilisée (Ancelin et al. 2007 ; Félix-Faure, Carrière et Kalt 2013).

La CEC peut également être estimée avec la texture du sol et le taux de MO (méthode FPT-WEPP ou Water Erosion Predict Projet). Le calcul est le suivant :  $\text{CEC} = 2 * \% \text{MO} + 0,5 * \% \text{Argile}$ , avec la CEC la capacité d'échange cationique, le %MO correspondant au taux de matière organique, %Argile correspondant au pourcentage d'argile dans le sol (Paul van dijk 2013).

#### **Facteurs influençant l'indicateur :**

La CEC dépend de la teneur en argile. Un sol argileux aura une CEC plus élevée qu'un sol sableux. La CEC dépend également de la teneur en matière organique et du type d'argile présent dans le sol. Le type d'argile varie en partie en fonction du climat, sauf pour des zones où la roche mère est relativement jeune (zones volcaniques, roches calcaires en zones côtières...). Il y a donc une relation entre CEC et climat (Fox 2008 ; Interbio Franche-Comté s.d.).

### **Description et intérêts :**

Le calcium est présent dans tous les sols, sous différentes formes et en proportion variable. Les formes insolubles (calcaire inactif et calcaire actif) sont issues de l'altération de la roche mère. Elles sont surtout présentes dans les sols de nature calcaire. Le calcaire inactif se trouve sous forme de blocs, de graviers ou de sables calcaires. Le calcaire actif se trouve sous des formes de particules fines de la taille des limons ou de certaines argiles. Ces formes très fines sont transformées chimiquement par l'eau et le CO<sub>2</sub> en calcium soluble. Le calcium soluble se trouve dans la solution du sol et peut libérer des ions Ca<sup>2+</sup> capables d'être fixés sur le complexe argilo-humique (Guerin 2016 ; Félix-Faure, Fabre et al. 2009).

L'état calcique du sol est en relation avec le pH. En sol acide, les protons H<sup>+</sup> sont plus importants en proportion que les ions Ca<sup>2+</sup>. En général, lorsque la teneur en calcaire augmente, le pH de l'eau augmente également (Guerin 2016 ; Delaunois et al. 2013). Ce sont les amendements calcaires qui vont permettre une augmentation en calcium et une diminution du pH dans le sol. Les cations Ca<sup>2+</sup> présents dans les amendements calcaires jouent donc un rôle de liaison entre les argiles et les humus tous deux chargés négativement. D'autres cations comme le Mg<sup>2+</sup> ont aussi cette capacité. Le chaulage a ainsi un effet bénéfique sur la structure du sol, il permet de maintenir ou d'améliorer la stabilité structurale. Au champ, un sol bien pourvu en Ca<sup>2+</sup> aura un ratio Ca/CEC > 65%. Cette quantité de Ca<sup>2+</sup> favorise le maintien d'une structure grumeleuse avec une bonne perméabilité à l'eau et à l'air avec des agrégats plus résistants à la dispersion causée par les pluies. A l'inverse, un sol avec un mauvais état calcique et donc avec un faible ratio Ca/CEC aura tendance à se compacter et donc à s'asphyxier (Guerin 2016 ; Félix-Faure, Fabre et al. 2009).

### **Méthode d'évaluation :**

L'évaluation de la présence de calcaire dans le sol peut se faire de manière empirique à l'aide d'un test HCl sur un prélèvement de terre. En présence de calcaire, une réaction chimique entre le calcaire et le HCl entraîne un dégagement de CO<sub>2</sub>, visible par l'apparition de bulles sur le prélèvement de terre (Delaunois et al. 2013).

L'évaluation de la teneur en calcaire peut également se faire par différentes méthodes au laboratoire : dosage du calcaire total (calcimètre de Bernard), dosage du calcaire actif (Gatoux 2011).

Les méthodes de dosage du calcaire permettent d'avoir des résultats plus précis que les tests HCl de terrain. Au niveau des tests en laboratoire, chaque méthode est soumise à des limites d'utilisation différentes.

### **Facteurs influençant l'indicateur :**

La quantité de calcaire d'un sol dépend du type de sol et plus précisément de la roche mère. Cette quantité peut varier sous l'effet des apports en calcaire (exemple : chaulage) (Fox 2008 ; Guerin 2016).

### **Description et intérêts :**

L'azote (N) est un élément nutritif essentiel à la croissance des cultures. Il entre dans la composition des protéines (dont les enzymes), et dans celle des acides nucléiques (dont l'ADN). Il joue un rôle primordial dans la photosynthèse, en tant que composant de la chlorophylle. L'azote est majoritairement présent dans le sol sous forme organique (détritus de végétaux ou animaux en décomposition, animaux du sol, microorganismes etc.). Il est aussi présent sous forme minérale (nitrate NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, ammonium NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, ammoniac NH<sub>3</sub>, urée CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>). Les plantes assimilent l'azote principalement sous forme de nitrates. C'est l'activité biologique du sol transforme l'azote d'une forme à une autre (Dupuy-Lyon, Coantic et Zunino 2021).

Un déficit en azote peut donc réduire la fertilité du sol et les rendements. De même, un excédent d'azote, au-delà des besoins immédiats des cultures, correspond à une source d'inefficacité économique pour les agriculteurs. Cet excédent est également potentiellement à l'origine de fuites vers les eaux. Ces fuites peuvent être à l'origine des dégâts environnementaux (l'eutrophisation par exemple) ou sanitaire (risque pour la santé humaine) (Dupuy-Lyon, Coantic et Zunino 2021 ; Interbio Franche-Comté s.d.).

### **Méthode d'évaluation :**

*Mesure des teneurs en azote du sol :*

Les teneurs en azote sont calculées grâce à des analyses de terre en laboratoire. Les mesures ont pour but de quantifier les diverses formes azotées disponibles dans les sols suite à une extraction du sol dans une solution de KCl (Brauman et Thoumazeau 2020). L'ouvrage de Fahd-Rachid (1990) reprend les différentes méthodes d'extraction et de dosage de l'azote minéral (N-NH<sub>4</sub> échangeable, N-NO<sub>3</sub>, et N-NO<sub>2</sub>) et de l'azote organique (Fahd-Rachid 1990). Les méthodes les plus répandues sont les méthodes kjeldahl et Dumas.

*Mesure du NO<sub>3</sub><sup>-</sup> fixé sur les membranes échangeuses d'ions :*

La méthode des membranes échangeuses d'ions évalue la dynamique des nutriments dans le sol (Qian et Schoenau 2002 cité par Brauman et Thoumazeau 2020). La capacité d'adsorption des membranes des cations et anions disponibles dans le sol est considérée comme représentative de l'action des racines des plantes (Le Cadre et al. 2018 cité par Brauman et Thoumazeau 2020). Les membranes anioniques et cationiques sont préalablement chargées avec des solutions ionisées puis déposées dans le sol entre 15 et 20 jours. Au cours de cette période, elles peuvent adsorber soit les cations, soit les anions disponibles dans le sol. Les membranes sont ensuite éluées et les ions fixés sur la membrane sont mesurés au laboratoire (Brauman et Thoumazeau 2020).

La détermination du stock d'azote dans le sol dépend de la méthode utilisée (Fahd-Rachid 1990). Par exemple, la méthode de Dumas permet de déterminer l'azote total, y compris les fractions inorganiques comme le nitrite et le nitrate, alors que la méthode de Kjeldahl ne détermine que l'azote organique et l'ammoniac (Müller 2017).

### Facteurs influençant l'indicateur :

La minéralisation de l'azote peut s'effectuer en quelques semaines, quelques mois ou quelques années. Elle dépend de différents facteurs tels les apports en engrais minéral, engrais et amendements organiques, le climat, le type de sol, la culture mise en place (Figure 7) (Dupuy-Lyon, Coantic et Zunino 2021 ; Fahd-Rachid 1990).

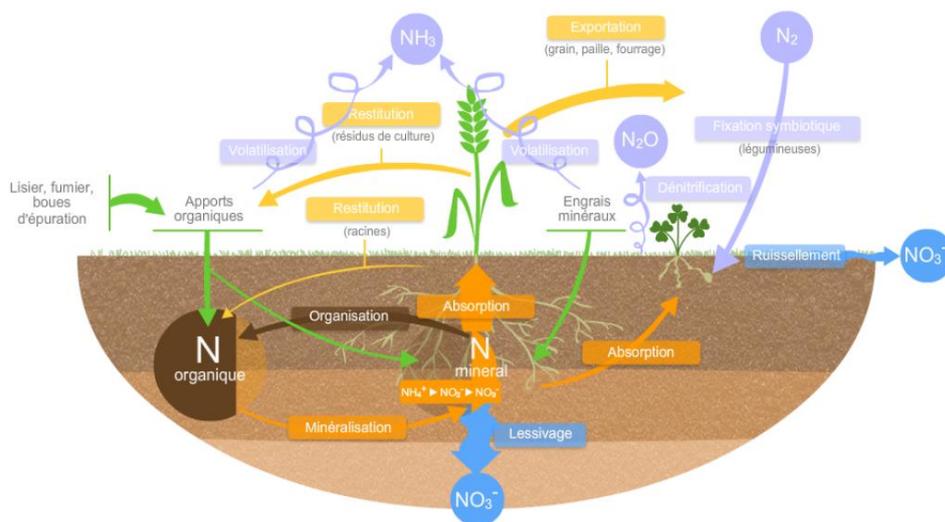


Figure 7 : Cycle de l'azote en milieu agricole (Dupuy-Lyon, Coantic et Zunino 2021).

Teneur en éléments nutritifs majeurs : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO, MgO

### Description et intérêts :

Les éléments nutritifs, et notamment les éléments majeurs (Phosphore, Potassium, Azote, Magnésium, Calcium) sont nécessaires à la production végétale. Si l'un de ces éléments s'éloigne de l'optimum, il devient limitant, et tout le système productif est déstabilisé (Interbio Franche-Comté s.d. ; Denoroy et al. 2019).

Le tableau 2 ci-dessous reprend le rôle des éléments majeurs au niveau de la croissance et du développement du végétal, ainsi que les causes possibles des carences de ces éléments.

Tableau 2 : Eléments majeurs, rôles et causes des carences (Interbio Franche-Comté s.d.)

Elément	Rôle	Cause possible de la carence
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Croissance de tous les organes dont le système racinaire. Rôle clé dans la division et la respiration cellulaire.	Chaulage excessif. Excès de Mn, Fe ou Zn. pH > 7 ou < 5,5. MO faible. Hydromorphie.
K <sub>2</sub> O	Port de la plante. Transfert des acides aminés vers les racines. Rôle dans la photosynthèse.	Chaulage excessif. Excès de N, MgO. pH < 5,5. Conditions lessivantes.
MgO	Métabolisme de P. Synthèse protéique. Activation enzymatique. Port de la plante.	Chaulage excessif. Excès de K, Ca. MO élevée. Hydromorphie.
CaO	Parois cellulaire. Assimilation de l'azote : réduction du nitrate en ammonium.	Conditions lessivantes. Sécheresse.

#### Méthode d'évaluation :

Une analyse de sol permet de faire l'état des lieux des teneurs en éléments nutritifs majeurs dans le sol. Les analyses de laboratoires sont souvent interprétées sous forme graphique et les résultats sont comparés à des valeurs de références (Interbio Franche-Comté s.d.).

Au niveau de la détermination des teneurs en éléments majeurs, les interprétations des analyses sont propres à chaque laboratoire et varient selon le type de sol.

#### Facteurs influençant l'indicateur :

La teneur en éléments nutritifs du sol varie dans le temps et dans l'espace. Les différentes pratiques agricoles vont influencer la teneur en éléments nutritifs du sol. Cette teneur peut varier directement à cause des apports d'engrais minéral. Elle varie également indirectement par les apports d'engrais et amendements organiques, qui seront décomposés par l'activité biologique du sol. D'autres facteurs comme le climat, le type de sol, les cultures mises en place, jouent aussi un rôle dans la variation de la teneur en éléments nutritifs (Bouvier 2012 ; Denoroy et al. 2019).

### Description et intérêts :

Les oligoéléments sont nécessaires à la production et la bonne santé du végétal, malgré des quantités absorbées très faibles (quelques dizaines de grammes par hectare). Les oligoéléments qui sont les plus souvent analysés sont le fer, le manganèse, le cuivre, le Zinc, le bore et le molybdène. A trop forte concentration ces éléments peuvent être toxiques (Interbio Franche-Comté s.d. ; Bouvier 2012).

Le tableau 3 ci-dessous reprend le rôle des oligoéléments au niveau de la croissance et du développement du végétal, ainsi que les causes possibles des carences de ces éléments.

Tableau 3 : Oligoéléments, rôles et causes des carences (Interbio Franche-Comté s.d.)

Elément	Rôle	Cause possible de la carence
Fe	Synthèse enzymatique. Photosynthèse. Fixation de l'azote de l'air.	pH > 7. Hydromorphie. Manque de potassium. Calcium élevé. Chaulage excessif.
Mn	Réduction des nitrates. Photosynthèse.	pH > 7. Hydromorphie. Excès de Fer. Chaulage excessif. MO élevée.
Zn	Métabolisme de l'auxine (élongation cellulaire). Protection des conditions de sécheresse.	pH > 7. Hydromorphie. Excès de d'azote. Chaulage excessif. MO faible.
Cu	Synthèse de la chlorophylle. Photosynthèse. Fertilité du pollen.	MO faible.
B	Multiplication cellulaire. Production du pollen. Métabolisme des sucres.	pH >7. Sécheresse.
Mo	Réduction des nitrates. Fixation de l'azote de l'air.	pH acide. Excès de soufre.

### Méthode d'évaluation :

Une analyse de sol permet de faire l'état des lieux des teneurs en oligoéléments dans le sol. Les analyses de laboratoires sont souvent interprétées sous forme graphique et les résultats sont comparés à des valeurs de références (Interbio Franche-Comté s.d.).

Au niveau de la détermination des teneurs en oligoéléments, les interprétations des analyses de sol sont propres à chaque laboratoire et varient selon le type de sol.

**Facteurs influençant l'indicateur :**

La teneur en oligoéléments du sol varie dans le temps et dans l'espace. Les différentes pratiques agricoles vont influencer la teneur en oligoéléments du sol. Cette teneur varie directement par apports d'engrais minéral et amendement. Elle varie également indirectement par apports d'engrais et amendements organiques, qui seront décomposés par l'activité biologique du sol. D'autres facteurs comme le climat, le type de sol, les cultures mises en place, jouent un rôle dans la variation de la teneur en oligoéléments (Lagrange 2019 ; Bouvier 2012).

## Bibliographie

- Abdallah, A. 1999. « Modélisation de l'infiltration dans les sols fins compactés : intégration des écoulements préférentiels dans les macropores ». Thèse. Institut National Polytechnique de Lorraine. 179 p.
- ADEME. 2021. « La vie cachée des sols ». M ta terre. [Disponible en ligne] <https://www.mtaterre.fr/dossiers/operation-plantetonslip/la-vie-cachee-des-sols> (Consulté le 29/12/2021).
- AFES, Mairie de Paris, et Educagri. 2014. « La macrofaune ». Sols fertiles, Vies secrètes. Un milieu vivant, 1 p.
- AgroEnviroLab. 2021. « Interpréter les résultats de la respiration du sol par la méthode SOLVITA® C-CO2 – Ajustement de l'index. » Mémo technique no.1. 2 p.
- Aiken, G.R., D.M. McKnight, R.L. Wershaw, et P. MacCarthy. 1985. « An introduction to humic substances in soil, sediment, and water ». In Aiken, G.R., et al., eds, Humic Substances in Soil, Sediment, and Water. pp. 1-8. John Wiley & Sons, New York.
- Amézketa, E. 1999. « Soil Aggregate Stability: A Review ». Journal of Sustainable Agriculture 14 (2-3) : pp. 83-151.
- Ancelin, O., J. Duranel, C. Dersigny, A. Duparque, et L. Fleutry. 2007. « Sols et Matières organiques - Memento : Pour des notions utiles et contre les idées reçues ». Memento. Agro-Transfert R&T et Chambres d'Agriculture de Picardie. 52 p.
- Andriamampianina, J., A. Charles, L. Cornaert, B. Maubé, et C. Willaume. 2018. « Caractérisation de la nématofaune du sol par une méthode simplifiée ». Fiche technique. MontpellierSupAgro, IRD, Agropolis fondation. 6 p.
- Andriamampianina, J., A. Charles, L. Cornaert, B. Maubé, et C. Willaume. 2018. « Décomposition de la matière organique du sol - Méthode des Tea bag ». Fiche technique. MontpellierSupAgro, IRD, Agropolis Fondation. 5 p.
- Andriulo A., B. Mary, et J. Guérif. 1999. « Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas ». Agronomie 19 : pp. 365-377.
- Arrouays, D., V. Antoni, M. BardY, A. Bispo, M. Brossard, C. Jolivet, C. Le Bas, M. Martin, N. Saby, N. Schnebelen, E. Villanneau, P. Stengel. 2012. « Fertilité des sols : conclusions du rapport sur l'état des sols de France ». Innovations Agronomiques 21 : pp.1-11.
- ARVOR Géotechnique. 2011. « Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux (NF P 94-068) ». Fiche technique MPL-LF-04 1. ARVOR Géotechnique - Ingénierie des sols et des fondations. 1 p.
- Audry, P., A. Combeau, F.X. Humbel, E. Roose, et J.F. Vizier. 1973. « Essai sur les études de dynamique actuelle des sols : définition, méthodologie, techniques, limitations actuelles, quelques voies de recherches possibles ». Bulletin de Groupe de Travail. ORSTOM. 126 p.
- Auernhammer, H. 2001. « Precision Farming — the Environmental Challenge ». Computers and Electronics in Agriculture 30 (1): pp. 31-43.
- Azevedo, M.C.B., J.L. Chopart, et C.C. Medina. 2011. « Sugarcane root length density and distribution from root intersection counting on a trench-profile ». Scientia Agricola 68 (1) : pp. 94-101.

- Baize, D., et Ch. Ducommun. 2014. « Reconnaître les sols de zones humides - Difficultés d'application des textes réglementaires ». *Etude et Gestion des Sols* 21 : pp. 85-101.
- Blanchart, E., J. Peigné, et J.F. Vian. 2021. « Les organismes du sol - Macrofaune ». MontpellierSupAgro. [Disponible en ligne] <https://www.supagro.fr/ress-pepites/OrganismesduSol/co/macrofaune.html> (Consulté le 05/12/2021).
- Blouin, M., Hodson, M.E., Delgado, E.A., Baker, G., Brussaard, L., Butt, K.R., Dai, J., Dendooven, L., Peres, G., Tondoh, J.E., et al. 2013. « A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services : Earthworm impact on ecosystem services ». *Eur. J. Soil Sci* 64 : pp. 161-182.
- Bouvier, E. 2012. « Adapter les Apports Organiques au sol ». Matière organique Fiche n°3. ADEME, Région Provence Alpes Cotes d'Azur. 8 p.
- Boyer, J. 1982. Les sols ferrallitiques - facteurs de fertilité et utilisation des sols. Initiations - Documentations techniques, ORSTOM. Tome 10. 396 p. ISBN : 2-7099-0637-6.
- Brauman, A., et A. Thoumazeau. 2020. « Biofunctool® : un outil de terrain pour évaluer la santé des sols, basé sur la mesure de fonctions issues de l'activité des organismes du sol ». *Étude et Gestion des Sols* 27 : pp. 289-303.
- Briat, J.F., et D. Job. 2017. Les sols et la vie souterraine : Des enjeux majeurs en agroécologie. Quae. 331 p. ISBN : 978-2-7592-2652-8.
- Brodowski, S., W. Amelung, L. Haumaier, et W. Zech. 2007. « Black carbon contribution to stable humus in German arable soils ». *Geoderma* 139 : pp. 220-228.
- Cadet, P. 1998. « Gestion écologique des nématodes phytoparasites tropicaux ». Cahiers Agricultures, Fond documentaire ORSTOM 7 : pp. 187-194.
- Cabidoche, Y.M., 2011. « Sols tropicaux des Outre-mer français tropicaux : une diversité ordonnée par la géochimie de l'altération des roches ». *Enjeux géologiques propres aux territoires tropicaux. Géosciences* 14 : pp. 22 - 31.
- Capowiez, Y., F. Loridat, A. Cadillon, A. Coulombel, et L. Fourrié. s. d. « Observer et quantifier les populations de vers de terre ». Fiche technique. IRARA Lyon, ITAB, FranceAgriMer, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. 4 p.
- Capowiez, Y., C. E. Parveaud, F. Loridat, A. Cadillon, A. Coulombel, et L. Fourrié. s. d. « Evaluer la capacité d'infiltration d'un sol ». Fiche technique. IRARA Lyon, ITAB, FranceAgriMer, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. 4 p.
- Chambre d'Agriculture Gironde. 2018. « Guide de terrain pour la caractérisation de la qualité des sols ». Guide technique. version 1. Chambre d'Agriculture Gironde. 51 p.
- Chambre d'agriculture Hérault, Centre Agrométéo Hérault, Département Hérault. 2011. « La charge en éléments grossiers d'un sol a un impact sur la pénétration des racines et sur la réserve en eau du sol. ». Fiche technique. 2 p.
- Chambre d'Agriculture Occitanie. 2011a. « Les critères analytiques des produits organiques ». Les produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc-Roussillon, Guide technique, Tome 1, Chapitre 5 : pp. 64-75.
- Chambre d'Agriculture Occitanie. 2011b. « Les matières organiques du sol ». Les produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc-Roussillon, Guide technique, Tome 1, Chapitre 2 : pp. 17-28.

- Champart, L. 2012. « Travail du sol et conversion en bio – Attention au risque de tassements des sols ». 5e journée scientifique de l'IHEV, « Les avancées de la recherche ». Montpellier.
- Chaussod, R. 1996. « La qualité biologique de sols : évaluation et implications ». Etude et Gestion des sols 3 (4) pp. 261-278
- Chaussod, R., et R. Nouaïm. 2001. « Caractérisation biologique d'échantillons de sol et applications agronomiques ». Alter Agri (45) : pp. 16-21.
- Chauvin, C., et C. Villenave. 2018. « L'effet des légumineuses sur le fonctionnement biologique du sol : une méta-analyse sur la nématofaune du sol ». Innovations Agronomiques 69 : pp. 47-60.
- Combres, J.C., L. Le Mezo, M. Mete, B. Bourjon. 1999. « Réserve utile et mesures d'humidité - Difficulté de calage des modèles de bilan hydrique ». Agriculture et développement (24) : pp 39 – 47.
- Czimczik, C.I., et C.A. Masiello. 2007. « Controls on black carbon storage in soils ». Global Biogeochemical Cycles 21 (3) : 8 p.
- Dambrine. 2000. « L'acidification des sols : origine, approche, enjeux et maîtrise - Acidité et acidification des sols ; une introduction ». Colloque COMIFER. [Disponible en ligne] [https://comifer.asso.fr/images/pdf/colloque\\_dambrine.pdf](https://comifer.asso.fr/images/pdf/colloque_dambrine.pdf) (Consulté le 05/12/2021).
- De Boissezon, P. 1965. « Les sols de savane des plateaux Batéké ». Série Pédologique, ORSTOM. 3 (4) : pp. 291-304.
- Delahaie, M., M. Boissières, S. Giuliano, L. Bedoussac, et L. Alletto. 2016. « Fertilité biologique des sols : Définition ». Dictionnaire d'agroécologie. [Disponible en ligne] <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/fertilite-biologique-des-sols/> (Consulté le 17/11/2021).
- Delaunois, A., G. Boucher, et A. Plence. 2014. « Caractérisation de la réserve en eau des sols à partir des sondages pédologiques à la tarière ». Fiche technique. Chambre d'Agriculture Tarn, Agence de l'eau Adour-Garonne, CasDar. 5 p.
- Delaunois, A., Y. Ferrie, M. Bouche, C. Colin, et C. Rionde. 2013. « Guide pour la description et l'évaluation de la fertilité des sols - destiné aux agriculteurs et aux agronomes ». Guide technique. Chambre d'agriculture du Tarn et INRA de Montpellier. 39 p.
- Denoroy, P., L. Jordan-Meille, S. Sagot, et Groupe PKMg COMIFER. 2019. La fertilisation P – K – Mg | Les bases du raisonnement. Edition COMIFER. 40 p. ISBN 978-2-910393-10-6.
- Douzals, J.P. 2000. « Mesures physiques de la variabilité des sols en agriculture de précision ». Ingénieries eau-agriculture-territoires, (24) : pp. 45-52.
- Duchaufour, P. 1970. Précis de Pédologie. Paris : Masson, 3<sup>ème</sup> édition. 438 p.
- Duparque, A., V. Tomis, B. Mary, H. Boizard, N. Damay, O. Ancelin, C. Dersigny, J. Duranel, L. Fleutry. 2011. « Le bilan humique AMG – Pour une démarche de conseil fondée sur des cas-types régionaux ». 10<sup>èmes</sup> rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse COMIFER-GEMAS – REIMS. 16 p.

- Dupouey, J.L., A. Thimonier, P. Behr. 1997. « Variations de la densité apparente des sols des hêtraies du nord-est de la France en relation avec leurs caractéristiques physico-chimiques ». *Etude et Gestion des sols* 4 (1) : pp. 43-52.
- Dupuy-Lyon, S., A. Coantic, et E. Zunino. 2021. « L'azote est un élément indispensable à l'agriculture, mais il peut entraîner des pollutions | Programme d'actions national nitrates ». Ministère de la transition écologique. [Disponible en ligne] <https://programme-nitrate.gouv.fr/comprendre/lazote-est-element-indispensable-a-lagriculture-il-peut-entraîner-pollutions> (Consulté le 06/12/2021).
- Escadafal, R., M.C. Girard, et D. Courault. 1988. « La couleur des sols : appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales ». *Agronomie* 8 (2) : pp. 147-154.
- Fahd-Rachid, A. 1990. « Mise au point méthodologique sur l'estimation de l'azote organique potentiellement minéralisable dans le sol ». Mémoire de recherche n°1. Centre ORSTOM Montpellier. 64 p.
- FAO. 2021. « Portail d'information sur le sol ». Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. [Disponible en ligne] <https://www.fao.org/soils-portal/about/definitions/fr/> (Consulté le 23/12/2021).
- Fardeau, J. C. 2015. « Des indicateurs de la fertilité des sols ». *Étude et Gestion des Sols* 22 : pp. 77-100.
- Fédération Départementale des CIVAM du Gard. 2020. « Fonctionnement du sol – II.1. Test de sédimentation ». [Disponible en ligne] <https://formationcivamgard.fr/?SolFina> (Consulté le 07/01/2022).
- Félix-Faure, B., B. Fabre et al. 2009. *Le chaulage : Des bases pour le raisonner*. Groupe chaulage COMIFER. 4<sup>ème</sup> édition. Vol. 2. Paris, France. 110 p. ISBN : 978-2-35253-044-2.
- Félix-Faure, B., M. Carrière et S. Kalt. 2013. « Prendre en compte tous les indicateurs de l'acidité des sols pour l'interprétation et le conseil ». Groupe Chaulage. 11<sup>èmes</sup> rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse COMIFER-GEMAS - Poitiers. 18 p.
- FIBL, Biosuisse. 2013. « Les principes de la fertilité des sols – Construire sa relation avec le sol ». Dossier technique. Biosuisse, FIBL. 32 p.
- Fox, D. 2008. « La dégradation des sols dans le monde ». Université Ouverte des Humanités, Université de Nice Sophia-Antipolis. [Disponible en ligne] <https://unt.univ-cotedazur.fr/uoh/degisol/fertilite-physique.php> (Consulté le 17/11/2021).
- Füllemann, F., A. Fischer, E. Carrard, M. Wendling, L. Schaffner, E. Cholley, et R. Charles. 2019. « Guide pratique : description du profil de sol agricole ». Guide technique. FIBL, Progrès Sol, Prométerre, Canton de Vaud. 34 p.
- Garcia, N. 2018. « Analyse exploratoire des variables structurant la capacité des communautés de nématodes phytoparasites à limiter l'implantation du nématode de quarantaine *Meloidogyne chitwoodi* ». Thèse. Université Bretagne Loire, AgroCampusOuest. 186 p.
- Gatoux, S. 2011. « SOL-0505 : Calcaire actif méthode Drouineau – Galet ». Laboratoires d'Analyses des Sols d'Arras. INRAE. [Disponible en ligne]

<https://www6.hautsdefrance.inrae.fr/las/Methodes-d-analyse/Sols/05.-pH-Calcaire/SOL-0505-Calcaire-actif-methode-Drouineau-Galet> (Consulté le 07/12/2021).

- Gautronneau, Y. et H. Manichon. 1987. « Guide méthodique du profil cultural ». Guide technique. ISARA, INAPG. 62 p.
- Gendry, M. 2018. « La Réserve Utile des Sols. » Fiche technique SOLAG n°4. Bulletin Sol et Agronomie des Chambres d'agriculture des Pays de la Loire. 2 p.
- Ghouil, M. 2014. « Indicateur - Quoi, pourquoi et comment ? ». Fiche Technique. ABC 2 Suivi & Evaluation. 2 p.
- GLOBE®. 2003-2005. « Etude du sol ». Une unité d'apprentissage GLOBE®. 294 p.
- Gobat, J.M., M. Aragno, et W. Matthey. 2010. Le sol vivant : Base de pédologie - Biologie des sols. 3<sup>ème</sup> édition revue et Augmentée. Sciences & ingénierie de l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes. 817 p. ISBN : 978-2-88074-718-3.
- Godin, B., R. Agneessens, S. Gofflot, S. Lamaudière, G. Sinnaeve, P.A. Gerin, et J. Delcarte. 2011. « Revue bibliographique sur les méthodes d'analyse des polysaccharides structuraux des biomasses lignocellulosiques ». Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 15 (1) : pp. 165-82.
- Goulet, E., R. Morlat, D. Rioux, et S. Cesbron. 2004. « Méthode de calcul de la réserve utile en eau des sols : application à la cartographie des terroirs viticoles du Val de Loire ». Vigne et Vin Publications Internationales, 38 (4) : pp. 231-235.
- Groupe de travail « état et activités biologiques des sols ». 2002. « Activités biologiques et fertilité des sols - Intérêts et limites des méthodes analytiques disponibles ». Document à l'usage des agents de développement. Commission « agronomie – systèmes de production » de l'ITAB. 27 p.
- Guerin, F. 2016. « Le calcium dans le sol ». Fiche technique SOLAG n°8. Bulletin Sol et Agronomie des Chambres d'agriculture des Pays de la Loire. 2 p.
- Guimarães, R. M. L., B. C. Ball, et C. A. Tormena. 2011. « Improvements in the Visual Evaluation of Soil Structure ». Soil Use and Management 27 (3) : pp. 395-403.
- Hedde, M. 2018. « Indicateurs basés sur la faune des sols : des outils pour l'agriculture innovante ? » Innovations Agronomiques 69 : pp. 15-26.
- Henin, S., G. Monnier, et R. Gras. 1969. Le profil cultural : l'état physique et ses conséquences agronomiques. Paris : Masson, 2<sup>ème</sup> édition. 332 p.
- Herrick, J. E., W. G. Whitford, A. G. de Soyza, J. W. Van Zee, K. M. Havstad, C. A. Seybold, et M. Walton. 2001. « Field Soil Aggregate Stability Kit for Soil Quality and Rangeland Health Evaluations ». CATENA, Soil aggregation in arid and semi-arid environments, 44 (1) : pp. 27-35.
- Huber, G., C. Schaub. 2011. « La fertilité des sols : L'importance de la matière organique ». Guide technique. Chambre d'Agriculture Bas Rhin. 45 p.
- Ilstedt, U., A. Malmer, E. Verbeeten, et D. Murdiyarso. 2007. « The Effect of Afforestation on Water Infiltration in the Tropics: A Systematic Review and Meta-Analysis ». Forest Ecology and Management, Planted Forests and Water, 251 (1) : pp. 45-51.
- Interbio Franche-Comté. s.d. « Comprendre les sols agricoles ». Guide d'évaluation. Interbio Franche-Comté, Agence Française pour la Biodiversité. 34 p.

- Jeffery, Gardi, Jones, Montanarella, Marmo, Miko, Ritz, Peres, Römcke, et van der Putten. 2010. Atlas européen de la biodiversité des sols. Commission européenne, Bureau des publications de l'Union européenne, Luxembourg. 128 p. ISBN : 978-92-79-29726-7.
- Junqua, G., E. Touraud, et O. Thomas. 2004. « Caractérisation de la matière organique naturelle et de son évolution dans les sols et les sédiments à l'aide du couplage US/UV ». Déchets Sciences et Techniques - Revue francophone d'écologie industrielle. INSA Lyon, (34) : pp. 14-18.
- Kalbitz, K., Solinger, S., Park, J.-H., Michalzik, B., et Matzner, E. 2000. « Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils ». A review. Soil Science 165 : pp. 277- 304.
- Karimi, B., N. Chemidlin Prevost-Boure, S. Dequiedt, S. Terrat, et L. Ranjard. 2018. Atlas français des Bactéries du sol. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris. 192 p. ISBN : 978-2-36662-219-5.
- Labreuche, J., et N. Bousquet. 2009. « La battance - Le sol battu par la pluie ». Perspectives agricoles. ARVALIS-Institut du végétal, (360) : pp. 44-45.
- Labreuche, J., M. Déroulède, O. Ancelin, Somea, et V. Tomis. 2013. « Diagnostiquer - 4) Deux méthodes pour observer la structure du sol ». Perspectives agricoles. (397) : pp. 26-30.
- Labreuche, J., A. Duparque, H. Boizard. 2013. « Attendre – 2) Les sols ont une capacité naturelle à se restructurer ». Perspectives agricoles. (397) : pp. 19-21.
- Lagrange, H. 2019. « Contribution des PRO (Produits Résiduaire Organiques) aux apports d'oligoéléments ». Perspectives agricoles (464) : pp. 52-56.
- Lavelle, P. 1987. « Interactions, hiérarchies et régulations dans le sol : à la recherche d'une nouvelle approche conceptuelle ». Revue d'Ecologie et de Biologie du Sol 24 : pp. 219-229.
- Lavelle, Chauvel, et Fragoso. 1995. « Faunal Activity in Acid Soil ». In Plant-Soil Interactions at Low PH: Principles and Management, pp. 201-11. Dordrecht : Springer Netherlands. ISBN : 978-94-010-4099-0, 978-94-011-0221-6.
- Le Bissonais, Y., et C. Le Souder. 1995. « Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion ». Étude et Gestion des Sols 2 (1) : pp. 43-56.
- Le Cadre, E., M. Kinkondi, L.S. Koutika, D. Epron, et L. Mareschal. 2018. « Anionic exchange membranes, a promising tool to measure distribution of soil nutrients in tropical multispecific plantations ». Ecological Indicators 94 : pp. 254-256.
- Leneveu, J. 2017. « Étude de la compaction des sols et adaptation des pratiques culturales au Château Pédesclaux ». Mémoire de fin d'études. MontpellierSupAgro, AgroParisTech. 88 p.
- Lesbegueris, P. A., S. Gourdien, et J. P. Sarthou. 2018. « Fertilité physico-chimique du sol: Définition ». Dictionnaire d'Agroécologie. [Disponible en ligne] <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/fertilite-physico-chimique-du-sol/> (Consulté le 17/11/2021).
- Maertens, C. 1964. « La résistance mécanique des sols à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement ». Ann. Agron. 15 (5) : pp. 539-554.

- Mathieu, J. 2004. « Etude de la macrofaune du sol dans une zone de déforestation en Amazonie du Sud-Est, au Brésil, dans le contexte de l'agriculture familiale ». Thèse. Université Pierre et Marie Curie. 239 p.
- Mbilou, U.G., M. Ngouala Mabonzo, T. Miyouna. 2016. « Mesure de la vitesse d'infiltration des eaux dans le sol : Cas des sols de la Vallée du Niari en République du Congo ». *Journal of Applied Biosciences* 100 : pp. 9494 – 9503.
- Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales. 2022. « L'érosion du sol – Causes et effets ». Fiche Technique. [Disponible en ligne] <http://omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/12-054.htm> (Consulté le 03/10/22).
- Müller, J. 2017. « Analyse de référence selon la méthode de Dumas ou la méthode de Kjeldahl ? ». Livre blanc de FOSS. 5p.
- Munsell Color. 1994. *Munsell Soil Color Charts*. Munsell Color. Revised edition. Greg Macbeth : Munsell Color. 29 p.
- Nicolardot, B. et R. Chaussod. 1986. « Mesure de la biomasse microbienne dans les sols cultivés - III. Approche cinétique et estimation simplifiée de l'azote facilement minéralisable ». *Rev. Ecol. Biol. Sol.* 23 (3) : pp. 233-247
- Nsanzimfura, T. 2015. « Etude de la densité apparente et de la porosité du sol dans le dispositif expérimental crop-news de kamboïse (Burkina Faso) ». Mémoire de fin d'études. Cirad, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. 74 p.
- Paul van dijk. 2013. « Estimer la densité apparente pour ABC-Terre. Comparaison des fonctions de pédotransfert ». Guide technique. Association pour la relance économique d'Alsace. 17 p.
- Pearson, C.J., et B.C. Jacobs. 1985. « Root distribution in space and time in trifolium subterraneum ». *Austr. J. Agric. Res.* 36 : pp. 601-614.
- Peigné, J. 2018. « Les pratiques de l'agriculture de conservation : un levier d'amélioration de la fertilité des sols et d'innovation en agriculture biologique ? ». Mémoire d'Habilitation à Diriger la Recherche. Université Claude Bernard, Lyon 1. 131 p.
- Peigné, J., F. Loridat, A. Cadillon, A. Coulombel, et L. Fourrié. s. d. « Vers une méthode d'observation de l'activité des vers de terre ». Fiche technique. IRARA Lyon, ITAB, FranceAgriMer, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. 2 p.
- Pessenda, L.C.R., R. Boulet, R. Aravena, V. Rosolen, S.E.M. Gouveia, A.S. Ribeiro, et M. Lamotte. 2001. « Origin and dynamics of soil organic matter and vegetation changes during the Holocene in a forest-savanna transition zone, Brazilian Amazon region ». *The Holocene* 11 : pp. 283-287.
- Poudou, S. s. d. « Evaluer la réserve utile de son sol ». Fiche technique. Chambre d'agriculture Ariège. 4 p.
- Powison, D.S., P.C. Brookes, et B.T. Christensen. 1987. « Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total organic matter due to straw incorporation ». *Soil biology and biochemistry* 19 : pp. 159-164.
- Préfecture de la Réunion. 2016. « Protocole pour la réalisation de travaux d'amélioration foncière agricole et la valorisation des matériaux excédentaires issus des travaux d'épierreage ». Protocole. Préfecture de la Réunion.

- Qian, P., et J.J. Schoenau. 2002. « Practical applications of ion exchange resins in agricultural and environmental soil research ». *Can. J. Soil. Sci.* 82 : pp. 9-21.
- Ranjard, L., S. Dequiedt, C. Jolivet, N. Saby, J. Thioulouse, J. Harmand, P. Loisel, et al. 2010. « Biogeography of Soil Microbial Communities: A Review and a Description of the Ongoing French National Initiative ». *Agronomy for Sustainable Development* 30 (2): pp. 359-65.
- Rémy, J.C., et A. Marin-Laflèche. 1974. « L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique ». *Annales Agronomiques* 25 (4) : pp. 607-632.
- Riou, V., et H. Ceremonie. 2017. « Les nématodes : bioindicateurs des sols ». Fiche technique SOLAG n°2. *Bulletin Sol et Agronomie des Chambres d'agriculture des Pays de la Loire*. 2 p.
- Riou, V., et N. Chemidlin Prevost Bourre. 2018. « Les Bactéries du Sol ». Fiche technique SOLAG n°3. *Bulletin Sol et Agronomie des Chambres d'Agriculture des Pays de la Loire*. 2 p.
- Roger-Estrade, J. 2004. « Gestion des états physique et chimique du sol - Dégradation des matières organiques ». *Gestion des peuplements végétaux et des ressources du milieu*. AgroParisTech. [Disponible en ligne] [https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/SIAFEEAGRONOMIE5bd9/document/peuplements/sol/part2\\_mo\\_degradation.htm](https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/SIAFEEAGRONOMIE5bd9/document/peuplements/sol/part2_mo_degradation.htm) (Consulté le 07/12/2021).
- Roger-Estrade, J. 2017. « Gestion de la structure des sols cultivés : travail et non travail du sol ». Paris.
- Saenger, A. 2013. « Caractérisation et stabilité de la matière organique du sol en contexte montagnard calcaire : proposition d'indicateurs pour le suivi de la qualité des sols à l'échelle du paysage ». Thèse. Grenoble, France : Université de Grenoble. 269 p.
- Six, A. 2014. « Analyse des facteurs impactant la biodiversité écologique des vers de terre dans trois sols typiques du Poitou-Charentes ». Mémoire de Fin d'Études. AgroCampusOuest, Chambre d'Agriculture Poitou-Charentes. 80 p.
- Tardieu, F., et H. Manichon 1986. « Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. 11 - Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines ». *Agronomie* 6 (5) : pp. 415-425.
- Thoumazeau, A., F. Gay, P. Alonso, N. Suvannang, A. Phongjinda, P. Panklang, T. Chevallier, C. Bessou, et A. Brauman. 2017. « SituResp®: A Time- and Cost-Effective Method to Assess Basal Soil Respiration in the Field ». *Applied Soil Ecology*, pp. 223-30.
- Trochery, F. 2003. « Des indicateurs pour quoi faire ? » In Thévenet G., Faedy L., eds, *Les fertilités des sols et les systèmes de culture*. pp. 177-186. Blois : Imprimerie Saint-François.
- Tsague, G.E. 2021. « La compaction des sols : Les causes et les solutions ». Fiche technique. 5 p.
- Tuan Long Pham. 2008. « Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide ». Thèse. Ecole des Ponts ParisTech. 232 p.

- Vizier, J.F. 1971. « Étude de l'état d'oxydoréduction du sol et de ses conséquences sur la dynamique du fer dans les sols hydromorphes ». Série Pédologique, Cahiers ORSTOM 9 (4) : 25 p.
- Vizier, J.F. 1984. « Les phénomènes d'hydromorphie en régions tropicales à saisons contrastées. Application à une meilleure caractérisation des concepts de gley et de pseudogley ». Science du Sol (3) : pp. 225-238.
- Wall, D., M. Bradford, M. St. John, J. Trofymow, V. Behan-Pelletier, D. Bignell, J. Dangerfield, et al. 2008. « Global decomposition experiment shows soil animal impacts on decomposition are climate-dependent ». Global Change Biology 14 : pp. 2661-2677.
- Yoro, G. 1983. " Contribution à l'étude de caractérisation de la structure. Identification et évolution des paramètres structuraux de deux types de sols du nord-ouest de la Côte-d'Ivoire ". Thèse, Université d'Abidjan. 279 p.
- Yoro, G., et G. Godo. 1989. « Les méthodes de mesure de la densité apparente - Analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné ». Centre. ORSTOM, sér. Pédol. volume 15 (4): pp. 423-29.
- Zante, P. 1993. « Les techniques d'étude du profil cultural ». Mémoire bibliographique. Université Paris XII Val de Marne. 70 p.