



Parc
naturel
régional
Pyrénées
Ariégeoises


RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*

 L'INSTITUT
agro Montpellier

Protocoles et fiches de terrain

Etat des lieux et suivi de parcelles de forêt

Projet étudiants 2023



Auteurs :

Étudiants de l'Institut Agro de Montpellier

BOUCHER Jade
CAMPAGNE Emilie
FOUQUE Léna
GUILLAUME Doriane
LEMOINE Hugo
MASSON Lucille
SANCHEZ Léa
ZHANG Lorie

Contacts:

lucille.masson@supagro.fr
leasanchez.sa@gmail.com

Commanditaire :

HEMERYCK Raphaële, chargée de projet
"Forêt et changements climatiques" au
PNR ariégeois



Le climat change, adaptons-nous
avec la nature

Table des matières

Avant-propos	2
1. Méthode d'échantillonnage	2
2. Conceptions des protocoles - Etat des lieux et suivi des parcelles	3
3. Prélèvement de sol	7
3.1. Quantité de sol	7
3.2. Description du prélèvement de carottes de sol	8
4. Indicateurs physiques	8
4.1. Stabilité des agrégats	8
4.2. Masse volumique apparente (MVA)	13
4.3. Beerkan	16
4.4. Compaction	19
5. Indicateurs chimiques	22
5.1. pH et conductivité électrique	22
6. Indicateurs biologiques	27
6.1. Lombrics (Moutarde)	27
6.2. Facteur d'élanement et chablis	32
6.3. Litière	37
6.4. POXC (permanganate-oxidizable carbon)	40
6.5. SituResp (Respiration basale)	47
6.6. Perte au feu	52
6.7. Bait lamina	56
6.8. Test du slip	61
7. Etude de la biodiversité	64
7.1. Barber	64
8. Bibliographie	67

Avant-propos

Ce document a pour objectif de recenser les protocoles qui ont été mis en place. Ces derniers ont pour objectif la réalisation d'un état des lieux du sol de la parcelle étudiée ainsi que son suivi dans le temps dans un contexte de changement climatique.

Les protocoles sont accompagnés de fiches de relevés sur le terrain correspondantes et au besoin modifiables.

1. Méthode d'échantillonnage

La méthode d'échantillonnage est spécifique à chaque protocole. Nous pouvons cependant la résumer comme suit.

- **Général :**

La méthode d'échantillonnage choisie consiste à positionner sur la parcelle un minimum de trois aires d'expérimentation. Celles-ci sont choisies de manière à représenter la potentielle variabilité intra-parcellaire du sol. Les aires doivent être réparties sur l'ensemble de la parcelle.

Une attention particulière est portée sur le piétinement de ces aires d'expérimentation, car plusieurs expériences nécessitent un sol intact.

- **Protocoles nécessitant une analyse d'un ou plusieurs horizons de sol :**

Nombre de points de prélèvement : 3 minimum, 1 par aire d'expérimentation

Moyen de prélèvement : Tarière de 1,10 m de longueur

Description de la méthode : Nous conseillons, à horizon égal, de rassembler l'ensemble des points de prélèvement afin de les homogénéiser. Si les différences entre les points de prélèvements sont trop marquées, il est préférable de les analyser seuls.

Protocoles concernés : pH et Conductivité électrique, Nitrate et Ammonium, Perte au feu

- **Autres protocoles :**

Stabilité des agrégats, Masse volumique apparente, Beerkan, Compaction, Lombric, Litière, POXC, SituResp, Bait Lamina, Test du slip, Barber : ces protocoles ont une méthode d'échantillonnage (de sol ou autre) particulière.

Il est nécessaire de les mettre en place dans chaque aire d'expérimentation (soit un minimum de 3 répliques par protocole).

- **Facteur d'élançement/Chablis :**

Ces deux protocoles sont à mettre en place sur l'ensemble de la parcelle.

2. Conceptions des protocoles - Etat des lieux et suivi des parcelles

Le suivi de l'impact du changement climatique et la caractérisation des parcelles de forêt peuvent être réalisés au travers de divers indicateurs que l'on peut catégoriser en tant qu'indicateurs physiques, chimiques, biologiques ou de biodiversité. Ces indicateurs apportent des informations complémentaires. Cependant, le coût et le temps alloué à la mise en place de chacun d'eux est variable. Afin d'apporter une aide dans le choix des indicateurs pour le suivi de l'impact du changement climatique, un tableau comparatif des protocoles associés à ces indicateurs a été produit (**Tableau 1**).

2.1. Le changement climatique en Midi-Pyrénées

Le changement climatique se traduit en Midi-Pyrénées principalement par une augmentation de la température (de 0,3 °C par décennie en moyenne) dont les conséquences principales sont un assèchement du sol et une accentuation de l'intensité des sécheresses. Les prévisions pour les décennies à venir se divisent en plusieurs scénarios (Agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse aire métropolitaine, 2017) :

- un où la température se stabilise ;
- un autre plus extrême prévoit une augmentation de 4 °C à l'horizon 2071-2100, avec des saisons plus marquées : une période sèche qui s'allonge et une période humide qui se raccourcit.

Les variations de précipitations sur les Pyrénées sont à considérer avec prudence : certains affirment qu'aucune différence n'est observée (Agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse aire métropolitaine, 2017) tandis que d'autres observent une diminution des précipitations (OPCC, 2018). Les modèles prévoient une diminution de la pluviométrie et une intensification des événements pluvieux.

2.2. Hypothèses concernant l'impact du changement climatique sur les indicateurs étudiés

L'impact du changement climatique sur l'activité biologique du sol ne semble pas encore faire preuve de consensus par la communauté scientifique (Allen et al., 2011; Calvet et Raoul, 2013). Cependant, le suivi de ces indicateurs est jugé très pertinent, car l'habitat de certaines espèces sera modifié selon les prévisions du changement climatique dans la région. L'activité biologique du sol pourrait donc être impactée.

Le pH est également un indicateur intéressant à suivre. Selon les prévisions du changement climatique, les épisodes de sécheresses impacteront notamment la ressource en eau pour les végétaux, qui produiront alors moins de matière organique, et par conséquent moins de minéraux mobilisables par les végétaux eux-mêmes. L'état de la matière organique, la disponibilité en minéraux et le cycle du carbone seront donc probablement impactés, ce qui affectera alors le pH (Allen et al., 2011). Selon ce même principe, nous pouvons également supposer que la CE (Conductivité Électrique) et la CEC (Capacité d'Echange Cationique) seront impactées par le changement climatique. Certains modèles de prédictions du changement climatique prévoient une augmentation des aléas

climatiques tels que les sécheresses (principalement) et les fortes pluies. Les chênes sessiles présentent une résistance plus importante à la sécheresse, en comparaison avec les chênes pédonculés. Il pourrait y avoir une différence des facteurs d'élancement entre les deux espèces de chêne (plus élevées pour le chêne pédonculé). Mais cette hypothèse est à prendre avec précaution et ne sera pas perceptible avant plusieurs décennies.

Certains indicateurs sont pertinents pour l'établissement d'un état 0 de la parcelle. Cependant, ils n'évoluent pas, ou que très peu dans le temps et sous l'influence du changement climatique. C'est le cas de la masse volumique apparente, la compaction, et l'état structurel du sol, qui sont essentiellement dépendants de la gestion des parcelles (Allen et al., 2011).

Tableau 1 : Comparaison des différents indicateurs pouvant être suivis dans le cadre de l'étude de l'impact du changement climatique sur les forêts du PNR des Pyrénées ariégeoises

Indicateurs		Intérêts	Temps	Coûts		Labo PRO	Etat 0
Type	Nom de l'expérience		Pour 1 éch	Pour 1 éch	Matériel		
Physique	Stabilité des agrégats	Vers de terre; résistance à l'érosion; diffusion des gaz et infiltration de l'eau	20 min	€			
	Masse volumique apparente (MVA)	Tassement; circulation des gaz; Impact des vers de terre et machines	45 min	€€	Etuve	?	X
	Beerkan	Vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol; effets du tassement; érosion	2h30	€			
	Compaction	Tassement	10 min	€€	Pénétrömètre	?	
	Texture	Détermination de la réserve utile	/	€€€		X	X
Chimique	pH (bandelette)	Mesurer l'acidité du sol; peut donner des indications sur l'activité microbienne	15 min	€			X
	pH (pH-mètre)		45 min	€€	pH-mètre	?	X
	CE	Indicateur de la quantité d'eau et de nutriments	45 min	€€	Sonde conductimétrique	?	X
	CEC	Fertilité du sol (capacité de rétention des nutriments)	/	€€€		X	
	Ions Mg ²⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺	Quantification des ions	/	€€€		X	
	Ions Al ³⁺	Quantification des ions Al ³⁺	/	€€€		X	
Biologique	Litière	Vie biologique et cycle du carbone	25 min	€€	Balance de précision; étuve	?	
	POXC	Carbone labile du sol	2 h	€€	Spectrophotomètre; étuve	?	
	SituResp	Activité microbienne	24h30	€€	Spectrophotomètre	?	
	Perte au feu	Quantification de la matière organique	67 h	€€	Four de poterie ou four à moufle	X	
	Bait Lamina	Présence d'insectes et micro-organismes du sol	40 min	€	Languettes lamina en PVC		
	Test du Slip	Activité biologique des sols	20 min	€			
	POM/MAOM	Quantification de la matière organique du sol liée et seule	/	€€€		X	
	Lombrics (Moutarde)	Présence de vers de terre; structure du sol	2h30	€			
	Facteur d'élanement; chablis	Capacité du peuplement pour protéger le sol; stabilité du sol	30 min	€			
Biodiversité	Barber	Vie biologique	4h30	€			

Légende :

La catégorie "Etat 0" fait référence aux indicateurs seulement mobilisés lors de l'établissement de l'état 0. Leur suivi n'est pas pertinent dans le temps.

Pour la catégorie "Coûts pour 1 échantillon" :

€ : Peu cher qui ne demande pas de matériels de précision et de mesure

€€ : Besoin de matériels de précision et de mesure

€€€ : Expérience à faire faire par un laboratoire

Pour la catégorie "Labo pro" :

X : Expérience à faire par un laboratoire professionnel (protocole non explicité ci-dessous)

? : Expérience à faire seul uniquement si le matériel de précision et de mesure (ex : spectrophotomètre, balance de précision, étuve) est utilisé fréquemment, sinon faire faire par un laboratoire

3. Prélèvement de sol

3.1. Quantité de sol

Selon les protocoles et la nécessité des laboratoire privés, il sera important de prélever une quantité de sol conséquente.

Tableau 2 : Masse de sol nécessaire par protocole

Protocoles	Masse de sol nécessaire
Laboratoires privés	Minimum de 300 g par horizon + 400 g par horizon supérieur (pour POM/MAOM)
Stabilité des agrégats	/
Masse volumique apparente	3 cylindres de 100 cm ³
Beerkan	/
Compaction	/
Lombrics	/
Facteur d'élanement/chablis	/
pH/CE	10 g par horizon
Litière	/
POXC	10 g par point de prélèvement (0 à 10 cm)
SituResp	400 g par point de prélèvement (0 à 10 cm)
Perte au feu	10 g par horizon
Bait Lamina	/
Test du slip	/
Barber	/
TOTAL MINIMUM à prélever	320 g par horizon + 500 g pour chaque 1er horizon + 410 g par point de prélèvement

Note : une marge d'erreur est prise en compte dans le calcul des masses nécessaires.

3.2. Description du prélèvement de carottes de sol

Cette description est à destination des protocoles nécessitant du sol provenant de tous les horizons ou d'horizons précis.

Matériel :

- Tarière
- Gouttière
- Couteau

Une fois les aires d'expérimentation déterminées (cf : Méthode d'échantillonnage), il faut définir les points de prélèvement de sol. A l'aide d'une tarière et du couteau (qui sert à enlever une partie de la terre, potentiellement contaminée par le sol des horizons supérieurs), des carottes de sol sont sorties et successivement déposées dans une gouttière. Cela permettra la détermination des différents horizons. Une fois fait, les horizons sont séparés et nommés.

Idéalement pour l'état des lieux, un prélèvement jusqu'à la roche mère devrait être effectué.

4. Indicateurs physiques

4.1. Stabilité des agrégats

4.1.1. Objectif(s)

La caractérisation de la stabilité des agrégats permet de mettre en évidence la résistance à l'érosion hydrique et éolienne des particules. Cette stabilité dépend en partie des organismes vivants du sol qui, par leur digestion, agrègent les particules organiques et minérales. La stabilité a une influence sur les échanges gazeux et hydriques, la température du sol ou encore la pénétration des racines.

Dans ce protocole, la stabilité des agrégats dans l'eau repose sur un score allant de 1 à 6. Ce score permet de mettre en évidence la réaction du sol face à une action physique telle que la pluie ou un excès d'eau (érosion hydrique).

4.1.2. Matériel

Terrain :

- Truelle
- 1 set de tamis 2,5 cm de diamètre et d'ouverture de 1,5 mm numérotés de 1 à 18
- 2 plateaux de 30x45x5 cm
- Chronomètre
- Bidon d'eau d'1 L

4.1.3. Protocole

Terrain :

1. Collecter 6 agrégats minimum de 6 à 8 mm de diamètre à deux profondeurs différentes (0-2 cm pour les agrégats de la surface et 2-10 cm pour les agrégats du sol).
2. Recommencer à 2 autres points d'échantillonnage afin de récolter en tout 18 agrégats.
3. Disposer tous les agrégats dans des tamis numérotés de 1 à 18.
4. Sécher les agrégats à l'air libre pendant 1 à 2 heures.
5. Remplir le plateau d'eau à une hauteur de 2 cm.

Suivre les étapes suivantes :

Etape 1

1. À T=0 s : mettre le tamis 1 dans l'eau.
2. T=5 s : observer le tamis 1. Si l'agrégat reste entier ou est partiellement désagrégé (> 50%), pas de score. S'il est désagrégé à plus de 50 % attribuer un score de 1 (voir le tableau résultats).
3. À T=15 s : mettre le tamis 2.
4. À T=20 s : observer le tamis 2.
5. À T = 30 s : mettre le tamis 3 et revenir sur le tamis 1. Si plus de 50 % de l'agrégat s'est désagrégé, attribuer un score de 2.
6. Toutes les 15 s, continuer à déposer les autres agrégats et les observer.

Etape 2

1. Reprendre chaque tamis dans l'ordre.
2. A T = 5 min, agiter le premier tamis 5 fois dans l'eau (lever/baisser). Observer l'intégrité de l'agrégat et noter le score en fonction du pourcentage de sol qui est passé à travers le tamis (voir le tableau résultats).
3. Recommencer cette procédure en espaçant de 15 s chaque agrégat

Stabilité des agrégats - Terrain

Opérateur : Date : .../.../... Heure début : Heure fin :
Parcelle étudiée :

Point de prélèvement 1 - Coordonnée GPS :

Profondeur sol	Agrégat	Score
0-2 cm	1	
	2	
	3	
2-10 cm	4	
	5	
	6	

Point de prélèvement 2 - Coordonnée GPS :

Profondeur sol	Agrégat	Score
0-2 cm	7	
	8	
	9	
2-10 cm	10	
	11	
	12	

Point de prélèvement 3 - Coordonnée GPS :

Profondeur sol	Agrégat	Score
0-2 cm	13	
	14	
	15	
2-10 cm	16	
	17	
	18	

Point de prélèvement 4 - Coordonnée GPS :

Profondeur sol	Agrégat	Score
0-2 cm	13	
	14	
	15	
2-10 cm	16	
	17	
	18	

Moyenne des scores

Profondeur sol	Score moyen
0-2 cm	
2-10 cm	

4.1.4. Exploitation des résultats

Un sol avec des moyennes de score élevé met en évidence une stabilité des agrégats importante.

4.1.5. Temps

Etape	Temps pour 1 échantillon (3 répliques)
Mise en place du protocole	20 min
<i>Total</i>	<i>20 min</i>

4.1.6. Référence

INTERREG IV et FEDER s.d.. Caractériser la stabilité structurale et la battance.

Ketterings, Q. M., Blair, J. M., & Marinissen, J. C. Y. (1997). Effects of earthworms on soil aggregate stability and carbon and nitrogen storage in a legume cover crop agroecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 29(3-4), 401-408.

Schrader, S., & Zhang, H. (1997). Earthworm casting: stabilization or destabilization of soil structure?. *Soil Biology and Biochemistry*, 29(3-4), 469-475

Singh, J., Schädler, M., Demetrio, W., Brown, G. G., & Eisenhauer, N. (2019). Climate change effects on earthworms-a review. *Soil organisms*, 91(3), 114.

4.2. Masse volumique apparente (MVA)

4.2.1. Objectif(s)

La densité apparente est la masse de sol présente dans un volume donné, exprimée en g/cm^3 en général. Il s'agit d'un indicateur de compactage du sol et donc de sa porosité. Le compactage du sol dépend d'un ensemble de facteurs et s'observe à l'aide de plusieurs indicateurs reliés indirectement entre eux. Un sol trop compact possède une faible porosité, l'eau s'infiltré mal et ruisselle en surface, ce qui entraîne une érosion de surface. Le compactage du sol est lié à la présence d'organismes tels que les vers de terre qui, en produisant des turricules et en créant un réseau de galeries souterraines, participent à l'aération et à la structuration du sol.

4.2.2. Matériel

Terrain :

- 3 cylindres en inox de 100 cm^3 (A adapter selon la taille des cylindres utilisés)
- Maillet ou marteau
- Bêche
- Balance
- Sacs plastiques

Laboratoire :

- Étuve de $105 \text{ }^\circ\text{C}$

4.2.3. Protocole

Terrain :

1. Creuser un trou dans le sol, de manière à avoir une des parois parfaitement verticale.
2. À 10 cm du sol, enfoncer un cylindre horizontalement en le frappant avec un marteau.
3. Extraire le cylindre sans perdre de terre. Enlever l'excédent qui dépasse du cylindre si nécessaire.
4. Introduire la terre dans un sac plastique.

Laboratoire :

1. Sécher la terre dans une étuve à $105 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 24 heures.
2. Peser la masse sèche (M_s).

Masse volumique: $\rho_a = M_s/100 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

Masse volumique apparente

TERRAIN :

Opérateur : Date : .../.../... Heure début : Heure fin : Parcelle étudiée :

(!) pour chaque horizon, verser en commun les 3 cylindres dans le même sac

	1	2	3	4	5
Code de prélèvement					
Coordonnées GPS					

LABORATOIRE :

Opérateur : Date : .../.../... Heure début : Heure fin :

(!) temps de séchage

Temps de séchage :

Point de prélèvement	Code de prélèvement	Tamisage	Masse sèche totale	Masse terre fine	Masse terre fine après séchage à 105°C	Masse fragments grossiers	Masse volumique apparente	Remarques

4.2.4. Exploitation des résultats

L'analyse des résultats correspond à une comparaison entre les différents relevés sur une parcelle à un temps donné mais également à l'observation de l'évolution de cette masse volumique dans le temps. Il s'agit de mettre en relation les résultats avec les différents événements qui ont eu lieu dans le temps et dans l'espace sur la parcelle. Si la masse volumique augmente, cela traduit un compactage du sol.

Afin de faciliter l'analyse des résultats, des ordres de grandeur de référence peuvent être utilisés. Ainsi, un horizon de surface très organique aura une densité apparente très faible de l'ordre de $0,5 \text{ g/cm}^3$, un horizon minéral massif en profondeur aura une valeur de $2,2 \text{ g/cm}^3$ et un horizon minéral bien structuré aura une densité apparente de $1,3 \text{ g/cm}^3$.

4.2.5. Temps

Etape	Temps
Creuser le trou	5-15 min
Insérer les cylindres (x3 cylindres)	10 min
Récupérer la terre	10 min
Analyse en laboratoire et pesée	10 min
<i>Total</i>	<i>45 min</i>

4.2.6. Références

UNIL, Institut des dynamiques de la surface terrestre, s.d.. Détermination de la masse volumique apparente

4.3. Beerkan

4.3.1. Objectif(s)

Ce protocole vise à mesurer la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol jusqu'à la saturation de ce dernier. Cette méthode permet indirectement de modéliser la porosité ou bien de quantifier et localiser des zones de compaction. Ce test doit être fait sous la forme d'une comparaison dans le temps mais aussi dans l'espace : différentes zones dans une parcelle ou une même zone au fil du temps. Les informations fournies par ce test sur la porosité du sol seront à relier avec d'autres tests physiques, chimiques et biologiques.

4.3.2. Matériel

Terrain :

- 1 cylindre en PVC de 20 cm de diamètre
- 1 planche en bois
- 1 marteau
- 10 bouteilles d'eau de 310 mL
- 2 ou 3 grands bidons d'eau remplis à amener sur le terrain (5 L minimum)
- 1 chronomètre
- 2 sacs plastiques percés

4.3.3. Protocole

Terrain :

1. Placer le cylindre sur le sol et enlever la végétation éventuelle.
2. Placer si nécessaire un sac plastique percé pour éviter les éclaboussures lorsque l'eau est versée.
3. Verser la première bouteille d'eau et démarrer le chronomètre.
4. Noter le temps lorsque toute l'eau a été infiltrée et verser la bouteille suivante.
5. Continuer avec les autres bouteilles d'eau.
6. Arrêter l'expérience si le temps d'infiltration dépasse 30 minutes.

Beerkan - Terrain

Opérateur : Date : .../.../... Heure début : Heure fin :
Parcelle étudiée :

Verser la première bouteille d'eau de 310 mL dans le cylindre et commencer en même temps le chronométrage. Noter le temps au moment où la bouteille suivante est versée. Répéter la procédure jusqu'à ce que 10 bouteilles aient été versées. Si le temps d'infiltration devient trop important s'arrêter quand celui-ci a dépassé 30 minutes.

(!) Cette fiche ne concerne qu'un seul point de prélèvement, il est nécessaire de disposer d'autant de fiches que de points de prélèvement.

Bouteille # et volume	Temps test 1 (min et s)	Remarques
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

4.3.4. Exploitation des résultats

Pour l'exploitation des résultats, il va falloir tracer une courbe représentant le cumul des volumes d'eau versés en fonction des temps d'infiltration correspondants. Lorsque le régime d'infiltration devient stable, soit quand le régime devient permanent et que le sol est saturé en eau, la courbe prend une allure linéaire, et c'est à ce moment qu'il faut calculer la vitesse d'infiltration de l'eau avec la courbe.

Dans l'analyse des résultats, il faudra prendre en compte d'autres facteurs (biologiques, physiques et chimiques) pour avoir une vision globale du sol. On pourra simplement se rendre compte de l'évolution de la porosité du sol en fonction de la vitesse d'infiltration. En croisant ces informations avec les autres facteurs, on pourra comprendre ce qui a fait changer cette porosité.

4.3.5. Temps

Etape	Temps pour 1 échantillon (3 réplicas)
Préparation du matériel	30 min
Infiltration de l'eau	5-30 min (par réplica)
Réalisation des courbes	30 min
<i>Total</i>	<i>2h30</i>

4.3.6. Référence

N. Rakotondrazafy, (2020). BIOFUNCTOOL® Un set d'indicateurs pour évaluer la santé des sols, Beerkan : Infiltration de l'eau dans le sol, p. 26-28.

4.4. Compaction

4.4.1. Objectif(s)

Cette expérience permet d'observer le tassement du sol, ce qui donne des indications sur sa porosité. Le sol est formé d'agrégats, ce qui crée une structure stable avec une présence d'eau et d'air dans les espaces vides entre les agrégats. Une forte compaction limite cette présence d'espaces vides et augmente la densité apparente du sol, réduisant alors la perméabilité du sol à l'eau et à l'air. Le tassement peut donc avoir une forte conséquence sur l'accès des racines aux nutriments et à l'eau, et donc sur la croissance de la plante. De manière similaire, une diminution d'oxygène dans le sol va aussi modifier l'activité microbienne (ex : favorisation de la dénitrification par des processus anaérobies).

4.4.2. Matériel

Terrain :

Pénétrömètre (instrument de mesure mécanique qui permet de quantifier la compaction d'un sol en kg/cm^2)

4.4.3. Protocole

Terrain :

Planter le pénétrömètre doucement dans le sol et lire la valeur indiquée par l'aiguille.

Compaction/pénétromètre - Terrain

Opérateur : Date : .../.../... Heure début : Heure fin :
Parcelle étudiée :

Point	Code de mesure	Réplica	Mesures	Remarque

4.4.4. Exploitation des résultats

Comparer à la compaction mesurée précédemment. Une augmentation de la valeur mesurée indique une compaction du sol, possiblement dû à un tassement d'origine anthropique ou des phénomènes naturels. Il faut comparer la possible évolution des résultats avec les événements qui ont eu lieu dans le temps et dans l'espace sur la parcelle.

4.4.5. Temps

Etape	Temps pour 1 échantillon (3 répliques)
Mesure de la compaction	5 min
<i>Total</i>	<i>5 min</i>

4.4.6. Références

SDEC France, s.d.. Pénétrromètre manuel "Eijkelkamp", p65-66.

5. Indicateurs chimiques

5.1. pH et conductivité électrique

5.1.1. Objectif(s)

La mesure du pH et de la conductivité permet de connaître l'acidité du sol et sa concentration en ions conducteurs, et peut donner des indications sur l'activité microbienne et la teneur en nutriments du sol.

5.1.2. Matériel

Terrain :

- Bandelettes pH
- Tamis de 2 mm
- Balance de précision
- Spatule
- Eau déminéralisée
- Bécher 100 mL
- Éprouvette 50 mL

Laboratoire:

- Étuve de 30 °C
- pH-mètre et conductimètre
- Balance de précision
- Baguette en verre
- Solutions tampons pH4 et pH7
- Spatule
- Eau déminéralisée
- Agitateur magnétique et aimant
- Bécher 100 mL
- Éprouvette 50 mL
- Tamis de 2 mm

5.1.3. Protocole

Terrain :

1. Tamiser la terre au tamis de 2 mm.
2. Introduire 10 g de terre tamisée dans un bécher de 100 mL.
3. Ajouter 50 mL d'eau déminéralisée à l'aide d'une éprouvette.
4. Agiter énergiquement avec la spatule pendant quelques minutes.
5. Laisser reposer pendant une demi-heure.
6. Mesurer le pH en utilisant les bandelettes pH (voir notice) en faisant attention à ne pas toucher la boue au fond du bécher.

Laboratoire:

1. Sécher le sol à l'étuve, à 30 °C.
2. Tamiser la terre au tamis de 2 mm.
3. Introduire 10 g de terre tamisée dans un bécher de 100 mL.
4. Ajouter 50 mL d'eau déminéralisée à l'aide d'une éprouvette.
5. Agiter énergiquement avec un agitateur magnétique pendant quelques minutes.
6. Laisser reposer pendant une demi-heure. Pendant ce temps, étalonner le pH-mètre avec les solutions tampons pH4 et pH7.
7. Introduire les électrodes dans la suspension de sol sous agitation.
8. Lire les valeurs de pH et de conductivité lorsque les valeurs sont stabilisées.

H	Code de prélèvement	Réplica	Mesure du pH	CE	Remarques

H = Horizon concerné

5.1.4. Exploitation des résultats

Le pH du sol peut s'interpréter de la manière suivante :

Tableau 3 : Description de l'acidité des sols en fonction du pH

3,5 < pH < 4,5	Sols très acides
4,5 < pH < 6,5	Sols acides
6,5 < pH < 7,5	Sols neutres
7,5 < pH < 8,5	Sols basiques (généralement calcaires)
8,5 < pH < 10	Sols très basiques (généralement salés)

5.1.5. Temps

Etape		Temps pour 1 échantillon
Préparation échantillons	Prélèvement du sol	10 min
	Préparation du sol (tamiser, mettre en solution)	5 min
	Attente	30 min
Expérience sur le terrain	Test bandelettes de pH	1 min
Expérience en laboratoire	Préparation du matériel de laboratoire (étalonnage du pH-mètre et du conductimètre)	10 min
	Lecture des résultats	5 min
<i>Total</i>		<i>46 min sur le terrain 1 h en laboratoire</i>

Au total, si le sol possède 5 horizons, il faut répéter cette expérience 5 fois.

5.1.6. Référence

AFNOR, (1999). *Qualité des sols*, volumes 1 & 2, AFNOR éditions.

6. Indicateurs biologiques

6.1. Lombrics (Moutarde)

6.1.1. Objectif(s)

Ce protocole vise à se rendre compte de la qualité du sol et de sa fertilité. Il utilise les vers de terre comme témoins de cette fertilité. En effet ce sont des espèces architectes du sol, indispensables à la décomposition de la matière organique mais également à la structuration du sol.

Le protocole *Placettes vers de terre* a été proposé par l'Observatoire Agricole de la Biodiversité afin d'étudier la fertilité des sols. Il utilise la moutarde comme urticant pour faire remonter les lombrics à la surface. Elle contient de l'AITC (allylisothiocyanate) qui est un composé irritant.

6.1.2. Matériel

Terrain :

- Agitateur
- Coupe bordure
- Piquets (4 par m²)
- Ficelle et mètre
- Pince à épiler plate
- Bâche
- Bassine
- Eau
- Moutarde AMORA fine et forte (pots de 150 g)
- Arrosoir avec une pomme d'arrosage

6.1.3. Protocole

Terrain :

Il est conseillé de réaliser les prélèvements au printemps sur un sol humide mais ressuyé avec une température de l'air d'au moins 10 °C. De plus, il est préférable d'observer les vers avant toute intervention mécanique ou chimique sur la parcelle, ou 4 semaines après. Les interventions mécaniques affectent dans un premier temps l'habitat des vers (destruction des galeries, bouleversement de leur habitat) mais aussi les vers de terre en eux-mêmes (vers coupés en deux ou blessés).

1. Pour une placette (1 m²), mélanger 20 L d'eau avec 4 pots de moutarde (600 g).
Pour une parcelle (3 placettes), mélanger 60 L d'eau avec 12 pots (1 800 g).
Chaque placette se situe à au moins 6 mètres des autres sur la parcelle d'étude.
2. Choisir une zone homogène et représentative de la parcelle. Délimiter la zone d'étude avec les piquets et la ficelle.
3. Couper la végétation avec le coupe bordure.
4. Arroser la zone d'étude avec 10 L de mélange.

5. Récolter les lombrics qui remontent pendant 15 minutes.
6. Verser de nouveau 10 L si les lombrics ne sortent plus.
7. Etaler les vers de terre sur une bâche pour les identifier.
8. Rincer les lombrics dans l'eau et les remettre à 2 m de la zone d'étude.

Lombrics - Terrain

Opérateur : Date : .../.../... Heure début : Heure fin :

Parcelle étudiée :

T°C : Date de la dernière pluie : .../.../... Date de la dernière gelée : .../.../...

Pluie : nulle légère forte

Vent : nul léger fort

Ensoleillement : ensoleillé peu nuageux nuageux très couvert couvert

Humidité du sol : sec peu humide engorgé

EPIGES	Individus de petite taille (1 à 5 cm). Les espèces constituant ce groupe sont très colorées, souvent rouges bordeaux.
ANECIQUES A	Individus de grande taille (10 à 100 cm). Les vers de ce groupe ont une tête très colorée, le reste du corps devient de plus en plus pâle quand on s'approche de la queue. Le clitellum est plutôt orangé chez les anéciques à tête rouge alors qu'il est marron chez les « têtes noires ». Pour bien en observer la couleur, appuyer légèrement sur la tête du vers.
TETE NOIRE	
ENDOGES	Individus de petite à moyenne taille (3 à 20 cm). Dans ce groupe, les espèces sont faiblement colorées : rose, gris-clair ou verdâtre. On peut parfois voir le tube digestif par transparence.

	Zone 1	Zone 2	Zone 3
ADULTES			
JUVENILES			
ADULTES			
JUVENILES			
ADULTES			
JUVENILES			
ADULTES			
JUVENILES			

Individus non déterminés :

TOTAL PAR ZONE :

6.1.4. Exploitation des résultats

Tableau 4 : Potentialité d'accueil des vers de terre en fonction des caractéristiques pédo-climatiques

Caractéristiques pédo-climatiques	- Potentialité d'accueil des vers +	
	Texture et éléments grossiers	Sableux, caillouteux
Humidité	Séchant ou à forte hydromorphie	Bonne capacité de rétention en eau
Profondeur du sol	Sols superficiels	Sols profonds
Température	Inférieure à 0°C, supérieur à 20°C	Autour de 10-20°C

L'évolution de la quantité de vers de terre dans le sol, à relier avec les conditions climatiques de l'expérience et les conditions pédo-climatiques du milieu, témoigne de l'évolution de la santé du sol. En conditions de prélèvement identiques, une diminution du nombre de ces derniers exprime un sol non structuré avec une mauvaise infiltration de l'eau, de l'érosion en surface par ruissellement et un sol avec une mauvaise fertilité.

6.1.5. Temps

Etape	Temps
Préparation des mélanges (pour 3 placettes)	45 min
Application mélange + analyse des vers sur 1 placette	45 min
<i>Temps total pour les 3 placettes (1 parcelle)</i>	<i>2 h-2h30</i>

6.1.6. Références

Observatoire agricole de la biodiversité s.d., Placettes vers-de-terre.
Site internet: <https://www.observatoire-agricole-biodiversite.fr/les-protocoles/vers-de-terre>, consulté le 19/10/2023.

6.2. Facteur d'élançement et chablis

6.2.1. Objectif(s)

L'analyse du facteur d'élançement et le nombre de chablis permet d'évaluer la capacité du peuplement à protéger le sol, la stabilité individuelle des arbres, ainsi que la stabilité du sol. Le facteur d'élançement est défini par le rapport entre la hauteur totale de l'arbre et son diamètre mesuré à 1,30 m (exprimés tous deux en mètre). La stabilité d'un arbre est liée à son enracinement et la qualité du sol, parmi d'autres facteurs. Similairement, le nombre de chablis est aussi un indicateur de la stabilité du peuplement : les chablis sont des arbres déracinés mais souvent connectés à leur système racinaire.

Ces indicateurs permettent donc de vérifier la capacité du peuplement à protéger les sols, limiter les glissements de terrain, et à contribuer à l'épuration de l'eau.

6.2.2. Matériel

Terrain :

- Compas forestier ou mètre ruban
- Vertex ou autre matériel pour la mesure de la hauteur d'un arbre

6.2.3. Protocole

Terrain :

1. Mesurer le diamètre de l'arbre à 1,30 m de la base.
2. Mesurer la hauteur de l'arbre avec un vertex.
3. Compter le nombre de chablis.

Facteur d'élanacement - Terrain

Opérateur : Date : .../.../... Heure début : Heure fin :
Parcelle étudiée :

Arbre	Hauteur (m)	Diamètre (m)	Facteur d'élanacement (H/D)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			

24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			
41			
42			
43			
44			
45			
46			
47			
48			
49			
50			

Chablis - Terrain

Opérateur : Date : .../.../... Heure début : Heure fin :
Parcelle étudiée :

Décompte arbres déracinés mais connecté à leur système racinaire :

6.2.4. Exploitation des résultats

Dans les peuplements forestiers peu éclaircis, les arbres grandissent mais ne grossissent pas suffisamment. Ils sont alors fins et longilignes et présentent donc un facteur d'élancement H/D élevé. En conséquence, ils sont fragiles, notamment vis-à-vis des coups de vent (risque de rupture ou de flexion).

Le risque de chablis est faible pour un peuplement dont les arbres ont un rapport H/D inférieur à 80. Pour un rapport H/D compris entre 80 et 100, des éclaircies fortes sont déconseillées. Au-delà de 100, les risques de chablis sont élevés en cas d'intervention dans le peuplement.

6.2.5. Temps

La mesure de 9 arbres peut prendre jusqu'à 20 ou 30 minutes, cela dépend de la rapidité de l'opérateur, de l'expérience à mesurer le diamètre (ou la circonférence), et à mesurer ou estimer la hauteur de l'arbre.

6.2.6. Références

Bonnardot A. et al., (2020). Mesurer les arbres.
(<http://www.arbres-caue77.org/medias/files/fiche-mesurer-les-arbres-au-24-mars-2020-.pdf>)

Parc Pyrénées Ariégeoises, (2015). Guide de lecture des fiches.
(<https://www.parc-pyrenees-ariegeoises.fr/wp-content/uploads/2016/07/Guide-dUtilisation-Reseau-Forets.pdf>)

6.3. Litière

6.3.1. Objectif

Ce protocole vise à évaluer les effets de la méso et macrofaune dans la décomposition de la matière organique et ainsi appréhender la dynamique du carbone dans le sol. Il correspond à une étude morpho-fonctionnelle de la litière et de son état de dégradation. C'est un protocole qui se rapproche de l'indice d'humus (Ponge et Chevalier, 2006) mais il est facile d'utilisation.

6.3.2. Matériel

Terrain :

- Sacs plastiques
- Quadrat de 25 cm x 25 cm

Laboratoire :

- Étuve à 60 °C
- Balance

6.3.3. Protocole

Terrain :

1. Séparer et écrire sur les sacs plastiques: "entier" (E), "fragmenté" (F), "squelette" (S), "bois" (B), "agrégat" (A), "compacte" (C) et "frais" (F).
2. Placer le quadrat sur le sol.
3. Couper la biomasse fraîche et la mettre dans le sac noté "frais".
4. Récolter la litière et la diviser dans les 6 catégories de sac :
 - Entier* : entre 60 et 100 % de la surface foliaire
 - Fragmenté* : <50 % de la surface foliaire
 - Squelette* : >50 % de la surface foliaire est un squelette
 - Bois* : écorce, fruit, graine, branches
 - Agrégat* : *fragments de sol*
 - Compact* : feuilles compactées collées entre-elles

Laboratoire :

1. Sécher les échantillons à 60 °C pendant 48 heures.
2. Peser chaque échantillon.
3. Pour la litière compactée, peser le tout puis séparer en 3 catégories : entier (CE), fragmenté (CF) et squelette (CS).

Masse totale feuille = F + C + S + C

Fragmenté total (F tot) = (F + CF) / masse totale feuille

Squelette total (S tot) = (S + CS) / masse totale feuille

Compact = masse totale de C / masse totale feuille

Litière - Terrain

Opérateur : Date : .../.../... Heure début : Heure fin :
Parcelle étudiée :

Terrain :

	1	2	3	4	5	6
Proportions						
Remarques						

Notation des échantillons

- 1 - Entière (incluant les éléments artificiellement coupés) (E)
- 2 - Squelette (S)
- 3 - Fragmentée (F)
- 4 - Bois (B)
- 5 - Agrégat (A)
- 6 - Compact (C)

Laboratoire :

	1	2	3	4	5	6
Masse fraîche						
Masse sèche						

Pour la litière compacte, différencier :

	Entier	Fragmenté	Squeletté
Masse fraîche			
Masse sèche			

6.3.4. Exploitation des résultats

L'exploitation des résultats nécessite une lecture des ratios calculés avec les formules de la partie précédente. Ces ratios témoignent du taux de dégradation de la litière. Si la litière est fortement dégradée, c'est que la méso et la macrofaune du sol sont très actives, ce qui témoigne d'un sol en bonne santé où le recyclage du carbone est efficace.

6.3.5. Temps

Etape	Temps
Récupération litière pour 1 réplica (quadrat de 25 par 25 cm)	30 min
Pesée en laboratoire des échantillons	5 min
Tri du sac compact et pesée	25 min
<i>Total</i>	<i>1 h</i>

6.3.6. Référence

N. Rakotondrazafy, (2020). BIOFUNCTOOL® Un set d'indicateurs pour évaluer la santé des sols.

6.4. POXC (permanganate-oxidizable carbon)

6.4.1. Objectif(s)

La matière organique du sol peut être décomposée en matière organique labile, facilement décomposable par les micro-organismes, et en matière organique récalcitrante, plus difficilement disponible pour ces derniers. Ainsi, quantifier la part de matière labile du sol apporte une indication quant à la fertilité des sols.

L'une des méthodes existantes pour mesurer la part de carbone labile dans le sol et nécessitant du matériel de laboratoire "standard", repose sur l'oxydation du carbone par le permanganate de potassium. Cette réaction induit un changement de couleur du réactif, pouvant être mesurée au spectrophotomètre, et indiquant la concentration en carbone.

Il est intéressant de conduire ce protocole en parallèle de l'indicateur de respiration des micro-organismes du sol (SituResp).

6.4.2. Matériel

Laboratoire :

- Balance ($\pm 0,1$ mg)
- pH-mètre et tampons pH4 et pH7
- Agitateur rotatif
- Agitateur magnétique chauffant et barreaux aimantés
- Pipette automatique réglable 10 mL + pointes stériles
- Pipette automatique réglable 1000 μ L + pointes stériles
- Tubes de 10 mL
- Fioles jaugées de 1 L
- Bêchers 1 L
- Pipette pasteur
- 10 tubes falcon de 50 mL
- Potassium permanganate
- Calcium chlorure dihydrate
- Sodium hydroxyde 0.1 M
- Eau déminéralisée

Terrain :

- Solution mère de KMnO_4 0.2 M préparée en laboratoire et conservée dans un contenant opaque à la lumière
- Macrocuvettes spectrophotométriques de 4 mL
- Spectrophotomètre de terrain
- Balance de terrain 0-2000 g
- Tamis de 2 mm
- Truelle
- Tubes falcons de 50 mL avec un portoir (2 fois le nombre de points mesurés)
- Pipette réglable 0-5 mL ou une seringue avec cônes
- Chronomètre ou portable

6.4.3. Protocole

Préparation de la solution mère de KMnO_4 à 0.2 M (laboratoire) :

1. Peser 147 g de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dans un bécher de 1 L.
2. Ajouter 900 mL d'eau distillée et dissoudre complètement la solution sur un agitateur magnétique.
3. Transférer dans une fiole jaugée de 1 L et ajuster au trait de jauge (obtention de la solution de CaCl_2 1M).
4. Peser 31,6 g de KMnO_4 et les introduire dans un deuxième bécher de 1 L.
5. Ajouter 900 mL de la solution de CaCl_2 1M dans le second bécher et réaliser une dissolution complète sous agitateur magnétique chauffant (cette dissolution est très lente).
6. Introduire la sonde pH calibrée. Ajouter NaOH 0.1 M goutte à goutte avec une pipette pasteur jetable pour atteindre la valeur pH 7,2.
7. Après stabilisation du pH, transvaser la solution dans une fiole jaugée de 1 L. Ajouter la solution de CaCl_2 1M.
8. Transvaser la solution dans un flacon en verre brun. Stocker au frigo à l'abri de la lumière. La solution peut être conservée entre 3 et 6 mois (remarque: il faut environ 2 mL de solution mère par échantillon de sol).

Préparation de la gamme d'étalonnage KMnO_4 (laboratoire) :

1. Préparer 4 étalons dans des tubes de 10 mL en utilisant la solution mère de KMnO_4 en utilisant la micropipette de 1000 μL .

Concentration	Volume de la solution mère KMnO_4 0.2 M	Volume d'eau déminéralisée	Numéro tube étalon intermédiaire
0,005 M	250 μL	9,750 mL	1
0,01 M	500 μL	9,500 mL	2
0,015 M	750 μL	9,250 mL	3
0,02 M	1000 μL	9,0	4

2. Prélever 0,5 mL des étalons, les placer dans des tubes falcon de 50 mL et ajouter 49,5 mL d'eau déminéralisée.
3. Homogénéiser et mesurer les absorbances (à 550 nm) avec le spectrophotomètre
4. Construire une courbe standard.

Terrain :

1. Prélever le sol de 0 à 10 cm de profondeur et le tamiser à 2 mm.
2. Laisser sécher à l'air libre.
3. Peser 2,5 g de sol et les introduire dans des tubes falcon de 50 mL.
4. Ajouter 18 mL d'eau distillée à l'aide d'une pipette.
5. Ajouter 2 mL de solution mère de KMnO_4 .
6. Fermer les tubes et mettre sous agitation pendant 2 min (1 agitation par seconde).
7. Laisser reposer 10 min.
8. Transvaser 0,5 mL de solution dans un nouveau tube falcon.
9. Ajouter 49,5 mL d'eau déminéralisée et homogénéiser.
10. Transvaser la solution dans une macrocuvette et faire le blanc du spectrophotomètre.
11. Mesurer l'absorbance à 550 nm.

POXC - LABORATOIRE

Opérateur : Date : .../.../... Heure début : Heure fin :
Parcelle étudiée :

(!) prélever de 0 à 10 cm

Gamme d'étalonnage:

Concentration	Volume de la solution mère KMNO_4	Volume d'eau déminéralisée	Numéro tube étalon intermédiaire
0,005 M	250 μL	9,750 mL	1
0,01 M	500 μL	9,500 mL	2
0,015 M	750 μL	9,250 mL	3
0,02 M	1000 μL	9,0 mL	4

Absorbance des étalons intermédiaires:

Étalon intermédiaire	Absorbance
1	
2	
3	
4	

Absorbance des échantillons:

Echantillon de sol	Absorbance

6.4.4. Exploitation des résultats

Afin de déterminer la concentration de carbone labile dans le sol, une courbe standard est construite, à partir des absorbances des étalons intermédiaires (Figure 1).

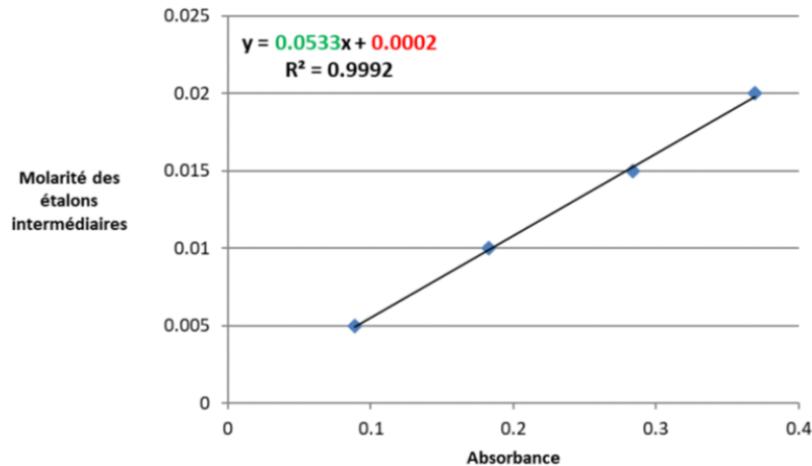


Figure 1 : Exemple de courbe standard, (Rakotondrazafy, 2020)

La pente et l'ordonnée à l'origine de la courbe standard interviennent dans la formule du calcul de la concentration du carbone labile du sol.

$$\text{POXC} = ([\text{KMnO}_4] - (\alpha + \beta \cdot \text{Abs})) \times \text{Cox} \times (\text{VolKMnO}_4 / \text{Msol})$$

POXC (mg/kg de sol) : carbone labile du sol

$[\text{KMnO}_4]$ (mol/L) : concentration initiale de la solution de KMnO_4 (0,02)

Cox (mgC/mol) : quantité de C oxydé avec 1 mole de MnO_4 (9000)

Vol KMnO_4 (L) : volume du KMnO_4 ayant réagi (0,02)

Msol (kg) : masse du sol (0,0025)

α : ordonnée à l'origine de la courbe standard

β : pente de la courbe standard

Abs : absorbance lue à 550 nm

6.4.5. Temps

Etape	Temps pour 1 échantillon (3 réplicas)
Récolte du sol 0-10 cm	20 min
Préparation de la solution de permanganate de potassium	1 h
Préparation de la gamme d'étalonnage	30 min
Mesure des absorbances	5 min
<i>Total</i>	<i>2 h</i>

6.4.6. Références

Mees, O., & Bertin, P. (2021). Etude comparative entre un couvert végétal multi-espèce et des couverts pures des espèces constituant le mélange (Doctoral dissertation, Thèse de doct.

N. Rakotondrazafy, (2020). BIOFUNCTOOL® Un set d'indicateurs pour évaluer la santé des sols, POXC p. 10-13.

6.5. SituResp (Respiration basale)

6.5.1. Objectif(s)

Cet indicateur permet de déterminer l'activité microbiologique du sol en quantifiant l'émission de CO₂ du sol par l'activité des micro-organismes, soit la respiration basale. Les micro-organismes du sol permettent la réalisation de la production primaire et par conséquent la structure du sol, le recyclage des nutriments et enfin la régulation du climat en stockant le carbone dans les sols.

Pour déterminer l'activité microbiologique, une cuve composée d'un gel coloré dont la couleur varie selon le pH est disposée dans un contenant hermétique avec du sol frais. En mesurant la différence d'absorbance de la cuve à 570 nm, il est possible de déterminer la quantité de CO₂ émise par le sol.

6.5.2. Matériel

Laboratoire :

- Macrocuvette pour spectrophotométrie
- Balance de précision ($\pm 0,1$ mg)
- Agitateur magnétique chauffant et barreaux aimantés
- Pipette automatique réglable 5 mL et pointes
- Bécher de 1 L
- Bécher en pyrex résistant à la chaleur
- Thermomètre
- Fiole jaugée de 1 L
- Dessiccateur
- Gros bocal hermétique de 1 L
- Rouge de crésol
- Chlorure de potassium
- Bicarbonate de sodium
- Agar microbiologique
- Soda lime
- Hydroxyde de sodium
- Eau déminéralisée

Terrain :

- Cuves SituResp® avec gel conservées dans du soda lime dans un bocal hermétique
- Pot en plastique de 30 mL pour maintenir les cuves
- Bocaux hermétiques de 250 mL
- Balance de terrain 0-2000 g
- Tamis de 5 mm

6.5.3. Protocole

Préparation de la solution indicatrice pour les cuves spectrophotométriques :

1. Peser et introduire 16,77 g de KCl, 0,315 g de NaHCO₃ et 0,0187 g du rouge de crésol dans une fiole jaugée de 1 L.
2. Rajouter de l'eau déminéralisée au trait de jauge et homogénéiser.
3. Transvaser la solution dans une bouteille et la garder à 4 °C pendant maximum 2 mois.

Préparation des cuves spectrophotométriques (pour 60 cuves) :

1. Introduire 1,5 g d'agar dans un bécher en pyrex résistant à la chaleur.
2. Ajouter 50 mL d'eau distillée.
3. Chauffer l'agar jusqu'à ébullition avec un agitateur magnétique chauffant.
4. Ajouter 100 mL de la solution indicatrice et maintenir la solution à 60-65 °C toujours sous agitation.
5. Remplir les cuves avec 1,5 mL de la solution préparée. Pour éviter les bulles, partir du fond de la cuve et remonter doucement.
6. Laisser refroidir les cuves pendant 1 h.
7. Garder les cuves dans un dessiccateur dans le noir complet avec du soda lime (ou 200 mL de 1 M NaOH) et un bécher d'eau pour 1 semaine. La couleur du gel des cuves doit se transformer de rouge à violet.

Terrain :

1. Transporter les cuves avec le gel SituResp® dans un bocal hermétique de 1 L contenant un flacon d'eau distillée et du soda lime.
2. Prélever le sol à 0-10 cm de profondeur et le tamiser à 5 mm.
3. Peser 100 g de sol tamisé à introduire dans un bocal hermétique de 250 mL.
4. Faire le blanc du spectrophotomètre.
5. Lire l'absorbance à T₀ (570 nm) d'une cuve après la sortie du bocal hermétique de transport.
6. Introduire la cuve dans un bocal hermétique contenant le sol à l'aide d'une pince.
7. Fermer hermétiquement et faire attention à ce que les bocaux restent droits pendant le transport.
8. Après 24 h, lire l'absorbance de la cuve avec le spectrophotomètre (570 nm).

Dans le cas où l'expérience ne peut pas être faite sur le terrain, il est possible de la réaliser en laboratoire de la même manière que sur le terrain. Cependant les échantillons de sol doivent être conservés à 4 °C au frigo.

SituResp - Laboratoire

Opérateur : Date : .../.../... Heure début : Heure fin :
Parcelle étudiée :

Masse de terre prélevée :

(!) prélever de 0 à 10 cm

Gel disponible :

Point de prélèvement 1 :

Coordonnées GPS :

Réplica	Code de prélèvement	Heure	Abs T0	Heure	Abs T24	Remarques
1						
2						
3						

Point de prélèvement 2 :

Coordonnées GPS :

Réplica	Code de prélèvement	Heure	Abs T0	Heure	Abs T24	Remarques
1						
2						
3						

Point de prélèvement 3 :

Coordonnées GPS :

Réplica	Code de prélèvement	Heure	Abs T0	Heure	Abs T24	Remarques
1						
2						
3						

Point de prélèvement 4 :

Coordonnées GPS :

Réplica	Code de prélèvement	Heure	Abs T0	Heure	Abs T24	Remarques
1						
2						
3						

6.5.4. Exploitation des résultats

Score SituResp = DO_T24/DO_T0

$$\text{Respiration (mg CO}_2\text{-C / kg soil)} = \frac{(e^{(2.98075 \cdot (DO_{T0} - DO_{T24}) - 2.7222)} \cdot V \cdot 12156)}{8.314 \cdot T \cdot M}$$

T : Température d'incubation (K)

V : Volume du contenant hermétique (mL)

M : Masse de sol (g)

DO_T0 : Absorbance à 570 nm avant incubation

DO_T24 : Absorbance à 570 nm après 24 heures d'incubation

Dans le cas où la cuve change de couleur et tend vers le jaune, l'émission de CO₂ est conséquente.

6.5.5. Temps

Etapes	Temps estimé pour un échantillon et 3 répétitions/répliques
Récolte du sol 0-10 cm	20 min
Laboratoire (préparation des échantillons : tamiser, peser, mettre en place les cuves)	20 min
Attente	24 h minimum
Laboratoire (mesure)	10 min
<i>Total</i>	<i>24h50</i>

6.5.6. Référence

N. Rakotondrazafy, (2020). BIOFUNCTOOL® Un set d'indicateurs pour évaluer la santé des sols, SituResp (Respiration basale) p. 14-16

Thoumazeau, A., Gay, F., Alonso, P., Suvannang, N., Phongjinda, A., Panklang, P., ... & Brauman, A. (2017). SituResp®: A time-and cost-effective method to assess basal soil respiration in the field. *Applied soil ecology*, 121, 223-230.

6.6. Perte au feu

6.6.1. Objectif(s)

La perte au feu permet de quantifier la matière organique dans le sol. La teneur en matière organique joue un rôle important dans la fertilité du sol, la rétention des nutriments et la capacité d'échange cationique.

6.6.2. Matériel

Laboratoire :

- Étuve de 105 °C
- Coupelle en porcelaine
- Four à moufle
- Balance
- Dessiccateur
- Crayon de laboratoire (résistant à la chaleur)

6.6.3. Protocole

Laboratoire :

La perte au feu s'effectue sur tous les horizons de chaque point de prélèvement.

1. Sécher l'échantillon de sol dans une étuve à 40 °C pendant 48 h.
2. Noter le numéro d'échantillon sous un creuset avec un crayon résistant à la chaleur.
3. Tarer la coupelle (M0).
4. Introduire 2 g de sol déshydraté (M1).
5. Placer la coupelle dans un four à moufle à 550 °C pendant 16 h.
6. Laisser refroidir dans un dessiccateur.
7. Peser la coupelle et le contenu (M2).

Perte au feu - Laboratoire

Opérateur : Date : .../.../... Heure début : Heure fin : Parcelle étudiée :

(!) Cette fiche ne concerne qu'un seul point de prélèvement, il est nécessaire de disposer d'autant de fiches que de points de prélèvement.

Point de prélèvement :

Coordonnées GPS :

Masse de terre prélevée :

H	Code de prélèvement	Réplica	Masse avant séchage	Masse après séchage (40 °C ou 105 °C)	Masse avant perte au feu	Masse après perte au feu (320 °C ou 550 °C)	Pourcentage MO	Calcul CO	Remarques

H	Code de prélèvement	Réplica	Masse avant séchage	Masse après séchage (40 °C ou 105 °C)	Masse avant perte au feu	Masse après perte au feu (320 °C ou 550 °C)	Pourcentage MO	Calcul CO	Remarques

MO = Matière Organique

CO = Carbone Organique

H = Horizon

6.6.4. Exploitation des résultats

La quantité de matière organique est déterminée avec le calcul suivant :

$$M.O. (g/kg \text{ de sol}) = \frac{\text{masse sol seg (g)} - \text{masse sol incinéré (g)}}{\text{masse sol sec (g)}} \times 1000$$

La perte de masse permet de donner la quantité de matière organique.

Le carbone organique peut être déduit du calcul de la masse organique :

$$\text{Carbone organique (gC/kg de sol)} = M.O./2$$

6.6.5. Temps

Etape	Temps pour 1 échantillon (3 répliques)
Prélèvement	1 h
Laboratoire dont temps d'attente	65 h
Laboratoire sans temps d'attente	1 h
<i>Total</i>	<i>67 h</i>

6.6.6. Référence

AFNOR, (1999). *Qualité des sols*, volumes 1 & 2, AFNOR editions.

6.7. Bait lamina

6.7.1. Objectif(s)

Cet indicateur de biodiversité permet de qualifier l'activité biologique du sol et de déterminer si le sol contient une mésofaune (ou la petite macrofaune) qui dégrade la cellulose dans l'horizon de surface d'un sol.

6.7.2. Matériel

Laboratoire :

- 8 bait lamina par point d'échantillonnage
- Substrat lamina de Terra Protecta ou substrat fabriqué (agar + cellulose + farine)
- Bécher de 250 mL
- Eau déminéralisée
- Thermomètre plongeant
- Agitateur magnétique chauffant
- Barreau aimanté

Terrain :

- Laminas
- Piquet et rubalise pour délimiter les zones d'échantillonnage
- Couteau avec une lame de 20 cm
- Mètre de 1 m minimum

6.7.3. Protocole

Laboratoire :

1. Mélanger 1 g d'agar et 0,7 g de cellulose dans un bécher de 250 mL.
2. Ajouter 100 mL d'eau déminéralisée.
3. Chauffer la solution à ébullition jusqu'à 100 °C.
4. Diminuer la température à 60 °C.
5. Arrêter le chauffage, ajouter 0,3 g de farine et mélanger pour obtenir une pâte homogène.
6. Remplir les trous de lamina avec la pâte avec les doigts et en faisant des aller-retours des deux côtés.
7. Laisser sécher les laminas pendant 20 min.
8. Re-remplir les trous et attendre de nouveau 20 min.
9. Recommencer une dernière fois.

Terrain :

1. Annoter les languettes de lamina pour les reconnaître.
2. Avec le couteau, faire un trou dans le sol.
3. Pour un site, insérer 8 languettes de lamina sur une ligne et espacées de 30 cm.
4. Attendre entre 2 semaines et 1 mois pour que 80 % des trous de lamina soient dégradés. Retirer les laminas et attribuer un score à chaque trou.
5. Retirer les laminas du sol puis retirer l'excès de sol en essuyant la lamina délicatement avec un chiffon.
6. Attribuer un score pour chaque trou de chaque lamina comme le montre le tableau ci-dessous :

Etat de dégradation	Pas de dégradation	Dégradation partielle	Dégradation totale	Présence de sol à la place du substrat
Score sur le terrain	0	0,5	1	NA

Bait Lamina - Terrain

Opérateur : Date : .../.../... Heure début : Heure fin :
Parcelle étudiée :

Code lamina	n° trou	Score	n° trou	Score	Moyenne	Code lamina	n° trou	Score	n° trou	Score	Moyenne
A	1		9			B	1		9		
	2		10				2		10		
	3		11				3		11		
	4		12				4		12		
	5		13				5		13		
	6		14				6		14		
	7		15				7		15		
	8		16				8		16		
C	1		9			D	1		9		
	2		10				2		10		
	3		11				3		11		
	4		12				4		12		
	5		13				5		13		
	6		14				6		14		
	7		15				7		15		
	8		16				8		16		
E	1		9			F	1		9		
	2		10				2		10		
	3		11				3		11		
	4		12				4		12		
	5		13				5		13		
	6		14				6		14		
	7		15				7		15		
	8		16				8		16		

Code lamina	n° trou	Score	n° trou	Score	Moyenne	Code lamina	n° trou	Score	n° trou	Score	Moyenne
G	1		9			H	1		9		
	2		10				2		10		
	3		11				3		11		
	4		12				4		12		
	5		13				5		13		
	6		14				6		14		
	7		15				7		15		
	8		16				8		16		

6.7.4. Exploitation des résultats

$$\text{Score par lamina (\%deg.j}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Moyenne (score 16 trous)}}{\text{Temps d'incubation (jour)}}$$

Score pour un point d'échantillonnage (%deg.j⁻¹) = Moyenne (score des 7-8 laminas)

L'activité biologique est proportionnelle à la dégradation du substrat.

6.7.5. Temps

Etape	Temps pour 1 échantillon (3 réplicas)
Labo (préparation des bait lamina)	20 min
Mise en place des bait lamina	15 min
Récupération des bait lamina	5 min
<i>Total</i>	<i>40 min</i>

6.7.6. Références

N. Rakotondrazafy, (2020). BIOFUNCTOOL® Un set d'indicateurs pour évaluer la santé des sols, Bait Lamina, p. 10-13.

Törne, E. V. (1990). Assessing feeding activities of soil-living animals. I. Bait-lamina-tests. *Pedobiologia*, 34(2), 89-101.

Rhizobiome. Les tutoriels du Pecnotlab : Activité biologique : Bait Lamina. Site internet: <https://rhizobiome.gitbook.io/les-tutoriels-du-pecnotlab/protocoles-et-observations/activite-biologique>, consulté le 19/10/2023

6.8. Test du slip

6.8.1. Objectifs et hypothèse

Ce protocole vise à illustrer l'activité biologique de décomposition des sols, à travers la dégradation d'un slip en coton bio. Ce test peut être intéressant afin d'effectuer des comparaisons intersites, par une évaluation qualitative de la dégradation des slips. Il ne s'agit pas d'un indicateur absolu de fertilisation ou d'activité biologique du sol, mais peut apporter des informations complémentaires.

Si le printemps est une saison recommandée, il reste tout à fait possible d'enfouir le slip à toute saison. Aussi, la durée d'enfouissement peut-être modulable.

6.8.2. Matériel

Terrain :

- Slip blanc en coton bio¹
- Bêche
- Jalons et rubalise pour repérer les slips

6.8.3. Protocole

Terrain :

1. Enterrer le slip à 8-10 cm de profondeur.
2. Localiser le slip en surface à l'aide des jalons et de la rubalise.
3. Après une durée déterminée et fixée (par exemple 3 mois), déterrer délicatement le slip, retirer l'excédent de terre et le sécher quelques jours à l'air libre.
4. Constater l'état de dégradation du slip.

¹ Le slip utilisé dans l'état zéro du sol est de la marque Sincère et de taille M. Afin de comparer les slips entre eux, il n'est pas nécessaire de prendre cette marque ou taille. Il faut cependant que les slips soient identiques.

Test du slip - Terrain

Opérateur : Date : .../.../... Heure début : Heure fin : Parcelle étudiée :
--

Coordonnées GPS :

-
-
-
-

Remarques (% de dégradation) :

6.8.4. Exploitation des résultats

L'évaluation de l'activité biologique du sol par le test du slip est qualitative. Elle est employée dans l'objectif de comparer plusieurs sites entre eux.

6.8.5. Temps

Il faut compter environ 10 minutes pour enterrer un slip et 10 minutes pour le déterrer, soit 20 min au total.

6.8.6. Références

Chambre régionale d'agriculture du Grand Est, (2019). Indicateur de la fertilité biologique des sols: le test du slip.

7. Etude de la biodiversité

7.1. Barber

7.1.1. Objectif(s)

La pose de pièges Barber peut être réalisée afin d'estimer une distribution d'abondance et une activité des invertébrés présents sur le sol, pour une période donnée. Cette méthode de capture, consiste à enfoncer dans le sol des pots à parois lisses, de façon à ce que leur ouverture affleure la surface du sol. Les pots contiennent un mélange ou une solution attirant à la fois les insectes qui tombent alors dedans, et les conservant, dans l'objectif de les identifier ensuite.

7.1.2. Matériel

Terrain :

- Carton imperméable (type brique de lait)
- 4 piquets en bois (pique à brochette)
- Plantoir à bulbe ou petite pelle
- Vinaigre blanc (ou rouge) à 8 % d'acidité
- Verre en plastique (ou récipient de même diamètre)

Laboratoire :

- Loupe binoculaire

7.1.3. Protocole

Terrain :

1. Dans le contenant en plastique, verser du vinaigre blanc.
2. Placer le contenant dans un trou dans la terre : le haut du récipient doit être aligné avec la surface du sol.
3. Placer une protection contre la pluie (carton imperméable).
4. Après une durée fixée en amont, pouvant aller de 48 heures à une semaine, récupérer les insectes piégés et les identifier à l'aide d'une loupe binoculaire.

Piège Barber - Terrain

Opérateur : Date : .../.../... Heure début : Heure fin :
Parcelle étudiée :

(!) Cette fiche ne concerne qu'un seul point de prélèvement, il est nécessaire de disposer d'autant de fiches que de points de prélèvement.

Pont de prélèvement :

Coordonnées GPS :

Notation du pot	Coordonnées GPS	Date passage 1	Date passage 2	Date passage 3	Date passage 4	Date passage 5

Description de point de repère afin de les retrouver :

Observations :

7.1.4. Exploitation des résultats

Avant toute analyse des pots Barber, il est essentiel de définir certains paramètres, en répondant à quelques questions :

- Quelle période de capture choisir ?
- Quelles espèces sont susceptibles d'être capturées ?
- Quelle est l'efficacité des pièges pour les espèces visées
- Les modalités sont-elles comparables ?

La reconnaissance des insectes peut-être réalisée à l'aide de clés de détermination.

Des indicateurs de biodiversité (indice de Shannon) peuvent être calculés.

7.1.5. Temps

Etape	Temps pour 1 échantillon (3 réplicas)
Placer les pots	20 minutes
Récolter les pots	10 minutes
Analyse des insectes	4 h (variable)
<i>Total</i>	<i>4h30 (variable)</i>

7.1.6. Référence

ROUX s.d., Les carabes.

Site internet: https://www.supagro.fr/ress-pepites/carabes/co/6_Echantillonnage.html, consulté le 19/10/2023.

8. Bibliographie

Allen, D. E., Singh, B. P., & Dalal, R. C. (2011). Soil health indicators under climate change: a review of current knowledge. *Soil health and climate change*, 25-45.

Calvet, Raoul (2013). Impact du changement climatique sur les micro-organismes du sol et rôles de ces derniers. Editions France Agricole .Collection Agriproduction. ISBN: 978-2-85557-244-4. eISBN: 978-2-85557-330-4

Agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse aire métropolitaine. *Glossaire - Changement Climatique.*; 2017.

https://www.aua-toulouse.org/wp-content/uploads/2017/09/pdf_glossaireacte-base_valid_cc.pdf

OPCC. *Le Changement Climatique Dans Les Pyrénées : Impacts, Vulnérabilités et Adaptation.*; 2018.

<https://www.opcc-ctp.org/sites/default/files/documentacion/opcc-informe-fr-print.pdf>