

# Guide d'échantillonnage et d'acquisition de données spectrales des sols du réseau d'expérimentation Manioc et Cacao



Décembre 2025

Ce travail a bénéficié de l'appui financier de:



FONDS FRANÇAIS POUR  
L'ENVIRONNEMENT MONDIAL



## Sommaire

Résumé	3
1. Introduction	4
Contexte	4
Objectif	4
Le réseau d'expérimentation	4
2. Prélèvement des échantillons de sol	6
2.1. Matériaux pour les prélèvements	6
2.2. Protocole d'échantillonnage	7
2.2.1. Échantillonnage pour les analyses physico-chimiques	8
2.2.2. Échantillonnage pour la mesure de la densité apparente	9
3. Préparation des échantillons prélevés	10
4. Calcul des propriétés physiques	12
4.1. Calcul de la proportion des fractions fine et grossière	12
4.2. Calcul de la densité apparente	12
5. Acquisition des données spectrales	12
5.1. Caractéristiques du spectromètre	12
5.2. Configuration du portail NeoSpectra et de l'application <i>Collect</i>	13
5.3. Préparation de l'espace de travail	15
5.4. Mode opératoire	16
Références	29
Annexe I. Système de codification des échantillons	30
Annexe II. Calcul du stock de carbone organique du sol et d'azote	31

## Résumé

Ce document décrit les différentes étapes d'échantillonnage de sols, de préparation des échantillons prélevés, de calcul des propriétés physiques, et d'acquisition des données spectrales dans le cadre du suivi annuel de la fertilité des sols dans le réseau de parcelles d'expérimentation du projet Terri4Sol en Côte d'Ivoire.

# 1. Introduction

## Contexte

Ce guide de prélèvement et d'acquisition de données spectrales d'échantillons de sol a été développé dans le cadre du projet Terri4Sol, coordonné par le CIRAD, qui vise à proposer des scénarios d'aménagement territorial favorisant la multifonctionnalité des paysages et l'adoption de pratiques agricoles durables pour contribuer à la préservation et la restauration de la fertilité des sols en Côte d'Ivoire.

Dans ce projet, Nitidæ coordonne la composante 3 qui vise à **accompagner des producteurs.trices de manioc et de cacao dans l'adoption de pratiques agroécologiques pour restaurer la fertilité des sols et favoriser la séquestration de carbone dans leurs parcelles**. L'intervention se concentre sur trois villages (Diasson, Mébifon et Mopodji) autour de la réserve de Mabi-Yaya, dans la région de la Mé.

**Un suivi annuel de la fertilité des sols est prévu à partir de 2023 sur une période de 5 ans pour les parcelles d'expérimentation de manioc et de 10 ans pour celles de cacao**, afin d'évaluer son évolution et de mieux orienter l'accompagnement des producteurs.trices de la région. Ce suivi annuel vise à **évaluer l'impact des pratiques**, notamment sur la teneur en carbone organique (CO) dans les sols, ainsi que la teneur en azote (N) et la densité apparente.

En 2023, un premier lot d'échantillons de sol a été analysé en laboratoire à l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, permettant d'établir une base de données de référence des propriétés d'intérêt. Les signatures spectrales des échantillons ont été ensuite acquises à l'aide d'un spectromètre portable (scanner NeoSpectra, aujourd'hui détenu par la société Buchi), et croisées avec les données de référence pour calibrer des modèles d'estimation des propriétés des sols. Les signatures spectrales des échantillons des parcelles suivies seront désormais acquises chaque année à l'aide du spectromètre, et serviront à estimer les propriétés des sols à l'aide des modèles calibrés au cours de toute la période de suivi.

## Objectif

Afin d'assurer la consistance et la comparabilité des mesures de sol sur toute la durée de la période de suivi (5 à 10 ans), il est indispensable que chaque étape du processus soit réalisée de manière strictement identique dans le temps et entre les sites. Dans ce contexte, ce guide a pour objectif de fournir un cadre méthodologique commun en décrivant de façon détaillée les étapes de prélèvement, de mesure et d'analyse des sols mises en œuvre au sein du réseau d'expérimentation et de suivi pluriannuel.

## Le réseau d'expérimentation

L'évaluation de l'impact des pratiques proposée s'appuie sur un réseau d'expérimentation regroupant 54 producteurs.trices, dont 35 producteurs.trices de manioc et 19 de cacao. Pour chaque producteur.trice, deux parcelles proches spatialement au sein de leur propriété ont été sélectionnées :

- **une parcelle test**, sur laquelle est mise en œuvre une pratique agroécologique spécifique ;
- **une parcelle témoin**, conservée sans intervention afin de servir de référence.

Ce dispositif permet d'évaluer l'impact des pratiques agricoles testés sur la fertilité des sols, en comparant, dans le temps, l'évolution des propriétés des sols entre les parcelles test et les parcelles témoins.

Parmi les 35 producteurs.trices de manioc, les pratiques suivantes sont testées sur les parcelles test :

- **Engrais vert** : 5 parcelles
- **Jachère cultivée** : 4 parcelles
- **Fumure organique** : 5 parcelles
- **Restitution des feuilles** : 4 parcelles
- **Non-brûlage** : 6 parcelles
- **Cultures associées** : haricot (5 parcelles), soja (3 parcelles), arachide (3 parcelles)

Concernant les 19 producteurs.trices de cacao, les parcelles ont été classées selon leur **niveau de production** (> ou < 300 kg) et la **présence ou non d'ombrage**, puis deux types de pratiques sont testées sur les parcelles test :

- **Réhabilitation des cacaoyères**
- **Agroforesterie / réintroduction d'espèces**

Les modalités testées sont réparties comme suit :

- Production > 300 kg avec ombrage – Réhabilitation : 4 parcelles
- Production > 300 kg sans ombrage – Agroforesterie/réintroduction : 5 parcelles
- Production < 300 kg avec ombrage – Réhabilitation : 5 parcelles
- Production < 300 kg sans ombrage – Agroforesterie/réintroduction : 3 parcelles
- Production < 300 kg sans ombrage – Réhabilitation : 2 parcelles

Au total, le réseau d'expérimentation est composé de **38 parcelles de cacao** (19 parcelles test et 19 parcelles témoins) et de **69 parcelles de manioc** (35 parcelles test et 34 parcelles témoins)<sup>1</sup>. La répartition spatiale des parcelles est présentée dans la Figure 1. Localisation des parcelles test et témoin du réseau d'expérimentation de producteurs.trices de cacao et manioc (nb. de parcelles = 107) dans la région de la Mé, Côte d'Ivoire. Fond de carte: Google Satellite, 2025. Figure 1. Les coordonnées de chaque parcelle test et témoin ont été enregistrées grâce à un GPS, ainsi que des informations relatives au nom du producteur.trice, au village de rattachement de la parcelle, à la topographie (bas-fond, colline, pente, plaine), à la taille de la parcelle et au précédent cultural (forêt, vieille jachère, jeune jachère, culture pérenne ou culture vivrière). L'ensemble de ces informations, ainsi que les valeurs des mesures des indicateurs suivis annuellement et la date des prélèvements sont centralisés et stockés dans la base de données du réseau d'expérimentation Manioc et Cacao.

---

<sup>1</sup> Une même parcelle témoin est utilisée comme référence pour deux parcelles test voisines, en raison de leur proximité spatiale et de conditions environnementales similaires.

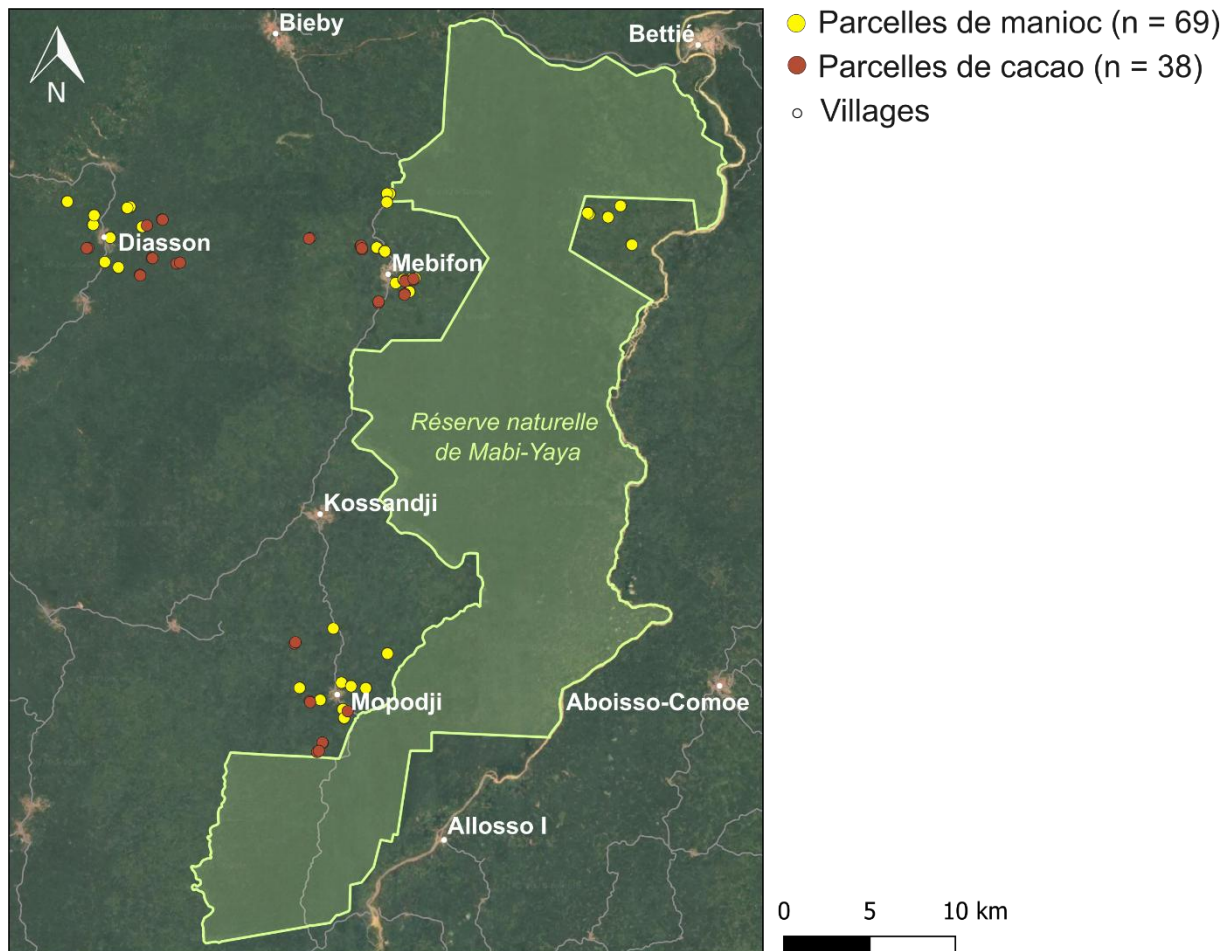


Figure 1. Localisation des parcelles test et témoin du réseau d'expérimentation de producteurs.trices de cacao et manioc (nb. de parcelles = 107) dans la région de la Mé, Côte d'Ivoire. Fond de carte: Google Satellite, 2025.

## 2. Prélèvement des échantillons de sol

### 2.1. Matériaux pour les prélèvements

- Sachets plastiques à zip (ex. sacs de congélation  $\geq 26 \times 26$  cm) labélisés avec l'année de prélèvement, suivie du code des échantillons à prélever<sup>2</sup> (Figure 2a)
- Six seaux labélisés, pour les trois profondeurs des prélèvements pour les analyses physico-chimiques, et pour les trois profondeurs des prélèvements pour les mesures de densité apparente (Figure 2b)
- Couteau (Figure 2c)
- Mètre ruban (Figure 2d)
- Pioche (Figure 2e)
- Échantillonneur de sol en cylindre (Figure 2f)
- Marteau et tarière avec marquage à 10, 20 et 30 cm (Figure 2g)
- Pelle (Figure 2h)

<sup>2</sup> Les codes pour les échantillons à prélever sont listés et détaillés en Annexe I.



Figure 2. Matériaux pour les prélèvements de sol.

## 2.2. Protocole d'échantillonnage

La méthode d'échantillonnage a été initialement élaborée par Dr. Vincent Freycon et Dr. Bruno Héroult (UR Forêts et Sociétés, CIRAD) et par Pr. Jérôme Tondoh (Université Nangui Abrogoua) et Blandine A. Koffi, dans le cadre du projet Terri4Sol, et adaptée pour le suivi pluriannuel du réseau d'expérimentation cacao et manioc.

Les échantillons destinés aux analyses physico-chimiques et à la mesure de la densité apparente sont prélevés de manière aléatoire dans un rayon de 10 m autour du point central de chaque parcelle (Figure 3). Les points centraux, localisés à l'aide de coordonnées GPS, sont espacés d'une distance minimale de 20 m entre les parcelles test et témoins (Figure 3). Chaque année, quatre sites de prélèvement sont définis pour les analyses physico-chimiques et un site de prélèvement pour la mesure de la densité apparente (Figure 3).

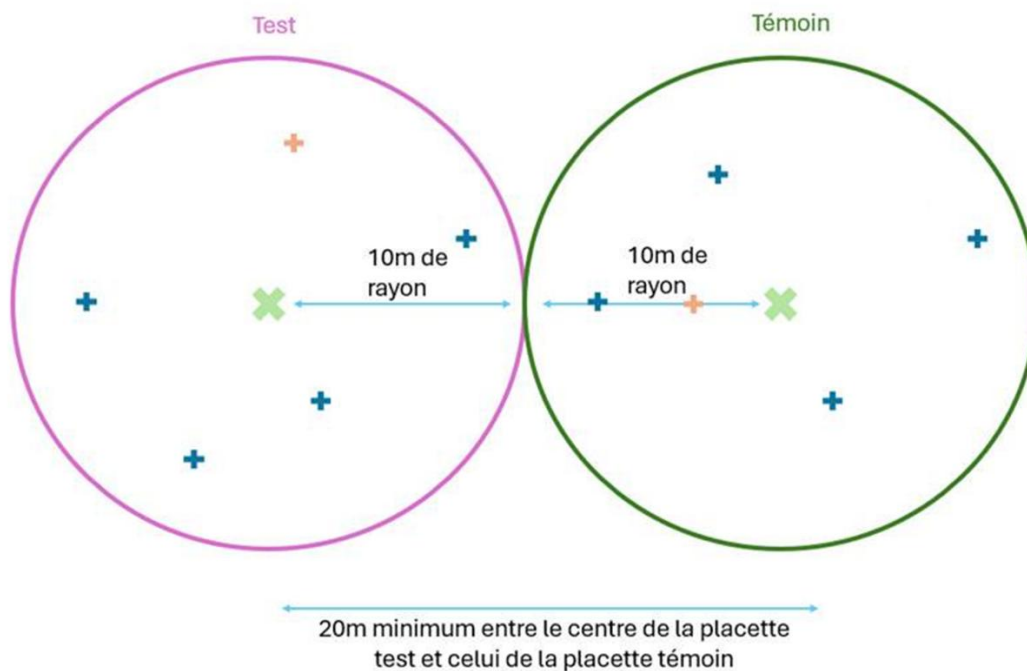


Figure 3. Schéma de l'espacement des sites de prélèvement au sein d'une parcelle test ou témoin sur une année. Les croix vertes représentent les points centraux de la parcelle (localisés par des coordonnées GPS), les croix bleues représentent des sites de prélèvement pour les analyses physico-chimiques (4 prélèvements par parcelle par an) et les croix oranges les sites de prélèvement pour la mesure de la densité apparente (1 prélèvement par parcelle par an).

Les sites de prélèvement sont d'abord soigneusement dégagés des débris végétaux, en veillant à ne pas altérer la structure du sol par piétinement ou toute autre action susceptible d'affecter l'échantillon. D'une année sur l'autre, les sites de prélèvement sont déplacés à l'intérieur du rayon de 10 m afin d'éviter de prélever aux mêmes emplacements que les années précédentes et de limiter ainsi les biais d'analyse liés à une modification de la structure du sol par les prélèvements antérieurs.

### 2.2.1. Échantillonnage pour les analyses physico-chimiques

**Un échantillon composite est collecté par parcelle et profondeur**, aux profondeurs suivantes : 0--10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm. Au total, **12 prélèvements (carottes de sol) sont effectués dans les 4 sites de prélèvement par parcelle** suivant ces étapes :

1. **Prélèvement à 0-10 cm** : pour chacun des 4 sites de prélèvement enfoncer la tarière à l'aide d'un marteau jusqu'à ce que la marque des 10 cm soit alignée avec la surface du sol. Vider ensuite le contenu dans le seau correspondant ;
2. **Prélèvement à 10-20 cm** : dans les mêmes trous, prolonger le forage de 10 cm supplémentaires jusqu'à ce que la marque des 20 cm soit alignée avec la surface. Transférer le sol prélevé dans le seau correspondant ;
3. **Prélèvement à 20-30 cm** : poursuivre le forage dans les mêmes trous sur 10 cm de plus, jusqu'à atteindre la marque des 30 cm. Vider le contenu dans le seau correspondant.

Après avoir fait les 12 prélèvements on mélange le contenu de chaque seau pour former **un échantillon composite par profondeur et par parcelle**. Les débris animaux et végétaux visibles sont retirés, tandis que les éléments grossiers sont conservés, et les agrégats compacts sont désagrégés manuellement. Chaque échantillon composite par profondeur est ensuite placé dans le sachet étiqueté correspondant.

Chaque année, un total de **321 échantillons composites** sont collectés pour les analyses physico-chimiques : 114 provenant des 38 parcelles de cacao et 207 des 69 parcelles de manioc, à raison de 3 profondeurs par parcelle. Le système de codification des échantillons est présenté en [Annexe I](#).

### 2.2.2. Échantillonnage pour la mesure de la densité apparente

**Un échantillon est collecté par parcelle et profondeur**, aux profondeurs 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm. Cela représente **3 prélèvements réalisés au centre de chaque parcelle**, en suivant la méthode au cylindre décrite ci-dessous et illustrée dans la Figure 4 :

1. **Préparation de la zone de travail** : délimiter une zone de prélèvement d'environ 50 cm x 30 cm, en prenant soin de ne pas altérer la structure du sol en s'y appuyant ;
2. **Ouverture du profil de sol** : à l'aide d'une pioche et d'une pelle, creuser un profil de sol d'environ 40 cm de profondeur, ainsi qu'une tranchée latérale pour permettre à l'opérateur de s'installer en face du profil sans marcher sur la zone d'échantillonnage ;
3. **Prélèvement à 0-10 cm** : positionner l'échantillonneur cylindrique verticalement à quelques centimètres du profil, puis l'enfoncer doucement sur 10 cm à l'aide d'un marteau, en veillant à ne pas perturber la structure du sol. Vider le contenu dans le seau correspondant ;
4. **Prélèvement à 10-20 cm** : à l'aide d'un couteau, découper une petite tranchée à 10 cm de profondeur dans le profil, en utilisant le mètre ruban placé verticalement dans la tranchée pour vérifier et ne pas dépasser la profondeur souhaitée. Introduire ensuite le cylindre verticalement dans cette tranchée pour prélever le sol sur 10 cm, puis transférer l'échantillon dans le seau correspondant ;
5. **Prélèvement à 20-30 cm** : répéter l'opération de l'étape précédente à 20 cm de profondeur pour le troisième échantillon.



Figure 4. a) Vue zénithale de la zone de prélèvement montrant les emplacements des échantillons prélevés à 0–10 cm (gauche), 10–20 cm (centre) et 20–30 cm (droite) ; b) placement vertical de l'échantillonneur de sol en cylindre à proximité du profil ; c) découpe de la tranchée à l'aide d'un couteau et d'un mètre ruban ; d) positionnement du mètre ruban pour localiser la profondeur de 20 cm avant le prélèvement de l'échantillon de 20 à 30 cm.

Après avoir fait les 3 prélèvements, les débris animaux et végétaux visibles sont retirés, et les agrégats compacts sont désagrégés manuellement. Les échantillons sont ensuite placés dans les sachets étiquetés correspondants. Chaque année, un total de **321 échantillons** sont collectés pour la mesure de la densité apparente : 114 provenant des 38 parcelles de cacao et 207 des 69 parcelles de manioc, à raison de 3 profondeurs par parcelle. Le système de codification des échantillons est présenté en [Annexe I](#).

### 3. Préparation des échantillons prélevés

Les étapes de préparation des échantillons suivent la procédure opérationnelle standard pour la manipulation et la préparation d'échantillons de sol destinés à des analyses physico-chimiques (FAO, 2020). Les matériaux utilisés pour la préparation des échantillons, comprenant un **tamis en acier inoxydable à maille de 2 mm de diamètre** et son récipient de collecte, un **mortier et pilon**, ainsi qu'une **balance digitale** (modèle actuellement utilisé : 14191-2087B, résolution: 0.1-0.5g, Précision 0.2-1g), sont présentés dans la Figure 5.



Figure 5. Le tamis et le récipient de collecte, le mortier et pilon et la balance utilisés pour la préparation des échantillons.

Les sachets contenant les échantillons sont conservés à l'abri de la lumière directe du soleil et restent **ouverts** afin de favoriser le séchage et de limiter les processus biologiques de décomposition/ minéralisation de la matière organique par les micro-organismes du sol. La **durée du séchage peut varier entre une et deux semaines**, selon les conditions d'humidité ambiante.

Une fois secs, le reste de débris végétaux et animaux sont retirés manuellement des échantillons collectés et ils sont ensuite **pesés à l'aide de la balance**. Pour garantir que les échantillons sont complètement secs, la pesée est répétée plusieurs fois jusqu'à ce que la masse mesurée ne varie plus entre deux pesées successives effectuées à 24h d'intervalle : on récupère ainsi la **masse sèche constante**.

Les pesées sont réalisées avec les échantillons dans leurs sachets de collecte. Afin de corriger l'excès de masse introduit par les sachets, dix sachets vides sont pesés séparément pour en déterminer leur masse moyenne. Cette valeur est ensuite soustraite de la masse totale de chaque échantillon, ce qui permet d'obtenir la **masse nette de sol sec**, exprimée en grammes.

Une fois secs, les échantillons prélevés pour les analyses physico-chimiques suivent une série d'étapes successives visant à séparer la **fraction fine** (utilisée pour l'acquisition de données spectrales) de la **fraction grossière** (ou "refus"). Une adaptation de la méthode de fractionnement granulométrique par tamisage successif est utilisée, consistant à intégrer un rinçage à l'eau après le tamisage à sec. Cette approche est particulièrement adaptée aux sols tropicaux, souvent constitués d'agrégats sur lesquels sont fixés des éléments fins (Feller, 1979).

1. **Émottes** l'échantillon en cassant délicatement les mottes de terre ou conglomérats (blocs compacts de sol), manuellement ou à l'aide du mortier et du pilon. Cette opération doit être réalisée avec précaution afin de réduire la taille des agrégats sans broyer le sol, de manière à préserver sa structure pour les étapes suivantes.
2. **Tamiser** l'échantillon à l'aide du tamis. Le tamisage est effectué par agitation manuelle pendant environ dix minutes, jusqu'à ce qu'aucune particule supplémentaire ne traverse le tamis. La **fraction fine** (particules < 2 mm), composée de sable, limon et argile, est recueillie dans le récipient, puis transférée dans un sachet étiqueté avec le code de l'échantillon.
3. **Effriter manuellement le refus** (fraction grossière > 2 mm) directement sur le tamis, afin de détacher les éventuelles particules fines encore adhérentes aux éléments grossiers. Les particules ainsi libérées sont collectées dans le récipient et ajoutées à la fraction fine dans le sachet correspondant.
4. **Laver le refus restant** sur le tamis à l'aide d'eau, en le plaçant au-dessus d'un seau, pour éliminer les dernières traces de particules fines. Faire ensuite sécher le refus sur du papier journal, puis le peser à l'aide de la balance afin d'obtenir la **masse de la fraction grossière** (particules > 2 mm), exprimée en grammes.

Les sachets contenant la fraction fine des échantillons sont stockés dans une salle à l'abri de la lumière directe du soleil, en vue des analyses ultérieures. La fraction grossière, quant à elle, n'intervenant pas dans les analyses ultérieures, peut être éliminée après la pesée.

## 4. Calcul des propriétés physiques

Dans le cadre du suivi annuel des propriétés des sols du réseau d'expérimentation, les propriétés physiques suivantes doivent être calculées de manière systématique : **la proportion des fractions fine et grossière** ainsi que **la densité apparente du sol**.

La proportion de la fraction fine et la densité apparente sont utilisées, en combinaison avec la **teneur en carbone organique (%)** (estimée par spectrométrie), pour l'estimation ultérieure des **stocks de carbone organique du sol** et des **stocks d'azote**. Le détail des formules utilisées pour le calcul des stocks de carbone organique et d'azote est présenté en [ci-dessousnnexte II](#).

### 4.1. Calcul de la proportion des fractions fine et grossière

La masse de la fraction grossière est soustraite de la masse nette de sol sec afin d'estimer la **masse de la fraction fine** (particules < 2 mm), exprimée en grammes, pour chaque échantillon. Ces valeurs sont ensuite converties en pourcentages, permettant ainsi d'obtenir la **proportion de chaque fraction** (fine et grossière) par rapport à la masse totale de sol sec.

### 4.2. Calcul de la densité apparente

La **densité apparente (ou masse volumique du sol) en g/cm<sup>3</sup>** est calculée en **divisant la masse nette de sol sec (g)** par le **volume de l'échantillon prélevé** (volume du cylindre, en cm<sup>3</sup>). Le volume du cylindre est de  $\approx 237,6 \text{ cm}^3$  (dimensions : 9,8 cm de hauteur, 5,5 cm de diamètre).

## 5. Acquisition des données spectrales

### 5.1. Caractéristiques du spectromètre

Le scanner NeoSpectra est un spectromètre opérant dans le domaine électromagnétique du proche infrarouge avec les caractéristiques suivantes :

Caractéristiques	Valeur
Dimensions	178 x 91 x 62 mm
Poids	1 kg
Températures de fonctionnement	-5 à 40°C
Capacité de la batterie (théorique)	800 scans
Durée de chargement	-3h pour 80% de batterie, 5h pour 100%
Connexion sans fil	Bluetooth V4.2 BLE
Port de chargement	USB-C
Logiciels	Applications NeoSpectra mobile
Région du spectre électromagnétique mesurée	1 350 – 2 500 nm
Résolution spectrale	16 nm
Rapport signal-sur-bruit	2 000 : 1
Diamètre du faisceau lumineux collecté	-1 cm

Les éléments contenus dans la mallette de l'appareil sont présentés dans la Figure 6 ci-après :



Figure 6. Éléments contenus dans la mallette du spectromètre NeoSpectra.

## 5.2. Configuration du portail NeoSpectra et de l'application Collect

Les données spectrales acquises avec le spectromètre sont enregistrées dans l'**application mobile NeoSpectra Collect**, développée par Si-Ware Systems, via une connexion Bluetooth. Elles sont ensuite sauvegardées sur le **portail cloud NeoSpectra** (accessible à l'adresse suivante : <https://portal.neospectra.cloud/auth/login>) grâce à une synchronisation via le réseau Wi-Fi (à noter que cette synchronisation peut parfois s'avérer lente) (Figure 7).



Figure 7. Schéma de la connexion entre le spectromètre et l'application NeoSpectra Collect via connexion Bluetooth et avec le portail cloud Neospectra via connexion Wi-Fi.

Un compte utilisateur, associé à une adresse e-mail institutionnelle, doit être créé en amont, via le portail, par un **administrateur** lié à la licence d'utilisation de Nitidæ, afin de permettre l'accès au portail. Les personnes avec un rôle d'administrateur de Nitidæ sont, à ce jour, Rolande Ettien ([r.ettien@nitidae.org](mailto:r.ettien@nitidae.org)), Beatriz Bellón ([b.bellon@nitidae.org](mailto:b.bellon@nitidae.org)) et Clovis Grinand ([c.grinand@nitidae.org](mailto:c.grinand@nitidae.org)).

Une fois le compte activé, l'utilisateur peut :

- Se connecter à l'application mobile NeoSpectra Collect avec son compte utilisateur ;
- Associer le spectromètre à son compte ;
- Synchroniser les données collectées avec le portail en ligne et ;
- Gérer et visualiser les données sauvegardées sur le portail.

Les étapes d'installation et de configuration de l'application NeoSpectra Collect sont détaillées, et accompagnées de captures d'écran, ci-dessous :

### Étape 1 - Télécharger l'application sur un smartphone ou tablette

- Ouvrir le **Google Play Store** sur un appareil Android
- Rechercher « **NeoSpectra Collect** »
- Télécharger et installer l'application

### Étape 2 - Connexion au compte utilisateur et au portail en ligne

- Ouvrir l'application NeoSpectra Collect
- Se connecter avec les **identifiants fournis par l'administrateur** relié à la licence Nitidæ
- S'assurer que l'option « **Sync Data** » est activée, et que l'appareil est **connecté à Internet (wifi activé)** pour permettre la synchronisation avec le portail en ligne

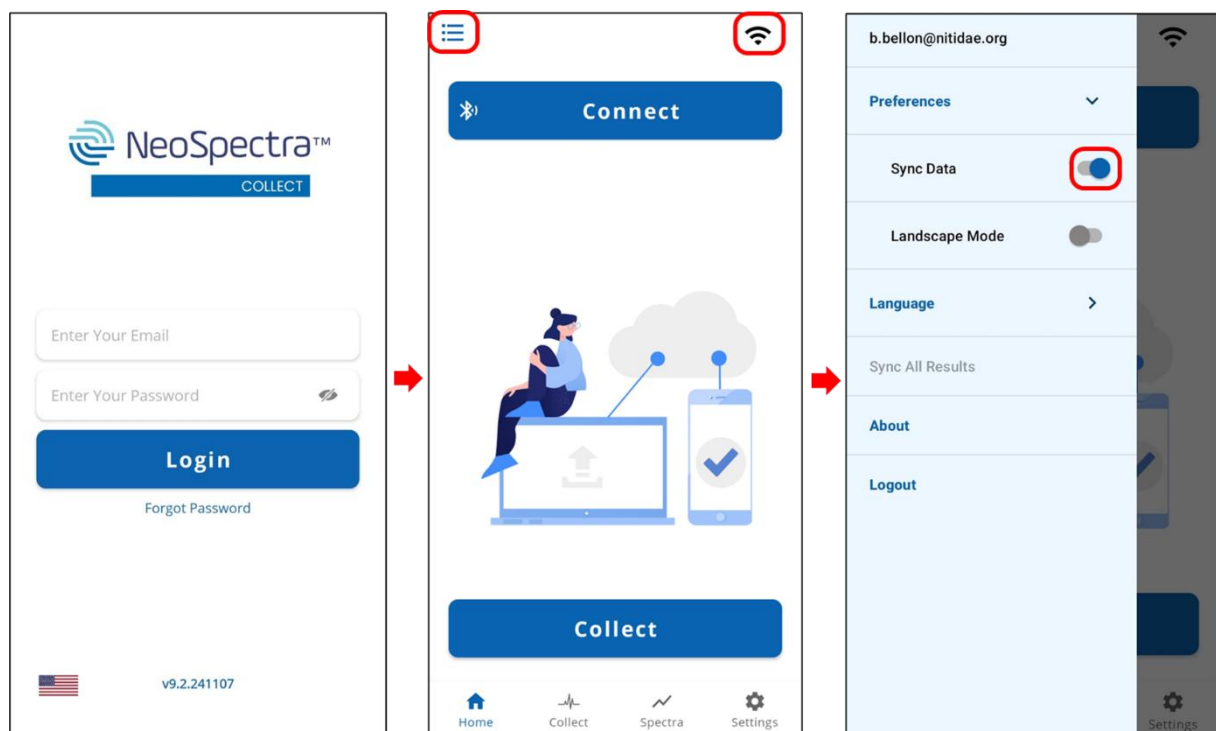


Figure 8. Interface de l'application NeoSpectra Collect montrant l'écran de connexion au compte utilisateur, l'activation de l'option « Sync Data » et l'indicateur de connexion à Internet pour la synchronisation des données avec le portail en ligne.

### Étape 3 – Connexion au spectromètre

- Allumer le spectromètre
- Activer le **Bluetooth** sur l'appareil mobile et vérifier que la connexion Bluetooth est également active dans l'écran du spectromètre
- Cliquer sur **Connect**, puis sélectionner le bon appareil (identifiable par son numéro de série) et appuyer à nouveau sur **Connect**.

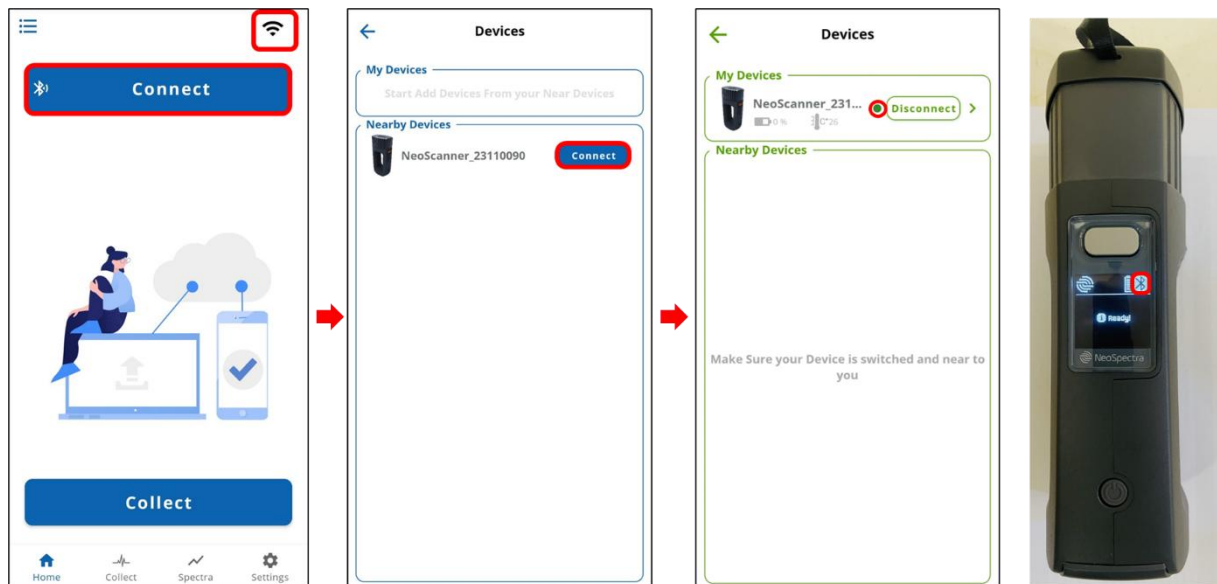


Figure 9. Connexion au spectromètre via l'application NeoSpectra Collect : activation du Bluetooth sur l'appareil mobile et sur le spectromètre, sélection de l'appareil à connecter à partir de son numéro de série et indicateurs de connexion.

### 5.3. Préparation de l'espace de travail

Avant de commencer les acquisitions spectrales, il est essentiel d'imprimer la liste d'échantillons à scanner, avec leur identifiant, et de bien préparer l'espace de travail pour garantir une manipulation fluide et organisée. Il est nécessaire de disposer d'une grande table ou **paillasse dégagee**, dans une salle qui doit être protégée de la poussière, le vent et la lumière directe ou tout autre élément pouvant affecter les échantillons et leur scan.

Une suggestion d'**organisation des différents éléments nécessaires sur la paillasse** est présentée dans la Figure 10 ci-après :



Figure 10. Suggestion d'organisation des éléments nécessaires pour les acquisitions des données spectrales sur la paillasse.

## 5.4. Mode opératoire

Cette section décrit les étapes du protocole à suivre pour acquérir et gérer les données spectrales à l'aide du spectromètre, allant de la disposition de l'échantillon pour l'analyse jusqu'à la vérification finale des acquisitions.

### Étape 1 – Disposition de l'échantillon

L'échantillon à scanner (préalablement préparé selon les étapes de la section 4.1) doit être versé dans un récipient adapté, capable de contenir une **épaisseur minimale de 1 cm de sol** pour garantir une mesure fiable. La surface du récipient doit également être **suffisamment large** pour permettre l'acquisition de **10 mesures distinctes**, en déplaçant la cellule de mesure d'au moins **1 cm entre chaque mesure** (soit environ le diamètre du faisceau lumineux collecté). Dans la mesure du possible, les récipients doivent être noirs ou, s'ils sont transparents, placés sur une surface noire afin de garantir un fond absorbant et **éviter les interférences du support avec la mesure spectrale**. Un exemple de disposition de l'échantillon, réparti dans deux récipients avec les emplacements de mesure recommandés, est présenté en Figure 11.

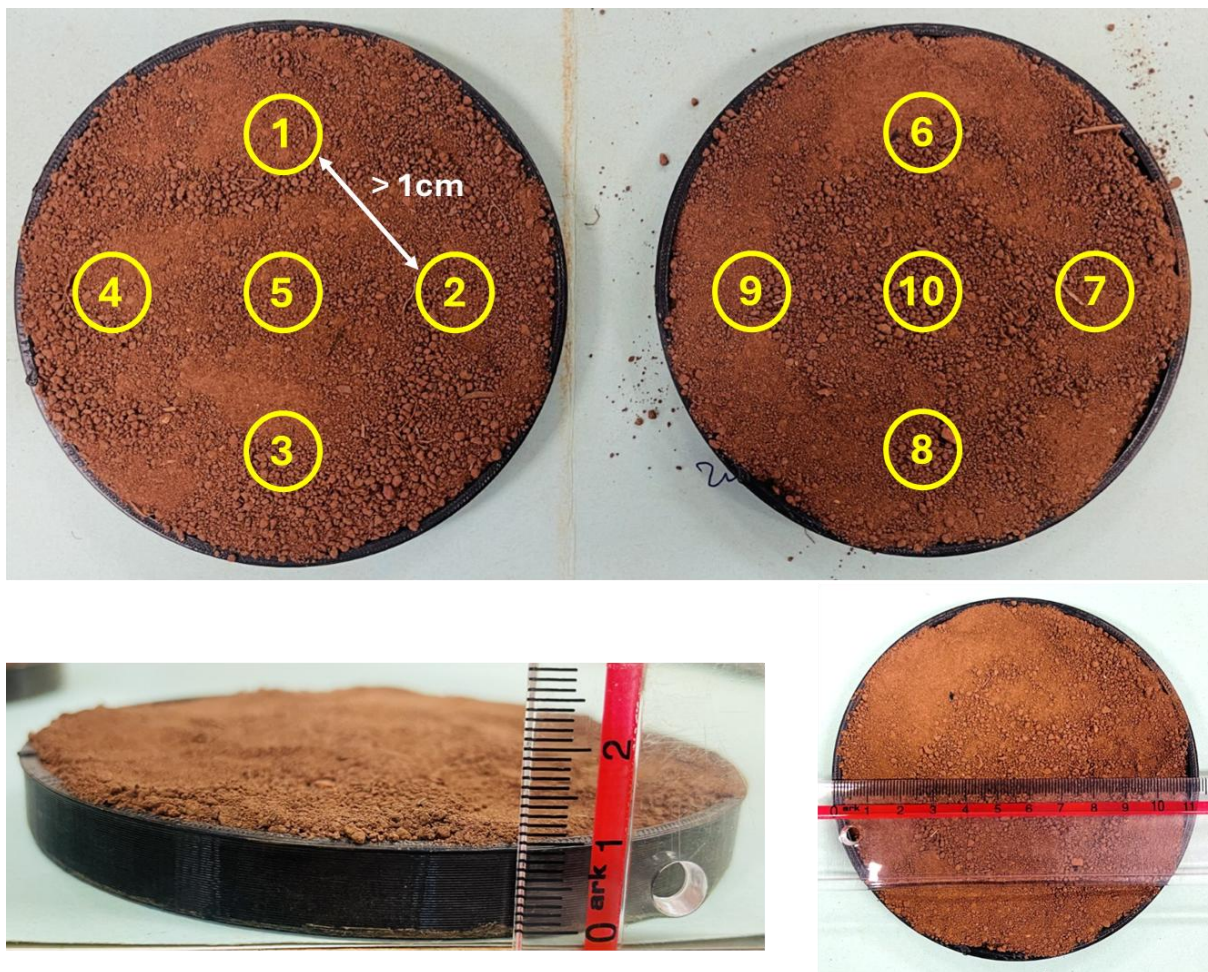


Figure 11. Suggestion de disposition de l'échantillon pour l'acquisition des données spectrales, réparti dans deux récipients noirs de 1 cm de profondeur et de 11 cm de diamètre. Les cercles jaunes indiquent les emplacements approximatifs de la cellule de mesure du spectromètre pour la réalisation de 10 répétitions de mesure, espacés de plus de 1 cm afin de garantir l'indépendance des acquisitions.

Le transfert du sol depuis les sachets vers les récipients peut être facilité à l'aide d'une pelle, d'un entonnoir ou d'une cuillère. Une spatule ou une cuillère permet ensuite de niveler et tasser légèrement la surface, en retirant l'excès de matière, de façon à obtenir une **surface plane, homogène, en contact direct et horizontal avec la cellule de mesure** du spectromètre. Pour limiter les pertes de matière, il est recommandé de placer les récipients au-dessus de feuilles de papier ou d'un plateau. Ces supports doivent être nettoyés soigneusement entre chaque échantillon afin d'éviter tout risque de contamination croisée entre échantillons.

## Étape 2 - Configuration des paramètres de mesure

Les paramètres généraux de scan qui se trouvent dans le menu *Settings* de l'application NeoSpectra Collect doivent rester configurés selon les valeurs par défaut proposées par l'application (cf., Figure 12 ci-dessous) :

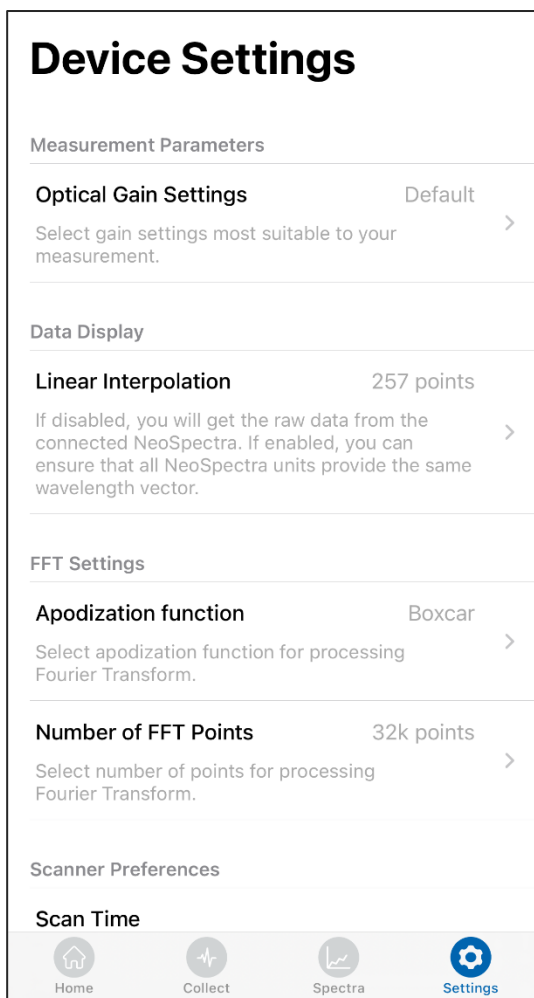


Figure 12. Paramètres généraux de scan par défaut dans le menu Settings de l'application NeoSpectra Collect.

Ensuite, sur le **menu Collect** de l'application, remplir les paramètres de mesure suivants :

- *Scan time* (durée d'un scan individuel) = 5 secondes ;
- *Interval* (période de pause dans la mesure entre chaque scan, permettant de déplacer la cellule de mesure au prochain point de scan) = 5 secondes ;
- *Number of measurements* (nombre total de scans par échantillon) = 10 ;
- *Material Name* = identifiant du **lot d'échantillons à scanner** (ex. BD\_321ech\_2024) ;
- *Sample name/ID* (identifiant de l'échantillon) = identifiant unique de l'échantillon à scanner.

Figure 13. Paramètres de mesure à renseigner dans le menu Collect de l'application NeoSpectra Collect, incluant la durée des scans, l'intervalle entre scans, le nombre total de mesures par échantillon, ainsi qu'un exemple d'identifiants pour le lot (Material Name) et l'échantillon (Sample Name/ID).

Chaque spectre collecté (**1 spectre par scan, 10 spectres au total par échantillon**) sera enregistré dans l'application NeoSpectra Collect ainsi que sur le portail cloud sous le **nom de l'échantillon** (Sample name/ID), suivi d'un **suffixe de 1 à 10** (ou de 0 à 9), correspondant au numéro de scan ex., adzope\_n\_345\_1, adzope\_n\_345\_2, [...], adzope\_n\_345\_10 (rappel : 10 acquisitions successives sont effectuées par échantillon afin de couvrir la variabilité spatiale de la surface scannée).

### Étape 3 – Calibration du spectromètre

Avant chaque série de mesures, il est indispensable de calibrer le spectromètre afin de garantir la qualité des données acquises :

- nettoyer soigneusement la cellule de mesure à l'aide du tissu en microfibre ou des lingettes, afin d'éliminer toute poussière ou résidu pouvant interférer avec la calibration ;
- nettoyer également le couvercle contenant la référence blanche ;
- refermer le couvercle sur l'appareil et placer le spectromètre dans sa mallette ;
- appuyer sur le bouton **Calibrate** dans l'application NeoSpectra Collect > menu Collect ;
- attendre la confirmation de fin de calibration avant de réaliser les acquisitions (Figure 14).



Figure 14. Messages affichés sur l'application et sur l'écran du spectromètre indiquant la fin de la calibration, et « blanc » de calibration dans le couvercle.

#### Étape 4 - Scan l'échantillon

Avant de lancer l'acquisition, vérifier que tous les paramètres de mesure sont correctement renseignés dans l'onglet *Collect* de l'application NeoSpectra Collect, et s'assurer que le message **Ready !** s'affiche à l'écran du spectromètre. Placer ensuite le spectromètre **à la verticale**, de manière que la **cellule de mesure soit en contact direct et étanche à la lumière avec la surface de l'échantillon**, à l'endroit prévu pour la première mesure. Il est important de **ne pas exercer de pression excessive** : le poids de l'appareil seul suffit à assurer un bon contact, tout en évitant de rayer ou d'endommager la cellule de mesure.

L'opérateur doit être installé de manière confortable, sans contrainte physique, avec une bonne visibilité à la fois sur **l'écran de l'application** et sur **l'écran du spectromètre**, afin de suivre attentivement le déroulement des étapes (Figure 15).



Figure 15. Placement de l'opérateur pendant l'acquisition de données spectrales en position assise face aux écrans de l'application NeoSpectra Collect et du spectromètre.

Une fois le spectromètre bien positionné, appuyer sur le bouton **Scan** du menu *Collect* pour démarrer la séquence d'acquisitions. Chaque scan s'effectue en trois étapes successives, visibles sur l'écran de l'appareil :

- **Material scan** : le faisceau lumineux s'allume et le spectromètre enregistre l'information spectrale ;
- **Scan complete** : l'acquisition est terminée ;
- **Lights off** : le faisceau s'éteint et une courte pause permet alors de déplacer le spectromètre vers la position suivante, à plus de 1 cm de la précédente, pour capturer une zone différente de l'échantillon. **Attention** : ce déplacement doit être effectué en soulevant l'appareil puis en le repositionnant délicatement, **sans le faire glisser sur la surface**, afin de ne pas risquer de rayer la cellule de mesure.

Ces trois messages se succèdent pour chaque répétition, jusqu'à l'acquisition des 10 scans. À la fin de la séquence, le message **Material complete** s'affiche sur l'écran du spectromètre, indiquant la fin des mesures pour l'échantillon (Figure 16). En parallèle, l'application affiche un **indicateur de progression** pendant l'acquisition, permettant de suivre en temps réel l'**avancement des mesures successives** (de 1/10 à 10/10) (Figure 16).



Figure 16. Succession de messages affichés sur l'écran du spectromètre au cours d'une séquence de mesure. L'application NeoSpectra Collect affiche en parallèle un indicateur de progression permettant de suivre l'avancement de la série de scans.

À la fin des acquisitions, **nettoyer délicatement et soigneusement la cellule de mesure**, puis **replacer le spectromètre dans sa mallette avec le couvercle fermé** et **recalibrer l'appareil** selon l'étape 3, pendant les vérifications des acquisitions (voir étape suivante) et la préparation du prochain échantillon.

### Étape 5 – Vérification des acquisitions et consignes finales

Avant de passer à l'échantillon suivant, il est impératif de vérifier la qualité des acquisitions réalisées. Cette vérification s'effectue à deux niveaux :

- Dans l'application NeoSpectra Collect (onglet **Spectra**) sur le smartphone ou la tablette.

- Sur le portail cloud, dans le menu **Measurements** > [Nom du matériel], où sont stockées les données synchronisées (voir Figure 17).

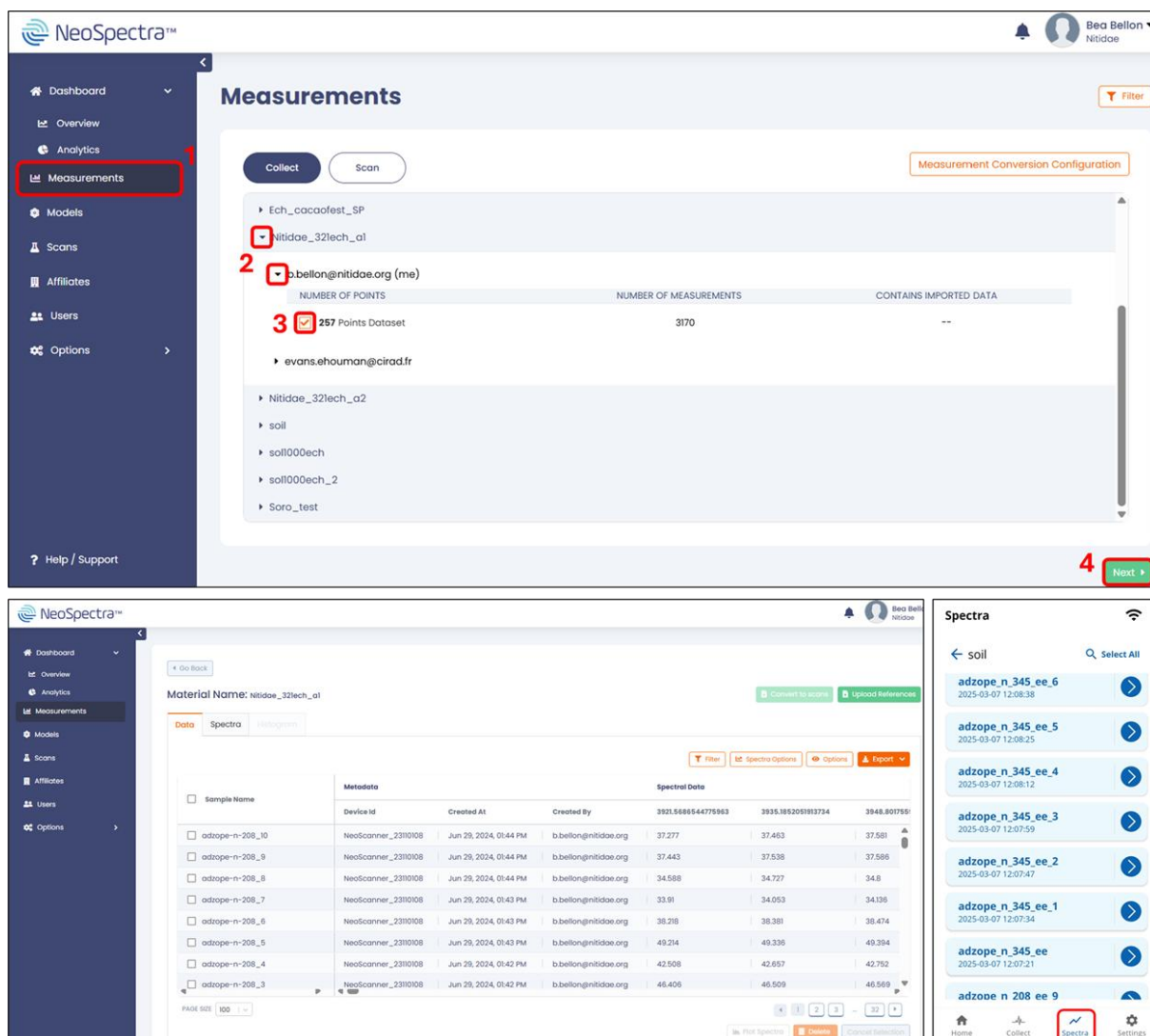


Figure 17. Démarche pour accéder à la liste des acquisitions dans le menu Measurements du portail cloud et dans l'onglet Spectra de l'application NeoSpectra Collect.

En particulier il faudra vérifier les points suivants :

- **Nombre de répétitions** - Vérifier qu'il y a exactement **10 scans** par échantillon. Si le nombre de répétitions est incorrect :
  1. supprimer l'échantillon concerné dans l'application ;
  2. attendre que la synchronisation avec le portail cloud soit complétée (c.-à.-d., que l'échantillon supprimé n'apparaisse plus dans la liste en ligne) ;
  3. corriger le paramètre **Number of Measurements = 10** dans le menu Collect de l'application, puis recommencer l'acquisition (refaire l'étape 4).

**Attention** : supprimer des données uniquement depuis le portail cloud ne suffit pas. Si les données ne sont pas également supprimées dans l'application Collect, elles seront réimportées automatiquement dans le cloud lors de la prochaine synchronisation. Il est donc **indispensable de supprimer les scans depuis l'application** en sélectionnant l'option **Local and Cloud** (Figure 18) pour que la suppression soit définitive.

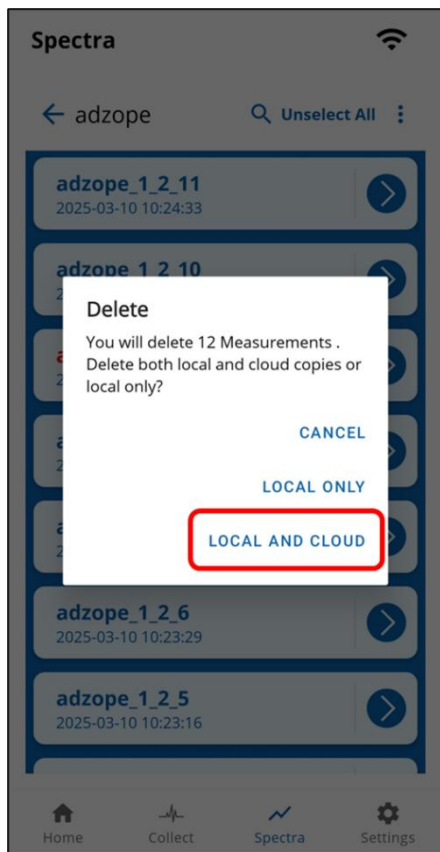


Figure 18. Démarche pour supprimer des spectres dans l'application NeoSpectra Collect : 1. Sélectionner les spectres à supprimer dans la liste, et 2. choisir l'option Local and cloud pour les effacer à la fois de l'appareil et du portail cloud.

- **Identifiants des échantillons** - S'assurer que l'identifiant de l'échantillon est correctement saisi. En cas d'erreur de frappe, le renommage peut être effectué **uniquement dans l'application** et il faudra renommer manuellement une par une les 10 scans de l'échantillon (voir Figure 19).

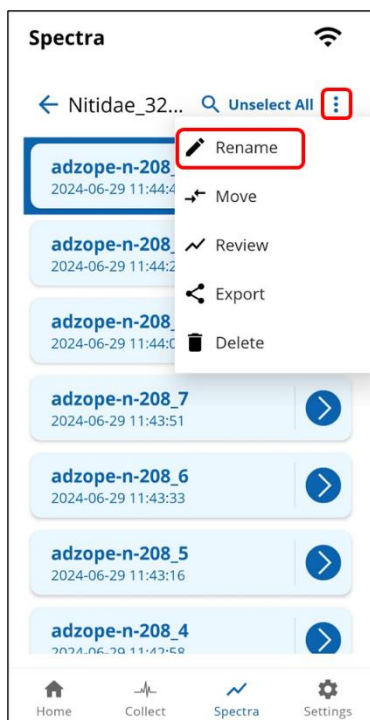


Figure 19. Démarche pour renommer des spectres dans l'application NeoSpectra Collect : sélectionner les spectres un par un et modifier leur nom individuellement.

Si deux échantillons ont été scannés sous le même identifiant on retrouve 20 scans pour un même identifiant. Dans ce cas, supprimer les **10 derniers scans** et recommencer leur acquisition avec le bon identifiant.

**Attention** : il n'est pas possible de **modifier les noms d'échantillons** via le portail cloud, il est donc essentiel de le faire **depuis l'application** et d'attendre la synchronisation complète des changements avant de poursuivre. En cas de manque de synchronisation du nom modifié sur la plateforme il faudra supprimer l'échantillon et recommencer l'acquisition en renseignant le bon nom.

- **Synchronisation application–plateforme cloud** - Vérifier que **tous les scans** sont bien synchronisés avec la plateforme cloud. Dans l'application *Collect*, un identifiant de scan **bleu** signifie que la synchronisation est réussie ; un identifiant **rouge** indique qu'elle est encore en attente (voir Figure 20).

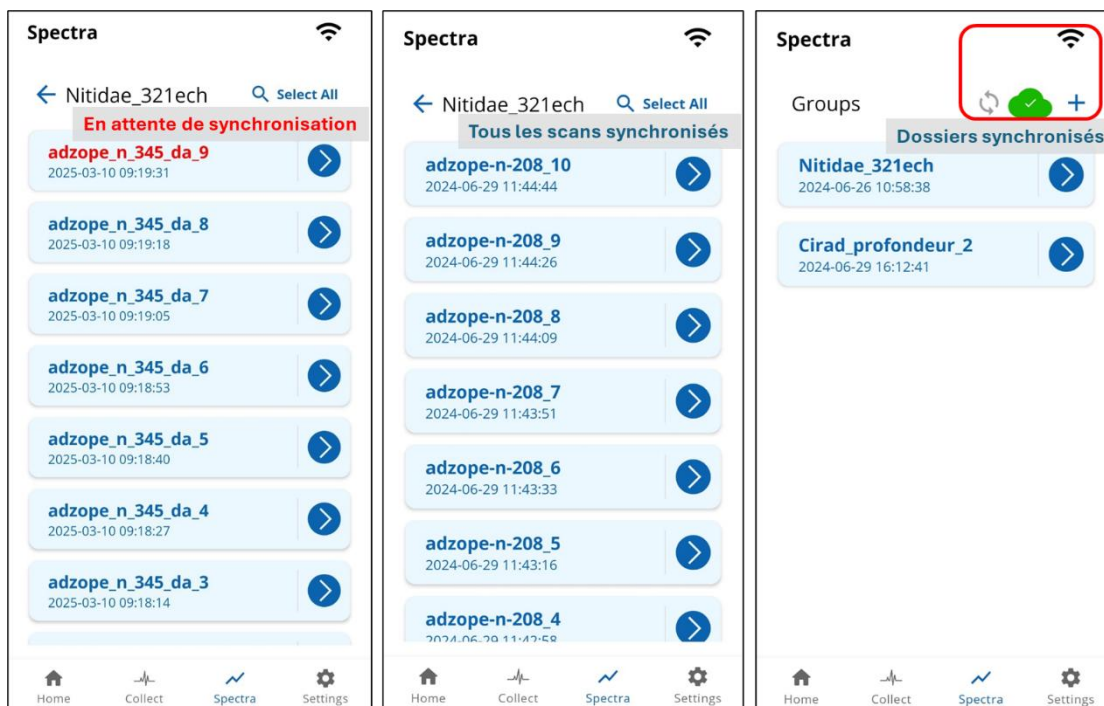


Figure 20. Indicateurs de synchronisation dans l'application NeoSpectra Collect : un identifiant de scan bleu indique que la synchronisation avec la plateforme cloud est réussie, tandis qu'un identifiant rouge signale qu'elle est toujours en attente.

Si un ou plusieurs scans restent en rouge plusieurs minutes et **n'apparaissent pas dans le portail cloud**, supprimer l'échantillon concerné, confirmer la suppression dans la plateforme cloud, et reprendre l'acquisition depuis l'étape 4.

- **Qualité des spectres** – Vérifier la **forme générale des spectres** (forme typique d'un sol, avec des pics caractéristiques d'absorption et de réflectance, ex., Figure 21).

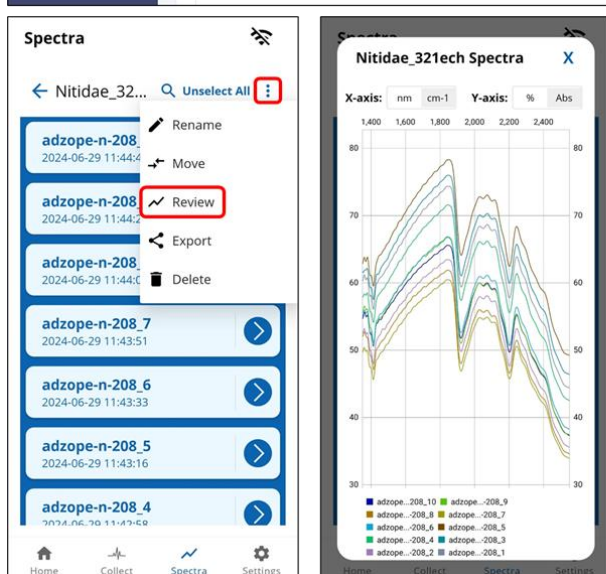
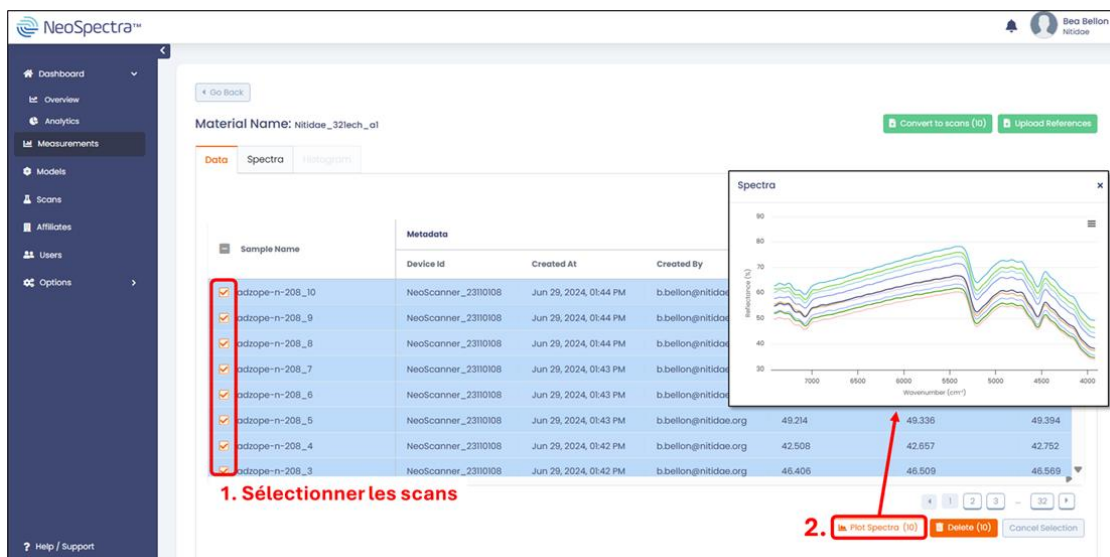


Figure 21. Démarche pour afficher les signatures spectrales des scans acquis et contrôler leur qualité dans la plateforme cloud et dans l'application NeoSpectra Collect.

Si un spectre apparaît **plat**, bruité ou présente une forme anormale, il faut supprimer l'ensemble des 10 répétitions associées dans l'application, attendre la synchronisation avec la plateforme cloud, puis reprendre l'acquisition (refaire l'étape 4).

**Important :** Noter dans le **carnet de laboratoire** toutes les manipulations effectuées (ex., suppression ou renommage de fichiers, anomalies détectées, etc.) (Figure 22). Cette traçabilité est essentielle pour comprendre d'éventuels problèmes ultérieurs dans la base de données finale.

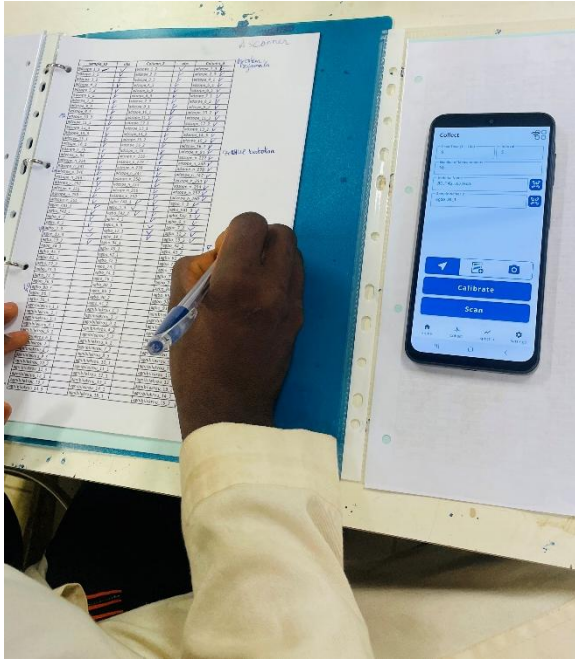


Figure 22. Exemple de page de carnet de laboratoire consignant les manipulations effectuées pendant la campagne d'acquisition spectrale, incluant le suivi des échantillons scannés, la suppression ou le renommage éventuels de fichiers, ainsi que des anomalies détectées.

Une fois la vérification des acquisitions terminée, il est essentiel d'appliquer les bonnes pratiques suivantes avant de passer à la mesure de l'échantillon suivant, afin de garantir le suivi et la qualité des mesures :

- **cocher l'échantillon scanné** dans la liste de suivi,
- **nettoyer soigneusement les récipients** afin d'éliminer toute particule résiduelle et éviter toute contamination croisée,
- **attendre la fin complète de la calibration** avant de recommencer une nouvelle série de mesures,
- **mettre à jour le nom de l'échantillon** sur l'application pour qu'il corresponde exactement à celui du prochain échantillon à scanner.

### Points d'attention supplémentaires

Pour garantir la qualité des données et assurer le bon fonctionnement du spectromètre, il est essentiel de prendre en compte les points suivants pendant les acquisitions spectrales :

- **Reprise des mesures perturbées** : Si vous estimez que l'acquisition a été perturbée (échantillon trop hétérogène, difficultés de déplacement de l'appareil, défaut de contact, etc.), il est impératif de refaire la série de mesures de l'échantillon. Pensez à noter le problème rencontré dans le carnet de laboratoire afin d'assurer une bonne traçabilité.
- **Gestion de la mémoire de l'appareil** : Le spectromètre dispose d'une mémoire interne capable de stocker **999 scans** (soit 99 échantillons). Une fois la mémoire pleine, il faudra la vider pour poursuivre les acquisitions (Figure 23). Avant de procéder à cette opération, il faut s'assurer que tous les scans collectés ont bien été synchronisés avec la plateforme cloud. Il est également recommandé de réaliser une sauvegarde locale de sécurité (voir section 5.5. pour les détails sur la procédure de téléchargement des données spectrales).

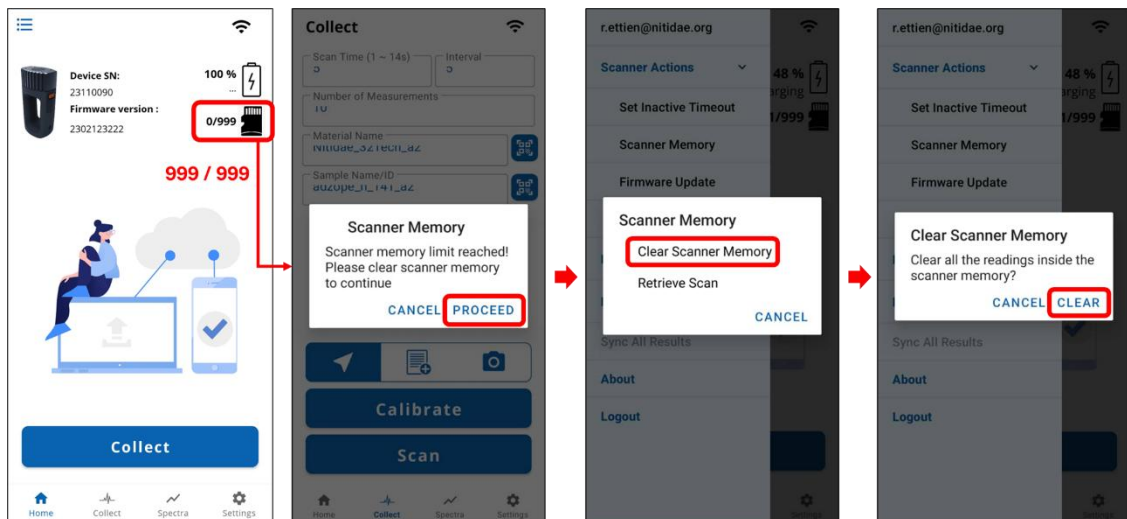


Figure 23. Procédure à suivre pour vider la mémoire interne du spectromètre lorsque la limite de 999 scans est atteinte.

- Gestion des batteries :** La batterie du spectromètre se décharge durant l'utilisation. Pour éviter toute interruption, il est recommandé de brancher l'appareil sur une prise d'alimentation **avant que la batterie ne soit totalement épuisée**. Il est possible de continuer à scanner pendant que l'appareil est branché, mais veillez à **débrancher dès que la batterie est complètement chargée** pour éviter la surchauffe de l'appareil. Profitez des pauses pour recharger le spectromètre. Veillez à charger également le smartphone, si besoin, pendant la session.

## Références

- Corti, G., Ugolini, F. C., Agnelli, A., Certini, G., Cuniglio, R., Berna, F., & Fernández Sanjurjo, M. J. (2002). The soil skeleton, a forgotten pool of carbon and nitrogen in soil. *European Journal of Soil Science*, 53(2), 283-298.
- FAO (2020). Standard operating procedure for handling and preparation of soil samples for chemical and physical analyses. Global Soil Laboratory Network (GLOSOLAN). <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca8283en>
- Feller, C. (1979). Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. *Cahier ORSTOM: Série Pédologie*, 17, 339-346.
- IPCC (2003). Good practice guidance for land use, land-use change and forestry (GPG-LULUCF). <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf.html>
- Perruchoud, D., Walthert, L., Zimmermann, S., & Lüscher, P. (2000). Contemporary carbon stocks of mineral forest soils in the Swiss Alps. *Biogeochemistry*, 50(2), 111-136.
- Poeplau, C., Vos, C., & Don, A. (2017). Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. *Soil*, 3(1), 61-66.

## Annexe I. Système de codification des échantillons

Les codes des échantillons à prélever dans le réseau d'expérimentation de parcelles de manioc et cacao contiennent les informations suivantes :

- Préfix identifiant « **adzope\_n** » permettant de les dissocier des autres lots d'échantillons de la base de données Terri4Sol ;
- Pour les parcelles de manioc, la mesure d'accompagnement mise en place sur les parcelles test (« **cas** » culture associée soja, « **caa** » culture associée arachide, « **cah** » culture associée haricot, « **fo** » fumure organique, « **ev** » engrais vert, « **jc** » jachère cultivée, « **nb** » non brûlage, « **rf** » restitution feuilles), ou « **t** » pour indiquer les parcelles témoin ;
- Pour les parcelles de cacao, les critères des parcelles (« **PO** » production > 300 kg & ombrage, « **PPS** » production > 300 kg & pas d'ombrage, « **DO** » production < 300 kg & ombrage, « **DPS** » production < 300 kg & pas d'ombrage), suivis des suffixes « **r** » pour l'appui réhabilitation, « **a** » pour l'appui agroforesterie/réintroduction, et « **t** » pour les parcelles témoin ;
- Le nom et prénom des producteurs.trices ;
- Les suffixes « **PC** » pour les analyses physico-chimiques ou « **BD** » pour la densité apparente (*bulk density*) ;
- La profondeur du prélèvement (« **1** » 0-10 cm, « **2** » 10-20 cm, « **3** » 20-30 cm)

Exemples de codes d'échantillons du réseau d'expérimentation de parcelles de manioc :

adzope\_n/ev/abeu\_mireille/PC/1

adzope\_n/ev/abeu\_mireille/PC/2

adzope\_n/ev/abeu\_mireille/PC/3

adzope\_n/t/abeu\_mireille/PC/1

adzope\_n/t/abeu\_mireille/PC/2

adzope\_n/t/abeu\_mireille/PC/3

adzope\_n/ev/abeu\_mireille/BD/1

adzope\_n/ev/abeu\_mireille/BD/2

adzope\_n/ev/abeu\_mireille/BD/3

adzope\_n/t/abeu\_mireille/BD/1

adzope\_n/t/abeu\_mireille/BD/2

adzope\_n/t/abeu\_mireille/BD/3

Exemples de codes d'échantillons du réseau d'expérimentation de parcelles de cacao :

adzope\_n/DPSa-Abé-Théodore/PC/1

adzope\_n/DPSa-Abé-Théodore/PC/2

adzope\_n/DPSa-Abé-Théodore/PC/3

adzope\_n/DPSt-Abé-Théodore/PC/1

adzope\_n/DPSt-Abé-Théodore/PC/2

adzope\_n/DPSt-Abé-Théodore/PC/3

adzope\_n/DPSa-Abé-Théodore/BD/1

adzope\_n/DPSa-Abé-Théodore/BD/2

adzope\_n/DPSa-Abé-Théodore/BD/3

adzope\_n/DPSt-Abé-Théodore/BD/1

adzope\_n/DPSt-Abé-Théodore/BD/2

adzope\_n/DPSt-Abé-Théodore/BD/3

## Annexe II. Calcul du stock de carbone organique du sol et d'azote

Les sols du réseau d'expérimentation étant généralement caillouteux, présentent une **proportion importante d'éléments grossiers** (fragments minéraux > 2 mm). Conformément aux recommandations du GIEC, dans ce contexte, les estimations de densité apparente doivent être corrigées en fonction de la proportion de fragments grossiers (IPCC, 2003). Cette correction consiste à considérer uniquement la **fraction fine du sol**, les fragments grossiers étant généralement considérés comme dépourvus de carbone organique du sol (Perruchoud *et al.*, 2000). Cette correction est nécessaire afin d'éviter une **surestimation des stocks de carbone organique** dans ce type de sols.

Les **stocks de carbone organique** sont ainsi estimés en tenant compte de la **densité apparente de la fraction fine du sol**, selon l'approche proposée par Poeplau, Vos et Don (2017), décrite ci-dessous.

La **masse de la fraction fine du sol** (< 2 mm) est calculée selon l'équation suivante :

$$Masse_{frac\ fine}(g) = DA \times Volume \times Fraction\ fine$$

où :

- DA est la densité apparente du sol ( $g\ cm^{-3}$ ), équivalente à  $t\ m^{-3}$  ;
- Volume de l'échantillon ( $cm^3$ ) ;
- Fraction fine correspond au rapport entre la masse de la fraction fine et la masse totale de l'échantillon, sous forme décimale.

La **densité apparente de la fraction fine du sol** est alors définie par :

$$DA_{frac\ fine}(t\ m^{-3}) = \frac{DA \times Volume \times Fraction\ fine}{Volume} = DA \times Fraction\ fine$$

Le **stock de carbone organique du sol** pour une profondeur d'échantillonnage donnée est calculé selon l'équation suivante :

$$SOC_{stock}(t\ ha^{-1}) = \frac{\%C_{org}}{100} \times DA_{frac\ fine} \times Profondeur \times 10\ 000$$

où :

- $\%C_{org}$  est la teneur en carbone organique, estimée par spectrométrie ;
- $DA_{frac\ fine}$  est la densité apparente de la fraction fine ( $t\ m^{-3}$ ) ;
- Profondeur est exprimée en m ;
- $10\ 000\ m^2\ ha^{-1}$  correspond à la surface d'un hectare.

Pour un échantillon de **10 cm d'épaisseur (0,1 m)**, l'équation peut être simplifiée comme suit :

$$SOC_{stock}(t\ ha^{-1}) = \frac{\%C_{org}}{100} \times DA_{frac\ fine} \times 1000$$

Le **stock total de carbone organique du sol sur le profil étudié** est obtenu par l'addition des stocks calculés pour chaque profondeur :

$$SOC_{stock\ total}(t\ ha^{-1}) = \sum SOC_{stock}(0 - 10\ cm, 10 - 20\ cm, 20 - 30\ cm)$$

Bien que la fraction grossière puisse contenir de faibles quantités de carbone organique (Corti et al., 2002), ce qui peut conduire à une **légère sous-estimation des stocks**, cette approche est considérée comme la plus robuste et la plus adaptée dans le contexte de sols riches en éléments grossiers (Poeplau, Vos et Don, 2017).

Les **stocks d'azote du sol** sont calculés selon la même approche que les stocks de carbone organique, en remplaçant la teneur en carbone organique par la **teneur en azote**, estimée également par spectrométrie.