



SOLAE : Améliorer la prise en compte des SOLs Agro-Ecologique dans les exploitations agricoles dans les territoires méditerranéens de PACA

Contribution à l'appropriation et à la généralisation de l'utilisation d'indicateurs d'évaluation de la qualité des sols en Provence –Alpes – Côte d'Azur



De plus en plus d'agriculteurs et d'acteurs du Développement, se référant aux progrès de la Recherche, à l'initiative d'autres agriculteurs et à la pression sociale et environnementale, se préoccupent du sol.

Une meilleure connaissance, partagée, de ses caractéristiques et de son fonctionnement s'avèrent nécessaire à la bonne utilisation des outils de conseil (outils d'aide à la décision en matière de fertilisation, gestion de la matière organique ou outils de pilotage de l'irrigation par exemple).

Des démarches et des outils d'évaluation agri-environnementale intégrant un volet « SOL » sont mis en place chez les agriculteurs (nouveaux indicateurs de qualité biologique des sols, modèles pour l'estimation des risques de fuites d'azote dans l'eau ou dans l'air, niveau d'utilisation des produits phytosanitaires, ...).

En Provence Alpes Côte d'Azur de nombreux travaux sont conduits autour de la thématique « SOL » que ce soit au niveau de la Recherche fondamentale et appliquée, des acteurs du Développement et de groupes d'agriculteurs en agriculture biologique ou conventionnelle. Ils font de plus en plus appel à des outils d'évaluation de la qualité des sols utilisables sur le terrain chez, ou par l'agriculteur.

L'ambition initiale dans le cadre du projet SOLAE était de contribuer à la construction d'indicateurs globaux sur le changement de modes de gestions agro-écologiques des sols.

Mais après les premières phases d'inventaire du projet SOLAE, tant en matière de méthodes et outils qu'au niveau des données disponibles en Région Provence Alpes Côte d'Azur, et devant les nombreuses interrogations pratiques des conseillers des réseaux de Développement, il a été convenu de recentrer les travaux de SOLAE sur les indicateurs spécifiquement liés à la qualité du sol.

En effet les conseillers en contact avec les agriculteurs ont rapidement constaté le manque d'éléments pour choisir et conseiller l'utilisation de méthodes faciles à mettre en œuvre sur le terrain. La demande des agriculteurs de disposer d'outils simples et pertinents, adaptés à leurs pratiques au quotidien est forte

Ce document présente les résultats d'un travail important destiné à répertorier et décrire les différents outils, méthodes et tests fiables et simples à mettre en œuvre sur le terrain, permettant d'accéder à un résultat indicatif sur la qualité d'un sol. L'objectif initial (construction d'indicateurs globaux sur le changement de modes de gestions agro-écologiques des sols) a donc été réorienté, de manière à ne pas sauter des étapes d'appropriation et de généralisation de l'usage des indicateurs d'évaluation de la qualité des sols par les conseillers et les agriculteurs de PACA en particulier sur le terrain.

Contribution à la construction d'indicateurs de changements de modes de gestions agro-écologique des sols en Provence –Alpes – Côte d'Azur

1. Contexte

Dans la première phase du projet SOLAE un inventaire des outils et méthodes utilisés en matière de connaissance des sols a été réalisé à partir des éléments en possession des partenaires de SOLAE ou de leurs réseaux. Cela a conduit à produire un Mémento, un porter à connaissance partagé.

Mais les travaux conduits sur le terrain avec les groupes d'agriculteurs, et la mise en place de formations sur les sols quelques mois après le démarrage du projet SOLAE, a mis en exergue le besoin de renforcer la connaissance des conseillers en région PACA sur les outils et des indicateurs de la qualité des sols, avant de passer à une phase de construction d'indicateurs des changements de pratiques.

Cette réorientation a été considérée comme nécessaire, et comme un préalable indispensable pour l'ensemble des partenaires de SOLAE en vue de consolider le savoir-faire collectif et favoriser à terme la capitalisation des connaissances en PACA.

2. Cadre méthodologique

La méthodologie a été élaborée par l'INRAE et a mobilisé, non seulement des partenaires régionaux de SOLAE, mais aussi des organismes et experts nationaux des différentes disciplines de Science du Sol.

Les travaux ont porté sur :

1. Recherche bibliographique à travers plusieurs supports d'informations: articles scientifiques, blog de jardinier, livres, magazines, pratiques des conseillers.
2. Analyse des caractéristiques de chaque test ou méthode :
 - Les objectifs
 - Les principes de mesure et mode opératoire
 - Le matériel et les consommables nécessaires
 - Les normes associées lorsqu'elles existent
 - Les données obtenues (quantitatives, qualitatives...)
 - Les avantages et les inconvénients
 - Le degré d'expertise nécessaire
 - Le domaine d'application
 - Les références scientifiques et techniques
3. Regroupement des résultats dans un support unique
4. Focus sur un test spécifique : le test de stabilité structurale

3. Principaux résultats

Les résultats synthétiques ont été rassemblés dans un fichier Excel comportant 5 feuilles (**Annexe A** : Fichier Excel synthétisant les différents indicateurs de la qualité d'un sol et leurs tests associés) :

- Le sommaire, rassemblant tous les tests et méthodes classés selon le type d'indicateur
- Les indicateurs biologiques divisés en deux sous-groupes : les indicateurs faunistiques et les indicateurs microbiologiques
- Les indicateurs chimiques divisés en cinq sous-groupes : les kits d'analyses, les indicateurs de pH, les indicateurs optiques, les indicateurs de teneur en carbone et les indicateurs de teneur en azote
- Les indicateurs physiques divisés en cinq sous-groupes : les indicateurs de l'état et de la stabilité structurale, les indicateurs de texture, les indicateurs de perméabilité, les indicateurs de résistance et les indicateurs de présence d'eau
- Les multi-indicateurs

Au total plus de 60 indicateurs ont été identifiés et caractérisés.



Les travaux conduits sur un test de stabilité structural (méthode de Seybold et Herrick) avaient pour objectif d'étudier la faisabilité et les limites de ce test relativement simple mais plus précis que le slake-test utilisé au champ par exemple.

Les résultats détaillés figurent dans le mémoire de fin de 1^{ère} année de MASTER « Hydrogéologie, Sol et Environnement », présenté par Morgane PEREZ, intitulé « **Analyse bibliographique d'indicateurs « simples » permettant de caractériser et de suivre les différentes composantes de la qualité d'un sol agricole** » (**Annexe B**)

ANNEXE A

**Fichier Excel synthétisant les différents indicateurs de la qualité
d'un sol et leurs tests associés**

LISTE DES INDICATEURS

Indicateurs biologiques	Indicateurs physiques	Indicateurs chimiques	Multi-indicateurs
Indicateurs faunistiques	Indicateur de l'état et de la stabilité structurale	Kit d'analyse chimique (site Agrifournitures)	Biofunctool
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la macrofaune : les vers de terre (ou Méthode Bouché)	Test bêche	Indicateur de pH	
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la mésofaune : les micro-arthropodes (extracteur de MacFadyen)	Profil cultural	Test au bicarbonate de soude	
Méthode d'échantillonnage et d'analyse des macro-invertébrés (ou méthode TSBF) + Méthode IndVal	Mini profil 3D	Test au vinaigre	
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la macro et mésofaune (extracteur de Berlese Tullgren)	Slake test	Méthode du chou rouge	
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la mésofaune : les enchytréides (entonnoir à eau)	Test de Le Bissonnais	Méthode de détermination du pH	
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la nématofaune (par élutriation)	Kit de stabilité des agrégats	Indicateur optique	
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la nématofaune (méthode de Cobb ou méthode des seaux)	Indicateur de texture	Spectroscopie Proche Infrarouge (SPIR ou NIRS)	
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la nématofaune (méthode des 2 fioles de Seinhorst)	Test du boudin	Spectroscopie Moyen Infrarouge (SMIR ou MIRS)	
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la nématofaune (méthode de l'entonnoir de Baermann et méthode de Baermann modifiée)	Test du lancer de la boule	Indicateurs teneur en carbone	
Cage à émergence	Test de la pression	Test au permanganate de potassium	
Indicateurs microbiologiques	Méthode du bocal	Méthode Dumas ou méthode de combustion sèche	
Méthode du sachet de thé	Test de la pâte à tarte	Calcimétrie	
LEVA-bag	Analyse granulométrique par tamisage	Méthode Walkley-Black	
Méthode du slip en coton	Analyse granulométrique par sédimentation	Méthode Anne ou méthode par voie humide	
Test de Bait Lamina	Granulomètre à diffraction laser	Indicateurs teneur en azote	
Méthode de respiration induite par le substrat (SIR) (exemple MicroResp TM et SituResp)	Indicateur de perméabilité	Kit Nitrachek	
Méthode par fumigation-extraction	Essai à la fosse (ou essai matsuo)		
Méthode par analyse des acides gras phospholipidiques (PLFA) et par analyse des lipides éther-phospholipidiques (PLEL)	Test de Beerkan		
Méthode par analyse des acides gras phospholipidiques (PLFA) en utilisant la méthode simple d'extraction des PLFA	Test de Muntz (ou méthode conventionnelle des doubles anneaux)		
Méthode d'extraction directe de l'ADN du sol (métagénomique)	Méthode Porchet		
Méthode d'extraction directe de l'ADN du sol (métabarcoding)	Perméamètre de Guelph		
	Indicateur de résistance		
	Test du tournevis		
	Test à la houe (piochard)		
	Essai de pénétration		
	Essai scissométrique		
	Essai pressiométrique		
	Indicateur indiquant la présence d'eau		
	Test tactile		
	Méthode gravimétrique		
	Méthode par sonde à neutrons		
	Méthode de Richards ou méthode de la presse à membrane		
	Méthode TDR		
	Méthode de mesure avec le tensiomètre à bougie poreuse		

Indicateurs faunistiques	Objectifs	Principes	Normes (non vérifiées)	Mode opératoire	Matériaux nécessaires	Données finales	Contexte d'application	Terrain/laboratoire	Remarques	Avantages	Inconvénients	Degré d'expertise	Documents/sites internet associés	Références scientifiques
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la macrofaune : les vers de terre (ou Méthode Bouche)	Déterminer la diversité de la faune du sol	Etude de l'ensemble des communautés de (macro) du sol et leurs modes de vie	NF IN ISO 23811.3 Qualité du sol - Prélèvement des invertébrés du sol - Partie 1 : 1 ^{er} manuel et extraction des vers de terre	Identifier la zone d'échantillonnage (1 m ²) et nettoyer soigneusement la surface (couper la végétation et de la liège ou les amis organiques). Appliquer 3 arrosages de solution formale à 15 minutes d'intervalle. Prélever les lombriciens à la surface du sol puis effectuer un triage soigné jusqu'à 3 cm de profondeur pour récupérer les individus non récoltés. Faire un prélèvement physique : entrainer un bloc de terre (20x20x20 cm) au sein de la zone et trier manuellement. Mettre les individus trouvés dans du formol (pour la conservation) et procéder à la reconnaissance des espèces.	Une bêche, des bassines, des récipients contenant du formol	Abondance : nombre d'individus/m ² (global ou par catégories écologiques) Biomasse : g/m ² Richesse : nombre d'espèces	→ Evaluation des risques environnementaux dans des terrains contaminés/pollués → Rendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols → Rendre compte de la fertilité de la terre en culture	Terrain + laboratoire	Réponse rapide de l'indicateur après modification du milieu Méthode d'échantillonnage utilisée depuis de nombreuses années (existence de référence)	Méthode coûteuse en temps, destruction de la faune (utilisation d'un liquide conservateur).	Echantillonnage : débutant Analyse : expert	<ul style="list-style-type: none"> • Fiche outil : Les vers de terre - G. Peres et al. (Université de Rennes 1) • OPI (Observatoire Participatif des Vers de Terre) : https://cecosoil.univ-rennes1.fr/OPIV_actuel.php • Les bio-indicateurs de l'état des sols : principe et exemples d'utilisation - M. Le Guédard et al. (2017) • Programme RMA2 BioDiv Bretagne (tome 2) - D. Cluzeau (2009) 	<ul style="list-style-type: none"> • Modification de la dynamique d'une population de vers de terre Lombricos terrestres au champ. Contributeur à l'étude de l'impact des systèmes de culture sur les communautés lombricoles - C. Régnier (2008) • Les bio-indicateurs de l'état des sols : principe et exemples d'utilisation - M. Le Guédard et al. (2017) • Programme RMA2 BioDiv Bretagne (tome 2) - D. Cluzeau (2009) 	
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la mésofaune : les micro-arthropodes (extracteur de MacFadyen)	Déterminer la diversité de la faune du sol	Etude de l'ensemble des peuplements des micro-arthropodes (à l'exception de la colle définie par sa taille : de 100 µm à quelques mm) et leurs modes de vie	NF IN ISO 23811.2 Qualité du sol - Prélèvement des invertébrés du sol - Partie 2 : prélèvement et extraction des micro-arthropodes (Collembola et Acarina)	Si le sol est difficile à pénétrer, commencer par entailler le sol avec une bêche afin de pratiquer deux ouvertures parallèles. Enterrer le carotier le plus profondément possible dans le sol. Couvrir le carotier puis découper la crotte du sol et le reporter à l'aide d'un souteau cranté. Faire un capoton de chaque côté de l'échantillon (indiquant le haut et le bas de la crotte). Transférer la mésofaune à l'aide de l'extracteur MacFadyen. Transférer les micro-arthropodes dans de l'alcool de conservation. Effectuer un tri et une reconnaissance des espèces sous la loupe binoculaire ou le microscope.	Un carotier, un couteau cranté, des boîtes de prélèvement, un extracteur MacFadyen, une loupe binoculaire ou un microscope	Abondance : nombre d'individus/m ² (global ou par catégories écologiques) Biomasse : g/m ² Richesse : nombre d'espèces	→ Evaluation des risques environnementaux dans des terrains contaminés/pollués → Rendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols → Rendre compte de la fertilité de la terre en culture	Terrain + laboratoire		Méthode coûteuse en temps, destruction de la faune (utilisation d'un liquide conservateur).	Echantillonnage : débutant Analyse : expert	<ul style="list-style-type: none"> • Programme RMA2 BioDiv Bretagne (tome 2) - D. Cluzeau (2009) • Echantillonnage de la mésofaune du sol - G. Vannier et J.F. Canevari da Fonseca 		
Méthode d'échantillonnage et d'analyse des macro-invertébrés (ou méthode 138B) + Méthode IndVal	Déterminer la diversité de la faune du sol	Etude de l'ensemble des peuplements de (macro) du sol et leurs modes de vie	NF IN ISO 23811.5 Qualité du sol - Prélèvement des invertébrés du sol - Partie 5 : prélèvement et extraction des macro-invertébrés du sol	Délimiter une partie de sol de 25 cm de côté et 30 cm de profondeur. Partager l'échantillon en 3 strates suivant la profondeur soit 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm. Trier manuellement la faune puis procéder à la reconnaissance des espèces.	Une bêche, des bassines, des récipients contenant du formol et une solution formale	Indicateur Biologique de la Qualité des Sols (IBQS) (calculé avec INQS(0,5)). De la densité moyenne de l'espèce dans un site (calculée avec la méthode 138B) si il y a une valeur indicative du terrain (obtenue avec la méthode IndVal)	→ Evaluation des risques environnementaux dans des terrains contaminés/pollués → Rendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols → Rendre compte de la fertilité de la terre en culture	Terrain + laboratoire	Possibilité d'utiliser une solution formale à 0,2% ou une solution à base de moulineur pour extraire les macro-invertébrés du sol (jusqu'à une profondeur de 15 cm)	Représentation faible de la diversité et de l'abondance des organismes présents	Echantillonnage : débutant Analyse : expert	<ul style="list-style-type: none"> • Indice biologique de la qualité des sols (IBQS) : bio-indicateur de la qualité des sols basé sur l'étude des peuplements de macro-invertébrés - N. Ruiz • Evaluation et suivi de la qualité des sols - HSTIA (2012) 	<ul style="list-style-type: none"> • Indicateurs synthétiques de la qualité du sol - N. Ruiz et al. (2009) • Etude de la diversité de la pétéofaune dans les systèmes agroforestiers - R. Métral (2005) • Programme RMA2 BioDiv (Tome 1) - D. Cluzeau (2009) • Programme RMA2 BioDiv (Tome 1) - D. Cluzeau (2009) 	
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la macrofaune (extracteur de Berlese Tullgren)	Déterminer la diversité de la faune du sol	Etude de l'ensemble des peuplements de (macro) du sol et leurs modes de vie	NF IN ISO 23811.2 Qualité du sol - Prélèvement des invertébrés du sol - Partie 2 : prélèvement et extraction des micro-arthropodes (Collembola et Acarina)	Placer un volume connu de terre dans un entonnoir dont le trou de sortie est fermé par un grillage. Placer un récipient contenant un liquide conservateur sous le trou de l'entonnoir. Placer l'ensemble sous une lampe à incandescence (source de chaleur). Effectuer la reconnaissance des espèces trouvées.	Un entonnoir, un récipient contenant de l'alcool à 70% (liquide conservateur), une source de chaleur	Abondance : nombre d'individus/m ² (global ou par catégories écologiques) Biomasse : g/m ² Richesse : nombre d'espèces	→ Evaluation des risques environnementaux dans des terrains contaminés/pollués → Rendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols → Rendre compte de la fertilité de la terre en culture	Terrain + laboratoire	Cette extraction est souvent réalisée après tamisage de l'échantillon de sol pour les microfaunes, ou réaliser l'extraction sur plusieurs petits échantillons homogènes.	Méthode facile, peu coûteuse et assez rapide, nombreux moyens de concevoir un bœcher (un bac Curver, une bouteille en plastique, une bassine, un cadre en bois...)	Destruction de la faune (utilisation d'un liquide conservateur)	Echantillonnage : débutant Analyse : expert	<ul style="list-style-type: none"> • Le bœcher : extraction des arthropodes de la lièvre - J.H. Yvonne et P. Bonneau (2008) 	<ul style="list-style-type: none"> • Etude de la diversité de la pétéofaune dans les systèmes agroforestiers - R. Métral (2005) • Programme RMA2 BioDiv (Tome 1) - D. Cluzeau (2009) • Cours de fonctionnement du TRBS - La Taupe du sol : diversité, méthodes d'étude, fonctions et perspectives - A. Degroen (2003)
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la mésofaune : les enchytréides (entonnoir à eau)	Déterminer la diversité de la faune du sol	Etude de l'ensemble des peuplements d'Enchytréides du sol et leurs modes de vie	NF IN ISO 23811.3 Qualité du sol - Prélèvement des invertébrés du sol - Partie 3 : prélèvement et extraction des enchytréides	A l'aide d'un carotier, prélever des échantillons de sol à différentes profondeurs (par tranches de 5 cm de profondeur). Enterrer les enchytréides en utilisant un entonnoir à eau. Disposer l'échantillon dans un flacon de volume de 2 litres sur l'entonnoir lui-même disposé sur un tube à essai rempli d'eau, recouvrir la surface d'un disque en verre ou en plastique en évitant d'empêcher les bulles d'air, disposer le dispositif sous une lampe chauffante. Les enchytréides fuient l'entonnoir en cherchant un milieu plus oxygéné en bas du tube à essai. Ils sont déposés dans une boîte à pétri et comptés à l'aide d'une loupe binoculaire et d'une feuille de papier quadrillée.	Un carotier, un entonnoir, un flacon de 2 litres, un tube à essai, un disque en verre, une lampe chauffante, une boîte à pétri, une loupe binoculaire	Abondance : nombre d'individus/m ² (global ou par catégories écologiques) Biomasse : g/m ² Richesse : nombre d'espèces	→ Evaluation des risques environnementaux dans des terrains contaminés/pollués → Rendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols → Rendre compte de la fertilité de la terre en culture	Terrain + laboratoire	Les enchytréides fuient la lumière et la chaleur.	Méthode efficace.	Echantillonnage : débutant Analyse : expert	<ul style="list-style-type: none"> • Etude des processus de fourbification des marais de Lavours et de Chèvres : interactions eau, matière organique et activité biologique - R. Corti et T. Troupin (2004) • Les enchytréides : des organismes ingénieurs des sols mal connus - C. Pédrot et al. (2016) 		
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la nématofaune (par dilution)	Déterminer la diversité de la faune du sol	Etude de l'ensemble des communautés de nématodes et leurs modes de vie	NF IN ISO 23811.4 Qualité du sol - Prélèvement des invertébrés du sol - Partie 4 : prélèvement, extraction et identification des nématodes du sol	A l'aide d'un carotier, prélever des échantillons de sol dans la strate 0-20 cm. Enterrer les nématodes par dilution : lors d'un échantillon de sol est placé dans l'eau, les particules lourdes du sol sédimentent plus rapidement que les nématodes. Lors d'une dilution, un courant d'eau ascendant maintient contact permet d'extraire les nématodes. Pour prélever les nématodes, passer le surmugant au travers d'un tamis et procéder au comptage.	Un carotier, un diluoir d'osterlinck, des tamis, une loupe binoculaire ou un microscope	Abondance : nombre d'individus/m ² (global ou par catégories écologiques) Biomasse : g/m ² Richesse : nombre d'espèces	→ Evaluation des risques environnementaux dans des terrains contaminés/pollués → Rendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols → Rendre compte de la fertilité de la terre en culture	Terrain + laboratoire		Méthode simple à réaliser.	Méthode peu précise car la sédimentation est approchée à l'œil et l'efficacité des extractions est très variable.	Débutant	<ul style="list-style-type: none"> • Identification morphologique des nématodes 	<ul style="list-style-type: none"> • Les bio-indicateurs de l'état des sols : principe et exemples d'utilisation - M. Le Guédard et al. (2017) • La nématofaune, un bioindicateur pour évaluer le fonctionnement biologique des sols - C. Villeneuve (2018) • Méthode d'analyse MOA012 version 1a relative à l'extraction, la détection et l'identification morphobiochimique des nématodes phytoparasites - Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche (2010) • Méthode de fonctionnement biologique de la nématofaune : semis direct versus labour sur les hautes terres près d'Antsirabé (Madagascar) - C. Villeneuve et al. (2000) • Nématode extraction - Bulletin OIPF (2013)
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la nématofaune (méthode de Cobb ou méthode des saus)	Déterminer la diversité de la faune du sol	Etude de l'ensemble des communautés de nématodes et leurs modes de vie	NON	A l'aide d'un carotier, prélever un échantillon de sol dans la strate 0-20 cm. Mélanger l'échantillon avec de l'eau par un brassage énergique dans unseau à puis assés décoloré. L'ensemble d'eau puis renverser sur un entonnoir B rempli d'eau de façon à ce que l'entonnoir de A plonge de 1 à 2 cm dans l'eau contenu dans B. Laisser environ 10 minutes le sol tomber de la veie B. Renverser l'entonnoir A sur un bœcher C plein d'eau pendant 10 à 20 min. Remonter à sur un bœcher D plein d'eau. Puis renverser à sur C. Les contenus de A et B sont passés à travers un tamis de 40 à 50 µm et celui de C sur un tamis de 90 à 100 µm. Récupérer les nématodes et procéder au comptage.	Un carotier, 1seau, un tamis à maille 1 mm, un tamis à maille plus fine, un bœcher ou goblet de lecture	Abondance : nombre d'individus/m ² (global ou par catégories écologiques) Biomasse : g/m ² Richesse : nombre d'espèces	→ Evaluation des risques environnementaux dans des terrains contaminés/pollués → Rendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols → Rendre compte de la fertilité de la terre en culture	Terrain + laboratoire		Méthode simple à réaliser.	Méthode peu précise car la sédimentation est approchée à l'œil et l'efficacité des extractions est très variable.	Débutant	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode d'analyse MOA012 version 1a relative à l'extraction, la détection et l'identification morphobiochimique des nématodes phytoparasites - Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche (2010) 	
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la nématofaune (méthode des 2 fioles de Seinhorst)	Déterminer la diversité de la faune du sol	Etude de l'ensemble des communautés de nématodes et leurs modes de vie	?	A l'aide d'un carotier, prélever un échantillon de sol dans la strate 0-20 cm. Mélanger l'échantillon avec de l'eau dans un bœcher puis passer la suspension bioassés à travers un tamis de maille de 1 à 2 mm afin d'éliminer les gros débris. La transférer dans un entonnoir A équipé d'un entonnoir. Le rempli d'eau puis renverser sur un entonnoir B rempli d'eau de façon à ce que l'entonnoir de A plonge de 1 à 2 cm dans l'eau contenu dans B. Laisser environ 10 minutes le sol tomber de la veie B. Renverser l'entonnoir A sur un bœcher C plein d'eau pendant 10 à 20 min. Remonter à sur un bœcher D plein d'eau. Puis renverser à sur C. Les contenus de A et B sont passés à travers un tamis de 40 à 50 µm et celui de C sur un tamis de 90 à 100 µm. Récupérer les nématodes et procéder au comptage.	Un carotier, des bœchers, des tamis de mailles différentes, des entonnoirs, un bœcher binoculaire ou un microscope	Abondance : nombre d'individus/m ² (global ou par catégories écologiques) Biomasse : g/m ² Richesse : nombre d'espèces	→ Evaluation des risques environnementaux dans des terrains contaminés/pollués → Rendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols → Rendre compte de la fertilité de la terre en culture	Terrain + laboratoire	50% des petits nématodes se trouvent dans l'entonnoir A et le reste dans B et C (qui contiennent 75% des plus gros). Le bœcher D ne contient pratiquement pas de nématode et son contenu est éliminé.	Méthode permettant de récupérer la plupart des nématodes de taille petite à moyenne. L'appareil permet de séparer l'extrait en plusieurs fractions, le tamisage est ainsi plus facile.	L'utilisation de fioles en verre rend la technique plus fragile.	Echantillonnage : débutant Analyse : expert	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode d'analyse MOA012 version 1a relative à l'extraction, la détection et l'identification morphobiochimique des nématodes phytoparasites - Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche (2010) 	
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la nématofaune (méthode de l'entonnoir de Baermann et méthode de Baermann modifiée)	Déterminer la diversité de la faune du sol	Etude de l'ensemble des communautés de nématodes et leurs modes de vie	?	A l'aide d'un carotier, prélever un échantillon de sol dans la strate 0-20 cm. Un tamis est retenu dans la partie supérieure d'un entonnoir. L'extrémité du tube de l'entonnoir est équipée d'un tissu souple détrempé. Un filtre papier ou tissu est placé dans le tamis. L'échantillon de sol de 20 g est versé dans l'entonnoir et est placé sur le tissu. De l'eau est versée dans l'entonnoir jusqu'au recouvrement de l'échantillon. Après une période de 12 heures à 3 jours, les nématodes mobiles ont traversé le tissu et se trouvent à l'extrémité inférieure de l'entonnoir. Ils sont récupérés dans un bœcher en prélevant quelques ml en descendant le clamp. Procéder au comptage.	Un carotier, un tamis, un entonnoir, un tissu souple, un filtre papier ou tissu, un bœcher, une loupe binoculaire ou un microscope	Abondance : nombre d'individus/m ² (global ou par catégories écologiques) Biomasse : g/m ² Richesse : nombre d'espèces	→ Evaluation des risques environnementaux dans des terrains contaminés/pollués → Rendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols → Rendre compte de la fertilité de la terre en culture	Terrain + laboratoire	Méthode permettant de récupérer les nématodes mobiles. La mauvaise oxygénation peut réduire la mobilité des nématodes : une adaptation de cette méthode est plus efficace. C'est la méthode Baermann modifiée (utilisation d'une cuvette à la place d'un entonnoir).	Méthode ayant une faible efficacité.	Méthode ayant une faible efficacité.	Expert	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode d'analyse MOA012 version 1a relative à l'extraction, la détection et l'identification morphobiochimique des nématodes phytoparasites - Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche (2010) 	
Cage à émergence	Déterminer la diversité de la faune du sol	Etude de l'ensemble des peuplements d'insectes aériens à larves saproxyliques du sol et leurs modes de vie	NON	Placer la cage à émergence sur le sol. Attendre quelques jours puis collecter les insectes présents dans la cage. Procéder à l'identification.	Une nasse ou une cage à émergence achetée dans le commerce (exemple : site Wildarea + page à émergence de sol environ 30 euros)	Abondance : nombre d'individus/m ² (global ou par catégories écologiques) Biomasse : g/m ² Richesse : nombre d'espèces	→ Evaluation des risques environnementaux dans des terrains contaminés/pollués → Rendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols → Rendre compte de la fertilité de la terre en culture	Terrain + laboratoire	Méthode simple à utiliser et facilement transférable d'un endroit à un autre.	La transformation de la larve située dans le sol en adulte prend souvent plusieurs jours, ce qui induit un temps d'attente assez important.	Echantillonnage : débutant Analyse : expert	<ul style="list-style-type: none"> • Etude de la diversité de la pétéofaune dans les systèmes agroforestiers - R. Métral (2005) • Les entomologistes et performances d'un piège à émergence destiné à l'étude des insectes à larves saproxyliques ou aquatiques - J. Brunhes (1981) 		
Indicateurs microbiologiques														
Méthode du sachet de thé	Déterminer l'activité biologique d'un sol par l'intermédiaire de la décomposition de matières organiques	Observation de la dégradation (à long terme) de contenu d'un sachet de thé	OUI	Enterrer un sachet de thé dans le sol que l'on souhaite étudier en ayant pris soin de le passer avant. Attendre 3 mois. Placer à nouveau le sachet de thé et observer la décomposition des feuilles de thé.	Un sachet de thé (thé vert et Rooibos) et une balance	Taux de décomposition et taux de dioxyde de carbone libérés par la perte de masse du matériau partiellement ou totalement décomposé (jours)	→ Réalisation du test dans des écosystèmes et des biomes contrastés (influence la température et les systèmes à risque des agents de dioxyde de carbone)	Terrain + laboratoire	A plus grande échelle, cette méthode permet de collecter des informations sur le taux de dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère (biomasse convertie à des molécules de prévision). Possibilité d'utiliser des types de thé différents (avec une décomposition lente ou rapide).	Méthode accessible à tous, peu coûteuse et pratique. Méthode normalisée qui permet de comparer les différents données entre elles.	Une courbe de taux de décomposition précise nécessite généralement plusieurs points de données dans le temps, ce qui induit la nécessité d'être proche du site d'étude. Méthode peu précise.	Débutant	<ul style="list-style-type: none"> • Brewing Big Data - The Tea-Bag Index - L.E. Oplon (2017) • Tea Bag Index - a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems - J.A. Kocum et al. (2013) 	
LEVA Bag	Déterminer l'activité biologique d'un sol par l'intermédiaire de la décomposition de matières organiques	Observation de la dégradation (à long terme) de contenu d'un sac de nylon rempli de paille	OUI	Enterrer un sac de nylon (maille de 1 mm) rempli de paille dans le sol que l'on souhaite étudier en ayant pris soin de le passer avant. Attendre 4 mois. Peser à nouveau le sac de nylon et observer la décomposition de la paille.	Un sac de nylon, une masse déterminée de paille mesurée à l'aide d'une balance ou possibilité d'acheter un LevaBag (entre 80 et 160 euros selon la quantité souhaitée)	Taux de décomposition et taux de dioxyde de carbone libérés par la perte de masse du matériau partiellement ou totalement décomposé (jours)	→ Lorsque qu'il y a une baisse du rendement des parcelles → Lorsque que l'on souhaite connaître l'impact des insectes ou des arthropodes sur la qualité des sols → Lorsque que l'on veut connaître la qualité des espaces verts → Lorsque que l'on souhaite déterminer l'impact du changement de pratiques agricoles	Terrain + laboratoire	A plus grande échelle, cette méthode permet de collecter des informations sur le taux de dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère (biomasse convertie à des molécules de prévision).	Méthode simple à comprendre et facile d'utilisation. Méthode normalisée qui permet de comparer les différents données entre elles.	Méthode peu précise, sensible aux conditions pédologiques.	Débutant	<ul style="list-style-type: none"> • Fiche capacité de dégradation des résidus - LEVA-Bag 	
Méthode du slip en coton	Déterminer l'activité biologique d'un sol par l'intermédiaire de la décomposition de matières organiques	Observation de la dégradation (à long terme) d'un slip en coton blanc 100% biologique	NON	Enterrer un slip en coton blanc dans le sol que l'on souhaite étudier. Attendre environ 2 mois. Laver le sous-vêtement (pour enlever le sol) et observer la décomposition du coton	Un slip en coton blanc bio	Taux de décomposition et taux de dioxyde de carbone libérés par la perte de masse du matériau partiellement ou totalement décomposé (jours)	→ Lorsque qu'il y a une baisse du rendement des parcelles → Lorsque que l'on souhaite connaître l'impact des insectes ou des arthropodes sur la qualité des sols → Lorsque que l'on veut connaître la qualité des espaces verts → Lorsque que l'on souhaite déterminer l'impact du changement de pratiques agricoles	Terrain + laboratoire	La couleur et les odeurs peuvent aussi être étudiées. Elles indiquent des différences d'activité microbiologique. L'odeur est souvent qualifiée de type "terreux", "humus", "champignons" dans les sols les plus actifs. Une odeur de "renfermé", "moisi" oriente plus vers un sol présentant des problèmes tels que l'asphyxie aérobie par exemple.	Méthode simple, compréhensible et facile à mettre en place. Les slips comprennent plus de couleurs et un élastique, ce qui permet de les récupérer plus facilement.	Méthode ne répondant pas à un protocole scientifique établi.	Débutant	<ul style="list-style-type: none"> • Des slips comme indicateur de la vie biologique (2018) par le site de l'Institut pour l'écologie - in the name of soil conservation 	

<p>Test de Bait Lamina</p>	<p>Déterminer l'activité biologique d'un sol par l'intermédiaire de la décomposition de matières organiques</p>	<p>Mesure de l'activité alimentaire des invertébrés du sol à l'aide d'appâts organiques (coléoptère + son de bét + charbon actif)</p>	<p>NF EN ISO 18311 Qualité du sol - Méthode pour tester les effets des contaminants du sol sur l'activité alimentaire des organismes vivants dans le sol - Test Bait Lamina</p>	<p>Prendre des bandes de plastique PVC d'une longueur de 16 cm perforées de 16 trous, Remplir les trous d'appât. Insérer verticalement les bandes dans le sol et les laisser environ 14 jours. Retirer les bandes du sol, laver les trous éliminer les résidus de terre) et placer les bandes près d'une source lumineuse pour pouvoir dénombrer les appâts qui ont été mangés.</p>	<p>Des bandes en plastiques perforées, des appâts, une source lumineuse, un ordinateur (programme de mesure)</p>	<p>On attribue des notes en relation avec la consommation des appâts (2 - appât totalement consommé ; 1 - appât partiellement consommé ; 0 - appât non consommé) On les reporte sur une matrice de 4 x 16. On peut aussi calculer un pourcentage d'activité alimentaire par couche de sol et par réplicat. Puis on peut en déduire l'activité alimentaire totale.</p>	<p>→ Tester les effets des contaminants du sol sur l'activité alimentaire des organismes vivants dans le sol</p>	<p>Terrain + laboratoire</p>	<p>La durée du test dépend de la saison, de la température et de l'humidité du sol</p>	<p>Méthode s'appliquant à tout type de sol, peu coûteuse et rapide.</p>	<p>Ne s'applique pas aux sols potentiellement inondables ou très superficiels. Son application peut se révéler difficile dans des conditions climatiques ou géographiques extrêmes.</p>	<p>Echantillonnage : débutant Analyse : expert</p>	<p>• Mesure de l'activité biologique de la parcelle de suivi à long terme "Observat" par la méthode Bait Lamina - S. Campote et C. Maurer (2015)</p>	<p>• Selecting cost effective and policy-relevant biological indicators for European monitoring of soil biodiversity and ecosystem function - B. Griffiths (2016)</p>
<p>Méthode de respiration induite par le substrat (SR) (exemple MicroResp TM et StuResp)</p>	<p>Déterminer l'abondance et la diversité des micro-organismes du sol</p>	<p>Etude des échanges gazeux au cours de la respiration</p>	<p>NF EN ISO 14240-1 Qualité du sol - Détermination de la biomasse microbienne du sol - Partie 1 : méthode par respiration induite par le substrat</p>	<p>Prélever un échantillon de sol. Mélanger le sol et tamiser avec un tamis de maille 2 mm. Répartir l'échantillon dans des plaques aux puits profonds. Mettre du substrat carboné dans des puits (glucose, saccharose, trehalose, cellobiose, amidon, acide oxalique, acide malique...). Placer un joint d'étanchéité sur la plaque aux puits profonds. Recouvrir la plaque d'une microplaque contenant un galetage et un indicateur coloré. Insérer les microplaque à l'étuve à 25°C pendant 6 heures. Mesurer le changement de couleur du gel par spectrophotométrie.</p>	<p>Du matériel de prélèvement, un tamis, des plaques aux puits profonds, des joints, des microplaque, du substrat, une étuve, un spectrophotomètre</p>	<p>Le CO2 dégagé par l'activité catabolique des microorganismes du sol provoque un changement de couleur du gel agrégé proportionnellement à la quantité dégagée. Après mesure au spectrophotomètre, on peut estimer le taux de respiration pour chaque puits.</p>	<p>→ Evaluation des risques environnementaux dans des terrains contaminés/pollués → Prendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur le fonctionnement biologique des sols.</p>	<p>Terrain + laboratoire Terrain (méthode StuResp)</p>	<p>La respiration basale du sol correspond au dégagement de CO2 des puits de "terraz" dans lesquels aucun substrat n'a été ajouté au sol.</p>	<p>La sensibilité et la sélectivité des substrats permet de différencier les activités et de discriminer les faibles niveaux. Les méthodes sont relativement simples à mettre en œuvre et peu coûteuses. Elles devraient toutes pouvoir être automatisées à court terme.</p>	<p>Le manque de mesures réalisées avec des protocoles standardisés ou normalisés dans des contextes différents, excluant des situations de référence. Il n'est encore la mise à disposition d'un référentiel d'interprétation des résultats pour un conseil efficace. Les variables environnementales ont une influence importante sur les paramètres.</p>	<p>Echantillonnage : débutant Analyse : expert</p>	<p>• Sur d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols - B. Balloy (2017) • Measuring respiration profiles of soil microbial communities across Europe using MicroResp TM method - A.E. Creamer et al (2015) • Méthodes de description de la biodiversité et du fonctionnement écologique du sol - Agropolis Fondation (2018) • Influence de l'activité Rhizogama necroticum Hochst sur les communautés de microorganismes et de nématodes d'un sol cultivé en mil au Sénégal (Nième) - S. Diakhité (2014) • StuResp - a time and cost effective method to assess basal soil respiration in the field - A. Thomsen (2017)</p>	<p>• Sur d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols - B. Balloy (2017) • Détermination de la biomasse microbienne des sols : méthode "fumigation-extraction" (1999) • Programme IMAGS BioDiv Bretagne (tome 2) - D. Cluzeau (2009)</p>
<p>Méthode par fumigation-extraction</p>	<p>Déterminer l'abondance et la diversité des micro-organismes du sol</p>	<p>Etude des échanges gazeux au cours de la respiration</p>	<p>NF EN ISO 14240-2 Qualité du sol - Détermination de la biomasse microbienne du sol - Partie 2 : méthode par fumigation-extraction</p>	<p>Prendre un échantillon de sol ayant un volume connu. L'échantillon est divisé en deux lots : un lot témoin (non fumigé) et un lot fumigé. Le sol fumigé est traité par des vapeurs de chloroforme pendant 16 heures (dans un dessiccateur sous vide). L'extraction du carbone organique est réalisée par agitation de l'échantillon dans du K2S2O8 (0,2% N) pendant 60 min à 30°C. L'extraction est suivie d'une centrifugation à 4000g pendant 5 min pour séparer le soluté de sol du supernatant (dans lequel se trouve le CO2). On mesure le dosage par oxydation au persulfate sous rayonnement UV (appareil Odeum DC 80) du carbone organique soluble.</p>	<p>Une étuve à vide et pompe à vide, une ampoule à décantier (pour lavage du chloroforme), des petits récipients en verre, une table agitante, une centrifugeuse, des pots de centrifugation, un analyseur de carbone organique dissous (COD)</p>	<p>La différence du carbone organique soluble entre les deux types d'échantillons (fumigés et témoins) (pour lavage du chloroforme), des petits récipients en verre, une table agitante, une centrifugeuse, des pots de centrifugation, un analyseur de carbone organique dissous (COD) selon Chaussod et Houat (1993).</p>	<p>→ Evaluation des risques environnementaux dans des terrains contaminés/pollués → Prendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur le fonctionnement biologique des sols.</p>	<p>Terrain + laboratoire</p>	<p>La technique est applicable aux sols non lâchés fraîchement prélevés. La fumigation par des vapeurs de chloroforme permet de séparer les cellules des micro-organismes vivants.</p>	<p>Ces résultats peuvent être liés à d'autres mesures. Méthode précise.</p>	<p>Le référentiel reste à partager et à consolider entre les différents laboratoires mettant en œuvre cette mesure.</p>	<p>Echantillonnage : débutant Analyse : expert</p>	<p>• Sur d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols - B. Balloy (2017) • Détermination de la biomasse microbienne des sols : méthode "fumigation-extraction" (1999) • Programme IMAGS BioDiv Bretagne (tome 2) - D. Cluzeau (2009)</p>	<p>• Sur d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols - B. Balloy (2017) • Détermination de la biomasse microbienne des sols : méthode "fumigation-extraction" (1999) • Programme IMAGS BioDiv Bretagne (tome 2) - D. Cluzeau (2009)</p>
<p>Méthode par analyse des acides gras phospholipidiques (PLFA) et par analyse des lipides éther-phospholipidiques (PLEL)</p>	<p>Déterminer l'abondance et la diversité des micro-organismes du sol</p>	<p></p>	<p>NF EN ISO 29843-1 Qualité du sol - Détermination de la diversité microbienne du sol - Partie 1 : méthode par analyse des acides gras phospholipidiques (PLFA) et par analyse des lipides éther-phospholipidiques (PLEL)</p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>
<p>Méthode par analyse des acides gras phospholipidiques (PLFA) en utilisant la méthode simple d'extraction des PLFA</p>	<p>Déterminer l'abondance et la diversité des micro-organismes du sol</p>	<p></p>	<p>NF EN ISO 29843-2 Qualité du sol - Détermination de la diversité microbienne du sol - Partie 2 : méthode par analyse des acides gras phospholipidiques (PLFA) en utilisant la méthode simple d'extraction des PLFA</p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>
<p>Méthode d'extraction directe de l'ADN du sol (métagnomique)</p>	<p>Déterminer l'abondance et la diversité des micro-organismes du sol</p>	<p>Exploration de la diversité microbienne globale d'un environnement par séquençage de l'ADN de tous les génomes présents dans cet environnement</p>	<p>NF EN ISO 11061 Qualité du sol - Méthode pour extraire directement l'ADN d'échantillons de sol</p>	<p>→ échantillonnage sur le terrain → extraction de l'ADN → séquençage de l'ADN → analyse de la séquence → identification d'aspects fonctionnels du génome (sans forcément déterminer les espèces)</p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>	<p></p>
<p>Méthode d'extraction directe de l'ADN du sol (métabarcoding)</p>	<p>Déterminer l'abondance et la diversité des micro-organismes du sol</p>	<p>Exploration de la diversité microbienne globale d'un environnement par séquençage d'un fragment particulier d'ADN présents dans cet environnement</p>	<p>NON</p>	<p>→ échantillonnage sur le terrain → extraction de l'ADN → amplification de l'ADN (métachondrial) → séquençage de l'ADN amplifié → analyse de la séquence → identification des espèces présentes dans l'échantillon</p>	<p></p>	<p></p>	<p>→ Permet de réaliser un inventaire des espèces en milieux difficiles → Permet de réaliser un inventaire des espèces difficiles à déterminer → Permet de détecter et suivre les espèces invasives → Evaluation de la qualité écologique des milieux → Permet de suivre la modification des aires de distributions</p>	<p>Terrain + laboratoire</p>	<p>La présence d'ADN ne signifie pas toujours la présence d'organisme</p>	<p>Méthode non invasive, peu coûteuse, avec des capacités de détection plus ou moins accrues.</p>	<p>Il n'y a pas de connaissance des stades de développement des organismes ni de l'état des populations. Il n'y a pas de connaissance de l'abondance absolue. La base de référence est encore incomplète. La détectabilité et l'efficacité de la méthode varient selon les groupes et les milieux.</p>	<p>Echantillonnage : débutant Analyse : expert</p>	<p>• ADN environnemental et métabarcoding</p>	<p></p>

	Objectifs	Principes	Normes (non vérifiées)	Mode opératoire	Matériaux nécessaires	Données finales	Contexte d'application	Terrain/laboratoire	Remarques	Avantages	Inconvénients	Degré d'expertise	Documents/sites internet associés	Références scientifiques
Indicateur de l'état et de la stabilité structurale														
Test bêche	Déterminer l'état structural des 10-25 premiers centimètres d'un sol	Observation et analyse du sol dans sa globalité ainsi que ses propriétés	NON	Pour éviter de tasser le bloc à observer en le prélevant, vider une pénétromètre. Puis prélever les côtés du bloc et observer sur 20 cm de profondeur. Basculer doucement le bloc de sol, enfoncer la bêche à environ 25 cm de profondeur. Basculer doucement la bêche et la poser délicatement sur la bêche.	Une bêche, une pelle, un mètre	Chaque paramètre se voit attribuer une note de 0, 1 ou 2 en sachant que des notes intermédiaires sont possibles. Ainsi, une note globale de l'état structural est attribuée au sol étudié : satisfaisant (supérieur à 25), moyen (de 20 à 25) et mauvais (inférieur à 10).	→ Evaluation de la fertilité physique d'une sol → Permet d'observer les changements dans la structure du sol notamment le tassement, le croûte de battance ou la semelle de labour	Terrain	Permet d'aider l'utilisateur à prendre des décisions tactiques et ainsi de définir un itinéraire de travail approprié au type de sol.	Méthode facile à utiliser, très peu d'équipement nécessaire	Méthode peu précise car basée sur le choix de notation de l'observateur. Diagnostic difficile pour les sols calcaires, les sols trop secs ou très humides.	Echantillonnage : débutant Analyse : expert	<ul style="list-style-type: none"> Le test à la bêche ou "drop test" - CLIMA QUEST (2013) Le test bêche : pour un diagnostic rapide de l'état structural du sol - R. Meunier (2018) Procédure du test à la bêche - Chambre d'Agriculture Vendée 	<ul style="list-style-type: none"> Guide méthodique du test bêche - structure et action des vers de terre - C. Turillon et al. (2018) Complémentarité des méthodes de diagnostic de la structure du sol : guide complémentaire aux 3 méthodes - V. Tomis
Profil culturel	Déterminer l'état structural d'un sol	Observation et analyse du sol dans sa globalité ainsi que ses propriétés	OUI	Repérer une zone représentative de la parcelle. Choisir les dimensions du profil ainsi que la face d'observation (pour éviter tout tassement lors du creusement). Creuser la fosse et commencer les observations.	Une bêche ou une pelle mécanique, un couteau, un mètre	Chaque paramètre se voit attribuer une note de 0, 1 ou 2 en sachant que des notes intermédiaires sont possibles. Ainsi, une note globale de l'état structural est attribuée au sol étudié : satisfaisant (supérieur à 25), moyen (de 10 à 25) et mauvais (inférieur à 10).	→ Comprendre les effets du travail du sol et des passages d'engins sur la structure, le tassement (battance de labour), l'enracinement et la circulation de l'eau → Pouvoir anticiper les effets futurs de la culture d'un terrain	Terrain	Permet d'aider l'utilisateur à prendre des décisions tactiques et ainsi de définir un itinéraire de travail approprié au type de sol.	Permet d'observer l'organisation structurale d'un sol à plus grande échelle. Méthode peu coûteuse.	Méthode longue (2 à 3 heures par profil). Utilisation d'une pelle mécanique (non obligatoire). Zone restreinte.	Echantillonnage : débutant Analyse : expert	<ul style="list-style-type: none"> Guide méthodique du profil culturel - T. Guaisne et al. H. Mousther (1987) Complémentarité des méthodes de diagnostic de la structure du sol : guide complémentaire aux 3 méthodes - V. Tomis Deux méthodes pour observer la structure du sol - Revue Perspectives Agricoles N°397 (2013) 	<ul style="list-style-type: none"> Guide méthodique du profil culturel - T. Guaisne et al. H. Mousther (1987) Complémentarité des méthodes de diagnostic de la structure du sol : guide complémentaire aux 3 méthodes - V. Tomis Deux méthodes pour observer la structure du sol - Revue Perspectives Agricoles N°397 (2013)
Mini profil 3D	Déterminer l'état structural d'un sol	Observation et analyse du sol dans sa globalité et ainsi que ses propriétés	NON	Rapprocher les 2 palettes du chargeur avec un écartement de 20 à 30 cm puis enfoncer complètement les palettes dans le sol avec un angle de 30 à 45°. Lever légèrement sans à-coups puis redresser les palettes pour éviter l'effondrement du bloc.	Chargeur téléscopique	Chaque paramètre se voit attribuer une note de 0, 1 ou 2 en sachant que des notes intermédiaires sont possibles. Ainsi, une note globale de l'état structural est attribuée au sol étudié : satisfaisant (supérieur à 25), moyen (de 20 à 25) et mauvais (inférieur à 10).	→ Evaluation de la fertilité physique d'une sol → Permet d'observer les changements dans la structure du sol notamment le tassement, le croûte de battance ou la semelle de labour	Terrain	Méthode intermédiaire entre le test à la bêche et le profil culturel.	Observation à hauteur des yeux. Prémad peu destructeur, simple, rapide. Permet une meilleure vision de la structure et de l'enracinement au regard de la méthode à la bêche.	Manipulation d'un chargeur téléscopique. Zone restreinte du fait du faible nombre de prélèvements possibles.	Echantillonnage : débutant Analyse : expert	<ul style="list-style-type: none"> Guide méthodique du mini-profil 3D : diagnostiquer rapidement l'état structural de vos sols - V. Tomis et al. (2017) Complémentarité des méthodes de diagnostic de la structure du sol : guide complémentaire aux 3 méthodes - V. Tomis 	<ul style="list-style-type: none"> Guide méthodique du mini-profil 3D : diagnostiquer rapidement l'état structural de vos sols - V. Tomis et al. (2017) Complémentarité des méthodes de diagnostic de la structure du sol : guide complémentaire aux 3 méthodes - V. Tomis
Slake test	Déterminer la stabilité structurale du sol	Observation de la déformation d'une motte de terre au contact de l'eau	NON	Remplir d'eau de petits récipients en plastique. Introduire un tamis à l'extérieur. Mettre une motte de terre sur le tamis. Mesurer la vitesse à laquelle la motte de terre se désagrège.	Des récipients en plastique/verre, des tamis adaptés à la taille des récipients, de l'eau	Si la motte reste entière, le sol possède une très bonne stabilité structurale. Si elle se désagrège totalement, le sol a une très mauvaise stabilité structurale.	→ Evaluation de l'impact de l'activité agricole sur la structure des sols → Permet d'adapter les pratiques agricoles	Terrain	Permet de tirer des conclusions concernant les techniques culturales à mettre en œuvre pour améliorer les sols testés.	Méthode facile à utiliser.		Débutant	<ul style="list-style-type: none"> Slake test Stabilité structurale d'un sol : technique du slake test - Jardiner autrement 	<ul style="list-style-type: none"> Slake test : apprécier son sol dans un verre d'eau - Revue Techniques culturales simplifiées (2013)
Test de Le Bissonais	Déterminer la stabilité structurale du sol	Observation de la déformation d'une motte de terre au contact de l'eau	Qualité du sol - Mesure de la stabilité d'agrégats de sols soumis à l'action de l'eau	ISO 10939 Echantillonnage, préparation, traitement (humectation rapide, humectation lente, agitation), séparation granulométrique des fragments (tamisage dans l'éthanol, tamisage après séchage) Voir protocole	Une bêche, des boîtes de prélèvement, des tamis, une feuille de l'éthanol	Les résultats sont exprimés soit sous la forme d'histogrammes représentant la distribution de la taille des agrégats résultants, soit sous la forme des diamètres moyens pondérés (MMPD). On peut aussi faire la moyenne des MMPD pour obtenir une valeur synthétique unique, ou bien calculer des rapports entre les MMPD des différents tests afin de faire apparaître la part respective de chacun des mécanismes.	→ Evaluation de la fertilité physique d'une sol → Permet d'observer les changements dans la structure du sol notamment le tassement, le croûte de battance ou la semelle de labour	Laboratoire	Les agrégats récupérés pour faire les tests sont compris entre 3 et 5 mm.	La standardisation de l'état des échantillons permet d'effectuer des comparaisons entre études.	Méthode ne rendant pas compte de tout ce qu'il se passe in situ. Il faut donc combiner cette méthode avec d'autres tests (de battance, de roussellement et d'érosion).	Expert	<ul style="list-style-type: none"> Livres - Guide des analyses en pédologie - 3ème édition revue et augmentée (2018) Procédure de tests de stabilité structurale - INRA (mise à jour en 2013) 	<ul style="list-style-type: none"> Livres - Guide des analyses en pédologie - 3ème édition revue et augmentée (2018) Procédure de tests de stabilité structurale - INRA (mise à jour en 2013)
Kit de stabilité des agrégats	Déterminer la stabilité structurale du sol	Observation de la déformation d'une motte de terre au contact de l'eau	NON	Prélever un échantillon de sol. Le passer au tamis maille 2 mm afin de récupérer les éléments fins. Déterminer la masse initiale de chaque tamis vide (de 0,25 mm). Puis placer 10 grammes de sol en notant le poids exact (P1). Placer les tamis remplis de sol sur un chiffon humide pour que les échantillons se réhydratent par capillarité (pendant 5 minutes). Placer les tamis à l'intérieur de la boîte puis procéder au tamisage des échantillons dans un bac d'eau désionisée ou distillée (distance verticale de 1,5 cm à raison de 30 cycles par minute) pendant 5 minutes. Après les cycles, placer les tamis sur un chiffon sec. Sécher les échantillons à l'aide d'un sèche-cheveux ou à l'étuve (60°C pendant 24h). Après séchage, les poids de chaque tamis ont été enregistrés (P2). Pour déterminer la quantité de sable, les tamis ont été immergés dans 10g de dispersion de solution de CaClon pendant 5 minutes en effectuant les cycles de tamisage. Rincer les échantillons jusqu'à ce qu'il ne reste que les particules primaires. Placer les échantillons sur un chiffon sec puis les faire sécher. Après séchage, le poids de chaque tamis a été enregistré (P3).	Des tamis de test, un système test, une balance, un agitateur, des chiffons, de l'eau déminéralisée, un moyen de séchage	Pourcentage d'agrégats stables à l'eau = ((P2 - P3)/(P1 - P3)) * 100	→ Evaluation de la fertilité physique d'une sol → Permet d'observer les changements dans la structure du sol notamment le tassement, le croûte de battance ou la semelle de labour	Terrain et laboratoire	Méthode peu coûteuse, facilement réalisable par les non experts, peut être réalisée sur le terrain comme en laboratoire.		Méthode peu précise.	Débutant	<ul style="list-style-type: none"> Aggragate stability kit for soil quality assessments - C.A Seybold et J.E Herrick (2003) 	<ul style="list-style-type: none"> Aggragate stability kit for soil quality assessments - C.A Seybold et J.E Herrick (2003)
Indicateur de texture														
Test du boudin	Déterminer la texture du sol (argileux, limoneux, sableux)	Observation de la compacité du sol	NON	Prendre une poignée de terre humide et la malaxer jusqu'à obtenir un boudin	Aucun	Si le boudin est souple et malléable, il s'agit d'une terre argileuse. Si le boudin est fragile et se défait facilement, il s'agit d'une terre limoneuse. S'il est impossible de faire un boudin, il s'agit d'une terre sableuse.	→ Lorsque l'on veut optimiser le rendement de sa culture (pour savoir quel type de culture planter) → Evaluation de l'impact de l'activité agricole sur la qualité des sols	Terrain	Méthode facile et gratuite.	Méthode peu précise.		Débutant	<ul style="list-style-type: none"> Le test du boudin 	
Test du lancer de la boule	Déterminer la texture du sol (argileux, limoneux, sableux)	Observation de la compacité du sol	NON	Prendre une poignée de sol humide et la presser pour en faire une boule. Lancer la boule en l'air et la rattraper.	Aucun	Si la boule se désagrège, le sol est pauvre et contient trop de sable. Si la boule reste formée, le sol est probablement bon et contient suffisamment d'argile.	→ Lorsque l'on veut optimiser le rendement de sa culture (pour savoir quel type de culture planter) → Evaluation de l'impact de l'activité agricole sur la qualité des sols	Terrain	Méthode facile et gratuite.	Méthode peu précise.		Débutant	<ul style="list-style-type: none"> La texture du sol 	
Test de la pression	Déterminer la texture du sol (argileux, limoneux, sableux)	Observation de la compacité du sol	NON	Prendre une poignée de sol et l'humecter un peu de façon à lier le sol sans qu'il colle à la main. Presser le sol puis ouvrir la main.	Aucun	Si le sol garde l'empreinte de la main, alors il contient une part importante d'argile. Si l'empreinte disparaît, le sol est pauvre et contient une part importante de sable.	→ Lorsque l'on veut optimiser le rendement de sa culture (pour savoir quel type de culture planter) → Evaluation de l'impact de l'activité agricole sur la qualité des sols	Terrain	Méthode facile et gratuite.	Méthode peu précise.		Débutant	<ul style="list-style-type: none"> La texture du sol 	
Méthode du bocal	Déterminer la texture du sol (argileux, limoneux, sableux)	Observation de la densité des particules de sol	NON	Trouver un bocal transparent avec des bords lisses. Remplir à moitié le bocal de terre et remplir le reste du bocal avec de l'eau. Refermer le bocal en laissant un peu d'air. Remuer pendant 3 minutes puis laisser reposer pendant 30 minutes. Ensuite, remuer de nouveau 3 minutes. Laisser reposer pendant au moins 24 heures afin que les particules les plus fines puissent se déposer.	Un bocal, de l'eau, un mètre	Les strates observables dans le bocal possèdent des épaisseurs différentes. En mesurant ces épaisseurs, nous pouvons en déduire le pourcentage de limon, d'argile et de sable contenu dans le sol étudié.	→ Lorsque l'on veut optimiser le rendement de sa culture (pour savoir quel type de culture planter) → Evaluation de l'impact de l'activité agricole sur la qualité des sols	Laboratoire	Les particules les moins fines sont les particules d'argiles (terre fine). Celles les plus fines sont les particules de sable, de cailloux, de graviers. A la surface de l'eau flottent les débris végétaux divers.	Méthode facile à utiliser, peu coûteuse.	Test non faisable sur le terrain de par son temps de réalisation. Méthode non précise.	Débutant	<ul style="list-style-type: none"> Tester son sol : comment définir la structure de son sol sans matériel spécifique ? (2016) 	
Test de la pâte à tarte	Déterminer la texture du sol (argileux, limoneux, sableux)	Observation de la compacité du sol	NON	Prendre une poignée de terre humide et l'étaier en la roulant avec une bouteille.	Une bouteille	L'épaisseur de la pâte vous indique la texture du sol : moins de 3 mm d'épaisseur (sol argileux), de 3 à 5 mm d'épaisseur (sol limoneux) et impossible d'étaier la pâte sans la briser (sol sableux)	→ Lorsque l'on veut optimiser le rendement de sa culture (pour savoir quel type de culture planter) → Evaluation de l'impact de l'activité agricole sur la qualité des sols	Terrain	Méthode facile et peu coûteuse.	Méthode peu précise.		Débutant	<ul style="list-style-type: none"> Le blog du jardinier bio - Connaître son sol : tests simples et plantes indicatrices (2013) 	
Analyse granulométrique par tamisage	Déterminer la texture du sol en classant les particules par classes de diamètres	Tri, par des tamis standards, de grains grossiers dans l'échantillon de sol étudié.	Qualité du sol - Détermination de la répartition granulométrique de la matière minérale des sols - Méthode par tamisage et sédimentation	Sécher une masse de sol connue et la séparer par vibration sur une série de tamis superposés (de la maille la plus large à la maille la plus fine). Peser le contenu de chaque tamis.	Une balance, un agitateur, des tamis de mailles différentes	Courbes cumulatives de tamisat (% de grains inférieurs à une taille donnée) en fonction du logarithme décimal de la taille (courbe granulométrique)	→ Permet d'estimer la capacité d'adsorption du sol vis-à-vis des métaux et des substances organiques → Permet d'estimer la quantité de matières en suspension et la quantité de matières sédimentées	Laboratoire	Pour des grains de taille supérieure à 80 µm	Méthode donnant la vraie taille de la particule.	Méthode n'intégrant pas la forme de la particule. Les particules agglomérées pendant le séchage peuvent fausser les résultats.	Expert	<ul style="list-style-type: none"> Analyse granulométrique - INPL Nancy Analyse granulométrique - LAND 	<ul style="list-style-type: none"> Dynamique de mise en place des sols en plaine alluviale du Rhône supérieur - J. Farine et A. Gerber (2008) Caractérisation granulométrique et morphologique de particules cristallines : applications en cristallisation et en précipitation - B. Bernard-Michel (1999)
Analyse granulométrique par sédimentation	Déterminer la texture du sol en classant les particules par classes de diamètres	Mesure de la vitesse de décantation des grains fins à gros fins.	Qualité du sol - Détermination de la répartition granulométrique de la matière minérale des sols - Méthode par tamisage et sédimentation	Introduire un agent dispersant. Mélanger la solution et le sol à l'aide d'un agitateur. Verser la suspension dans un cylindre de sédimentation de 1l et ajouter de l'eau distillée afin d'avoir une suspension totale de 1000 ml. Laisser reposer le sol 10h afin d'atteindre la saturation optimale. Mélange de 30-40g pour un sol à gros grains contenant des fins, et 1 à 5 mm pour les sols à grains fins. Boucher et agiter vigoureusement le cylindre pendant 5 min puis le déposer dans un endroit stable et exempt de vibration. Noter le temps de départ de la sédimentation. Mesurer la concentration et la vitesse de chute des particules de sol à l'aide d'un hydromètre après des temps définis. Le cylindre doit être renversé de bas en haut à plusieurs reprises. Mesurer la température à chaque fois que l'on mesure la concentration.	Un agitateur, un cylindre de sédimentation, un hydromètre ou densimètre, un thermomètre	Le diamètre maximum des particules encore en suspension est calculé par la loi de Stokes. Ensuite, une courbe granulométrique pourra être établie.	→ Permet de déterminer le pourcentage de silt et d'argile contenu dans le sol	Laboratoire	Pour des grains ayant une taille comprise entre 80 µm et 1 µm. Méthode utilisée en complément de l'analyse granulométrique par tamisage.	Méthode précise.	Les temps d'analyse sont très longs.	Expert	<ul style="list-style-type: none"> Méthode d'analyse : détermination de la granulométrie - Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2015) Analyse granulométrique Analyse granulométrique des sols : méthode par sédimentation - Géo 3 Lab 	<ul style="list-style-type: none"> Méthode d'analyse : détermination de la granulométrie - Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2015) Analyse granulométrique Analyse granulométrique des sols : méthode par sédimentation - Géo 3 Lab
Granulomètre à diffraction laser	Déterminer la texture du sol en classant les particules par classes de diamètres	Mesure des distributions granulométriques des particules en mesurant la variation angulaire de l'intensité de lumière diffusée lorsqu'un faisceau laser traverse l'échantillon de particules dispersées.	Analyse granulométrique - Méthodes par diffraction laser	L'échantillon à analyser est inséré dans le passeur d'échantillon. Ce dernier dispose d'un agitateur et d'une pompe, et fait ainsi circuler l'échantillon à travers d'une lentille située dans le granulomètre. Deux rayons lasers sont utilisés lors de la mesure.	Un granulomètre à diffraction laser, un ordinateur	Histogramme de répartition par classe granulométrique. Calcul des principaux paramètres : diamètre moyen, dispersion, surface spécifique.	→ Permet de déterminer le pourcentage de silt et d'argile contenu dans le sol	Laboratoire	La diffraction laser utilise la théorie de diffusion de la lumière de Mie pour calculer la distribution granulométrique des particules sur la base d'un modèle sphérique équivalent en volume.	Méthode possédant une bonne reproductibilité, une bonne résolution spectrale.	Méthode limitée par la longueur d'onde du faisceau laser et par la transparence des grains.	Expert	<ul style="list-style-type: none"> Technique de granulométrie à diffraction laser - Malvern Panalytical Granulométrie laser - Colas (2004) 	<ul style="list-style-type: none"> L'utilisation de la diffraction laser pour la détermination de la granulométrie : application aux sols, agrégats, perte en terre - J. Laurent et A. Abrecht Etude multi-échelle de la granulométrie des particules fines générées par érosion hydrique : apports pour la modélisation - J. Guignard (2022) Tracage sédimentologique et géochimique des variations climatiques affectant le continent sud-est asiatique au cours du Quaternaire. Etude de la corrélation 1144 - F. Pluquet (2000) Analyse granulométrique : principes et méthodes - J. Fourrier et al. (2012)
Indicateur de perméabilité														
Essai à la fosse (ou essai matsoo)	Déterminer la capacité d'infiltration d'un sol	Mesure du débit déversé dans la fosse pour maintenir une hauteur d'eau constante	NON	Creuser une fosse de dimensions connues. La remplir d'eau en maintenant une hauteur d'eau constante.	Un tractopelle ou une mini pelle	On mesure une première fois un débit Q1 (débit qu'il faut pour maintenir la hauteur d'eau dans la fosse). Puis on allonge la fouille d'une certaine longueur et on mesure à nouveau le débit Q2. La différence des 2 débits mesurés est le débit absorbé par la longueur supplémentaire de fouille.	→ Comprendre le comportement hydrodynamique des sols, en particulier la naissance du ruissellement, la capacité d'infiltration des horizons superficiels soumis à différents systèmes de culture et la perméabilité des horizons sous-jacents	Terrain	On allonge la fouille, on élimine l'influence des extrémités.	Méthode simple, peu coûteuse.	Méthode peu précise.	Débutant	<ul style="list-style-type: none"> Mesure "in situ" de la perméabilité d'un sol non saturé (BRGM) - J.M Lamarche (1971) Contenu des études préalables à la réalisation d'une zone de regât végétalisée - groupe de travail EPNAC (2013) 	<ul style="list-style-type: none"> Mesure "in situ" de la perméabilité d'un sol non saturé (BRGM) - J.M Lamarche (1971) Contenu des études préalables à la réalisation d'une zone de regât végétalisée - groupe de travail EPNAC (2013)
Test de Beerkan	Déterminer la capacité d'infiltration d'un sol	Mesure de la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol, en condition de sol humide et ressuyé	NF X30-620 Déchets - Détermination du coefficient de perméabilité verticale d'un terrain par essai à l'infiltromètre à simple anneau, de type fermé - Essai à charge constante et essai à charge variable	Trouver une surface plane pour effectuer le test. Enfoncer le cylindre de 2 à 3 cm dans le sol. Verser de l'eau (plusieurs litres sont nécessaires). Mesurer le temps d'infiltration.	Bouteilles d'eau, cylindre PVC, marteau en caoutchouc, bêche, couteau, ciseau	Courbes représentant les cumuls d'eau infiltrée en fonction des temps d'infiltration. Le temps d'infiltration augmente progressivement (l'eau versée remplit les pores du sol puis atteint généralement un régime stable d'eau contenue dans les pores liéculés). Il faut calculer la vitesse d'infiltration durant le régime stable.	→ Permet de comparer l'effet de différents outils de travail du sol sur le porosités → Permet de quantifier et localiser des zones de compaction	Terrain	L'intérêt de ce test réside essentiellement dans la comparaison de différentes situations : comparaison de l'effet de différentes techniques culturales, différentes parcelles et de différentes zones dans la parcelle.	Méthode simple - Résultats cohérents avec le type de sol. Graphiques facilement interprétables.	Mise en œuvre plus longue si le sol est argileux.	Débutant	<ul style="list-style-type: none"> SoiAB - limiter le travail du sol et évaluer la fertilité des sols en agriculture biologique - L. Fournier et al. (2013) Estimation des paramètres hydrodynamiques des sols par la méthode Beerkan - S. Kanari et al. (2015) 	<ul style="list-style-type: none"> SoiAB - limiter le travail du sol et évaluer la fertilité des sols en agriculture biologique - L. Fournier et al. (2013) Estimation des paramètres hydrodynamiques des sols par la méthode Beerkan - S. Kanari et al. (2015)

Test de Muntz (ou méthode conventionnelle des doubles anneaux)	Déterminer la capacité d'infiltration d'un sol	Mesure de la descente du niveau d'eau dans l'anneau interne pour connaître la perméabilité verticale	NO 130-118 Déchets - Détermination du coefficient de perméabilité verticale d'un terrain par essai à l'infiltromètre à double anneau de type ouvert	Trouver une surface plane pour effectuer le test. Enfoncer les cylindres de plusieurs centimètres dans le sol. Remplir en eau les éprouvettes (avec un système de filtration) et mettre en eau le cylindre central. La mise en eau est réalisée en cassant le jet pour éviter toute dégradation du sol. Détacher le chronomètre puis mettre rapidement le second anneau en eau et poursuivre la mesure jusqu'à l'obtention d'une vitesse d'infiltration stable.	Un système à double anneau, un mètre, deux éprouvettes avec des systèmes de flotteur	Graphique représentant le volume d'eau infiltré en fonction du temps : on obtient un débit lorsque la courbe devient une droite.	→ Diagnostiquer des problèmes d'invasion → Comprendre le comportement hydrodynamique des sols, en particulier la naissance du ruissellement, la capacité d'infiltration des horizons superficiels soumis à différents systèmes de culture et la perméabilité des horizons sous-jacents	Terrain	Le calcul est identique à celui de la méthode Porchet charge constante. La seule différence réside dans la surface d'infiltration (l'eau ne peut s'infiltrer que par le fond).	Cette méthode est effectuée sur le sol en place sans réalisation d'une cavité.	Méthode exigeant beaucoup d'eau et de temps, ne convient pas pour des pentes supérieures à 5% et ne donne pas le même classement des sols pour des conditions de pluies naturelles.	• Faculté de travaux pratiques d'hydrologie - Avignon Université (2018) • Contenu des études préliminaires à la réalisation d'une zone de regret végétalisée - groupe de travail EPNAC (2013) • Rapport de stage : infiltration de l'eau dans les sols, développement et utilisation d'infiltromètres - G. Thomas • Expérimentation et mise au point d'une méthodologie de mesure in situ des faibles perméabilités : synthèse des travaux réalisés en 1962-1963 et 1964 - M. Barrès et al (1995)	
Méthode Porchet	Déterminer la capacité d'infiltration d'un sol	Mesure de la descente du niveau d'eau dans un trou de sondage (charge variable) ou dans une éprouvette (charge constante)	7	Creuser un trou cylindrique de diamètre et profondeur connus. Après avoir rempli d'eau, on mesure la vitesse d'infiltration dans le sol pour la méthode à charge variable. Pour la méthode à charge constante, installer d'abord un dispositif permettant de conserver une charge constante (vase de Mariotte, flotteur...). Puis remplir le trou d'eau et vérifier que la charge reste constante.	Un mètre, un flotteur ou un vase de Mariotte, une éprouvette, une tarrière	Graphique représentant le volume d'eau infiltré en fonction du temps : on obtient un débit lorsque la courbe devient une droite.	→ Diagnostiquer des problèmes d'invasion → Comprendre le comportement hydrodynamique des sols, en particulier la naissance du ruissellement, la capacité d'infiltration des horizons superficiels soumis à différents systèmes de culture et la perméabilité des horizons sous-jacents	Terrain	La profondeur du sondage dépend du type de sol. Il est nécessaire au préalable de saturer en eau les parois de la cavité, afin de respecter au mieux les hypothèses de calcul (le de Darcy).	Mise en oeuvre rapide, à faible coût et avec peu de matériel.	Ne fournit pas des résultats exacts en valeur absolue.	• Faculté de travaux pratiques d'hydrologie - Avignon Université (2018) • Contenu des études préliminaires à la réalisation d'une zone de regret végétalisée - groupe de travail EPNAC (2013) • Rapport de stage : infiltration de l'eau dans les sols, développement et utilisation d'infiltromètres - G. Thomas	
Perméamètre de Guelph	Déterminer la capacité d'infiltration d'un sol	Mesure du volume d'eau infiltré au cours du temps (charge hydraulique constante)	7	Creuser un trou cylindrique de diamètre et profondeur connus. Positionner le perméamètre dans le trou, le bas doit toucher le fond du trou, puis stabiliser le triplet. Remplir le perméamètre d'eau et procéder aux mesures.	Un perméamètre de Guelph, une tarrière	On obtient un niveau d'eau (au niveau des réservoirs du perméamètre) et un temps. Calculer la différence de niveau (H) et la différence de temps (t) entre deux mesures et calculer le rapport d'H/t. Lorsque le sol est saturé, le rapport d'H/t se stabilise.	→ Diagnostiquer des problèmes d'invasion → Comprendre le comportement hydrodynamique des sols, en particulier la naissance du ruissellement, la capacité d'infiltration des horizons superficiels soumis à différents systèmes de culture et la perméabilité des horizons sous-jacents	Terrain	Il faut réaliser un deuxième test, au même endroit, à une charge différente, généralement supérieure. Le calcul détermine la perméabilité (avec comme des deux essais).	Matériel léger, portable, résistant et peut être mis en oeuvre par une seule personne car il nécessite une faible quantité d'eau par essai (2,5 à 3L).		• Faculté de travaux pratiques d'hydrologie - Avignon Université (2018) • Contenu des études préliminaires à la réalisation d'une zone de regret végétalisée - groupe de travail EPNAC (2013)	
Indicateur de résistance													
Test du tournevis	Déterminer la résistance des terrains	Mesure de l'enfoncement d'un tournevis dans le sol	NON	Faire pénétrer un tournevis classique dans un sol.	Un tournevis	Selon la position de la main pour faire pénétrer l'outil à 10 cm, on observe 3 résultats : - sol tendre : prise entre le pouce et l'index - sol mi-dur : prise à pleine main - sol dur : prise en forme de poing d'en haut.	→ Déterminer l'épaisseur et la profondeur des différentes couches de sol et effectuer des contrôles de compactage	Terrain	Ce test permet à la fois d'estimer la consistance du sol peu avant le passage des machines ainsi que le module de déformation par cisaillement pour caractériser la résistance du sol au cisaillement.	Méthode simple, peu coûteuse, accessible à tous et pouvant être répétée.	Méthode peu précise.	• Rapport ART 766 : Vulnérabilité du sol et consommation de carburant - E. Diserens et A. Battisto (2013)	
Test à la houe (picochard)	Déterminer la résistance des terrains	Mesure de la profondeur de l'enfoncement de la lame dans le sol et de la hauteur correspondante du manche.	NON	Enfoncer l'outil dans le sol de sorte que l'outil y reste planté de lui-même après la frappe. Essayer de cisailer le sol.	Une houe	Selon la position du corps pour faire le test, on obtient plusieurs résultats : - sol tendre : test effectué avec une main - sol entre tendre et mi-dur : test effectué avec deux mains - sol mi-dur : test effectué avec une main et les jambes fléchies - sol entre mi-dur et dur : test effectué avec deux mains et les jambes fléchies - sol dur : test impossible	→ Effectuer des contrôles de compactage	Terrain	Grâce aux valeurs initiales (la profondeur de pénétration de la lame, la hauteur de l'extrémité du manche lorsque la houe est enfoncée et la position du corps nécessaire pour cisailer le sol à l'aide de la houe), il est possible de calculer la consistance du sol.	Méthode simple, peu coûteuse, accessible à tous et pouvant être répétée.	Méthode peu précise.	• Rapport ART 766 : Vulnérabilité du sol et consommation de carburant - E. Diserens et A. Battisto (2013) • Guide TASC - E. Diserens et A. Battisto (2013)	
Essai de pénétration	Déterminer la résistance des terrains	Mesure de l'enfoncement d'une tige dans le sol	7	Faire pénétrer dans le sol par battage un train de tiges fines, muni à son extrémité d'une pointe de section conique. Le battage est assuré par une masse (ou mouton) tombant d'une hauteur bien déterminée.	Des tiges fines, un mouton	Pour une énergie de battage constante, on compte le nombre de coups de mouton correspondant à un enfoncement donné du train de tiges dans le terrain. Ce nombre permet empirique par la suite être transformé en une résistance dynamique en fonction du type du géomètre utilisé.	→ Déterminer l'épaisseur et la profondeur des différentes couches de sol et effectuer des contrôles de compactage	Terrain	Plusieurs essais de pénétration peuvent être réalisés : - essai de pénétration statique CPT - essai de pénétration dynamique, DPT - essai de pénétration au cône par DPT	Méthode simple, rapide, économique et pouvant être répétée.		• Essai pénétromètre dynamique versus essai pressiométrique (2017) • Exploitation du signal pénétrométrique pour l'aide à l'obtention d'un modèle de terrain - C. Sastre Jurado (2018)	
Essai scissométrique	Déterminer la résistance des terrains	Mesure de la contrainte en cisaillement à la rupture (ou cohésion non drainée) pour les sols mouss purement cohérent (sable, tourbe, argile molle)	7	Enfoncer le scissomètre par un vérin à la profondeur voulue, puis appliquer un moment de torsion sur la tige.	Un scissomètre (tige munie à son extrémité de 2 plaques verticales de mêmes dimensions et perpendiculaires entre elles)	Permet de représenter graphiquement la contrainte de cisaillement dans le sol en fonction de la rotation imposée au moulinet ou palette.	→ Déterminer l'épaisseur et la profondeur des différentes couches de sol et effectuer des contrôles de compactage	Terrain	Cet essai ne convient pas aux sols non saturés, hautement perméables ou aux argiles fissurées. Il existe deux autres formes de cet appareil : le scissomètre de laboratoire et le scissomètre de poche.	Méthode simple, rapide, à faible coût.		• Qu'est-ce que le pénétromètre dynamique ? • Exploitation du signal pénétrométrique pour l'aide à l'obtention d'un modèle de terrain - C. Sastre Jurado (2018) • TP Terrain : reconnaissance de sol in situ - L. Sibille (2018) • Mécanique des sols - Chapitre 3 : cisail et mesure in situ	
Essai pressiométrique	Déterminer la résistance des terrains	Mesure de la dilatation d'une sonde cylindrique réalisée dans un forage pour déterminer la relation entre la pression appliquée par la sonde sur les parois du forage et le déplacement des parois du forage.	7	Dans un forage réalisé préalablement, introduire une sonde cylindrique pression-volume, une sonde pressiométrique et une tubulure de liaison, un réservoir de gaz	Un pressiomètre (un contôleur pression-volume, une sonde pressiométrique et une tubulure de liaison), un réservoir de gaz	Permet d'obtenir une courbe de variation volumétrique du sol en fonction de la contrainte appliquée, et de définir une relation constante déformation du sol en place.	→ Déterminer l'épaisseur et la profondeur des différentes couches de sol et effectuer des contrôles de compactage	Terrain	On détermine 3 paramètres : - la pression de fluage - la pression limite - le module de déformation pressiométrique	Méthode donnant beaucoup d'informations sur la mégéologie du terrain.		• Essai pénétromètre dynamique versus essai pressiométrique (2017) • Les essais - GeoMeca • Qu'est-ce que le pressiomètre ? • Exploitation du signal pénétrométrique pour l'aide à l'obtention d'un modèle de terrain - C. Sastre Jurado (2018)	
Indicateur indiquant la présence d'eau													
Test tactile	Apprécier l'état d'humidité d'un sol	Déterminer le taux d'humidité d'un sol grâce au toucher	NON	Prendre une poignée de sol et mâcher de bout des doigts.	Aucun	On observe 5 modalités : sec (pas d'humidité décelable), frais, humide (échantillon malléable, humidité voisine de la capacité au champ), très humide, saturé (présence d'eau libre).	→ Permet de choisir le type d'irrigation en fonction de l'humidité des sols	Terrain	L'état "frais" et "très humide" sont des appréciations intermédiaires.	Méthode simple, gratuite et rapide.	Méthode ne donnant pas de résultats précis.	• LIVRE : Guide pour la description des sols - D. Baize et B. Jabot (2011)	
Méthode gravimétrique	Déterminer la teneur pondérale en matière sèche et en eau d'un sol	Mesure de la différence de masse avant et après chauffage	ISO 11465 Qualité du sol - Détermination de la teneur pondérale en matière sèche et en eau - Méthode gravimétrique	Placer une masse connue de sol dans un récipient préalablement séché et pesé. Déterminer la masse du récipient et du sol (m1). Placer le tout dans une étuve à 105°C jusqu'à obtenir une masse constante. Laisser refroidir le récipient dans un dessiccateur durant au minimum 45 minutes. Déterminer la masse du récipient (m2).	Une étuve, un dessiccateur, une balance analytique, un récipient en matériau n'absorbant pas l'humidité, une cuillère	La teneur en matière sèche et la teneur en eau pondérale	→ Permet de choisir le type d'irrigation en fonction de l'humidité des sols	Terrain	D'autres moyens de séchage peuvent être utilisés (non normés) : le séchage par infrarouge, le séchage par source à halogène, le séchage par micro-onde.	Un grand nombre d'échantillons peut être analysé simultanément. Méthode peu coûteuse et facile à réaliser.	Méthode laborieuse ayant une longue durée de mesure. Des erreurs systématiques importantes se manifestent lorsque l'échantillon est hygroscopique et absorbe l'humidité de l'air après le séchage et avant de pouvoir être pesé.	• Détermination de la teneur pondérale en matière sèche et en eau - ISO6 (2014) • Méthodes de détermination du taux d'humidité - Météor. Tokyo (2002)	
Méthode par sonde à neutrons	Déterminer la teneur en eau d'un sol	Mesure de l'humidité se fondant sur le principe de la modulation des neutrons rapides par les atomes d'hydrogène	ISO 10971 Qualité du sol - Détermination de la teneur en eau de la zone non saturée - Méthode à la sonde à neutrons de profondeur	Installer dans le sol un tube d'accès (à 5 cm de diamètre), fermé à son extrémité inférieure. Descendre la sonde à neutrons dans le tube d'accès. Mesurer le flux de neutrons thermalisés.	Une tarrière, une sonde à neutrons (un tube d'accès, un compteur, une source de neutrons rapides et un détecteur de neutrons thermalisés)	La densité de neutrons lents	→ Permet de choisir le type d'irrigation en fonction de l'humidité des sols	Terrain	Les neutrons rapides émis par la source entrent en collision avec les atomes du sol et perdent peu à peu leur énergie cinétique. Après un certain nombre de collisions, les neutrons sont thermalisés et forment un nuage de neutrons lents autour de la sonde.	L'appareil permet de réaliser des mesures rapides et non destructives.	Nécessite l'étalonnage de l'appareil pour chaque site de mesure voire pour chaque horizon pédologique. L'appareil est mal adapté à la détection de fronts abrupts d'humidité. Les mesures sont défectives à la surface du sol. Effet des ondes sismiques.	• Cours de physique du sol - État de l'eau du sol - A. Mermoud (2006)	
Méthode de Richards ou méthode de la presse à membrane	Déterminer la teneur en eau d'un sol	Extraction de l'eau contenue dans un échantillon de sol soumis à une pression déterminée dans une enceinte fermée	7	Placer les anneaux pour retirer le sol sur la plaque de porcelaine poreuse pour recevoir les échantillons. Verser les échantillons de sol dans les anneaux et vider. Ajouter l'eau déminéralisée sur les plaques de porcelaine posées dans un bac de saturation. Tremper les échantillons par capillarité en laissant un excès d'eau stagner sur les plaques de porcelaine. Laisser jusqu'au lendemain. Au bout de 24h, enlever l'eau en excès des plaques de porcelaine avec une pipette ou une seringue. Monter les plaques de porcelaine dans la chambre d'extraction et connecter à l'inséneur les tubes d'évacuation d'eau. Fermer hermétiquement l'extracteur par serrage des écrous du couvercle. Connecter un tube collecteur en caoutchouc aux tubes d'évacuation extérieurs et les anneaux assemblés dans un bûcher en verre pour collecter l'eau extraite. Ouvrir la valve de régulation du collecteur. Ouvrir la bouteille d'air comprimé jusqu'à obtenir la bonne pression dans l'appareil. Laisser sous pression 48h. Ne pas oublier de fermer les extrémités des tubes d'évacuation pour éviter que l'eau remonte après relâchement de la pression. Transférer rapidement les échantillons dans de bûchers préalablement pesés et numérotés. Les peser avec le sol humide. Les mettre dans une étuve pendant 24h. Peser les bûchers contenant la terre sèche.	Une chambre d'extraction, une pipette, des bûchers, une bouteille d'air comprimé, une étuve, une balance	La teneur en eau correspondant à la rétention de l'eau des échantillons.	→ Permet de choisir le type d'irrigation en fonction de l'humidité des sols	Laboratoire	Les presses ont des caractéristiques différentes suivant les pressions qu'elles peuvent supporter : on distingue les presses à haute pression (P3 à bar) et les presses à basse pression (P3 à bar). On distingue également les presses à plaque et les presses à membrane.	Le matériel est coûteux.	Il y a un potentiel danger de par la manipulation d'équipement sous haute pression.	Expert	• LIVRE - Analyse physique des sols - méthodes choisies - C. Mathieu et F. Pietain (1998)
Méthode TDR	Déterminer la teneur en eau d'un sol	Mesure du temps de propagation dans le sol d'une onde électromagnétique à haute fréquence	7	Enfoncer les deux tiges métalliques de l'appareil TDR dans le sol et faire une mesure.	Un réflectomètre (un générateur de signal, un guide d'onde, un coupleur, un oscilloscope, un échantillonneur), une tarrière	Le générateur de signal émet une impulsion de type échelon qui se propage via un câble coaxial le long des guides d'ondes constitués de tiges métalliques parallèles. Arrivé à l'extrémité finale des guides, le front d'onde est réfléchi et repart vers l'oscilloscope qui enregistre les variations d'amplitude du signal en fonction du temps, en début du câble.	→ Permet de choisir le type d'irrigation en fonction de l'humidité des sols	Terrain	Des projets de recherche visent à obtenir, à partir d'une seule mesure par réflectomètre temporelle, un profil hydrique de sol, et non plus une mesure ponctuelle moyenne. Le temps de propagation des ondes varie selon la valeur de la permittivité relative du sol. La permittivité mesurée du sol est fonction des permittivités de ses constituants (air, particules minérales, eau). Celle de l'eau dominant largement, c'est la teneur relative en eau qui impose la permittivité globale effective du sol. Un étalonnage permet de relier celle-ci à la teneur en eau volumique du sol.	Méthode simple avec une bonne précision. Les mesures peuvent être automatisées et répétées pour des analyses en continu.		• Cours de physique du sol - État de l'eau du sol - A. Mermoud (2006)	
Méthode de mesure avec le tensiomètre à bougie poreuse	Déterminer la succion du sol	Prélèvement de solution du sol à l'aide de lysimètres à ténaculaire poreuse	NON	Remplir le tensiomètre d'eau très légèrement colorée. Suspendre le tube hors de l'eau durant quelques minutes. Plonger le tensiomètre dans la même eau colorée de manière à noyer complètement la bougie poreuse. À l'aide de la pompe à vide manuelle, aspirer de l'eau dans le tensiomètre, sur une hauteur de 3 à 4 m dans le tube. Finir le remplissage d'eau dans le tube en vérifiant qu'aucune bulle de gaz soit piégée dans le tube. Fermer le tube avec un bouchon. Contrôler sur le manomètre la valeur de la pression. Placer la bougie poreuse dans le sol et faire les mesures.	Le tensiomètre à bougie poreuse avec le manomètre à vide, une pompe à vide manuelle, une tarrière, des filtres, un bûcher, de l'eau déminéralisée	Solution du sol	→ Études des pollutions en sous-sol → Dosages des engrais	Terrain	Au départ, l'eau contenue dans le tensiomètre est à la pression atmosphérique. Dans le sol, les films d'eau autour des particules au contact de la bougie poreuse se développent également sur cette partie du tensiomètre. Lorsque le sol s'assèche, les films d'eau deviennent plus fins et plus limités. Le tensiomètre sur le terrain maintient constamment un équilibre entre le potentiel matriciel de l'eau dans le sol et le potentiel de l'eau dans le tube.	Méthode précise.	Expert	• LIVRE - Analyse physique des sols - méthodes choisies - C. Mathieu et F. Pietain (1998)	

	Objectifs	Principes	Normes (non vérifiées)	Mode opératoire	Matériaux nécessaires	Données finales	Contexte d'application	Terrain/laboratoire	Remarques	Avantages	Inconvénients	Degré d'expertise	Documents/sites internet associés	Références scientifiques
Kit d'analyse chimique (site Agrifournitures)	Déterminer certains paramètres chimiques d'un sol	Mesure de la CEC + état acido basique (pH eau, pH KCl, calcium total et actif) + état organique (matières organiques, N organique, C/N, IAM) + état minéral (conductivité, P205, K2O, MgO, CaO) + oligo (Fe, cuivre, zinc, manganèse, bore)	NON	Commander sur le site Agrifournitures.fr vos analyses et payer en ligne (108 euros). Réceptionner à domicile votre Kit Analyse (comprendant fiche de renseignement, sachet de prélèvement, fiche de conseils de prélèvement et carton de lettre suivie pré-imbriqué pour l'expédition). Expédier votre terre au laboratoire d'analyse. Dès prise en charge de votre sol par le laboratoire, vous en êtes informés par SMS, ainsi qu'à la fin des quantifications et lorsque votre bulletin vous est envoyé. Sous 15 jours ouvrés, vous recevez votre résultat en format PDF et en A3 plastifié couleur. Vous pouvez à ce moment là contacter l'ingénieur responsable des interprétations pour faire un bilan avec lui des tableaux de fertilisation et des conseils donnés.	Kit d'analyse	"Radar" de l'état de fertilité du sol (voir document : Exemple de résultat d'analyse avec un kit)	→ Pour l'élaboration d'un plan de fertilisation à long terme	Terrain	Les personnes concernées sont les agriculteurs, les arboriculteurs, les viticulteurs et les maraichers.	Méthode simple, accessible à tous et rapide. L'analyse est faite par des experts donc fiable.		Débutant	https://www.agrifournitures.fr	
Indicateur de pH														
Test au bicarbonate de soude	Déterminer l'acidité d'un sol	Observation d'une réaction chimique due au contact entre le bicarbonate de soude et le sol	NON	Mélanger un échantillon de sol avec de l'eau déminéralisée pour former une boue. Puis verser le bicarbonate de soude.	Du bicarbonate de soude, un récipient	Si la solution "pétille", alors le sol est acide.	→ Pour identifier une pollution des sols → Pour déterminer le type de culture à planter	Terrain	Les sols très riches en humus et/ou sableux vont probablement être acides.	Méthode simple et peu coûteuse.	Méthode ne donnant pas de résultats précis.	Débutant	Le blog du jardinier bio - Connaitre son sol : tests simples et plantes indicatrices (2013)	
Test au vinaigre	Déterminer l'alcalinité d'un sol	Observation d'une réaction chimique due au contact entre le vinaigre blanc et le sol	NON	Verser le vinaigre blanc sur l'échantillon de sol.	Du vinaigre blanc, un récipient	Si le vinaigre réagit, alors le sol est alcalin.	→ Pour identifier une pollution des sols → Pour déterminer le type de culture à planter	Terrain	Les sols calcaires sont des sols alcalins.	Méthode simple et peu coûteuse.	Méthode ne donnant pas de résultats précis.	Débutant	Le blog du jardinier bio - Connaitre son sol : tests simples et plantes indicatrices (2013)	
Méthode du chou rouge	Déterminer l'acidité ou l'alcalinité d'un sol	Observation d'un changement de couleur	NON	Émousser le chou rouge. Faire bouillir de l'eau distillée pure. Placer ensuite le chou rouge dans l'eau et laissez tremper le morceau pendant une dizaine de minutes avant de les retirer. On conserve le jus violet qui, en toute logique, possède un pH neutre (7). Placez ensuite un peu de jus dans un récipient propre, et ajoutez deux cuillères à soupe de terre. Laissez ce mélange reposer une demi-heure avant de vérifier la couleur.	De l'eau distillée, un chou rouge, des récipients	Si la solution est violette, alors la terre possède un pH neutre. Si la solution est rose, la terre possède un pH acide. Si la solution est bleu/verte, la terre possède un pH alcalin.	→ Pour identifier une pollution des sols → Pour déterminer le type de culture à planter	Laboratoire	Si on le souhaite, nous pouvons d'abord vérifier les couleurs en testant le jus avec du bicarbonate (alcalin) et du jus de citron (acide) le premier fait avec la solution au bleu-vert et le deuxième au rose vif. Cela permet d'avoir des solutions comparables aux résultats trouvés.	Méthode simple et peu coûteuse permettant d'avoir une idée générale du pH du sol.	Méthode peu précise.	Débutant	Jardinage pratique : 4 méthodes pour mesurer le pH du sol (2015)	
Méthode de détermination du pH	Déterminer le pH d'un sol	Mesure du pH à l'aide d'une méthode instrumentale	NF ISO 10390 Qualité du sol - Détermination du pH	Laissez sécher une quantité définie de sol à température ambiante durant au moins 12 heures. Confectionnez une suspension du sol (contenant au moins 5g de sol) dans cinq fois son volume soit d'une solution de chlorure de potassium (KCl) 1M de qualité pour analyse, soit d'une solution de chlorure de calcium (CaCl2) 0,01 M de qualité pour analyse. Agitez énergiquement la suspension durant cinq minutes. Laissez reposer la suspension durant au moins deux heures, mais pas plus de 24 heures. Mesurez le pH de la phase liquide à l'aide d'un pH-mètre, étalonné avant chaque mesure avec une série appropriée de solutions tampons (pH 4 et pH 7 par exemple).	Des récipients, un pH-mètre, du KCl ou CaCl2, des solutions tampons	Si la solution présente un pH compris entre 0 et 6, alors c'est acide. Si la solution présente un pH de 7, alors c'est neutre. Si la solution présente un pH compris entre 8 et 14, alors c'est alcalin.	→ Pour identifier une pollution des sols → Pour déterminer le type de culture à planter	Terrain ou laboratoire	Méthode simple à réaliser, peu coûteuse et rapide. Méthode de référence.	Étalonnage avant chaque mesure		Débutant	LIVRE - Lignes directrices de l'OCDE pour les essais de produits chimiques : quinzième addendum aux lignes directrices de l'OCDE pour les essais de produits chimiques (2004)	
Indicateur optique														
Spectroscopie Proche Infrarouge (SPIR ou NIRs)	Déterminer la composition chimique des échantillons de sol grâce à leurs propriétés d'absorption et de réflectance de la lumière	Mesure et analyse des spectres de réflexion dans la gamme de longueurs d'onde 780 à 2500 nm	NF ISO 17184 Qualité du sol - Dosage du carbone et de l'azote par spectrométrie proche infrarouge (SPIR)	La technique consiste à soumettre un échantillon à un rayonnement situé dans le domaine du proche IR, l'échantillon est ainsi scanné.	Une source lumineuse, un monochromateur, un filtre proche infrarouge, une cuvette, un détecteur, un ordinateur	Pour chaque longueur d'onde, la part du rayonnement réfléchi (éfficacité) par l'échantillon est mesurée à l'aide de détecteurs et convertie en absorbance. L'ensemble de ces absorbances constituent le spectre qui peut être considéré comme une empreinte globale, reflétant la composition chimique de l'objet analysé.	→ Pour analyser la teneur en eau des semences → Pour analyser la qualité des fourrages, du soja et du blé	Terrain (appareil portable) ou laboratoire	Dans le domaine de l'environnement, des études ont été menées en sédimentologie lacustre, fluviale et dans les tourbières, en biologie végétale, sur la teneur en carbone, azote et phosphore des plantes, sur la maturité des composts et la vitesse de décomposition des litières. La SPIR nécessite une phase d'étalonnage. Principalement pour la détection des atomes de carbone, d'oxygène, de soufre, d'azote et d'hydrogène. Les spectres NIR apportent des informations provenant principalement des composés organiques et des argiles.	Méthode rapide (spectre obtenu en quelques secondes), facile à mettre en œuvre, non destructive (pas d'altération de l'échantillon). Le coût d'une analyse est faible.	La SPIR ne permet pas la détection de constituants présents à l'état de traces. La mesure de la matière minérale n'est en principe pas possible en SPIR car les éléments minéraux n'ont généralement pas de liaisons répondant dans ce domaine spectral. L'eau possède une forte capacité d'absorption, ce qui peut être un inconvénient pour les échantillons frais (humides) car son signal peut masquer celui des autres constituants de l'échantillon.	Expert	Quels indicateurs pour évaluer la qualité de sols forestiers soumis à des contraintes environnementales fortes ? - L. Cécillon (2008) Projet INCA : Spectroscopie Proche Infrarouge pour la comptabilité carbone au champ - A. Gobrecht et al. (2014) Archives pédoécologie et dynamiques environnementales : mise au point d'une nouvelle méthode de reconnaissance des paléovégétations, fondée sur l'analyse spectroscopique dans le proche infrarouge des matières organiques de sols et pailles/soles - E. Dumont (2009) Revue INRA productions animales - La spectrométrie dans le proche infrarouge pour la caractérisation des ressources alimentaires - D. Bastianelli et al. (2018) Revue B.A.S.E. - l'intérêt de la spectroscopie proche infrarouge en analyse de terre - V. Genot et al. (2014)	
Spectroscopie Moyen Infrarouge (SMIR ou MIRs)	Déterminer la composition chimique des échantillons de sol grâce à leurs propriétés d'absorption et de réflectance de la lumière	Mesure et analyse des spectres de réflexion dans la gamme de longueurs d'onde 2500 à 3500 nm	NON	La technique consiste à soumettre un échantillon à un rayonnement situé dans le domaine du moyen IR, l'échantillon est ainsi scanné.	Une source lumineuse, un monochromateur, un filtre proche infrarouge, une cuvette, un détecteur, un ordinateur	Pour chaque longueur d'onde, la part du rayonnement réfléchi (éfficacité) par l'échantillon est mesurée à l'aide de détecteurs et convertie en absorbance. L'ensemble de ces absorbances constituent le spectre qui peut être considéré comme une empreinte globale, reflétant la composition chimique de l'objet analysé.	→ Pour analyser la teneur en eau des semences → Pour analyser la qualité des fourrages, du soja et du blé	Terrain (appareil portable) ou laboratoire	La MIRs nécessite une phase d'étalonnage. En moyen IR, l'absorption est intense et les bandes obsoètes sont nettes et assignables à des groupes chimiques. Les pics sont principalement dus aux variations des liaisons C-C, C-H et C=O. Les spectres MIR contiennent des informations à la fois sur la matière organique et sur les minéraux.	Méthode rapide (spectre obtenu en quelques secondes), facile à mettre en œuvre, non destructive (pas d'altération de l'échantillon). Le coût d'une analyse est faible.		Expert	Sols maigres et spectroscopie dans le moyen infrarouge : classification, caractérisation et sensibilité au climat - H.M. Razafimanantra (2011) Evaluation des stocks en carbone des sols agricoles (réunions) par spectroscopie moyen infrarouge (MIR), mesures in situ et construction de modèles de prédictions - S. Quéro (2017)	
Indicateurs teneur en carbone														
Test au permanganate de potassium	Déterminer la quantité de matières organiques présente dans le sol	Observation de la capacité d'oxydation de la matière organique quantifiant le compartiment labile du carbone du sol	NON	Faire sécher un échantillon de sol sur un plastique noir par exemple. Mettre le sol dans une fiole avec la solution de permanganate diluée. Attendre 30 minutes avant d'avoir le résultat.	Fiole de permanganate de potassium, une pipette, une fiole vide, échelle des couleurs permettant le diagnostic	Si la solution présente au dessus de l'échantillon de sol (déposé au fond de la fiole) reste rouge à violette, alors le sol contient très peu de matières organiques réactives. Si la solution devient plus claire, alors le sol possède une richesse en matières organiques importante.	→ Rendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols	Terrain	Méthode peu coûteuse et rapide.	Méthode peu précise.		Débutant	Analyse rapide de la qualité d'un sol - AZC Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols - B. Balloy (2017)	
Méthode Dumas ou méthode de combustion sèche	Déterminer le taux de carbone organique et de carbone total d'un sol	Mesure de la quantité de gaz carbonique formée du cours de la manipulation	NF ISO 10694 Qualité du sol - Dosage du carbone organique et du carbone total après combustion sèche (analyse élémentaire)	L'échantillon est chauffé à une température d'au moins 900°C dans un flux de gaz contenant de l'O2, et exempt de gaz carbonique. Le carbone présent dans l'échantillon est alors oxydé et désorbé sous forme de CO2. La quantité de CO2 dégagée est mesurée par titrimétrie, gravimétrie, conductométrie, chromatographie en phase gazeuse ou grâce à une méthode de détection dans l'infrarouge. A 900°C, les carbonates sont entièrement décomposés. Le dosage du carbone organique consiste à éliminer préalablement les carbonates en traitant l'échantillon à l'HCl ou en soustrayant la teneur de carbonates du carbone total.	Une balance analytique, de la verrerie courante de laboratoire, un tamis maille 250 µm, un appareil de dosage du carbone total, des croûtes, des réactifs (eau déminéralisée, substance étalon, acide chlorhydrique)	La teneur en carbone total et la teneur en carbone organique.	→ Rendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols	Laboratoire	On a besoin d'étalonner l'appareil.	Méthode permettant d'analyser un grand nombre d'échantillon en une journée (méthode rapide). Méthode ne générant pas de pollution environnementale. Méthode automatisée et résultats archivés.	La méthode est mal adaptée pour la détermination du carbone organique dans des sols fortement carbonatés et pauvres en matières organiques. Méthode coûteuse (matériel + réactifs).	Expert	Analytical methods comparison for soil organic carbon determination in Andean Forest of Sangay National Park, Ecuador - F.E. Cargua Catagna et al. (2017) Dosage du carbone organique par combustion sèche après décarbonatation automatisée des sols - G. Caria et al. Détermination du carbone organique et du carbone total par combustion sèche - ISSEP (2014)	
Calcimétrie	Déterminer le taux de carbonates d'un sol	Mesure du carbone minéral contenu dans l'échantillon principalement sous forme de carbonate de calcium ou de magnésium	NF ISO 10693 Qualité du sol - Détermination de la teneur en carbonate - Méthode volumétrique	Un échantillon de sol est placé en milieu acide afin de décomposer les carbonates et dégager le carbone minéral sous forme de CO2. Le volume de CO2 ainsi dégagé est mesuré à l'aide d'un calcimètre ou appareil Schöberl et on peut ainsi calculer la teneur en carbonates de l'échantillon.	Une balance analytique, de la verrerie courante de laboratoire, un calcimètre, des réactifs	Le volume de CO2 dégagé par l'échantillon. On peut donc calculer la teneur en carbonates.	→ Rendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols	Laboratoire	On a besoin d'étalonner l'appareil.	Méthode peu coûteuse en matériels et en réactifs, facile d'utilisation. Méthode permettant d'analyser un grand nombre d'échantillon en une journée (méthode rapide).	Méthode demandant beaucoup d'expérience.	Expert	Dosage du carbone organique par combustion sèche après décarbonatation automatisée des sols - G. Caria et al.	
Méthode Walkley-Black	Déterminer le taux de carbone organique	Mesure de l'oxydation de la matière organique par une quantité en excès de bichromate de potassium en milieu sulfurique	NF ISO 14235 Qualité du sol - Dosage du carbone organique par oxydation sulfochromique	Même mode opératoire que la méthode Anne. La seule différence est qu'il ne faut pas chauffer les échantillons.	Une solution de bichromate, une solution d'acide sulfurique, un agitateur, des tubes à essais, une centrifugeuse, un spectrophotomètre, du glucose	Le carbone organique présent dans l'échantillon de sol est oxydé par du bichromate de potassium en excès, en milieu sulfurique et à 135°C. Le chrome VI (orange) est réduit par la matière organique en chrome III (vert). Puis, le chrome III formé est dosé par colorimétrie. En effet, la quantité de chrome III est proportionnelle à la teneur en carbone organique présente dans le sol.	→ Rendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols	Laboratoire	Méthode s'adaptant quasiment à tous les types de sols, nécessitant un équipement en matériels et réactifs peu coûteux et permettant l'analyse possible d'un grand nombre d'échantillons dans la journée. La verrerie est réutilisable après son nettoyage.	Risque de brûlures et de réactions allergiques de par les manipulations d'acide sulfurique concentré et de bichromate de potassium.	Expert	Application des dosages automatisés à l'analyse des sols - B. Dabin et J.C. Brion (1967)		
Méthode Anne ou méthode par voie humide	Déterminer le taux de carbone organique	Mesure de l'oxydation de la matière organique par une quantité en excès de bichromate de potassium en milieu sulfurique	AFNOR X 31-102 Qualité du sol - Dosage du carbone organique par oxydation sulfochromique	Introduire la prise d'essai dans un tube. Au moyen des distributeurs, ajouter respectivement 5 mL de solution de bichromate puis 7,5 mL d'acide sulfurique. Homogénéiser soigneusement avec l'agitateur. Placer les tubes dans le bloc chauffant et laisser réagir 30 min. Retirer les tubes et ajouter 50 mL d'eau. Refroidir dans un bain d'eau et ajuster à 75 mL avec de l'eau. Homogénéiser et laisser décantier 1h. Centrifuger une partie du surmugant à 2000 Tr pendant 10 min. Etalonner le spectrophotomètre avec du glucose. Régler le spectrophotomètre sur une longueur d'onde de 585 nm. Passer la gamme d'étalonnage, puis les essais. Déterminer la fonction d'étalonnage et calculer les concentrations en carbone de chaque essai.	Une solution de bichromate, une solution d'acide sulfurique, un agitateur, des tubes à essais, un bloc chauffant, une centrifugeuse, un spectrophotomètre, du glucose	Le carbone organique présent dans l'échantillon de sol est oxydé par du bichromate de potassium en excès, en milieu sulfurique et à 135°C. Le chrome VI (orange) est réduit par la matière organique en chrome III (vert). Puis, le chrome III formé est dosé par colorimétrie. En effet, la quantité de chrome III est proportionnelle à la teneur en carbone organique présente dans le sol.	→ Rendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols	Laboratoire	Méthode s'adaptant quasiment à tous les types de sols, nécessitant un équipement en matériels et réactifs peu coûteux et permettant l'analyse possible d'un grand nombre d'échantillons dans la journée. La verrerie est réutilisable après son nettoyage.	Risque de brûlures et de réactions allergiques de par les manipulations d'acide sulfurique concentré et de bichromate de potassium.	Expert	Dosage du carbone organique par combustion sèche après décarbonatation automatisée des sols - G. Caria et al. Application des dosages automatisés à l'analyse des sols - B. Dabin et J.C. Brion (1967)		
Indicateurs teneur en azote														
Kit Nitratek	Déterminer le taux de nitrates d'un sol	Mesure de la teneur en azote disponible dans le sol (sous forme d'azote nitrique)	NON	Avant toute mesure, il faut extraire l'azote dans une solution extractante (comme de l'eau distillée). Puis procéder à la mesure avec le Nitratek.	Kit d'analyse (lecteur, 100 bandelettes, 100 filtres, solution étalon et une tarière) à 380 euros	La teneur en nitrate.	→ Gérer au plus juste les apports d'azote à la culture en cours	Terrain	Il faut respecter un protocole commun sur toute l'AAFC, travailler en mode relatif plutôt qu'en valeur absolue, ne pas oublier que les valeurs obtenues sont différentes d'un résultat de laboratoire, ne pas hésiter à faire des répétitions.	Méthode simple et pouvant être répétée.		Débutant	Le Nitratek, un outil d'aide à la décision de terrain - Terragricoles-de-bretagne (2011)	

	Objectifs	Principes	Normes (non vérifié)	Indicateurs	Données finales	Contexte d'application	Terrain/laboratoire	Remarques	Avantages	Inconvénients	Degré d'expertise	Documents/sites internet associés	Références scientifiques
Biofunctool	Déterminer la santé des sols par une approche additive	Etudier la qualité des sols en intégrant les propriétés physiques, les propriétés chimiques et les propriétés biologiques	NON	Indicateurs physiques : infiltration du sol, évaluation visuelle de la structure du sol et stabilité des agrégats à l'eau Indicateurs chimiques : N min. biodisponible et membrane échangeuse d'ion (nitrates) Indicateurs biologiques : carbone labile, activité mésofaune, activité microbienne, activité macrofaune, activité mésofaune et activité lombricienne.	Biofunctool Index (entre 0 et 1)	→ Evaluation des risques environnementaux dans des terrains contaminés/pollués → Rendre compte de l'impact de différentes pratiques agricoles sur la qualité des sols	Terrain + laboratoire		Approche multifonctionnelle (plusieurs fonctions mesurées). Mesure sur site (immédiateté de la plupart des résultats). Coût et rapidité (1/2 heure par point d'analyse). Pas de lien commercial.		Expert		<ul style="list-style-type: none"> • Comment mesurer la santé des sols ? - A. Brauman et A. Thoumazeau (2018) • Biofunctool : a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A : concept and validation of the set of indicators - A. Thoumazeau (2019) • Biofunctool : a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part B : investigating the impact of land management of rubber plantations on soil quality with the Biofunctool index - A. Thoumazeau (2019)

ANNEXE B

**Mémoire de fin de 1ère année de MASTER
« Hydrogéologie, Sol et Environnement »,
présenté par Morgane PEREZ (Université d'Avignon / INRAE EMMAH)**

**« Analyse bibliographique d'indicateurs « simples » permettant
de caractériser et de suivre les différentes composantes de la
qualité d'un sol agricole »**

MASTER « **H**ydrogéologie, **S**ol et **E**nvironnement »

Master 1

**Analyse bibliographique d'indicateurs « simples »
permettant de caractériser et de suivre les
différentes composantes de la qualité d'un sol
agricole**



Mémoire présenté par
Mégane PEREZ

Stage réalisé au Centre de recherche PACA-INRA -
Département Sol

Sommaire

Sommaire	2
Table des illustrations	3
Table des tableaux	3
Avant-propos	4
Remerciements	5
Résumé	6
Abstract	6
I. Introduction	7
II. Synthèse bibliographique	8
1. Les bio-indicateurs	10
□ Synthèse générale sur le sol biologique.....	10
□ Les indicateurs faunistiques	10
□ Exemple : les lombrics	10
□ Les indicateurs microbiologiques.....	11
□ Exemple : la respiration microbienne induite, estimation de la biomasse microbienne.....	12
2. Les indicateurs chimiques	12
□ Synthèse générale sur le sol chimique.....	13
□ Exemple 1 : le kit d'analyse chimique (« Analyse complète du sol »).....	13
□ Exemple 2 : indicateur du pH d'un sol - le test au bicarbonate de soude et le test au vinaigre.....	13
□ Exemple 3 : indicateur des matières organiques fraîches d'un sol - le test au permanganate de potassium.....	14
3. Les indicateurs physiques.....	14
□ Synthèse générale sur le sol physique	15
□ Exemple 1 : indicateur de texture d'un sol - la technique du bocal.....	16
□ Exemple 2 : la stabilité structurale selon la méthode de Le Bissonnais	16
III. Application : le test de stabilité structurale	17
1. Contexte général.....	17
2. Les sols.....	19
3. Matériels et méthodes.....	21
□ Préparation.....	21
□ Application (Annexe VII : les étapes du test en photo).....	21
4. Résultats et discussion.....	23
□ Test 1	23
□ Test 2 : sol Kernza, sol Seigle et sol Bulk	25
□ Le sol Lysimètre	26
5. Conclusion sur le test de stabilité structurale	27
IV. Conclusion	27
V. Bibliographie	28
VI. Annexes	30
□ Annexe I : Extrait du fichier Excel synthétisant les différents indicateurs de la qualité d'un sol et leurs tests associés.....	30
□ Annexe II : le MicroResp TM (extrait de mon rapport de stage UEO – Licence 3)	31
□ Annexe III : exemple de résultats d'un kit d'analyse chimique	33
□ Annexe IV : triangles des texture	34
□ Annexe V : protocole de la méthode de Le Bissonnais	35
□ Annexe VI : matériels nécessaires (extrait du protocole INRA)	36
□ Annexe VII : les étapes du test en photo	37
□ Annexe VIII : système racinaire d'un plant de Kernza et d'un plant de Seigle	40

Table des illustrations

Figure 1: Graphique représentant la répartition des tâches effectuées lors de mon stage	5
Figure 2: Les fonctions du sol	8
Figure 3: Synthèse de la recherche bibliographique concernant les indicateurs de la qualité d'un sol ..	9
Figure 4: Les trois types de lombrics selon la profondeur du sol.....	11
Figure 5: Exemple de résultat du test au permanganate de potassium (à gauche : un sol conventionnel sous labour ; à droite : un sol en agriculture contrôlée depuis 2-3 ans).....	14
Figure 6: Test du bocal pour déterminer la texture d'un sol à partir du classement gravimétrique des particules de sol.....	16
Figure 7: Mode opératoire général de la méthode de Le Bissonnais.....	17
Figure 8: Nombre annuel d'articles scientifiques citant Seybold et Herrick	18
Figure 9: Thèmes des articles citant Seybold et Herrick	18
Figure 10: Plan d'organisation des échantillons sur la plaque-test.....	22

Table des tableaux

Tableau 1: Synthèse bibliographique concernant les indicateurs biologiques	10
Tableau 2: Indicateurs de pH : test au bicarbonate de soude et test au vinaigre	13
Tableau 3: Répartition des éléments constitutifs d'un sol	15
Tableau 4: Caractéristiques de quelques méthodes classiques de mesure de la stabilité structurale des sols (d'après Le Bissonnais et Le Souder 1995)	17
Tableau 5: Caractéristiques des sols de la phase 1.....	19
Tableau 6: Caractéristiques de la parcelle (sol Kernza, sol Seigle et sol Bulk) de la phase 2	20
Tableau 7: Comparaison du pourcentage d'agrégats stables à l'eau (WSA) à 0,25 mm des méthodes manuelles et des méthodes mécanisées (d'après Seybold et Herrick, 2001).....	23
Tableau 8: Plan de plaque de la phase 1.....	23
Tableau 9: Pourcentages d'agrégats stables à l'eau (avec correction sable). Les valeurs sont classées selon un gradient de couleur : du rouge (valeurs les plus fortes) au vert (valeurs les plus faibles).	23
Tableau 10: Valeurs moyennes selon l'échantillon de sol testé	24
Tableau 11: Moyennes, écart-types et coefficient de variation pour chaque sol	24
Tableau 12: Plan de plaque de la phase 2	25
Tableau 13: Pourcentages d'agrégats stables à l'eau (avec correction sable). Les valeurs sont classées selon un gradient de couleur : du rouge (valeurs les plus fortes) au vert (valeurs les plus faibles).	25
Tableau 14: Valeurs moyennes selon l'échantillon de sol testé	25
Tableau 15: Moyennes, écart-types et coefficient de variation pour chaque échantillon de sol.....	26
Tableau 16: Résultats des tests pour le sol Lysimètre.....	27

Avant-propos

Ce rapport de stage rentre dans le cadre de l'obtention du diplôme de Master Hydrogéologie, Sol et Environnement dont les enseignements sont dispensés par l'université d'Avignon. Il est le fruit d'un travail de trois mois mêlant recherche bibliographique et étude expérimentale sur un sujet fondamental : l'« **analyse bibliographique d'indicateurs simples permettant de caractériser et de suivre les différentes composantes de la qualité d'un sol agricole** ». En effet, de plus en plus d'acteurs de la société actuelle travaillant sur l'objet sol comme par exemple les agriculteurs qui utilisent le sol comme support de culture ou les aménageurs du territoire sont demandeurs d'indicateurs simples et accessibles permettant de déterminer tout ou partie de la qualité d'un sol. L'étude de ce milieu est complexe de par l'hétérogénéité de ses composantes (quantité de matières organiques, nombre d'organismes vivants, etc.) évoluant sous l'influence des conditions externes (hydrosphère, atmosphère et biosphère). Ainsi, on retrouve des sols possédant des stades de développement différents. On peut donc dire, d'une manière générale, que chaque sol est unique et que dans un même sol, chaque parcelle est également unique.

L'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) est le premier institut européen de recherche agronomique, mais il est également le deuxième institut mondial dans le domaine des sciences agricoles. Selon les chiffres de 2017 (**INRA 2017**), la communauté travaillant au sein de l'INRA est approximativement de 13 000 personnes (agents titulaires, chercheurs titulaires, stagiaires, doctorants). On peut dénombrer 250 laboratoires dont 45 unités expérimentales au sein de 13 départements scientifiques et 17 centres de recherche (dont celui d'Avignon). L'INRA situé à Avignon rassemble plusieurs unités dont l'unité mixte de recherches « Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes ». Cette unité résulte d'un partenariat entre l'université d'Avignon et l'INRA mêlant ainsi les agents du département environnement et agronomie de l'INRA avec les agents des départements d'hydrogéologie et de physique d'Avignon Université. L'objectif principal des recherches menées dans cette unité se résume en l'analyse de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau et la production agricole à l'échelle d'une parcelle mais également à l'échelle du territoire tout entier. Les chercheurs se focalisent sur les liens existants entre le sol, les plantes et l'atmosphère. De plus, les résultats de ces recherches permettent de guider les acteurs agricoles (ex. les agriculteurs) vers une culture du sol plus écologique et donc beaucoup plus saine pouvant ainsi entraîner un meilleur rendement agricole.

La raison pour laquelle ma candidature à l'offre de stage proposée par l'Institut National de la Recherche Agronomique a été instinctive est simple : l'envie d'apprendre. J'ai vu dans ce stage une opportunité à ne pas manquer. Mon rôle en tant qu'étudiante est d'enrichir mes connaissances scientifiques dans mes domaines de prédilection mais également dans les domaines où des manques se font ressentir. Je ne cache pas que l'agronomie est un de ces domaines. Voici une phrase que j'aime beaucoup et qui décrit ma réflexion sur l'apprentissage : « *Tout connaître est impossible, et plus j'en apprend, plus je m'aperçois que j'en ai à apprendre.* », Manumax.

L'objectif premier de cette étude était tout simplement de répertorier et décrire succinctement les différents tests permettant d'accéder à un résultat indicatif sur la qualité d'un sol. Très vite, les méthodes de référence plus complexes et se réalisant la plupart du temps en laboratoire s'ajoutèrent à ce répertoire. L'objectif second était d'envoyer ce répertoire avec un questionnaire aux agriculteurs et autres personnes compétentes pour analyser les retours et ainsi déterminer quelles techniques étaient utilisées et pourquoi. Cet objectif n'a pas été atteint pour des raisons de calendrier. Finalement, le dernier objectif à atteindre était de réaliser des manipulations sur le sol pour quantifier certains indicateurs de son état. Cette partie a bien sûr été faite avec professionnalisme mais également avec amusement (vive le bricolage du dimanche !).

Le travail de bibliographie doit être fait avec minutie car les sources de données sont vastes et nous pouvons vite nous y perdre. Etre rigoureux dans son travail est le mot d'ordre. On peut également dire de même pour la partie plus expérimentale de mon stage. Le graphique ci-dessous (**Fig.1**) illustre le temps consacré pour chaque tâche accomplie durant mon stage.

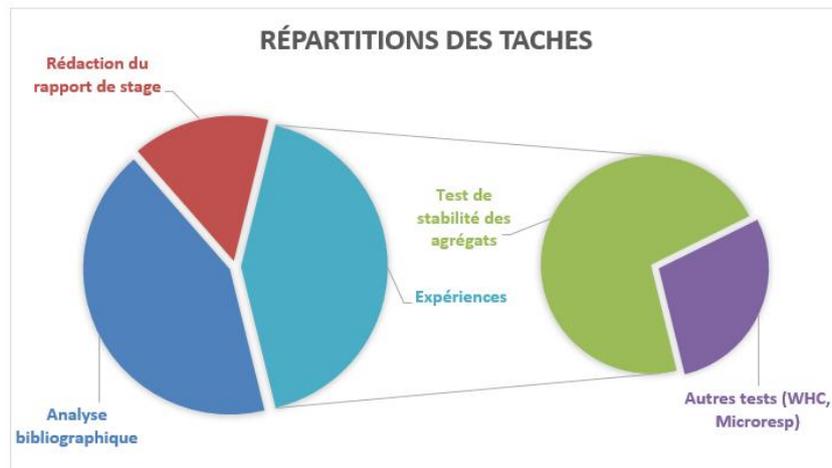


Figure 1: Graphique représentant la répartition des tâches effectuées lors de mon stage

Remerciements

Après trois mois au sein de l'unité EMMAH SOL, il est de mon devoir de souligner le professionnalisme, l'humanité et la bienveillance de toutes les personnes que j'ai pu côtoyer durant mon stage. J'ai ainsi pu m'épanouir professionnellement mais également au niveau intellectuel. En effet, chaque jour passé a permis d'enrichir mes connaissances sur le milieu complexe qu'est le sol.

Avant tout, je tenais à remercier M. Stéphane RUY, chargé de recherches et directeur de l'UMR EMMAH, pour m'avoir accordé sa confiance dans la réalisation de ce stage et pour m'avoir procuré les réponses aux questions que je me posais. Mais je voulais également le remercier pour sa gentillesse et sa compréhension vis-à-vis de ma situation familiale.

Je remercie également Samuel Le-Gall, apprenti, et Mme Annette BERARD, chercheuse, pour leur encadrement, leur accueil chaleureux et leur aide pour la réalisation des multiples manipulations concernant la partie expérimentale de mon stage. Ce fut très appréciable de pouvoir manipuler le sol et élaborer un test de A à Z.

J'exprime enfin toute ma reconnaissance envers le personnel de l'INRA et les stagiaires pour leur convivialité et leur bonne humeur dont ils ont fait preuve durant toute cette période.

Résumé

Le **sol** est un milieu complexe reconnu comme une ressource non renouvelable à l'échelle humaine. Il est l'origine de multiples **services écosystémiques**. Il joue un rôle primordial dans la filtration des intrants (engrais, produits phytosanitaires) et plus généralement des polluants, déterminant ainsi la qualité des eaux souterraines. Il est le support des cultures. De plus, il permet la régulation des flux hydriques. Maintenir ou restaurer la **qualité** de ce sol dans le futur mais également dans le présent est un enjeu mondial majeur. Cependant, cet objectif se heurte à un contexte global de pressions augmentant avec la hausse de la population et les interactions entre le changement climatique, les usages des terres et les pratiques agricoles contribuant à la dégradation des sols. Maintenir ou restaurer la qualité des sols nécessite donc d'avoir des outils pour évaluer et suivre cette qualité.

Les agriculteurs prennent de plus en plus en compte la qualité des sols dans leurs pratiques culturales ou leurs rotations de cultures. Par conséquent, il faut leur proposer de nouvelles **méthodes** plus simples et plus rapides à mettre en œuvre et qui permettent de suivre en continu l'évolution de cette qualité.

Mots clés : sol, qualité, services écosystémiques, méthodes simples.

Abstract

Soil is a complex environment recognized as a non-renewable resource on a human scale. It is the source of many **ecosystem services**. It plays a key role in the filtration of inputs (fertilizers, plant protection products) and more generally of contaminants, thus determining the quality of groundwater. It is the support of cultures. In addition, it allows the regulation of water flows. Maintaining or restoring the **quality** of the soil in the future but also in the present is a major global challenge. However, this objective faces a global context of increasing pressures with population growth and the interactions between climate change, land use and agricultural practices contributing to land degradation. Maintaining or restoring soil quality therefore requires tools to assess and monitor soil quality.

Farmers are increasingly taking soil quality into account in their farming practices or crop rotations. Therefore, new **methods** must be offered that are simpler and faster to implement and that make it possible to continuously monitor the evolution of this quality.

Keywords : soil, quality, ecosystem services, simple methods.

I. Introduction

« En 1873 et 1875, l'Ukraine connaît deux années de sécheresse sévère, avec des conséquences désastreuses sur la production agricole. Une société savante russe décide de financer une expédition scientifique pour étudier sur place le phénomène et tenter d'y apporter des solutions. Dokoutchaev part en Ukraine dans une région de steppe. Pour observer le sol en profondeur, il fait creuser des tranchées sur un mètre de profondeur environ. Il observe toujours la même chose :

- en surface, une couche noire et bien aérée, riche en humus, grumeleuse, où les racines des graminées se développent bien
- en-dessous, une couche moins riche en humus, plus claire, avec des taches sombres ou très claires, créées par de la terre venue de la surface ou du calcaire venu du sous-sol.
- plus en profondeur, la roche-mère, un lœss c'est-à-dire une roche meuble à base de poussière accumulée par le vent lors des périodes glaciaires

Ce sol est appelé « tchernozem » ou « terre noire » par les paysans ukrainiens.

Quelques années plus tard, le gouverneur de la région forestière de Gorki, à l'est de Moscou, fait appel à Dokoutchaev pour établir une carte de la qualité des sols afin de répartir équitablement les impôts fonciers. Il fait creuser des tranchées comme en Ukraine, mais ce qu'il voit est bien différent. A la surface repose une litière de feuilles et de brindilles mal décomposées, puis une couche acide, noire, riche en humus, puis une couche sableuse, à aspect de cendre, très claire, puis une couche riche en argile, en humus et en fer. Enfin, vient la roche-mère, qui peut-être un lœss comme en Ukraine mais pas forcément. Ce sol est appelé « podzol » par les paysans russes.

Dokoutchaev, en comparant les tchernozems et les podzols, en tire une conclusion qui fonde une nouvelle science, la pédologie. » (**Albouy et Bonotaux 2018**). Cette référence historique nous plonge au début de la science du sol.

De nos jours, nous pouvons définir le sol selon deux points de vue: scientifique et non scientifique. Pour obtenir une définition simple non scientifique, j'ai sollicité quelques personnes de mon entourage et le verdict est le suivant : le sol se définit comme la surface visible sur laquelle notre regard se pose et sur laquelle nous marchons. Dans le domaine scientifique, la définition est plus précise : « Le sol est un volume qui s'étend depuis la surface de la Terre jusqu'à une profondeur marquée par l'apparition d'une roche dure ou meuble, peu altérée, ou peu marquée par la pédogenèse. L'épaisseur du sol peut varier de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres, ou plus. Il constitue, localement, une partie de la couverture pédologique qui s'étend à l'ensemble de la surface de la Terre. Il comporte le plus souvent plusieurs horizons correspondant à une organisation des constituants organiques et/ou minéraux (la terre). Cette organisation est le résultat de la pédogenèse et de l'altération du matériau parental. Il est le lieu d'une intense activité biologique (racines, faune et micro-organismes). » (« **Sols et Définitions – AFES – Association Française pour l'Etude du Sol** »). Mais nous trouvons également la définition suivante : « le sol est le produit de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie, de l'atmosphère et des échanges d'énergie qui s'y manifestent. » (**Lozet et Mathieu 1997**). Nous pouvons donc commencer à voir toute la complexité que le mot « sol » engendre.

Le sol est considéré comme un milieu complexe et dynamique façonné par des facteurs externes comme la pluie, le gel, le vent, la sécheresse, la chaleur et les organismes vivants (plantes, champignons, bactéries ou animaux) mais également les activités anthropiques. Ce milieu est hétérogène d'un point de vue physique, chimique ou biologique. La qualité d'un sol s'observe donc à travers ces trois composantes. Toutefois, elle se traduit également par des fonctions écologiques, économiques, de production ou de support. Le sol fournit donc des services dits écosystémiques (**Fig.2**).



Figure 2: Les fonctions du sol

(Sources : <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/fr/c/294324/>)

La qualité d'un sol est fonction du service écosystémique fournit par le sol. Autrement dit, la qualité d'un sol attendue pour la fourniture de matériaux de construction ne sera pas la même qu'un sol agricole. Tous ces services écosystémiques sont reliés les uns aux autres. Par exemple, on peut l'illustrer par la fourniture des aliments (par un sol agricole) qui implique un sol ayant une multitude d'organismes vivants régulant ainsi les cycles biogéochimiques comme celui du carbone (ex. la séquestration) et les cycles de l'eau (ex. la purification de l'eau et réduction des contaminants du sol). Dans ce manuscrit, nous nous focaliserons sur la qualité d'un sol agricole mais de nombreux tests présentés ci-dessous peuvent être réalisés dans d'autres types de sol.

La mesure de la qualité d'un sol passe par divers tests de terrain ou par des méthodes de laboratoire servant à quantifier les multiples indicateurs décrivant le sol. Normés ou non, ces tests nous renseignent sur l'aspect physique du sol (la texture, l'état structural, l'infiltration, la résistance, la présence d'eau...), sur l'aspect chimique (acidité ou alcalinité, teneur en carbone, teneur en azote...) et sur l'aspect biologique (respiration microbienne, abondance faunistique...). Ces trois aspects vont être approfondis dans la première partie de ce rapport, résumant ainsi mon travail de recherche bibliographique. Dans la continuité, on abordera la deuxième partie de ce document qui traitera d'un test physique servant à caractériser la stabilité structurale des agrégats de sol.

II. Synthèse bibliographique

L'objectif durant cette phase de mon stage était de collecter et de synthétiser un ensemble de tests et de méthodes plus ou moins faciles à réaliser et permettant d'obtenir des résultats indiquant la qualité d'un sol. Ces recherches s'insèrent dans un projet CASDAR intitulé SOLAE qui associe l'INRA et l'ensemble des chambres

départementales et régionales d'agriculture de la région PACA et dont l'objectif est d'accompagner les agriculteurs dans une meilleure prise en compte de la qualité des sols dans leurs travaux.

La méthodologie suivie est la suivante :

- a. Recherche bibliographique à travers plusieurs supports d'informations: articles scientifiques, blog de jardinier, livres, magazines.
- b. Analyse des caractéristiques de chaque test ou méthode :
 - Les objectifs
 - Les principes de mesure et mode opératoire
 - Le matériel et les consommables nécessaires
 - Les normes associées lorsqu'elles existent
 - Les données obtenues (quantitatives, qualitatives...)
 - Les avantages et les inconvénients
 - Le degré d'expertise nécessaire
 - Le domaine d'application
 - Les références scientifiques et techniques
- c. Regroupement des résultats dans un outil unique (type fichier Excel et répertoire de données associées)

Le fichier Excel ainsi créé se divise en 5 feuilles (**Annexe I : Extrait du fichier Excel synthétisant les différents indicateurs de la qualité d'un sol et leurs tests associés**) :

- le sommaire, rassemblant tous les tests et méthodes classés selon le type d'indicateur
- les indicateurs biologiques divisés en deux sous-groupes : les indicateurs faunistiques et les indicateurs microbiologiques
- les indicateurs chimiques divisés en cinq sous-groupes : les kits d'analyses, les indicateurs de pH, les indicateurs optiques, les indicateurs de teneur en carbone et les indicateurs de teneur en azote
- les indicateurs physiques divisés en cinq sous-groupes : les indicateurs de l'état et de la stabilité structurale, les indicateurs de texture, les indicateurs de perméabilité, les indicateurs de résistance et les indicateurs de présence d'eau
- les multi-indicateurs

Afin de favoriser la diffusion et l'utilisation des résultats par d'autres chercheurs qui pourraient compléter ce document, l'ensemble des fichiers a été mis en place dans un espace collaboratif.



Figure 3: Synthèse de la recherche bibliographique concernant les indicateurs de la qualité d'un sol

La figure ci-dessus (**Fig.3**) synthétise le travail effectué durant près d'un mois. Les indicateurs biologiques, les indicateurs chimiques et les indicateurs physiques sont décrits dans la suite de ce manuscrit. Tous les tests ne seront pas détaillés.

1. Les bio-indicateurs

Le tableau ci-dessous (**Tab.1**) regroupe les résultats de mes recherches concernant les indicateurs biologiques :

	Indicateurs faunistiques	Indicateurs microbiologiques
Nombre de tests/méthodes répertoriés	10	10
Nombre de références (documents Internet et références scientifiques)	20	15

Tableau 1: Synthèse bibliographique concernant les indicateurs biologiques

• Synthèse générale sur le sol biologique

Le sol est un écosystème complexe dans lequel interagissent à plusieurs échelles les matrices minérales et organiques, les fluides liquides et gazeux, avec différentes formes de vies macroscopiques et microscopiques. C'est un milieu vivant où de multiples organismes vivent en communauté : des bactéries, des champignons, des algues, des animaux ou des plantes. On peut les classer selon plusieurs critères comme par exemple leur taille, leur régime alimentaire, leur habitat ou leur fonction écologique (**Métral 2007**).

• Les indicateurs faunistiques

Dans cette partie, on s'intéresse principalement à la pédofaune c'est-à-dire à la faune du sol. Cette pédofaune est divisée en sous-groupes différant selon la taille des espèces. On retrouve (« **Faune du Sol et des Litières - Animaux** »):

- la microfaune (organismes inférieurs à 0,2 mm) comme les protozoaires, les nématodes...
- la mésofaune (organismes de 0,2 à 4 mm) comme les acariens, les collemboles...
- la macrofaune (organismes de 4 à 80 mm) comme les lombrics, les insectes, les myriapodes...
- la mégafaune (organismes supérieurs à 10 cm) comme les mammifères, les reptiles...

Le nombre d'espèce dans le sol varie selon sa qualité. Tous sont des acteurs de la formation et de l'évolution du sol (**Gobat et al. 2010**). En effet, la pédofaune du sol contribue à créer un environnement naturel, sain et équilibré de par ses fonctions écologiques. « Les organismes agissent comme les principaux agents du cycle des éléments nutritifs : ils régulent la dynamique de la matière organique du sol, la séquestration du carbone dans les sols et les émissions de gaz à effet de serre ; ils modifient la structure physique du sol et le régime des eaux ; ils augmentent la quantité et l'efficacité de l'absorption de nutriments par la végétation, et ils améliorent la santé des végétaux. » (**Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture 2015**). Toutes ces fonctions garantissent une bonne fertilité des sols et donc une bonne qualité.

Le but d'un indicateur faunistique est de déterminer la diversité de la faune vivant dans le sol. Cependant il faut différencier la diversité au sein des espèces (diversité génétique), la diversité entre les espèces (diversité des organismes) et la diversité des écosystèmes (diversité écologique) (**Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture 2015**).

• Exemple : les lombrics

Un bon jardinier vous dira forcément que le nombre de vers de terre au sein d'un terrain est révélateur de la bonne qualité de celui-ci. Les lombrics sont des êtres vivants très importants pour la vie d'un sol. En effet, ils garantissent de nombreux services grâce à leur activité biologique. On peut citer les exemples suivants : « la formation de terre végétale (à travers un brassage répété du sol et l'incorporation de matières organiques), l'effet du fouissage et du rejet de turricules (bioturbation) sur la fertilité du sol et la croissance des plantes, l'enfouissement de matières organiques et l'enrichissement du sol en éléments minéraux, le cycle global érosion-sédimentation avec des transferts hydriques et aériens de fines particules de sol ramenés en surface par les vers de terre » (Blanchart et al. 2005). On dénombre trois types de lombrics (Fig.4) :

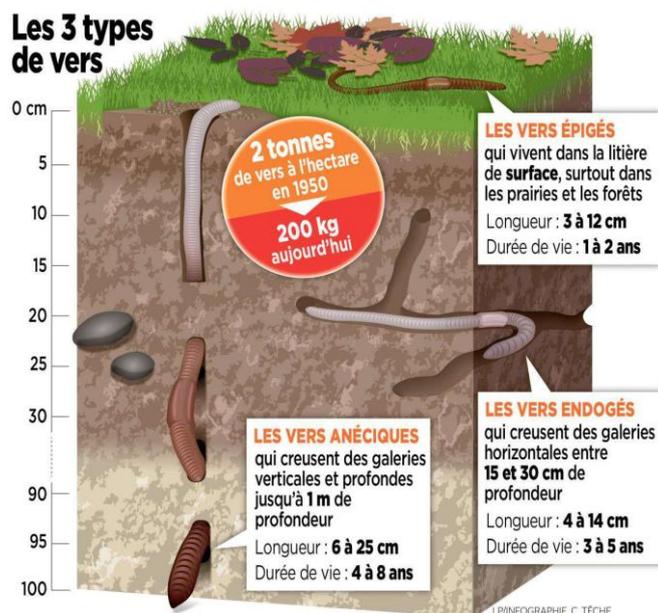


Figure 4: Les trois types de lombrics selon la profondeur du sol

(Sources : <http://www.leparisien.fr/societe/il-faut-sauver-le-ver-de-terre-22-09-2016-6139831.php>)

La méthode d'échantillonnage et d'analyse des lombrics (norme **ISO 23611-1:2018, Qualité du sol — Prélèvement des invertébrés du sol — Partie 1: Tri manuel et extraction des vers de terre**) permet d'étudier l'ensemble des communautés de vers de terre du sol ainsi que leur mode de vie. Le mode opératoire de cette méthode est le suivant : identifier la zone d'échantillonnage et nettoyer délicatement la surface en coupant la végétation et en ôtant la litière ou les amas organiques, appliquer trois arrosages d'un extractant chimique (ex. pour 1 m², utilisez 10 litres de solution moutardée) à 15 minutes d'intervalles, prélever les lombrics à la surface du sol puis effectuer un grattage superficiel jusqu'à 1 cm de profondeur pour récupérer les individus non récoltés, faire un prélèvement physique en extrayant à la bêche un bloc de terre (25x25x20cm) au sein de la zone et trier manuellement, mettre les individus trouvés dans un récipient contenant du formol 4% et procéder à l'identification (Marina Le Guédard et al. 2017). Cette méthode a pour avantage d'être simple, accessible à tous et utilisée depuis de nombreuses années (des références sont donc accessibles). En revanche, sa réalisation est longue si nous voulons faire plusieurs répétitions. De plus, l'utilisation d'un liquide extracteur (la solution moutardée) et d'un liquide conservateur (le formol) induit la mort de tous les lombrics prélevés ainsi qu'une potentielle pollution du sol et de la nappe sous-jacente. Ce tri manuel nous permet de déterminer l'abondance (le nombre d'individus par mètre-carré), la biomasse (la masse d'individus par mètre-carré) ainsi que la richesse des individus (le nombre d'espèces) (Peres et al., s. d.).

- **Les indicateurs microbiologiques**

Les microorganismes jouent un rôle clé au niveau du recyclage de la matière organique dans le sol et de l'altération des minéraux en nutriments rendus accessibles aux plantes. Ces microorganismes aident aussi à stabiliser des agrégats de sol et entrent dans les circuits de régulation hydrique par l'excrétion d'exopolysaccharides participant à la rétention en eau du sol.

La microbiologie est la science qui étudie les micro-organismes (bactéries, archées, levures, micro-algues et champignons filamenteux) et leurs activités. Par conséquent, les indicateurs microbiologiques du sol ont deux objectifs principaux : déterminer l'activité biologique d'un sol par l'intermédiaire de la décomposition de matières organiques et déterminer l'abondance ainsi que la diversité des micro-organismes du sol.

- **Exemple : la respiration microbienne induite, estimation de la biomasse microbienne**

Pour estimer la biomasse active des micro-organismes hétérotrophes du sol, on utilise la méthode de respiration induite par le substrat (norme **ISO 14240-1:1997, Qualité du sol — Détermination de la biomasse microbienne du sol — Partie 1: Méthode par respiration induite par le substrat**). Une approche miniaturisée de cette méthode est la technique MicroRespTM. Ces mesures se font en laboratoire et nécessitent des préparations antérieures. Il est nécessaire de préparer : les microplaques de détection (une semaine avant les mesures), les substrats carbonés et les microplaques à puits profonds (dans lesquelles les échantillons de sol sont distribués) (**Annexe II : le MicroRespTM**).

La méthode MicroRespTM est basée sur une technique colorimétrique. En mesurant indirectement la quantité de CO₂ dégagée par agrégats du sol distribués dans une microplaque, cette méthode permet de mesurer :

- la respiration basale du sol : mesure sans ajout de substrats carbonés. Les microorganismes actifs dans le sol catabolisent alors les matières organiques-nutriments présents et accessibles dans ce sol
- la biomasse microbienne : mesure avec ajout de glucose (= substrat carboné générique). Tous les microorganismes actifs catabolisent le glucose solubilisé distribué en excès et leur dégagement de CO₂ est proportionnel à leur biomasse (**Anderson et Domsch 1978**)
- « l'empreinte catabolique » du sol : mesure de respiration avec ajouts de divers substrats carbonés solubilisés, différents selon leur composition et l'origine qu'ils représentent.

Le protocole de réalisation est le suivant : prélever un échantillon de sol, mélanger le sol et tamiser avec un tamis de maille 2 mm, répartir l'échantillon dans des plaques à puits profonds, mettre différents substrats carbonés dans les puits (glucose, saccharose, tréhalose, acide malique...), placer un joint d'étanchéité sur la plaque à puits profonds individualisant ainsi chaque puits, recouvrir la plaque/joint d'une microplaque de détection contenant un gel agar et un indicateur coloré, mettre les microplaques dans un incubateur à l'obscurité et à 23°C pendant 6 heures, mesurer le changement de couleur du gel par spectrophotomètre à une longueur d'onde de 570 nm.

L'activité respiratoire des microorganismes dépend de plusieurs facteurs, tels que le taux d'humidité du milieu et l'accessibilité aux nutriments présents dans le sol (**Creamer et al. 2015**).

2. Les indicateurs chimiques

A l'exception du kit d'analyse chimique (1 référence), les indicateurs chimiques se répartissent en plusieurs sous-groupes :

- les indicateurs de pH répertorient 4 tests (2 références)

- les indicateurs optiques répertoriant 2 tests (7 références)
- les indicateurs de teneur en carbone répertoriant 5 tests (6 références)
- les indicateurs de teneur en azote répertoriant 1 test (1 référence)

- **Synthèse générale sur le sol chimique**

La chimie du sol se définit comme la « partie de la science des sols qui traite de la composition, des propriétés et des réactions chimiques des sols » (« **chimie du sol : définition de chimie du sol et synonymes de chimie du sol (français)** »). Le sol chimique est en constante interaction avec le sol physique et le sol biologique. En effet, « les propriétés chimiques du sol correspondent aux teneurs et disponibilités des éléments minéraux pour les plantes et aux paramètres chimiques du sol en lien avec leur restitution ou disponibilité » (« **QualiAgro - Propriétés chimiques du sol** »).

- **Exemple 1 : le kit d'analyse chimique** (« **Analyse complète du sol** »)

Mon but n'est en aucun cas de faire de la publicité pour le site vendant ce produit mais bel et bien d'illustrer mes propos. Le choix du produit n'est qu'à titre indicatif. De nombreux autres kits sont accessibles dans les commerces ou sur le web.

Le principe de ces kits est de mesurer les différents indicateurs chimiques d'un sol : la capacité d'échange cationique, l'état acido-basique, l'état organique, l'état minéral et les oligo-éléments comme le fer, le cuivre et le zinc contenus dans le sol. La plupart de ces kits se composent d'une fiche de renseignement, de sachets de prélèvement, d'une fiche conseil-prélèvement et d'un carton de lettre suivie pré-timbré pour l'expédition de l'échantillon de sol. Après envoi de l'échantillon dans un laboratoire d'analyse, les résultats seront accessibles en 15 jours. Ces résultats se présentent sous la forme d'un diagramme radar de l'état de fertilité du sol (**Annexe III : exemple de résultats d'un kit d'analyse chimique**). Les avantages de ces kits sont la simplicité d'utilisation (l'analyse chimique est faite en laboratoire par des professionnels) et l'accessibilité du kit (vendu dans les commerces ou sur le web).

Cependant, d'autres kits d'analyses plus spécifiques sont disponibles en libre service et permettent de cibler un indicateur chimique du sol (kit d'analyse de l'azote, du pH...).

- **Exemple 2 : indicateur du pH d'un sol - le test au bicarbonate de soude et le test au vinaigre**

Ces deux tests, très simples, permettent d'apprécier l'acidité ou l'alcalinité d'un sol soit le pH d'un sol (**Dubus 2013**). Le tableau ci-dessous, extrait du répertoire final de la synthèse bibliographique, nous donne quelques informations sur les tests présentés dans cette partie (**Tab.2**) :

	Test au bicarbonate de soude	Test au vinaigre
Objectifs	Déterminer l' acidité d'un sol	Déterminer l' alcalinité d'un sol
Principes	Observation d'une réaction chimique due au contact entre le bicarbonate de soude et le sol	Observation d'une réaction chimique due au contact entre le vinaigre blanc et le sol
Mode opératoire	Mélanger un échantillon de sol avec de l'eau déminéralisée pour former une boue. Puis verser le bicarbonate de soude.	Verser le vinaigre blanc sur l'échantillon de sol.
Résultats	Si la solution "pétille", alors le sol est acide.	Si le vinaigre réagit, alors le sol est alcalin.

Tableau 2: Indicateurs de pH : test au bicarbonate de soude et test au vinaigre

Ces tests ne permettent pas d'obtenir des mesures précises sur le pH d'un sol. Ils nous renseignent sur la nature acide ou basique de celui-ci. On peut noter qu'un sol calcaire est un sol alcalin. En revanche, les sols très riches en humus ou riches en sables sont probablement acides.

- **Exemple 3 : indicateur des matières organiques fraîches d'un sol - le test au permanganate de potassium**

Le test au permanganate de potassium permet de rendre compte de la proportion de matière organique dans un échantillon de sol (Balloy 2017). Ce test repose sur l'observation de la réaction chimique entre le carbone organique et le permanganate de potassium. En d'autres termes, on observe la capacité d'oxydation de la matière organique permettant ainsi de quantifier le compartiment labile de la matière organique c'est-à-dire la matière organique fraîche, facilement dégradée par la pédofaune.

Le mode opératoire du test est très simple : sécher un échantillon de sol au soleil sur une bâche noire par exemple, mettre un échantillon de sol dans une fiole préalablement rempli avec une solution de permanganate diluée, attendre 10 minutes avant d'interpréter le résultat. Le résultat se manifestera sous la forme d'un changement de couleur de la solution (Fig.5) : si la solution présente au-dessus de l'échantillon de sol reste rouge à violette, alors le sol contient très peu de matières organiques. En revanche, si la solution devient plus claire, alors le sol possède une richesse importante en matières organiques (Waligora 2017).



Figure 5: Exemple de résultat du test au permanganate de potassium (à gauche : un sol conventionnel sous labour ; à droite : un sol en agriculture contrôlée depuis 2-3 ans)

Cette méthode est simple, accessible à tous, utilisable sur le terrain, peu coûteuse et rapide. Cependant, l'expertise visuelle de la couleur de la solution est propre à chacun, ce qui fait que cette méthode n'est pas réellement précise. Pour réduire cette limite, nous pouvons utiliser un spectrophotomètre portable mais les coûts engagés seront plus onéreux (Brauman et al. 2018). De plus, cette méthode ne donne pas de résultats chiffrés et permet seulement d'apprécier la quantité de matière organique présente dans le sol.

3. **Les indicateurs physiques**

Voici une liste regroupant les résultats par catégories de mes recherches concernant les indicateurs physiques :

- les indicateurs de l'état et de la stabilité structurale : 6 tests et 13 références
- les indicateurs de texture : 8 tests et 17 références
- les indicateurs de perméabilité : 5 tests et 8 références
- les indicateurs de résistance : 5 tests et 9 références
- les indicateurs de présence d'eau : 6 tests et 3 références

• **Synthèse générale sur le sol physique**

Si l'on regarde l'aspect physique du sol, nous pouvons constater un mélange de trois phases : la phase solide, la phase liquide et la phase gazeuse. Le sol est un milieu hétérogène composé de grains solides (« la terre »), d'une plus ou moins grande quantité d'eau libre ou liée et d'un mélange de gaz. Le sol physique possède des paramètres clés servant de base pour toute analyse de sol. Il s'agit :

- de la granulométrie et de la texture
- de l'état et de la stabilité structurale
- de la porosité
- des propriétés mécaniques comme la cohésion ou le compactage
- des propriétés hydriques

L'agencement des grains solides entre eux forme le squelette du sol. On peut classer ses particules solides selon leur granulométrie c'est-à-dire selon leur taille. On distingue ainsi les particules fines des éléments grossiers (**Tab.3**) :

Eléments fins	Argiles	Inférieures à 2 µm
	Limons fins	De 2 à 20 µm
	Limons grossiers	De 20 à 50 µm
	Sables fins	De 50 à 200 µm
	Sables grossiers	De 200 à 2000 µm (2 mm)
Eléments grossiers	Graviers	De 0,2 à 2 cm
	Cailloux	De 2 à 5 cm
	Pierres	De 5 à 20 cm
	Blocs	Supérieurs à 20 cm

Tableau 3: Répartition des éléments constitutifs d'un sol

(Sources : <https://www.capinov.fr/la-granulometrie.php>)

Les analyses granulométriques se font uniquement sur la terre fine. Les argiles, les limons et les sables possèdent des propriétés différentes (**Schwartz, s. d.**) : « la teneur en argile joue sur l'importance des réserves d'eau et en bases échangeables ; la teneur en limons a un rôle essentiel sur la susceptibilité au tassement ; les sables favorisent le drainage, mais sont inertes sur le plan chimique ». Après l'obtention des pourcentages d'argiles, de limons et de sables grâce à différentes méthodes (ex. analyse granulométrique par tamisage ou par sédimentation ; granulométrie à diffraction laser), il est aisé d'identifier la texture du sol à l'aide d'un triangle des textures (**Annexe IV : triangle des textures**).

Les particules de sol peuvent se regrouper sous la forme d'agrégats, maintenues par un ensemble de substances organiques (exemples : la glomaline, les exopolysaccharides) qu'on qualifie comme la colle du sol (**NRCS 2010**). Ces agrégats peuvent être classés selon leurs tailles. On a ainsi : les macro-agrégats (supérieurs à 250 µm) et les micro-agrégats (de 20 à 250 µm) (**Gauthier, s. d.**). Par ailleurs, nous pouvons également les répertorier selon leur

mode d'arrangement : c'est la structure. Cette structure définie de nombreux paramètres pédologiques comme la porosité (le volume des vides du sol, occupé par de l'eau ou des gaz), la densité apparente, les propriétés d'infiltration,...

La stabilité structurale d'un sol est « l'aptitude d'un horizon à maintenir un bon état d'agrégation lorsqu'il est soumis à l'action brutale de l'eau » (**Baize 2016**) comme la pluie, le ruissellement ou l'irrigation. La stabilité structurale est un indicateur très important pour considérer la qualité d'un sol. En effet, un bon maintien de la structure permet de diminuer l'effet négatif qu'occasionne la croûte de battance, l'érosion ou encore le tassement des sols. Par conséquent, il influence sur le rendement global d'un sol cultivé (**Gauthier, s. d.**).

- **Exemple 1 : indicateur de texture d'un sol - la technique du bocal**

La méthode du bocal est un test simple permettant de déterminer la texture globale d'un sol. Il repose sur le principe de décantation des différents éléments constituant l'échantillon de sol. De par l'action de la gravité, les matières lourdes tombent au fond du bocal. A l'inverse, les matières légères se retrouveront à la surface. On distingue donc un gradient de densité des particules de sol. Le mode opératoire est le suivant : trouver un bocal transparent avec des bords lisses, remplir à moitié le bocal de terre et remplir le reste du bocal avec de l'eau, refermer le bocal en laissant un peu d'air, remuer pendant trois minutes puis laisser reposer pendant 30 minutes, remuer de nouveau trois minutes, laisser reposer pendant 24 heures afin que les particules les plus fines puissent se déposer (**Permaculture Design 2016**). Lorsque les strates sont visibles, la mesure de leurs épaisseurs permettra de déduire le pourcentage de limons, d'argile et de sables dans l'échantillon. On pourra également constater la présence ou l'absence de matière organique à la surface du liquide. Ce dessin illustre le résultat obtenu à partir du test du bocal (**Fig.6**) :

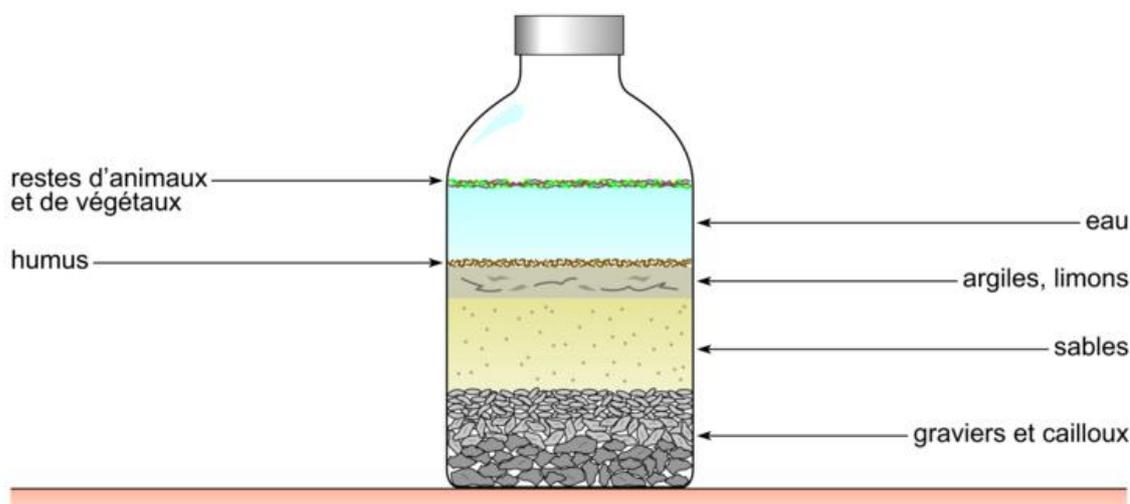


Figure 6: Test du bocal pour déterminer la texture d'un sol à partir du classement gravimétrique des particules de sol

(Sources : <https://www.assistancescolaire.com/eleve/6e/svt/reviser-une-notion/le-sol-un-milieu-particulier-6sce03/print?print=1&printSheet=1>)

- **Exemple 2 : la stabilité structurale selon la méthode de Le Bissonnais**

La méthode de référence, normée (**ISO 10930:2012, Qualité du sol — Mesure de la stabilité d'agrégats de sols soumis à l'action de l'eau**), pour déterminer si des agrégats de sol sont stables sous l'action brutale de l'eau est la méthode dite de Le Bissonnais. Cette méthode se base sur les recherches antérieures de nombreux

scientifiques comme Hénin (1958) ou Kemper et Rosenau (1986) et sur les recherches plus récentes des chercheurs de l'INRA (**Le Bissonais 2016**). Cette méthode est composée de trois tests : l'humectation rapide par immersion, l'humectation lente par capillarité et la désagrégation mécanique par agitation après réhumectation. « Les trois tests proposés ont pour objectif de rendre compte de ce comportement dans les différentes conditions climatiques, hydriques et structurales que l'on peut rencontrer à la surface du sol » (**Le Bissonais et Le Souder 1995**).

Le mode opératoire diffère selon les traitements effectués (**Annexe V : protocole de la méthode de Le Bissonais**). De manière synthétique, la **figure 7** illustre les trois traitements de cette méthode :

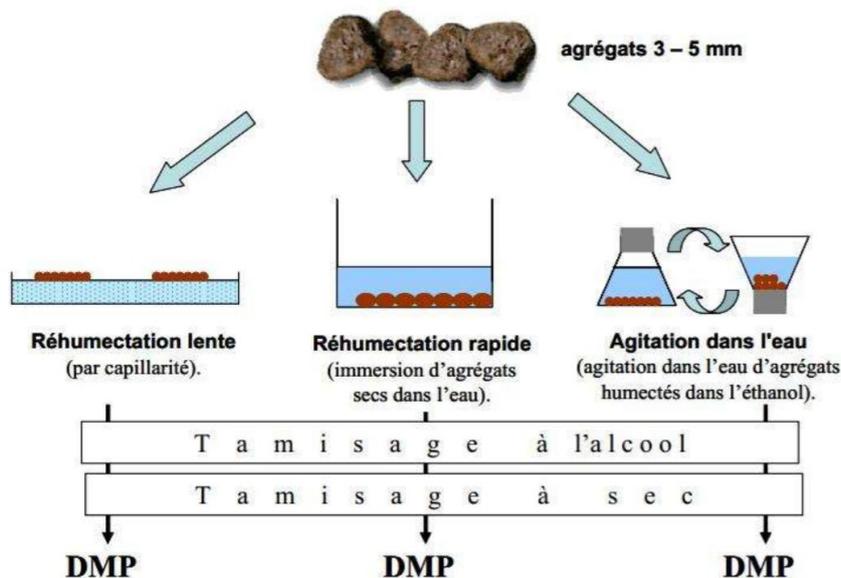


Figure 7: Mode opératoire général de la méthode de Le Bissonais

(Sources : https://asso-base.fr/IMG/pdf/presentation_Ch BARBOT MO Structure PDF.pdf)

A la fin de ces trois traitements, une séparation granulométrique est effectuée. Les résultats peuvent s'exprimer sous deux formes : un histogramme de la répartition des tailles des particules ou un histogramme des diamètres moyens pondéraux (DMP). La partie suivante traite d'un test de stabilité structurale non normé mais tout aussi intéressant.

III. Application : le test de stabilité structurale

1. Contexte général

Auteurs	Date	Caractéristiques de la méthode		
		Echantillon	Traitement	Expression du résultat
Yoder	1936	3-5 mm	tamisage à l'eau	MWD
Hénin et al.	1958	< 2 mm	tamisage à l'eau	% > 0,200 mm
De Leehneer et De Boodt	1959	sol entier	tamisage à l'eau	deltaMWD
Low	1967	4-5 mm	gouttes de pluie	nombre de goutte
Edwards et Bremner	1967	4-5 mm	ultrasons	taux de dispersion
Emerson	1967	3-5 mm	immersion	notation qualitative
Grieve	1980	4-5 mm	ultrasons	porosité inter-agrégats
Young	1984	2-9 mm	gouttes de pluie	MWD
Kemper et Rosenau	1986	1-2 mm	tamisage à l'eau	% > 0,250 mm
Churchman et Tate	1987	2-3,4 mm	tamisage à l'eau	MWD
Farres	1987	5-8 mm	gouttes de pluie	temps jusqu'à rupture
Loch	1989	sol entier	pluie simulée	% < 0,125 mm
Pojasok et Kay	1990	1-2 mm	tamisage à l'eau	% > 0,250 mm

Tableau 4: Caractéristiques de quelques méthodes classiques de mesure de la stabilité structurale des sols (d'après Le Bissonais et Le Souder 1995)

Comme nous l'avons vu précédemment, la stabilité structurale est un des paramètres clé pour qualifier le sol de son bon état. Depuis de nombreuses années, cet indicateur fait l'objet de recherches en constante évolution. Comme nous le montre le **tableau 4**, les caractéristiques de la méthode (le type d'échantillon, le traitement utilisé ainsi que l'expression des résultats) diffèrent selon les auteurs et selon les années de publications.

En 2001, un article a été publié dans le journal *Catena* s'intitulant: « Aggregate stability kit for soil quality assessments » (**Seybold et Herrick 2001**) et ayant pour but la présentation d'un test simple et accessible à tous pour quantifier les agrégats stables d'un échantillon de sol sous l'effet d'une agitation dans de l'eau. Ces deux scientifiques ont été inspirés par la méthode proposée par Kemper et Rosenau en 1986 (**Tab.4**).

Selon la plateforme Web of Science, cet article a été cité 33 fois depuis sa publication (**Fig.8**). On observe une hausse générale des articles mentionnant la méthode de Seybold et Herrick. Celle-ci a même été citée en 2019, ce qui prouve que la notion de stabilité structurale est un thème en développement et que cette méthode reçoit un intérêt particulier de la part des scientifiques. Cette information nous renseigne également sur la notoriété des auteurs. Si nous analysons encore plus en détails ces citations, nous pouvons observer que les thèmes principaux des publications citant l'article de Seybold et Herrick sont : les sciences du sol et les sciences de l'environnement (**Fig.9**).

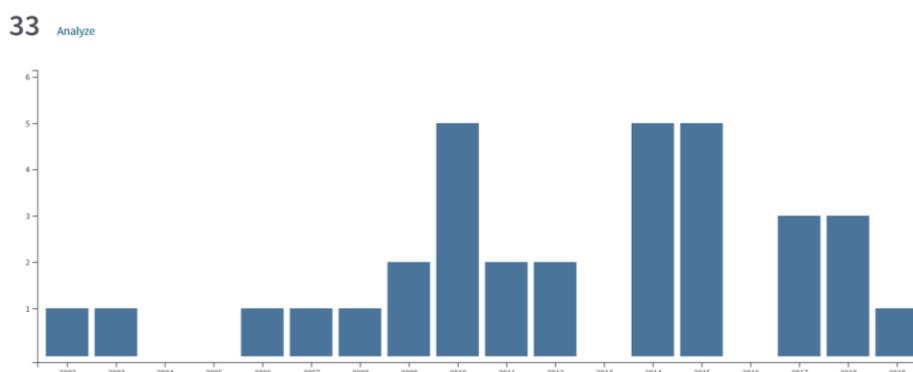


Figure 8: Nombre annuel d'articles scientifiques citant Seybold et Herrick
(Sources : Web of Science)

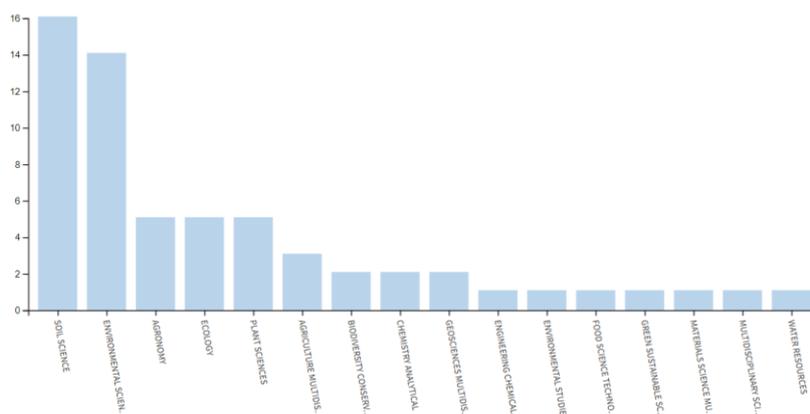


Figure 9: Thèmes des articles citant Seybold et Herrick
(Sources : Web of Science)

Ces informations sont intéressantes pour avoir un regard critique sur les expériences réalisées durant ce stage et sur les résultats obtenus. De plus, on pourrait imaginer qu'une analyse concrète de l'utilisation de cette méthode par les organismes techniques comme les Instituts techniques ou les chambres d'agriculture mais également les agriculteurs eux-mêmes seraient complémentaires de notre étude. Malheureusement, la durée de mon stage étant restreinte, la réalisation d'une enquête n'a pas été possible.

2. Les sols

Nous avons appliqué ce test en deux phases :

- la première phase de test a été réalisée sur un ensemble de sols connus et prélevés à divers endroits de France. Les objectifs de cette première phase de test étaient de se familiariser avec le matériel, avec le protocole mais également de pouvoir modifier les éléments nous paraissant inadéquats. De plus, les spécificités des sols ayant été étudiées avant le commencement de notre test, nos résultats pourront être comparés aux résultats des recherches précédentes. Cela nous permettra d'affirmer si notre test est fiable ou non. Vous pourrez trouver ci-dessous un tableau regroupant les caractéristiques des 10 sols étudiés, utiles pour analyser les résultats (**Tab. 5**). Les prélèvements ont été effectués entre la surface et 20 cm de profondeur avec une bêche classique. Chaque échantillon a ensuite été tamisé à 2 mm pour séparer les éléments grossiers (supérieurs à 2 mm) des éléments fins (inférieurs à 2 mm).

Nom des échantillons	Lieux de prélèvement	Type de sol	Particularité	Texture*	Matière organique (en g/kg)*	Sables grossiers (entre 0,20 et 2 mm) en %*
Crau	Plaine de la Crau (13)	Sol de prairie irriguée	Pâturage de moutons	Limoneux	55,1	23
Lysimètre	Avignon (84)	Sol de grandes cultures	INRA	Limono-argileux	26,8	0
Tavel	Tavel (30)	Sol de forêt de pin	/	Sableux	5,35	59
Auzeville	Auzeville (31)	Sol de grandes cultures	INRA	Limoneux	13,4	17
Lautaret	Col du Lautaret (05)	Sol de prairie alpine	Pâturage de moutons et passage de chamois et de cervidés	Limono-argileux	16,05	4
Ambel	Ambel (38)	Sol de prairie en moyenne montagne	Sol prélevé sur une taupinière	/	/	/
Theix	Theix (63)	Sol de prairie non cultivé en moyenne montagne	/	Sablo-argileux	60,3	43
Montpellier	Montpellier (34)	Sol de prairie cultivée	/	Limono-Argileux	27,3	9
Lusignan	Lusignan (86)	Sol de prairie cultivée	/	Limoneux	17,7	13
Rhizophymic	Clermont-Ferrand (63)	Sol de culture	INRA Sol de Limagne noire, volcanique	/	/	/

* les données de texture, de matières organiques et de sables grossiers ont été extraites de précédentes recherches

***Tableau 5:** Caractéristiques des sols de la phase 1*

- la deuxième phase avait pour but d'appliquer ce test à une étude en cours mais également de pouvoir analyser la répétabilité de notre test en testant un sol de la phase 1 et en comparant les résultats obtenus. Cette phase a été réalisée sur 3 types de sols à proximité de la ville de Maubec (38) provenant de la même parcelle et un sol déjà testé dans la première phase : le sol Lysimètre. Les caractéristiques pédologiques de la parcelle sont représentées dans le **tableau 6**.

Nom des échantillons	Lieux de prélèvement	Type de sol	Particularité	Texture*	Matière organique (en g/kg)*	Sables grossiers (entre 0,20 et 2 mm) en %*
Sol Kernza Sol Seigle Sol Bulk	Maubec (38)	Sol de culture	/	Limono-sableux	24,17	32

Tableau 6: Caractéristiques de la parcelle (sol Kernza, sol Seigle et sol Bulk) de la phase 2

Les particularités des sols sont les suivantes :

- le sol K pour Kernza : c'est un sol cultivé avec des céréales pérennes semées en automne 2017. Les céréales pérennes sont des céréales pouvant être productives durant plusieurs années consécutives sans être re-semées annuellement.
- le sol S pour Seigle : c'est un sol cultivé avec des semences du seigle (production annuelle)
- le sol B pour Bulk : c'est un sol moyen c'est-à-dire un sol prélevé dans la même parcelle agricole que les deux sols précédents mais dans des zones où on a évité la couverture végétale et les racines



Photographie de Samuel Le-Gall

Pour chaque sol, 6 échantillons ont été prélevés sur une distance de 50 mètres (6 répliques pour aborder l'hétérogénéité de la parcelle étudiée). Les noms des échantillons sont composés de la première lettre du type de sol et du numéro de l'échantillonnage (ex. K4 pour l'échantillon 4 du sol Kernza).

Pour les sols K et S, les plantes et le sol ont été prélevés à l'aide d'une triandine sur une profondeur de 20 cm et emportés avec le système racinaire. En laboratoire, les plantes ont été légèrement secouées pour récupérer le sol non lié aux racines. Ensuite, les agrégats les plus retenus aux racines ont été prélevés à la main. Un tamisage a été réalisé avec un tamis de 3 mm.

Pour le sol B, le prélèvement a également été fait avec une triandine. Cependant, l'échantillonnage n'a pas été réalisé correctement : le sol B a été prélevé entre les deux cultures. Ce sol ne sera donc pas comparable aux sols Kernza et Seigle.

3. Matériels et méthodes

En s'inspirant du mode opératoire décrit dans l'article de Seybold et Herrick (2001), nous avons établi notre propre protocole en prenant soin que le matériel utilisé soit adapté au test (**Annexe VI : matériels nécessaires**). La photographie ci-dessous représente le système utilisé pour effectuer la première phase du test de stabilité des agrégats.



Des modifications ont été apportées tout au long des phases de mise au point pour obtenir le protocole final suivant :

- **Préparation**

Prélever un échantillon de sol. S'il est humide, le laisser sécher à l'air libre pendant 48 heures ou dans une étuve à 60°C pendant 24 heures.

Tamiser l'échantillon de sol à l'aide d'un tamis de maille 2 mm pour éliminer les graviers, les débris végétaux ou les autres macrostructures et ainsi homogénéiser l'ensemble.

Procéder à la pesée des « paniers » sans sol (4 répliques par échantillon de sol).

- **Application (Annexe VII : les étapes du test en photo)**

Déposer une masse déterminée de sol tamisé dans chacun des « paniers », ici 5 grammes.

Procéder à la pesée des « paniers » avec sol (P1). Attention : les poussières inférieures à 0,25 mm restant sur la balance sont comprises dans la pesée mais sont nettoyées par la suite donc perdues (**Annexe VII : photo 1**).

Placer des chiffons sur une surface plane imperméable ou un bac à fond plat. Veiller à mettre une épaisseur suffisante de chiffons. Verser 500 mL sur les chiffons afin de les imprégner d'eau.

Placer les « paniers » sur les chiffons saturés pour que les échantillons absorbent l'eau par capillarité pendant environ 10 minutes (la disposition plane des chiffons permettra d'avoir une ré-humidification homogène des échantillons). Observer les échantillons à l'œil nu et veiller à saturer en eau tous les échantillons si cela n'est pas fait à l'aide d'une pissette (**Annexe VII : photo 2**).

Remarque : pour une étude plus approfondie, il peut être envisageable d'utiliser une table à suction. Cependant, le test devient plus complexe et beaucoup moins accessible.

Placer les « paniers » dans les emplacements appropriés de la plaque-test en suivant le plan d'organisation suivant (**Fig.10**) (**Annexe VII : photo 3**) :

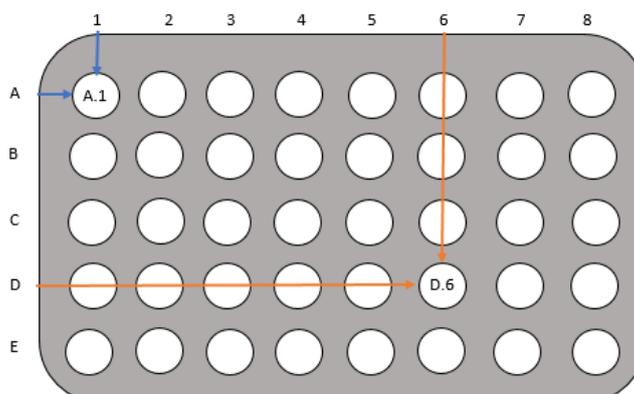


Figure 10: Plan d'organisation des échantillons sur la plaque-test

Remplir un bac avec de l'eau déminéralisée en faisant en sorte que l'échantillon de sol, quand il sera immergé, sera à 2 cm sous la surface de l'eau (agitation entre les 2 marquages au feutre du bac). Attention : l'eau doit être à la même température que le sol (le bac sera donc rempli d'eau et sera installé dans la même pièce que les échantillons au moins une heure auparavant).

Procéder à l'immersion de la plaque et des « paniers ». Faire 30 cycles de montées-descentes par minutes pendant 3 minutes, sans sortir les échantillons de l'eau, avec une amplitude de course verticale de 1,5 cm (**Annexe VII : photo 4**).

Sortir les « paniers » de l'eau et les déposer sur un chiffon/sopalin sec pendant 5 minutes. Vider l'eau du bac contenant la matière en suspension puis rincer (**Annexe VII : photo 6**).

Mettre les « paniers » dans une étuve, à 60°C pendant 24 heures (**Annexe VII : photo 7**). On considère que les agrégats restants dans les «paniers» sont stables (car résistants à l'immersion dans l'eau) (**Annexe VII : photo 5**).

Procéder à la pesée des « paniers » contenant les agrégats stables secs (P2).

Placer un chiffon imprégné d'eau déminéralisée (en versant 500 mL d'eau) sur une surface plane et y placer les paniers pour ré-humidifier les échantillons de sol pendant environ 10 minutes. Puis, remplir à nouveau le bac d'eau en ajoutant le dispersant (solution de Calgon à 10g/L) (**Annexe VII : photo 8**).

Plonger les « paniers » dans le bac pendant 5 minutes en effectuant les cycles de 2 secondes. Le Calgon permet de disperser les particules de sol pour ne conserver au-dessus du tamis que les particules de sables supérieures à 0.25 mm.

Rincer les « paniers » au jet d'eau (débit du mitigeur : 0,05 L/s) pendant 5 secondes (**Annexe VII : photo 9**). Les mettre sur un chiffon sec, puis à l'étuve à 60°C pendant 24 heures.

Procéder à la pesée des « paniers » contenant les particules de sable (P3) (**Annexe VII : photo 10**).

4. Résultats et discussion

La quantification du pourcentage d'agrégats stables à l'eau (Water Stable Aggregates WSA) se fait grâce à la formule suivante :

$$\text{Pourcentage d'agrégat stable à l'eau} = \frac{(P2 - P3)}{(P1 - P3)} \times 100$$

On calcule ensuite les coefficients de variation (CV) représentant la dispersion relative de la mesure en effectuant le rapport entre l'écart-type et la moyenne des réplifications des échantillons de sol. Le résultat est multiplié par 100 pour obtenir un pourcentage illustrant ainsi la dispersion des données autour de la moyenne. Ces coefficients de variation ne doivent pas excéder un taux de 5% (ce chiffre a été choisi en fonction de la publication de référence).

Les résultats obtenus pourront être comparés aux résultats décrits dans l'article de Seybold et Herrick (**Tab.7**) :

Soil Series	Textural class	n	Sieving method	WSA (%)	CV (%)	Corrected for sand	
						WSA (%)	CV (%)
Philomath	Silty clay loam	4	Manual	94 (4.1) ^a	4.4	88 (4.2)	4.7
			Mechanized	96 (2.3)	2.4	88 (2.1)	2.4
Cullen	Clay loam	4	Manual	78 (3.8)	4.8	69 (3.4)	4.8
			Mechanized	81 (3.3)	4.1	70 (3.3)	4.8
Belen	Sandy clay loam	4	Manual	60 (1.8)	3.0	56 (1.9)	3.4
			Mechanized	57 (4.3)	7.5	53 (4.4)	8.3
Capac	Loam	4	Manual	71 (1.8)	2.6	61 (2.0)	3.2
			Mechanized	76 (1.5)	2.0	62 (1.0)	1.6
Plainfield	Sandy loam	4	Manual	80 (4.1)	6.1	40 (3.3)	9.0
			Mechanized	85 (1.5)	1.8	41 (2.6)	6.4
Harrisburg	Loamy sand	4	Manual	52 (6.6)	12.7	32 (2.4)	7.5
			Mechanized	66 (2.9)	4.4	33 (1.4)	4.3

^aNumbers in parentheses are standard deviations.

Tableau 7: Comparaison du pourcentage d'agrégats stables à l'eau (WSA) à 0,25 mm des méthodes manuelles et des méthodes mécanisées (d'après Seybold et Herrick, 2001)

• Test 1

Les échantillons de la phase 1 ont été placés de façon aléatoire sur la plaque-test avec 4 réplifications par échantillon (**Tab.8**) :

	1	2	3	4	5	6	7	8
A	Crau	Crau	Crau	Crau	Lysimètre	Lysimètre	Lysimètre	Lysimètre
B	Tavel	Tavel	Tavel	Tavel	Auzeville	Auzeville	Auzeville	Auzeville
C	Lautaret	Lautaret	Lautaret	Lautaret	Ambel	Ambel	Ambel	Ambel
D	Theix	Theix	Theix	Theix	Montpellier	Montpellier	Montpellier	Montpellier
E	Lusignan	Lusignan	Lusignan	Lusignan	Rhizophymic	Rhizophymic	Rhizophymic	Rhizophymic

Tableau 8: Plan de plaque de la phase 1

Après trois jours de manipulation, nous obtenons enfin les premiers résultats (**Tab.9 et Tab.10**) :

En %	1	2	3	4	5	6	7	8
A	57	49	54	52	42	38	42	38
B	25	22	24	19	50	52	51	56
C	49	54	54	52	45	50	60	50
D	61	54	48	49	43	49	42	42
E	50	50	48	52	64	59	65	52

Tableau 9: Pourcentages d'agrégats stables à l'eau (avec correction sable). Les valeurs sont classées selon un gradient de couleur : du rouge (valeurs les plus fortes) au vert (valeurs les plus faibles).

En %	Moyenne
Crau	53
Lysimètre	40
Tavel	23
Auzeville	52
Lautaret	52
Ambel	51
Theix	53
Montpellier	44
Lusignan	50
Rhizophymic	60

Tableau 10: Valeurs moyennes selon l'échantillon de sol testé

En comparant nos résultats avec ceux de la publication et en mettant en parallèle les caractéristiques des différents échantillons de sols, nous pouvons faire les remarques suivantes:

- de manière générale, nos résultats sont plus faibles que dans la publication de Seybold et Herrick (2001). Prenons l'exemple d'un sol ayant une texture limoneuse (« loam »): Seybold et Herrick obtiennent un WSA moyen de 61% (avec correction sable). De notre côté, les sols ayant une texture limoneuse sont le sol Crau, le sol Auzeville et le sol Lusignan. Or, tous les trois possèdent un pourcentage d'agrégats stables à l'eau au alentour de 50% (avec correction sable). On peut donc se demander si notre test est réellement comparable à celui de Seybold et Herrick.
- le sol détenant le plus fort pourcentage d'agrégats stables est le sol « Rhizophymic » (sol de Limagne noire) avec une moyenne de 60%
- en revanche, le sol détenant la plus faible stabilité structurale est le sol de Tavel. Ce résultat est cohérent avec les caractéristiques granulométriques du sol : plus un sol a de sables et moins il sera stable (**Université de Nice 2008**). Le sol de Tavel possède 59% de sables grossiers (**Tab.5**).
- les sols Lysimètre et Montpellier présentent une WSA moyenne similaire. En regardant la texture, la quantité de matière organique et le taux de sables grossiers, on se rend compte que ces paramètres sont également similaires.
- les sols Crau, Auzeville, Lautaret, Ambel, Theix et Lusignan possèdent des moyennes semblables. Nous nous rendons compte qu'à l'exception d'Auzeville, tous ces échantillons proviennent de prairies. Les sols de prairies sont riches en matières organiques constituant ainsi un lien plus solide entre les particules de sol et assurant une stabilité structurale plus forte (**Leclerc 2012**).

Pour se rendre compte de la dispersion des échantillons de sol, nous pouvons analyser leurs coefficients de variation (**Tab.11**) :

En %	Moyenne	Ecart-type	CV
Crau	53	3,4	6
Lysimètre	40	2,3	6
Tavel	23	2,6	12
Auzeville	52	2,6	5
Lautaret	52	2,4	5
Ambel	51	6,3	12
Theix	53	5,9	11
Montpellier	44	3,4	8
Lusignan	50	1,6	3
Rhizophymic	60	5,9	10

Tableau 11: Moyennes, écart-types et coefficient de variation pour chaque sol

Nous pouvons faire la remarque suivante : certains coefficients de variation sont acceptables (inférieur ou égal à 5%) comme pour les sols Auzeville, Lautaret et Lusignan. Nous remarquons que ces échantillons possèdent une texture limoneuse. D'autre part, nous observons également que les échantillons ayant des coefficients de variations inférieurs à 10% (Crau, Lysimètre et Montpellier) possèdent un taux plus ou moins forts de limons. Nous pouvons donc faire l'hypothèse que le pourcentage de limons dans un sol serait en lien avec leur non dispersivité.

• **Test 2 : sol Kernza, sol Seigle et sol Bulk**

Les échantillons Kernza, Seigle et Bulk ont également été placés de façon aléatoire (**Tab.12**) sur deux plaques-test différentes avec le sol Lysimètre testé sur chacune des plaques (résultats traités dans la partie suivante) :

	1	2	3	4	5	6	7	8
A	S2	S2	S2	S2	S4	S4	S4	S4
B	K4	K4	K4	K4	B5	B5	B5	B5
C	S1	S1	S1	S1	K1	K1	K1	K1
D	B4	B4	B4	B4	K3	K3	K3	K3
E	S3	S3	S3	S3	Lysimètre	Lysimètre	Lysimètre	Lysimètre

	1	2	3	4	5	6	7	8
A	B3	B3	B3	B3	B2	B2	B2	B2
B	B6	B6	B6	B6	S6	S6	S6	S6
C	K6	K6	K6	K6	K2	K2	K2	K2
D	S5	S5	S5	S5	K5	K5	K5	K5
E	B1	B1	B1	B1	Lysimètre	Lysimètre	Lysimètre	Lysimètre

Tableau 12: Plan de plaque de la phase 2

Après plusieurs jours de manipulation, nous obtenons les résultats suivants (**Tab.13** et **Tab.14**) :

En %	1	2	3	4	5	6	7	8
A	63	49	59	49	71	73	76	77
B	66	59	61	53	68	64	66	65
C	69	62	46	41	52	48	50	59
D	77	71	70	60	64	52	59	69
E	54	64	64	48	19	29	25	27

En %	1	2	3	4	5	6	7	8
A	90	89	83	80	85	90	90	90
B	88	86	82	76	68	79	69	76
C	62	63	53	51	52	52	61	66
D	65	59	63	54	55	55	60	70
E	69	70	64	58	23	17	26	47

Tableau 13: Pourcentages d'agrégats stables à l'eau (avec correction sable). Les valeurs sont classées selon un gradient de couleur : du rouge (valeurs les plus fortes) au vert (valeurs les plus faibles).

Tableau 14: Valeurs moyennes selon l'échantillon de sol testé

Nom échantillons	Moyenne	Nom échantillons	Moyenne	Nom échantillons	Moyenne
S1	54%	K1	52%	B1	65%
S1					
S1					
S1					
S2	55%	K2	57%	B2	89%
S2					
S2					
S2					
S3	58%	K3	61%	B3	86%
S3					
S3					
S3					
S4	74%	K4	60%	B4	69%
S4					
S4					
S4					
S5	60%	K5	60%	B5	66%
S5					
S5					
S5					
S6	73%	K6	57%	B6	83%
S6					
S6					
S6					
Seigle	62%	Kernza	58%	Bulk	76%

Nous pouvons faire les remarques et les hypothèses suivantes :

- l'échantillon 2 du sol Bulk (B2) possède le plus grand pourcentage d'agrégats stables à l'eau soit 89%
- a contrario, l'échantillon 1 du sol Kernza possède le plus faible pourcentage d'agrégats stables à l'eau soit 52%
- le sol Bulk possède un WSA moyen élevé (76%). Nous pouvons faire l'hypothèse que de par les conditions d'échantillonnage particulières, ces résultats sont probablement faussés. Cependant, nous pouvons nous interroger sur le fait que ce sol moins influencé par les racines, se compose d'une structure pédologique plus stable que le sol Seigle ou le sol Kernza. A ce jour, je ne parviens pas à expliquer de façon scientifique une telle observation.
- de manière générale, le sol Kernza possède une stabilité structurale plus faible que le sol Seigle (58% contre 62%). Ces résultats me paraissent contradictoires. En effet, selon l'écologiste Paul Hawken, « Alors que les racines du blé annuel ne dépassent pas 1 mètre, celles du Kernza, épaisses et solides, peuvent descendre à 3 mètres, captant bien plus de carbone atmosphérique et l'enterrant en profondeur. » (**Hawken 2018**). Il compare donc une plante de production annuelle (le blé) avec une plante pérenne (le Kernza). En examinant les photographies prises lors d'une visite sur le terrain, nous remarquons bien que les systèmes racinaires ne sont pas les mêmes et que les racines des plants de Kernza sont plus développées (**Annexe VIII**). Or, un système racinaire développé doit induire une stabilité structurale plus importante (**DUFÉY et al. 1986**). Ici, ce n'est pas le cas. Nous pouvons donc supposer que le test n'est pas réellement fiable ou qu'il possède des limites encore non connues.

Pour se rendre compte de la dispersion des échantillons de sol, nous pouvons analyser leurs coefficients de variation (**Tab.15**) :

En %	Moyenne	Ecart-type	CV		Moyenne	Ecart-type	CV		Moyenne	Ecart-type	CV
S1	54	13,4	25	K1	52	4,8	9	B1	65	5,3	8
S2	55	6,9	13	K2	57	6,9	12	B2	89	2,6	3
S3	58	7,7	13	K3	61	7,2	12	B3	86	4,5	5
S4	74	2,7	4	K4	60	5,2	9	B4	69	7,1	10
S5	60	4,7	8	K5	60	7,3	12	B5	66	1,8	3
S6	73	5,6	8	K6	57	6	11	B6	83	5,1	6

Tableau 15: Moyennes, écart-types et coefficient de variation pour chaque échantillon de sol

Nous pouvons faire les remarques suivantes :

- pour le sol rhizosphérique de la céréale Kernza, les coefficients de variation sont tous supérieurs à 5%, ce qui montre une grande variabilité des résultats. Cependant, les moyennes entre les répliques expérimentales en champ sont relativement homogènes et se regroupent au alentour de 60%.
- pour le sol rhizosphérique de la céréale Seigle, seul l'échantillon 4 sort du lot avec un coefficient de variation de 4%. En faisant abstraction de cet échantillon, nous pouvons voir un gradient décroissant de la WSA de l'échantillon 1 à l'échantillon 6.
- pour le sol « Bulk », les coefficients de variation sont assez hétérogènes. Cependant, si nous analysons les moyennes des répliques expérimentales en champ, nous pouvons voir deux groupes de valeurs : une moyenne au alentour de 65-70% et une moyenne au alentour de 85%. Ce qui induirait deux degrés de stabilité structurale dans une même parcelle. De par les conditions d'échantillonnage (sol prélevé entre deux cultures), nous pouvons faire l'hypothèse que les moyennes au alentour de 60% serait du sol Kernza.

• Le sol Lysimètre

Les emplacements des échantillons de sol Lysimètre sont décrits dans le **tableau 12**. Cependant, les résultats des tests ne peuvent être comparables car une modification majeure a été apportée entre la phase 1 et la phase 2. Cette modification est la suivante : la dimension du bac a été revue à la hausse car on pouvait constater un effet

« ventouse » lors de la réalisation des cycles de trempage. Cet effet observé a diminué lors du changement de bac. On pourrait faire l'hypothèse que ce phénomène expliquerait la différence de WSA entre la phase 1 et la phase 2.

Le **tableau 16** nous montre les résultats de la phase 1 et les résultats de la phase 2 du test de stabilité des agrégats concernant le sol Lysimètre :

En %	Moyenne	Ecart-type	CV
Lysimètre 1	40	2,2	6
Lysimètre 2.1	25	4,5	18
Lysimètre 2.2	28	13,4	48

Tableau 16: Résultats des tests pour le sol Lysimètre

Nous pouvons faire les observations et les remarques suivantes :

- les résultats de la phase 2 sont plus faibles que ceux de la phase 1 (de 12 à 15 points de différence). Cependant, les pourcentages d'agrégats stables à l'eau pour les plaques 2.1 et 2.2 sont similaires (25% contre 28%). Il serait donc très intéressant de re-tester les sols de la phase 1 avec les changements opérés lors de la phase 2 pour réellement établir si le test est répétable ou non.
- en revanche, les coefficients de variation sont très élevés (18% pour 2.1 et 48% pour 2.2)
- si nous comparons le sol de Maubec (sol Kernza, Seigle et Bulk) avec le sol Lysimètre, nous constatons que ces sols possèdent approximativement la même teneur en matière organique (24,17 vs 26,80 g/kg). Cependant, le sol de Maubec possède un taux de sables grossiers plus important (32% contre 0% pour le sol Lysimètre). A première vue, on pourrait imaginer que le sol Lysimètre serait plus stable que le sol de Maubec (le sable étant un paramètre négatif pour la stabilité structurale d'un sol). Mais lorsque nous comparons les résultats trouvés, nous constatons que le sol de Maubec possède une stabilité structurale beaucoup plus forte. Nous pouvons alors nous demander si d'autres paramètres seraient pris en compte pour déterminer la stabilité structurale d'un sol comme la nature des matières organiques par exemple. Nous pouvons également nous demander si le test est réellement fiable.

5. Conclusion sur le test de stabilité structurale

Ce test de stabilité des agrégats soumis à l'action de l'eau est encore à ces débuts et de nombreux questionnements sont encore à éclaircir. Voici quelques exemples de questions que l'on peut se poser à ce stade :

- Pourquoi le sol Auzeville, sol de grande culture, possède une moyenne similaire aux sols de prairies tels que les sols Crau, Lautaret, Ambel, Theix et Lusignan ?
- Pourquoi les coefficients de variation sont-ils si élevés ? Par quels moyens peut-on les diminuer ?
- Est-ce que la quantité de sol analysée est suffisante ? Une plus grande quantité de sol étudiée pourrait-elle faire diminuer la variabilité de ce test ?
- La quantité de Calgon mise dans l'eau est-elle suffisante ?
- Comment fiabiliser ce test ?
- Est-ce que la réalisation de certaines manipulations via des méthodes mécaniques pourrait faire diminuer la variabilité des résultats ?

De nombreux résultats apparaissent incohérents et surprenants vis-à-vis des caractéristiques des sols. Cependant, ce test n'a vu le jour qu'il y a quelques mois et il est normal qu'il n'aboutisse pas du premier coup. De multiples mois de recherche sont encore à prévoir pour finaliser un test fiable. La réalisation de tests statistiques pourrait être envisagée pour valider la méthode.

IV. Conclusion

Les indicateurs étudiés dans ce rapport sont les indicateurs principaux spécifiques aux horizons d'un sol. D'autres indicateurs, moins spécifiques aux sols mais tout de même très intéressants à étudier, peuvent nous donner une idée sur la qualité d'un sol. Par exemple, nous pouvons lister :

- les escargots qui sont des bio-indicateurs de plus en plus étudiés. Des travaux actuels ont permis de démontrer que les escargots seraient des indicateurs biologiques plus efficaces que les vers de terre en nous renseignant à la fois sur la pollution du sol mais également sur celle de l'air (**Naim s. d.**).
- les plantes dites indicatrices nous révèlent de nombreuses informations sur la qualité d'un sol. En fonction du type de plante présente sur le terrain, on pourra caractériser certains paramètres pédologiques. Voici deux exemples connus pouvant illustrer mes propos : les fougères aigles sont des indicateurs de l'acidité du sol et les orties nous témoignent de la richesse en nitrates d'un sol (**Richard 2016**).

Pour déterminer la qualité globale d'un sol, l'analyse d'un seul indicateur n'est pas pertinente. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, le sol est un milieu très complexe en constante interaction avec l'écosystème environnant. Il est donc parfaitement logique de raisonner à plus grande échelle en se penchant sur plusieurs indicateurs à la fois. Tel est le principe du set d'indicateurs fonctionnels bord de champ « Biofunctool » qui comprend les indicateurs et tests suivants (**Brauman et Thoumazeau 2018**):

- les bio-indicateurs : le carbone labile (Permanganate Oxidizable Carbon), l'activité mésofaune (Lamina), l'activité microbienne (SituResp), l'activité macrofaune et mésofaune (analyse visuelle de la décomposition d'une feuille), l'activité des vers de terre (analyse des turricules)
- les indicateurs chimiques : l'azote minimale biodisponible (NminSoil), la membrane échangeuse d'ions (AEMN03)
- les indicateurs physiques : l'infiltration du sol (Beerkan), l'évaluation visuelle de la structure du sol (test bêche), la stabilité des agrégats à l'eau (AggSurf et AggSoil)

Il est également important de noter que chaque test peut être modifié selon les envies des chercheurs. En effet, un test non normé ayant pour objectif de caractériser la stabilité structurale d'un sol peut différer d'un autre test ayant le même but par le matériel utilisé ou le protocole suivi.

Cette recherche bibliographique n'est donc pas terminée de par le nombre croissant de nouveaux tests et de par l'engouement des chercheurs à vouloir apprécier la qualité d'un sol. La perspective d'une continuité à ce stage me paraît fortement envisageable.

V. Bibliographie

- Albouy, et Bonotaux. 2018. *Vous reprendrez bien un ver...de terre ! Petit guide de la vie souterraine*. Larousse.
- « Analyse complète du sol ». s. d. Agrifournitures.fr. Consulté le 20 août 2019. <https://agrifournitures.fr/analyse-et-correction-des-sols/10964-analyse-du-sol-complete-agriculture.html>.
- Anderson, J.P.E., et K.H. Domsch. 1978. « A Physiological Method for the Quantitative Measurement of Microbial Biomass in Soils ». *Soil Biology and Biochemistry* 10 (3): 215-21. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8).
- Baize, D. 2016. *Petit lexique de pédologie*. Quae. INRA.
- Balloy. 2017. « Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols ».
- Blanchart, Eric, G G Brown, S S Chernyanskii, P Deleporte, Christian Feller, et F Goulet. 2005. « Perception et popularité des vers de terre avant et après Darwin ». *Etude et Gestion des Sols*, 8.
- Brauman, A, et A Thoumazeau. 2018. « Comment mesurer la santé des sols ».
- Brauman, Alain, Alexis Thoumazeau, Sambo Pheap, Koy Ra, Soulikone Chaivanhna, Meesan Keo U Don, Clara Lefevre, et al. 2018. « Functional Indicator of Soil Ecosystem (FIRST): Investing in SMART Tools to Assess Soil Biological Functioning », 4.
- « chimie du sol : définition de chimie du sol et synonymes de chimie du sol (français) ». s. d. Consulté le 7 août 2019. <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/chimie%20du%20sol/fr-fr/>.

- Creamer, Stone, Berry, et Kuiper. 2015. « Measuring respiration profiles of soil microbial communities across Europe using MicroResp™ method.pdf ».
- Dubus. 2013. « Déterminez simplement la nature du sol de votre jardin ». *Le Blog du Jardinier Bio* (blog). 2 mars 2013. <https://www.un-jardin-bio.com/connaître-sol/>.
- Dufey, Halen, et Frankart. 1986. « Evolution de la stabilité structurale du sol sous l'influence des racines de trèfle (*Trifolium pratense* L.) et de ray-grass (*Lolium multiflorum* Lmk.). Observations pendant et après culture ». *Agronomie* 6 (9): 811-17.
- « Faune du Sol et des Litières - Animaux ». s. d. Consulté le 29 juillet 2019. http://circa13.free.fr/Z_Faune_du_Sol/pages/Animaux.html.
- Gauthier, Mélanie. s. d. « La stabilité des agrégats », 1.
- Gobat, Jean-Michel, Michel Aragno, et Willy Matthey. 2010. *Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols*. PPUR Presses polytechniques.
- Hawken, Paul. 2018. *Drawdown. Comment inverser le cours du réchauffement planétaire*. Actes Sud Nature.
- INRA. 2017. « Nos repères ». 2017. <http://institut.inra.fr%2FReperes>.
- ISO 23611-1:2018, *Qualité du sol — Prélèvement des invertébrés du sol — Partie 1: Tri manuel et extraction des vers de terre*. 2018. <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:23611:-1:ed-2:v1:fr>.
- ISO 10930:2012, *Qualité du sol — Mesure de la stabilité d'agrégats de sols soumis à l'action de l'eau*. s. d. Consulté le 20 août 2019. <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:10930:ed-1:v1:fr>.
- ISO 14240-1:1997, *Qualité du sol — Détermination de la biomasse microbienne du sol — Partie 1: Méthode par respiration induite par le substrat*. s. d. Consulté le 20 août 2019. <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:14240:-1:ed-1:v1:fr>.
- Le Bissonnais, et 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*, 13.
- Le Bissonnais, Y. 2016. « Aggregate Stability and Assessment of Soil Crustability and Erodibility: I. Theory and Methodology: Aggregate Stability and Assessment of Soil Crustability and Erodibility ». *European Journal of Soil Science* 67 (1): 11-21. https://doi.org/10.1111/ejss.4_12311.
- Leclerc. 2012. « Rôles des matières organiques dans le sol », 4.
- Lozet, et Mathieu. 1997. *Dictionnaire de Science du Sol*. Lavoisier.
- Marina Le Guédard, Cécile Villenave, Olivier Faure, Jean-François Nau, Benjamin Pauget, et Guénola Péres. 2017. « Les bio-indicateurs de l'état des sols : principe et exemples d'utilisation », 30.
- Métral. 2007. « Etude de la diversité de la pédofaune dans les systèmes agroforestiers ». <http://www.agroforesterie.fr/CASDAR/20062008/rapports0608/R63.pdf>.
- Naim, P. s. d. « Les escargots, bio-indicateurs de la qualité des sols ». Plateforme d'accès. Institut Français de l'éducation. Consulté le 23 août 2019. <http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/biodiversite/dossiers-thematiques/biosurveillance-et-bioindicateurs/les-escargots-bio-indicateurs-de-la-qualite-des-sols>.
- NRCS. 2010. « Soil Glue ». <https://agriculture-de-conservation.com/sites/agriculture-de-conservation.com/IMG/pdf/cohesion-sol.pdf>.
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. 2015. « Que font les microorganismes du sol? », 4.
- Peres, Cluzeau, Hotte, et Delaveau. s. d. « Description de l'indicateur : les vers de terre ».
- Permaculture Design. 2016. « Tester son sol : comment définir la structure de son sol sans matériel spécifique ».
- « QualiAgro - Propriétés chimiques du sol ». s. d. Consulté le 7 août 2019. <https://www6.inra.fr/qualiagro/Efficacite-Agronomique/Proprietes-chimiques-du-sol>.
- Richard, P. 2016. « Plantes indicatrices, témoins de la qualité d'un sol ». *Jardins de France*, 2016. <https://www.jardinsdefrance.org/plantes-indicatrices-temoins-de-la-qualite-dun-sol/>.
- Schwartz, D. s. d. « physique du sol ».
- Seybold, et Herrick. 2001. « Aggregate stability kit for soil quality assessments », 9.
- « Sols et Définitions – AFES – Association Française pour l'Étude du Sol ». s. d. Consulté le 25 juillet 2019. <https://www.afes.fr/sols-et-definitions/>.
- Université de Nice. 2008. « La dégradation des sols dans le monde ». 2008. <http://unt.unice.fr/uoh/degisol/fertilite-physique.php>.
- Waligora. 2017. « Analyse rapide de la qualité d'un sol », 2017, Agronomie, écologie et innovation édition.

VI. Annexes

- **Annexe I : Extrait du fichier Excel synthétisant les différents indicateurs de la qualité d'un sol et leurs tests associés**

qualite_des_sols.xlsx - Microsoft Excel

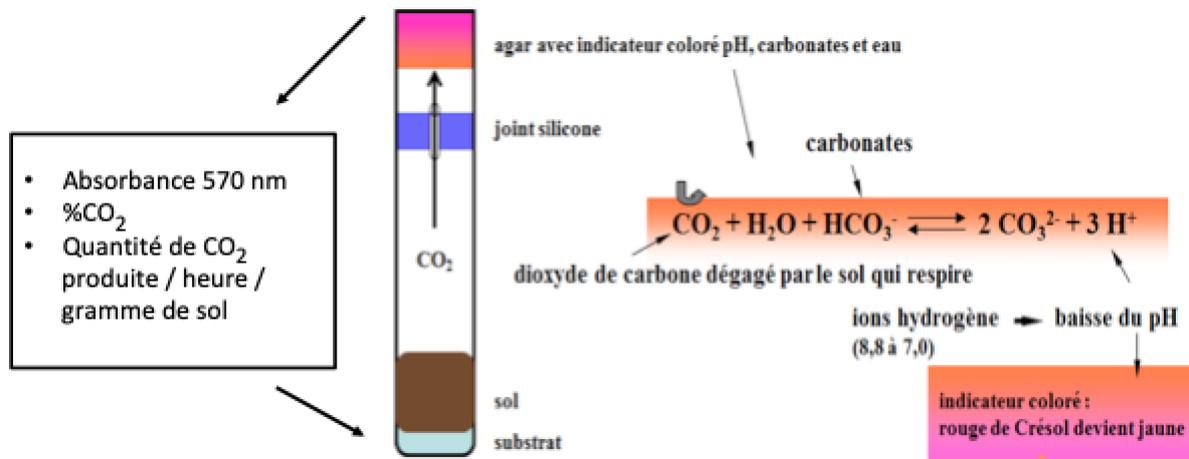
Indicateurs biologiques		Indicateurs physiques		Indicateurs chimiques	
Indicateurs faunistiques	Indicateur de l'état et de la stabilité structurale	Multi-indicateurs			
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la macrofaune : les vers de terre (ou Méthode Bouché)	Test bêche	Kit d'analyse chimique (site Agrifournitures)			Biofunctional
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la mésofaune : les micro-arthropodes (extracteur de MacFadyen)	Profil cultural	Indicateur de pH			
Méthode d'échantillonnage et d'analyse des macro-invertébrés (ou méthode TSBF) + Méthode IndVal	Mini profil 3D	Test au bicarbonate de soude			
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la macro et mésofaune (extracteur de Berlese Tullgren)	Slake test	Test au vinaigre			
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la mésofaune : les enchytréides (entonnoir à eau)	Test de Le Bissonnais	Méthode du chou rouge			
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la nématofaune (par élutriation)	Kit de stabilité des agrégats	Méthode de détermination du pH			
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la nématofaune (méthode de Cobb ou méthode des seaux)	Indicateur de texture	Indicateur optique			
Méthode d'échantillonnage et d'analyse de la nématofaune (méthode des 2 fioles de	Test du boudin	Spectroscopie Proche Infrarouge (SPIR ou NIRS)			
		Spectroscopie Moyen Infrarouge (SMIR ou MIRS)			

LISTE DES INDICATEURS

Prêt

- **Annexe II : le MicroResp™ (extrait de mon rapport de stage UEO – Licence 3)**

- **Principe de la technique en image**



- **Mesure de la microrespirométrie des échantillons (technique MicroResp™)**

Les mesures se font en laboratoire et nécessitent des préparations antérieures. Il est nécessaire de préparer : les microplaques de détection (une semaine avant les mesures), les substrats et les microplaques à puits profonds.

- **Les microplaques de détection**

Les microplaques de détection sont constituées d'un gel dont la couleur change selon la quantité de CO₂ dégagé par les puits contenant le sol et les substrats. La détection est basée sur une méthode colorimétrique : le CO₂ dégagé par les microorganismes du sol est capté par le gel de détection contenant un indicateur de pH (rouge de crésol). Ces microplaques doivent être préparées une semaine avant utilisation et doivent être utilisées dans les trois semaines qui suivent. Les plaques doivent être conservées à l'obscurité dans un récipient étanche contenant de la chaux sodée (élimination du CO₂) dont l'atmosphère est humide pour éviter la dessiccation du gel des plaques.

- **Les substrats**

Les substrats sont : le glucose, le tréhalose, la glycine et le malate (forme basique de l'acide malique).

Les substrats sont préparés à la concentration de 120g/L. Les substrats dissous dans de l'eau distillée doivent être conservés à 4°C pendant 15 jours au maximum. Les substrats, avant contact avec le sol, doivent être mis à température du bio-essai. Dans chaque puits, 25 µl de substrat sera mis.

- **Préparation des microplaques à puits profonds**

1. Peser la microplaque puits profonds à vide.
2. Chaque échantillon de sol est ensuite distribué volumétriquement de façon homogène dans les puits : poser la microplaque puits profonds sur une cale. Placer le dispositif de distribution avec sa plaque de fond sur la microplaque puits profonds. Déposer les agrégats de sol sur le système (après avoir préalablement enlevé les restes de racines ou débris végétaux encore éventuellement présents). « Araser » délicatement les trous du distributeur (avec la main gantée). Une fois l'échantillon de sol distribué, faire glisser la plaque de fond pour permettre au sol de tomber dans chaque puits profonds de la microplaque.
3. Peser à nouveau la microplaque après chaque distribution d'échantillon de sol, afin de connaître précisément le poids moyen du sol par puits.

4. Il est possible de mesurer sur une même microplaque la respiration de plusieurs échantillons de sol en remplissant une partie de la microplaque seulement. Placer du parafilm sur une partie de la microplaque à puits profonds et procéder comme indiqué ci-dessus.
5. Mettre les substrats à l'aide d'une pipette multidistribution

○ **Mesure de respiration du sol: montage**

Les mesures de densité optique sont réalisées à l'aide d'un spectrophotomètre lecteur de microplaques 96 puits, à une longueur d'onde de 570 nm. Le lecteur est adossé à un ordinateur possédant un logiciel adapté pour afficher les résultats. Deux mesures sont réalisées, la première (ti) avant incubation avec la microplaque à puits profonds et la seconde (tf) 4 à 6h après incubation sur la microplaque à puits profonds remplies de sol.

1. Réaliser la première lecture (ti) de la microplaque et sauvegarder le résultat
2. Placer le joint sur la plaque de détection
3. Placer la microplaque de détection avec son joint retournée sur la microplaque à puits profonds.
4. Vérifier que le joint soit correctement positionné dans chaque puits (pour éviter les risques de fuite)
5. Placer le montage sous un système de presse
6. Noter le temps (ti)
7. Laisser incuber quelques heures à l'abri de la lumière et à une température stable (ici 23°C).
8. Après le temps d'incubation, faire une deuxième lecture (tf) de la microplaque à 570 nm
9. Une feuille Excel déjà établie permet de transformer les valeurs de DO en quantité de C-CO₂ dégagé par les microorganismes, par gramme de sol sec et par heure.

Annexe III : exemple de résultats d'un kit d'analyse chimique

XXXXXXXXXX

février 2018

N° 15_4 XXXXXXXXXXXX

février 2018

N° 15_4 XXXXXXXXXXXX

Commentaires de l'analyse
 Appréciation générale : Des améliorations possibles.

Etat d'acidité : Basique avec un sol moyennement calcaire.

Etat organique : De niveau moyen à évolution moyenne. Apporter un amendement d'origine végétale afin d'augmenter le niveau d'humus.

Etat minéral : De niveau moyen, à maintenir. Phosphore à débloquer.

Etat physique : Texture de type argileux-sableux. Attention aux risques d'excès d'eau. Vérifier le drainage.

Plan de fertilisation Kg/ha sol 3000 T ou 2000 m3	Base 0,50% N minéralisé	P205	K2O	MgO	CaO
Réserves ou Déficients Kg/ha	11	390	90	0	16280
Action annuelle de redressement ou de minoration en Kg/ha	-11	0	-9	0	-1928
Blé Tendre Pailles enlevées Rendement: 70 Qtx/ha					
Equilibre de fertilisation de la culture	2,5	1	1,5	0,2	oligos éléments
Besoin annuel de la culture en Kg/ha	210	84	128	18	Cu, S, Mn
Plan 1er année	186	84	117	18	
Tournesol Rendement: 40 Qtx/ha					
Equilibre de fertilisation de la culture	2,5	1	0,6	0,3	oligos éléments
Besoin annuel de la culture en Kg/ha	132	62	32	18	B,S
Plan 2ieme année	121	62	23	18	
Mais grain uniquement Rendement: 100 Qtx/ha					
Equilibre de fertilisation de la culture	2,6	1	0,7	0,2	oligos éléments
Besoin annuel de la culture en Kg/ha	189	74	53	15	S, Zn, Mn
Plan 3ieme année	178	74	44	15	

Schématisation

CEC: Taux de saturation:

pH:

Etat organique: Azote organique, Matière organique = humus.

Etat minéral: N, P, K, Ca, Mg, S, Na, NH4+, NO3-, CO3 2-, SO4 2-.

Interprétations - conseils

Faible capacité d'échange en minéraux. Fractionner les apports d'engrais ainsi que l'irrigation. Largement saturée par le calcium.

Sol fortement basique. Fortes basicités potentielle. Moyennement calcaire. Attention, risque important de blocage d'éléments nutritifs avec des chloroses possibles.

Faible. A redresser pour accroître le niveau d'humus. Un peu faible. La fertilité organique est limitée. La minéralisation naturelle est un peu faible. Evolution moyenne de la matière organique. Réaliser du travail du sol pour oxygéner l'horizon concerné. Très faible activité microbienne.

Disponibilité de minéraux dans la solution du sol correcte. R = 390 Kg/ha Largement pourvu. R = 90 Kg/ha Bien pourvu. R = 0 Kg/ha Pourvu. Equilibré. R = 16280 Kg/ha Largement pourvu. D = 77 Kg/ha Moyennement pourvu. R = 4 Kg/ha Bien pourvu. R = 3 Kg/ha Bien pourvu. D = 0 Kg/ha Limite basse. R = 0 Kg/ha Bien pourvu.

Eléments	Résultat	Teneurs souhaitables	Interprétations - conseils
CEC (meq/kg) (valeurs de référence à minéral)	66,48	90	Faible capacité d'échange en minéraux. Fractionner les apports d'engrais ainsi que l'irrigation.
Saturation (%)	>100	50	Largement saturée par le calcium.
pH eau	8,33	6,6 - 7,1	Sol fortement basique.
pH kcal acidité de réserve	7,77	6,1 - 6,6	Fortes basicités potentielle.
Calcaire total (g/Kg)	78,15		Moyennement calcaire.
Calcaire actif (g/Kg)	45,40		Attention, risque important de blocage d'éléments nutritifs avec des chloroses possibles.
Matières organiques (g/Kg)	16,03	20 - 25	Faible. A redresser pour accroître le niveau d'humus.
Azote N organique (g/Kg)	0,72	0,78 - 1,16	Un peu faible. La fertilité organique est limitée. La minéralisation naturelle est un peu faible.
CIN (C org / N org)	12,94	9 - 11	Evolution moyenne de la matière organique. Réaliser du travail du sol pour oxygéner l'horizon concerné.
IAM (teneur fractionnée microbienne)	3	12 - 18	Très faible activité microbienne.
Conductivité (mS/cm)	0,13	0,06 - 0,12	Disponibilité de minéraux dans la solution du sol correcte.
Phosphore P205 Joret (g/Kg)	0,28	0,12 - 0,15	R = 390 Kg/ha Largement pourvu.
Potassium K2O (g/Kg)	0,20	0,13 - 0,17	R = 90 Kg/ha Bien pourvu.
Magnésium MgO (g/Kg)	0,12	0,10 - 0,13	R = 0 Kg/ha Pourvu.
K2O/MgO	1,67	1,00 - 3,00	Equilibré.
Calcium CaO (g/Kg)	9,00	1,89 - 2,56	R = 16280 Kg/ha Largement pourvu.
Fer (mg/Kg)	28,50	15 - 90	D = 77 Kg/ha Moyennement pourvu.
Cuivre (mg/Kg)	2,50	0,80 - 1,20	R = 4 Kg/ha Bien pourvu.
Zinc (mg/Kg)	4,90	2,80 - 3,30	R = 3 Kg/ha Bien pourvu.
Manganèse (mg/Kg)	4,90	5,50 - 10	D = 0 Kg/ha Limite basse.
Bore (mg/Kg)	1,43	0,60 - 1,60	R = 0 Kg/ha Bien pourvu.

Eléments	K2O/MgO	CaO/MgO	Blocage P/Fh	IAM	C/N	Cu /MO(%)	P205/ Zn
Résultats	1,67	75,00	45,00	3	12,94	1,56	26,53
Optimum	1 à 3	15 à 25	0 à 30	12 à 18	9 à 11	0,2 à 0,5	20 à 50
Remarques	Equilibre	Déséquilibré	Fort	Faible niveau	Fort	Déséquilibré	Equilibré

Produit de la société (joint avec le manuel de l'utilisateur) sur une échelle montrant les teneurs souhaitables (intervalle de 10% au total par ex).

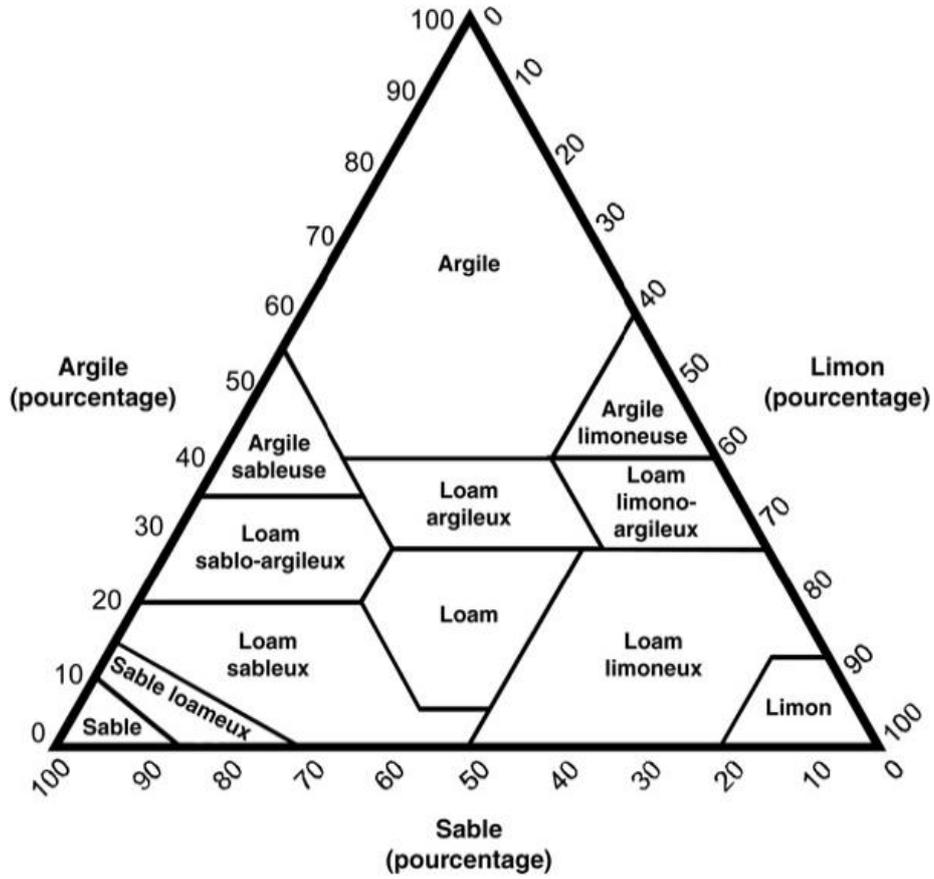
Le Responsable du Laboratoire

Base Bire fine : 3000 T/ha soit 20 cm de profondeur

légende

- **Annexe IV : triangles des texture**

Sources : http://www.omafra.gov.on.ca/CropOp/fr/general_agronomics/soil_management/soil_texture.html



• Annexe V : protocole de la méthode de Le Bissonais

Préparation de l'échantillon

Après prélèvement au champ dans des conditions d'humidité modérées, par exemple les conditions permettant la préparation des lits de semence, l'échantillon doit être ramené au laboratoire dans une boîte rigide et rapidement mis à sécher à l'air dans une atmosphère tempérée et ventilée. Durant cette période les plus grosses mottes peuvent être périodiquement brisées à la main pour produire, dans les conditions d'humidité optimales, le maximum d'agrégats de taille millimétrique. L'échantillon est ensuite passé au tamis et les agrégats de 3 à 5 mm sont sélectionnés pour les tests. Juste avant le test les agrégats sont mis à l'étuve à 40°C pendant 24 h pour supprimer d'éventuelles variations d'humidité et uniformiser les conditions de traitement.

Traitement 1 : humectation rapide par immersion

Ce traitement permet de tester le comportement de matériaux secs soumis à des humectations brutales, du type irrigation par submersion, ou des pluies intenses (orages de printemps et été), bien que dans ce dernier cas le choc des gouttes joue également un rôle.

- Peser 5 g d'agrégats de 3-5 mm (poids initial),
- Verser 50 ml d'eau permutée dans un bécher,
- Verser les agrégats dans le bécher,
- Laisser reposer 10 mn (observation visuelle de l'éclatement),
- Évacuer l'excès d'eau (par pipetage),
- Transférer les agrégats sur un tamis de 50 µm immergé dans de l'éthanol (en s'aidant d'une pissette d'éthanol).

Traitement 2 : humectation lente par capillarité

Ce traitement permet de tester le comportement de matériaux secs ou peu humides soumis à des pluies modérées. Il est moins destructif que l'humectation rapide et permet donc de discriminer des sols très peu stables.

- Peser 5 g d'agrégats de 3-5 mm (poids initial),
- Disposer les agrégats sur un papier "filtre" de type kleenex deux épaisseurs posé sur une table à succion avec une dépression de 3 cm,
- Attendre la réhumectation des agrégats par capillarité (au

moins 30 mn),

- Transférer les agrégats sur le tamis de 50 µm immergé dans l'éthanol (en s'aidant d'une pissette d'éthanol).

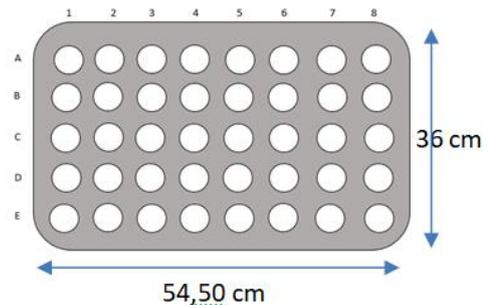
Traitement 3 : désagrégation mécanique par agitation après réhumectation

Ce traitement permet de tester le comportement de matériaux humides (périodes hivernales humides). La réhumectation préalable a pour objectif de tester la cohésion des matériaux à l'état humide indépendamment de l'éclatement. Cette réhumectation sans éclatement peut être réalisée soit par réhumectation sous vide soit par l'utilisation d'un liquide non polaire et miscible à l'eau. L'éthanol convient très bien dans ce cas (Hélin *et al.*, 1958).

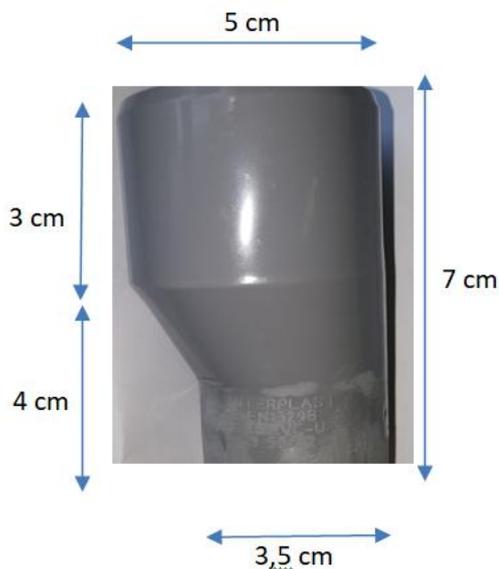
- Immerger les agrégats dans l'éthanol pendant 30 mn,
- Évacuer l'excès d'éthanol,
- Verser 50 ml d'eau permutée dans un erlenmeyer,
- Transférer les agrégats dans l'erlenmeyer (en s'aidant d'une pissette d'eau permutée),
- Ajuster le niveau d'eau permutée à 250 ml (en versant avec la pissette sur le bord de l'erlenmeyer),
- Agiter manuellement l'erlenmeyer en effectuant 10 retournements (on peut envisager de réaliser cette opération mécaniquement avec un agitateur adapté),
- Laisser reposer 30 mn. (observation visuelle de la décantation),
- Évacuer l'excès d'eau (par pipetage),
- Transférer les agrégats sur le tamis de 50 µm immergé dans l'éthanol (en s'aidant de la pissette d'éthanol).

• **Annexe VI : matériels nécessaires (extrait du protocole INRA)**

- Un tamis de maille 2 mm
- Une balance de laboratoire
- Des chiffons ou papier absorbant
- De l'eau déminéralisée
- Un chronomètre
- Une plaque-test en PVC pouvant contenir 40 paniers et ayant des poignées



- Des « paniers » de test en PVC (disposant d'une toile métallique de maille 0,25 mm collée à leur extrémité inférieure) Remarque : utilisation de colle Epoxy



- Un grand bac pouvant recevoir la plaque-test et disposant d'un marquage indiquant la hauteur d'eau à atteindre lors du remplissage
Attention : le bac doit être beaucoup plus grand que la plaque-test pour éviter l'effet ventouse ou l'effet de succion.
- Une étuve

• Annexe VII : les étapes du test en photo



Photo 1



Photo 2



Photo 3



Photo 4



Photo 5



Photo 6



Photo 7



Photo 8



Photo 9



Photo 10

Annexe VII :



Système racinaire d'un plant de Kernza (Photographie de Samuel Le-Gall)



Système racinaire d'un plant de Seigle (Photographie de Samuel Le-Gall)