



HAL
open science

**Maintien de la capacité d'infiltration des sols soumis aux eaux usées traitées : évaluation de l'intérêt de l'apport de matière carbonée (broyat de bois): Protocole in-situ (MATCARB) Convention MTE/DEB 2020-2022 pour la gestion des milieux et la biodiversité n°2102932869
Juillet 2021**

Laura Delgado-Gonzalez, Vivien Dubois, Catherine Boutin, Laurent Lassabatere, Rémi Clement

► **To cite this version:**

Laura Delgado-Gonzalez, Vivien Dubois, Catherine Boutin, Laurent Lassabatere, Rémi Clement. Maintien de la capacité d'infiltration des sols soumis aux eaux usées traitées : évaluation de l'intérêt de l'apport de matière carbonée (broyat de bois): Protocole in-situ (MATCARB) Convention MTE/DEB 2020-2022 pour la gestion des milieux et la biodiversité n°2102932869 Juillet 2021. REVERSAAL. 2021. hal-04292917

HAL Id: hal-04292917

<https://hal.inrae.fr/hal-04292917v1>

Submitted on 17 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Open licence - etalab



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE
la science pour la vie, l'humain, la terre

➤ **Maintien de la capacité d'infiltration des
sols soumis aux eaux usées traitées :
évaluation de l'intérêt de l'apport de matière
carbonée (broyat de bois): Protocole *in-situ*
(MATCARB)**

**Convention MTE/DEB 2020-2022 pour la gestion des
milieux et la biodiversité n°2102932869**

Juillet 2021

**Laura DELGADO-GONZALEZ
Vivien DUBOIS
Catherine BOUTIN
Laurent LASSABATERE
Rémi CLEMENT
UR REVERSAAL INRAE, LEHNA**

Ces travaux bénéficient du soutien du Ministère de la Transition Ecologique dans le cadre de la convention du 07/09/2020



INRAE, Centre de Lyon-Grenoble-Auvergne-
Rhone-Alpes
Unité de recherche REVERSAAL
5 rue de la Doua CS 20244
69625 VILLEURBANNE Cedex
www.inrae.fr

Villeurbanne, 09 juillet 2021

Projet : MATCARB

Responsable :

Rémi CLEMENT

Laura DELGADO-GONZALEZ

Contact : Laura DELGADO-GONZÁLEZ
Mail: laura.delgado-gonzalez@inrae.fr

Objet : Rapport intermédiaire 2021 : Protocole *in-situ*

1. Cadre de l'étude	3
2. Objectif de l'étude <i>in situ</i>	4
3. Description générale des sites expérimentaux	4
4. Méthodologie expérimentale	5
4.1. Critères de choix des sites expérimentaux	7
4.1.1. Temps de fonctionnement (âge des filtres)	7
4.1.2. Type de sol	7
4.1.3. Type de bois broyé	8
4.1.4. Nombre de tranchées	8
4.1.5. Dimensions tranchées	9
4.1.6. Nature de l'eau usée	9
4.1.7. Fréquence d'alimentation	9
4.1.8. Proximité des sites	9
4.1.9. Limitations techniques	9
4.2. Sélection des sites expérimentaux	10
4.3. Description des étapes du protocole	11
4.3.1. Étape 1 : Documentation du site	12
4.3.2. Étape 2 : Caractérisation géophysique des sites expérimentaux	12
4.3.2.1. Tomographie de résistivité électrique	12
4.3.2.2. Profil de sol	14
4.3.3. Étape 3 : Étude de la capacité d'infiltration des sols dans un FBB	15
4.3.3.1. Caractérisation de la conductivité hydraulique à saturation	15
4.3.3.2. Mesures complémentaires aux tests d'infiltration	21
4.3.4. Étapes 4 et 5 : Échantillonnage et analyses	22
4.3.4.1. Granulométrie	23
4.3.4.2. Teneur en eau et densité apparente	24
4.3.4.3. Matières volatiles	25
4.3.4.4. Teneurs en carbone organique et azote total	25
4.3.4.5. pH du sol	26
4.3.4.6. Métaux	27
4.3.4.7. Phosphore total	27
4.3.4.8. Capacité d'échange cationique et cations échangeables	27
4.3.4.9. Présence de la macrofaune	28
4.3.5. Étape 6 : Analyse des données	29
5. Synthèse d'intervention sur un site	29
6. Planning des campagnes de terrain	34

1. Cadre de l'étude

En partenariat avec le ministère de la Transition Écologique, l'unité de recherche REVERSAAL coordonne une étude portant sur le maintien de la capacité d'infiltration des sols, appliquée aux surfaces d'infiltration d'eaux usées traitées (EUT). En effet, l'une des principales difficultés lorsque l'on infiltre des EUT dans un sol, est de maintenir dans le temps sa capacité d'infiltration. La diminution de la capacité d'infiltration est généralement liée à des phénomènes de colmatage, qui peuvent avoir différentes origines. Le colmatage est le phénomène d'obturation progressive des pores du sol créé par un dépôt des fines particules (minérales ou organiques) charriées par l'EUT ou par des développements d'algues ou de bactéries (Forquet *et al.*, 2014). Le colmatage provoque ainsi une réduction de la perméabilité du sol. On distingue trois types de colmatage : biologique, physique et chimique. Le colmatage biologique se produit lorsqu'il y a un développement excessif des microorganismes contenus dans l'eau (cyanobactéries, algues, etc.) qui comble la porosité du sol (Baveye *et al.* 1998; Gonzalez-Merchan 2012). Le colmatage physique est provoqué par l'accumulation des matières en suspension (MES) présentes dans l'eau qui s'infiltre dans le sol ou par la compaction de celui-ci sous l'effet de la charge d'eau qui lui est appliquée. Les fines particules réduisent la porosité du matériau. Plus les sols ont une structure fine, plus le colmatage a lieu à proximité immédiate de leur surface et plus il est rapide ; pour les sols sableux, les MES migrent en profondeur avant de créer du colmatage (Djedidi et Hassen 1991; Yong, McCarthy et Deletic 2013). Par ailleurs, plus les particules charriées sont grosses, plus elles s'accumulent superficiellement et plus elles sont fines, plus elles migrent en profondeur. Ces deux mécanismes de colmatage sont les plus fréquemment rencontrés. Quant au colmatage chimique, il se crée, soit par cristallisation des minéraux présents dans l'eau, très souvent le carbonate de calcium (CaCO_3), soit par dissolution des grains de la matrice du sol par action des éléments chimiques charriés par l'eau dont la recristallisation bouche alors les pores. Cette réalité est d'autant plus vraie pour les sols à faible conductivité hydraulique à saturation. Lorsqu'un sol est colmaté, cela peut entraîner différents problèmes, comme du flaquage sur la parcelle conduisant à d'éventuels problèmes sanitaires.

Des travaux menés à INRAE, dans l'unité de recherche REVERSAAL, ces dernières années (Brun *et al.*, 2020), ont conduit à l'hypothèse que l'infiltration des eaux ménagères dans des tranchées d'infiltration remplies d'un support carboné, notamment le broyat de bois (BB), puisse favoriser le maintien de l'infiltration. Le filtre à broyat de bois (FBB) est un système constitué de tranchées filtrantes non étanches creusées dans le sol et remplies d'amendement organique. Les évolutions des capacités d'infiltration de l'ensemble « Sol et BB » seraient liées donc aux interactions entre le sol, le bois broyé et la macrofaune qui peut se développer dans ce nouvel écosystème. L'utilisation d'un support carboné (BB) présente un avantage non négligeable car c'est un matériau facilement disponible et renouvelable. Cette utilisation serait facilement extensible aux surfaces d'infiltration d'EUT. Cette hypothèse est, cependant, essentiellement basée sur des observations d'utilisateurs de terrain. La problématique de recherche est de déterminer dans quelle mesure l'utilisation de broyat de bois sur les surfaces d'infiltration permettrait de maintenir dans le temps la capacité d'infiltration des sols. Cela se concrétise sur les questions scientifiques suivantes :

1. Le BB contribue-t-il véritablement au maintien de l'infiltration des EUT dans le sol ?
2. Quelle est l'influence de la matière organique (BB) sur la structure du sol sous-jacent ?
3. Quelle est l'évolution pédologique du profil de sol par mélanges du BB et de l'horizon sous-jacents, en particuliers existe-t-il des processus aux interfaces entre les horizons sol/BB ?
4. Quel est l'impact des modifications pédologiques (évolution de la structure) sur les propriétés hydrodynamiques des horizons et notamment sur la conductivité hydraulique à saturation ?
5. Quel est le rôle joué par la faune et spécialement les mécanismes de bioturbation ?

L'objectif principal du projet est d'évaluer l'apport des matières carbonées (le BB) sur l'évolution de l'infiltration dans le sol. De ce premier objectif opérationnel, il en découle un second objectif de caractère scientifique qui est de comprendre et de mettre en évidence les phénomènes d'interactions sol / matière carbonée / macrofaune, contribuant au maintien de l'infiltration.

Pour répondre à ces objectifs de recherche, nous avons retenu une approche méthodologique en deux actions et à deux échelles différentes :

- A l'échelle *in situ* permettant d'évaluer et comparer les propriétés hydrodynamiques du sol sous les tranchées (FBB) et du sol avoisinant. Cette approche est principalement basée sur des essais d'infiltration dans les tranchées garnis de BB et à leur voisinage sur 3 à 4 sites identifiés. Sur chaque site, ces essais sont précédés de mesures géophysiques de tomographie de résistivité électrique pour obtenir une cartographie du sol autour et sous la tranchée étudiée (caractérisation du sol, identification des hétérogénéités). L'ensemble des données collectées, analysé par des approches statistiques, permettrait d'identifier si une évolution de la capacité d'infiltration a lieu grâce à l'interaction BB / sol.
- À l'échelle du laboratoire (colonne) permettant de mieux comprendre les phénomènes en jeu dans l'évolution de l'infiltration à une échelle maîtrisée. Des tests sur 4 pilotes alimentés en EUT et remplis de sol, avec et sans matière organique en surface (BB) et ensemencés ou non par de la macrofaune (vers de terre) sont réalisés afin d'approfondir les connaissances sur les processus et les interactions sol / BB / macrofaune sous conditions contrôlées et comparables pendant 8 à 14 mois. L'impact de la macrofaune sur la création et l'activation des macropores et sur la conductivité hydraulique à saturation sol sera spécifiquement approfondi (colmatage, chimie des interfaces, hydraulique des milieux poreux et impact de la macrofaune).

La méthodologie expérimentale décrite ci-après concerne uniquement la première action à l'échelle *in situ*.

2. Objectif de l'étude *in situ*

L'objectif de la première action du programme MATCARB concerné par ce protocole expérimental est de déterminer en conditions réelles de traitement, l'impact de l'amendement organique BB sur la capacité d'infiltration du sol. Deux hypothèses sont à l'origine d'une amélioration des propriétés hydrauliques du sol : la création des passages préférentiels et macropores à partir des galeries creusées par les lombrics (Blouin *et al.*, 2013) et le développement racinaire favorisé par une plus grande disponibilité de nutriments (notamment l'azote) dans le sol associé une plus grande aération du sol, générée par les galeries des lombrics (Blouin *et al.*, 2013). L'objectif de cette étude sera donc de valider ou d'invalider ces hypothèses.

3. Description générale des sites expérimentaux

Des surfaces d'infiltration en sortie de station d'épuration utilisant des tranchées de BB n'existent pas à ce jour. En revanche, le FBB a été amplement utilisé en ANC pour le traitement et l'infiltration des eaux ménagères des habitations. Pour cette raison, les sites expérimentaux retenus sont des terrains privés en milieu rural qui disposent de FBB pour traiter leurs eaux ménagères.

Les pratiques de dimensionnement des FBB ne sont pas stabilisées à ce jour. La surface par équivalent habitant¹ (EH) varie autour de 1 m²/EH (Brun *et al.*, 2020) et plusieurs tranchées sont utilisées pour des habitations avec plusieurs pièces principales. Chaque

¹ L'équivalent habitant est considéré dans l'ANC comme une pièce principale (PP) et non pas une charge de 60 g de DBO₅.

tranchée a une profondeur comprise entre 20 et 50 cm, une longueur variant entre 2.5 et 8 m et une largeur de 40 cm (Brun *et al.*, 2020). Les FBB sont alimentés par gravité par des eaux ménagères (EM) sans prétraitement. Certains FBB peuvent aussi récupérer les urines (U) des toilettes sèches ainsi que les lixiviats des composteurs (LC) des toilettes sèches. L'eau percole ensuite à travers le broyat de bois et s'infiltre dans le sol sous-jacent. Le système de distribution des eaux se fait par surverse sur un seul point (quelques FBB munis de deux points d'alimentation ont été aussi renseignés lorsque les tranchées sont très longues). Les FBB sont normalement constitués de plusieurs tranchées car l'alimentation est préconisée par alternance avec des cycles d'alimentation et de repos variables selon le cas (ex: 1 semaine / 1 semaine ou 2 semaines / 8 semaines).

Le BB utilisé comme support organique peut être fabriqué à base de bois-énergie (pellets, plaquettes, C5), de bois broyé (palettes et branches ou ses résidus, grumes) ou des particules de bois (sciures, copeaux, écorces), avec une granulométrie qui peut varier entre 0 et 100 mm (Brun *et al.*, 2020). Il se dégrade au fil du temps par l'action de la micro et macrofaune de l'écosystème. Cette dégradation génère un tassement du massif filtrant qui requiert des apports en BB réguliers de quelques cm (par exemple: 1 fois par an ou tous les deux ans) pour maintenir le niveau de ce matériau dans la tranchée.

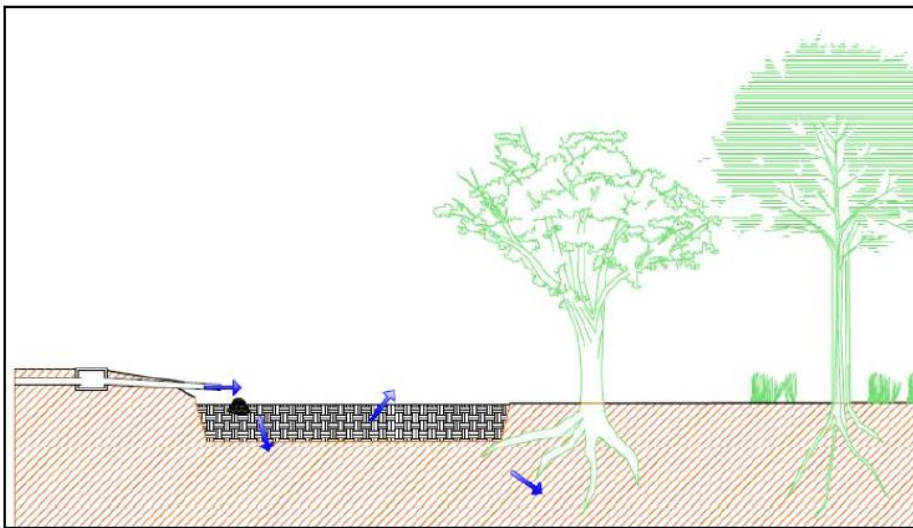


Fig. 1. Schéma d'un filtre à broyat de bois. Source : Ecocentre Pierre et Terre.

4. Méthodologie expérimentale

La méthodologie expérimentale de ce projet est divisée en plusieurs étapes chronologiques dont les résultats de l'étape (n) apportent les informations nécessaires à la réalisation de l'étape suivante (n+1). Ces étapes sont les suivantes (Fig. 2) :

- Étape 1 « pré-sélection et documentation des sites d'études » : Une douzaine de sites sont présélectionnés par le partenaire « L'Ecocentre Pierre et Terre » sur la base de critères logistiques et spécifiques détaillés en partie 4.1. Chaque site est documenté (emplacement, type d'effluent, dimensionnement du FBB...) en vue de la préparation des campagnes de terrain. Une présélection de 9 sites est réalisée.
- Étape 2 « reconnaissance des 9 sites et caractérisation géophysique » : Avant toute campagne de mesures, il est important d'effectuer une reconnaissance des sites. Ceci permet d'obtenir des informations complémentaires (Annexe A) et un premier niveau d'informations sur la structure du sol. Pour ce faire, des mesures géophysiques de tomographie de résistivité électrique sont réalisées sur les sites présélectionnés. Pour valider les résultats géophysiques et identifier le type de sol rencontré, des profils de sol sont réalisés à l'aide d'une tarière. Cette étape 2 fait l'objet d'une campagne

d'expérimentation spécifique à l'issue de laquelle 4 sites expérimentaux (parmi 9) sont définitivement choisis pour l'étude d'infiltration.

- Étape 3 « Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols de 4 sites » : Cette étape vise à estimer les conductivités hydrauliques à saturation des sols par des tests d'infiltration. Les conductivités hydrauliques à saturation du i) sol sous la tranchée et ii) du sol de référence (sol en place hors tranchée) sont mesurées à l'aide de l'essai Beerkan (infiltration d'eau dans un anneau) en vue de leur comparaison future. Des traçages géophysiques et une fosse pédologique complètent les essais d'infiltration réalisés avec un traceur afin d'observer l'écoulement de l'eau sous la tranchée.
- Étape 4 et 5 « Caractérisation physico-chimique des 4 sols » : Afin d'apporter des informations complémentaires nécessaires à une interprétation plus précise des essais d'infiltration, une collection d'échantillons est réalisée pour analyse au laboratoire des paramètres tels que la composition texturale du sol, la densité apparente, la teneur en eau, les matières volatiles, les teneurs en carbone azote et phosphore et la présence et densité de la macrofaune, entre autres. Des sondages pédologiques sont aussi réalisés sur ces 4 sites pour avoir des informations détaillées de la typologie du sol en place à comparer au référentiel pédologique français.
- Étape 6 « Analyse des données » : Une analyse statistique des données recueillies devrait permettre de répondre à la problématique scientifique du projet : Peut-on constater une évolution (voire amélioration) de la capacité d'infiltration des sols issue de l'interaction broyats de bois / sol / macrofaune ?

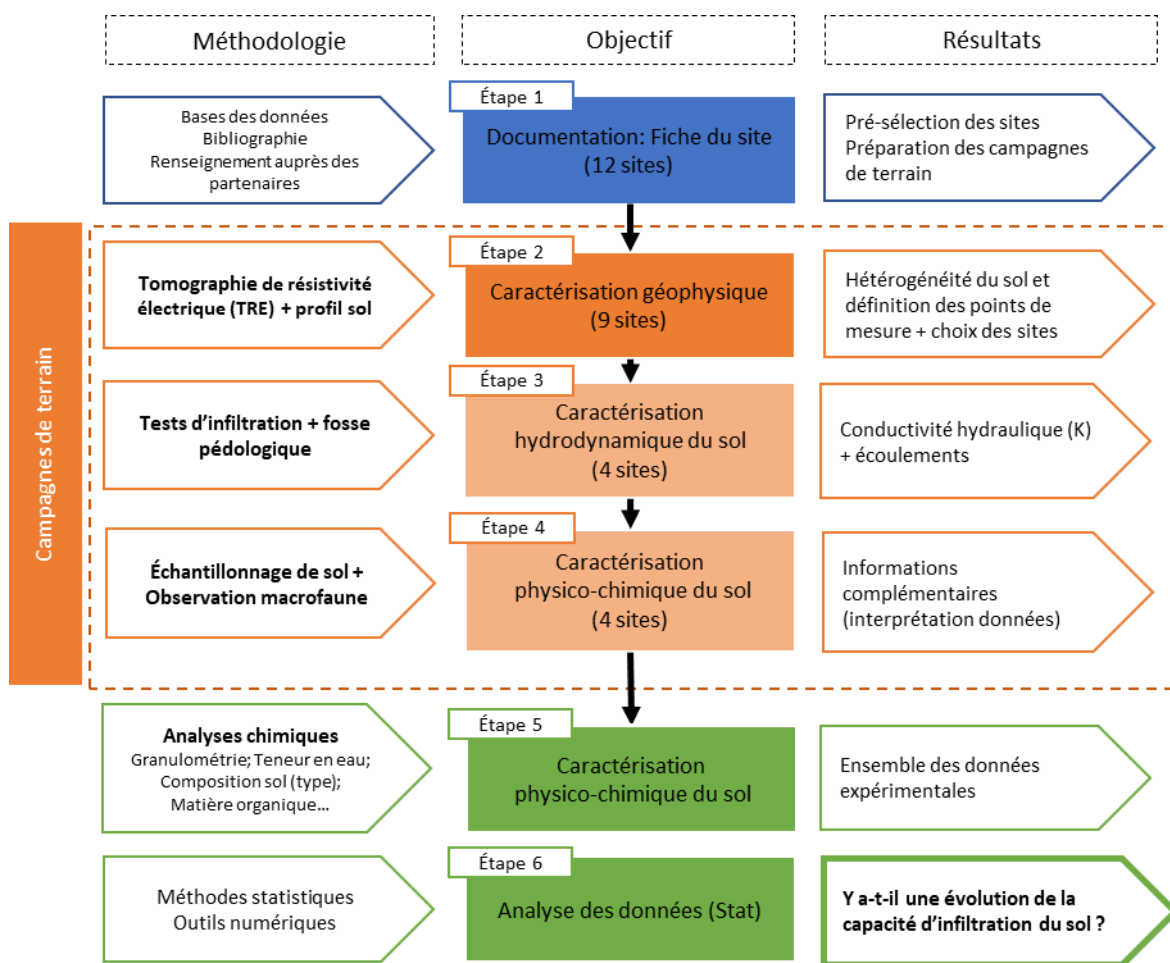


Fig. 2. Synoptique de la démarche méthodologique: couleur bleue pour la phase pré-campagne de terrain; couleur orange pour la phase campagne de terrain; couleur verte pour la phase post-campagne de terrain.

4.1. Critères de choix des sites expérimentaux

Un grand nombre des critères est examiné pour sélectionner les sites expérimentaux. L'influence de chacun des paramètres sur la capacité d'infiltration du sol n'est pas bien connue à ce jour. Des paramètres comme l'âge des filtres, le type de sol, le type de BB ou la qualité de l'eau (EM, EM+U, EM+LC) et charge hydraulique alimentant le filtre peuvent être très divers. Il est donc nécessaire de limiter cette variabilité en se focalisant sur un échantillon moindre de sites dont certains de ces paramètres sont communs. Ces différents critères de choix sont détaillés ci-après.

4.1.1. Temps de fonctionnement (âge des filtres)

L'âge de la plupart de sites est compris entre 0 et 6 ans. Pour s'assurer d'une maturité des filtres suffisante qui permettrait d'observer l'influence du BB sur la capacité d'infiltration, les sites de moins d'un an sont exclus de l'étude et les sites plus âgés sont privilégiés. L'existence de cette filière étant récente (moins de 10 ans) la présélection porte sur des sites ayant un temps de fonctionnement de plus de 2 ans.

4.1.2. Type de sol

La classification texturale d'un sol est déterminée par la taille de particules et leur quantité relative. Les différentes grandes fractions

sont : le sable (0,05 mm à 2 mm), le limon (0,002 mm à 0,05 mm), l'argile (< 0,002 mm). La classe texturale d'un sol peut être déterminée en fonction de sa composition relative telle que montrée dans le triangle des textures de la Fig. 3. Cette composition texturale a un impact sur les propriétés hydrodynamiques du sol ; la conductivité hydraulique à saturation diminue avec la taille des particules et donc avec la proportion d'argile et de limon présente.

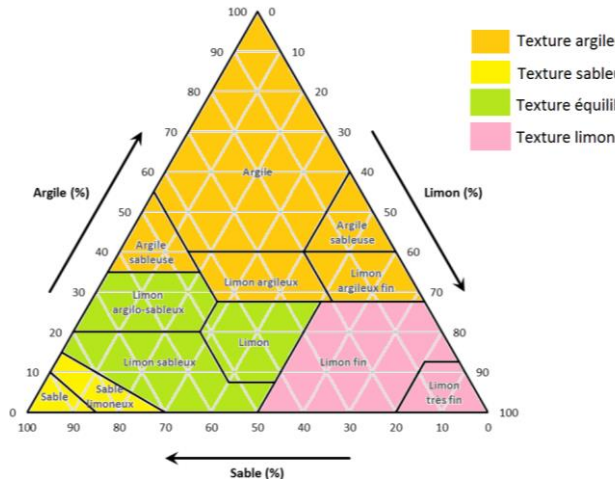


Fig. 3. Triangle de textures (adapté de Duchaufour 1997)

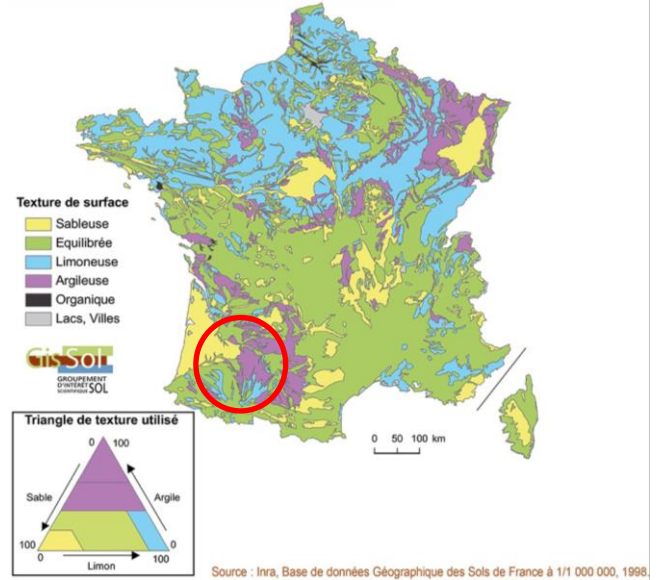


Fig. 4. Cartographie de la texture des sols (horizons) en France. Référence : Gis-Sol, 1998. Le cercle rouge indique l'emplacement des sites expérimentaux.

Selon la distribution de la classe texturale des sols du territoire français métropolitain montrée dans la Fig.4, les textures sablo-limono-argileuse à limono-argileuses sont prédominantes dans le sud-ouest de la France (Gis-Sol, 1998, Géoportail) où se trouvent un grand nombre de sites de FBB. Puisque l'intérêt de l'étude porte sur l'évolution des capacités d'infiltration des sols peu perméables, on se focalise volontairement sur les sites présentant une conductivité hydraulique à saturation très réduite c'est à dire ceux ayant une composition texturale essentiellement limono-argileuse ou argileuse.

4.1.3. Type de bois broyé

Le choix sur le type de BB à installer dans la tranchée se fait naturellement en fonction des matières disponibles localement. Cela implique souvent l'usage de déchets végétaux auto-produits par l'habitant. Les BB peuvent être des copeaux de bois, d'arbres, sciure, pailles, coupes d'élagage, feuilles, etc. ou des mélanges de ces différents sous-produits. On choisit de se focaliser sur le BB du type copeaux de bois afin de réduire la variabilité des données. De plus, il sera important, pour l'évaluation des résultats, d'identifier au mieux l'origine du BB.

4.1.4. Nombre de tranchées

Pour le bon déroulement des essais d'infiltration, la tranchée doit être en repos un minimum de 10-15 jours avant l'intervention, il est donc nécessaire de disposer d'un minimum de 2 tranchées ce qui est généralement préconisé lors de sa conception (alternance alimentation / repos). Toutefois, pour s'assurer de la qualité de l'intervention sur le site, il est recommandé de maximiser le nombre de tranchées, et de prioriser les sites constitués de plus de deux tranchées.

4.1.5. Dimensions tranchées

Les dimensions plus couramment constatées (Brun et al., 2020) sont : 2.5 x 0.4 x 0.3 m (longueur x largeur x profondeur). Cependant, des longueurs entre 2.5 et 8 m sont aussi rapportées ainsi que des profondeurs d'entre 20 et 40 cm. De plus, l'emplacement de l'unique point de distribution d'eau en extrémité de la tranchée crée des profils hydriques très différents le long du filtre. Pour cette raison, il est nécessaire de privilégier les sites aux filtres de dimensions semblables, notamment au niveau de leur longueur.

4.1.6. Nature de l'eau usée

L'eau alimentant les filtres peut être :

- de l'eau ménagère (EM)
- de l'eau ménagère, plus les urines provenant des toilettes à séparation (EM+U)
- de l'eau ménagère, plus des lixiviats de compostage des fèces et urines provenant des toilettes sèches (EM+LC)

Les apports en matière organique sont différents en fonction de la nature de ces eaux à traiter et pourraient influencer les processus de dégradation et les interactions des différents éléments dans un FBB.

D'un point de vue hydraulique, les quantités apportées par les eaux ménagères représentent, à elles seules environ 80 % des eaux totales d'un ménage (Brun et al, 2019). Les apports en urines pure ou des lixiviats représentent un faible part de ces volumes. C'est pourquoi ce critère devient moins prioritaire que d'autres. Et de fait, les eaux ménagères pures sont exclues du choix final des sites.

4.1.7. Fréquence d'alimentation

Des recommandations de dimensionnement des FBB ont été énoncés dans le rapport Brun et al., 2020, suite au premier retour d'expérience de cette filière. Un dimensionnement des FBB de 1 m²/EH a été préconisé. De même, une surface minimale de 5 m² à diviser en 5 filtres indépendants a été recommandée avec une alimentation en alternance d'une semaine, puis 4 semaines de repos pour les habitations comprenant de 4-5 personnes. Néanmoins, ces recommandations sont empiriques et restent à valider. Le rythme de l'alternance des installations existantes dépend fondamentalement du dimensionnement réalisé. Ainsi des alternances de l'alimentation du type (alimentation / repos) 1 semaine / 1 semaine, 1 semaine / 4 semaines, 2 semaines / 8 semaines ont été déjà constatées (Brun *et al.*, 2020). Il faudra toutefois se renseigner lors des visites sur la vraie alternance appliquée par l'utilisateur afin d'avoir des informations sur les conditions de fonctionnement du site et son entretien.

La diversité concernant le dimensionnement et le rythme d'alimentation en eau ne permettra peut-être pas de choisir un système spécifique. Si c'était le cas, les deux critères : dimensionnements autour de 1 m²/EH et sites suivant une maintenance suffisamment correcte deviendront prioritaires devant le rythme d'alimentation.

4.1.8. Proximité des sites

Afin de faciliter l'organisation des campagnes de terrain, il est nécessaire de garder une certaine proximité géographique entre les sites expérimentaux (≤ 1 heure de trajet) étant donné que les déplacements entre les sites peuvent devenir rapidement chronophages.

4.1.9. Limitations techniques

Pour garantir la qualité des mesures, certaines limitations techniques doivent être prises en compte :

- Clôtures métalliques éloignées : pour éviter les interférences dans les mesures de tomographie de résistivité électrique (TRE), les clôtures métalliques doivent être éloignées d'au moins 20 m de la tranchée notamment si celles-là sont perpendiculaires à la tranchée (voir Fig.5).
- Tranchées sur surfaces planes : pour le bon déroulement des mesures d'infiltration, éviter les sites ayant des tranchées en forte pente, risquée pour la stabilité du dispositif.
- Disponibilité ou, dans le cas néant, autorisation de la part des propriétaires des sites pour accueillir les campagnes de mesure pendant les dates énoncées avec mise à disposition éventuelle de points d'eau et/ou électriques (prises de courant). Un maximum de trois jours par site est planifié pour la complète réalisation des campagnes : un jour pour l'étape 2 et deux jours pour les étapes 3 et 4

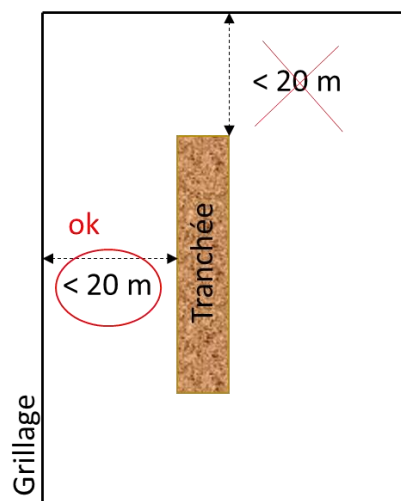


Fig. 5. Schéma de l'emplacement de la tranchée par rapport aux clôtures métalliques du terrain.

4.2. Sélection des sites expérimentaux

Les critères préalablement présentés s'intègrent, soit dans des critères de représentativité du système, soit dans des critères de représentativité des données, soit dans des critères logistiques ou techniques. Ils vont s'appliquer à différentes étapes du protocole selon le schéma ci-dessous (Fig. 6) :

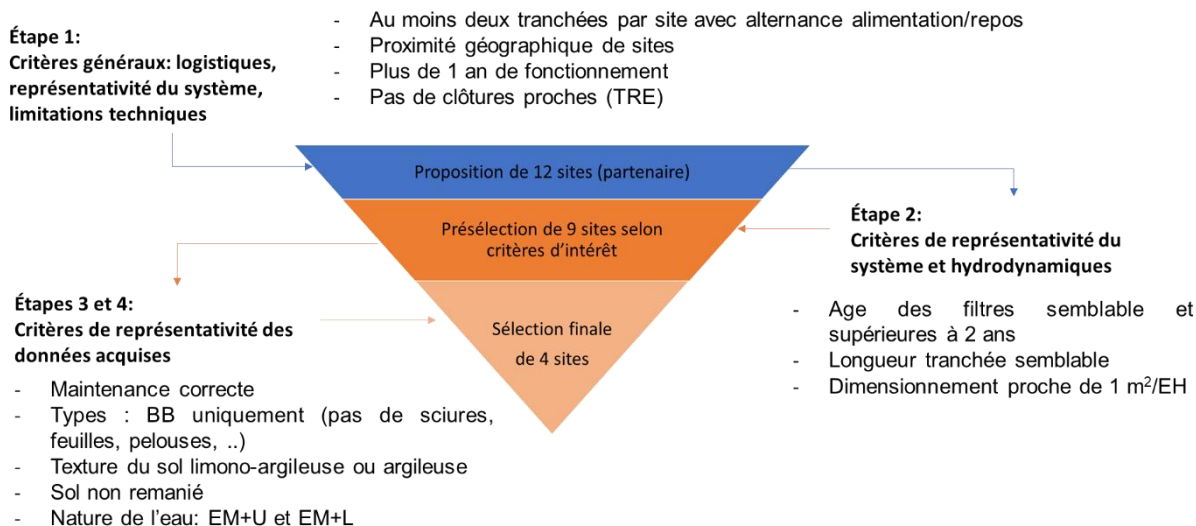


Fig. 6. Schéma de la procédure de choix des sites expérimentaux.

Sur la base des critères de choix préalablement expliqués, une présélection des sites expérimentaux est effectuée par l'intermédiaire de l'Ecocentre « Pierre et Terres » et une douzaine de sites réunissant, dans la mesure du possible, les critères suivants sont identifiés :

- Au moins deux tranchées par site avec alternance d'alimentation / repos
- Proximité géographique des sites
- Plus d'un an de fonctionnement
- Pas des clôtures métalliques proches

Ensuite une sélection de 9 sites sur les 12 proposés est réalisé après avoir recueilli un premier niveau d'information sur les caractéristiques des sites. La première campagne de terrain inclut la visite de reconnaissance et la caractérisation géophysique des sites, elle se fait sur les sites réunissant les critères suivants :

- Age des filtres supérieur à 2 ans.
- Dimensionnement autour de 1 m²/EH
- Longueur des tranchées semblable (de 2.5 à 5 m)

En fonction des résultats de cette première campagne, on choisit un échantillon de moindre importance (3-4 sites) pour poursuivre l'expérimentation sur la capacité d'infiltration des sols dans les FBB. Les critères communs aux sites sélectionnés sont :

- Origine du BB type copeaux
- Texture de sol limono-argileuse ou argileuse
- Nature de l'eau : EM+U et EM+L
- Sol non remanié
- Maintenance du site correcte

4.3. Description des étapes du protocole

4.3.1. Étape 1 : Documentation du site

Un premier niveau d'information peut être obtenu à partir des informations fournies par le partenaire L'Ecocentre Pierre et Terre et complétées par des ressources numériques publiques :

- Références bibliographiques : documents produits lors des études précédentes, notamment le rapport intitulé « Le traitement des eaux ménagères par filtres à broyat de bois » (Brun *et al.*, 2020).
- Études des projets du maître d'œuvre (L'Ecocentre Pierre et Terre).
- Bases de données publiques telles que Géoportail pour la géolocalisation des sites et l'obtention des images aériennes, ou InfoTerre™ pour des informations sur les profils verticaux du sol (forages dans les sols à proximité du site).

Un second niveau d'information est recueilli lors des premières visites de terrain. Elles fournissent des informations complémentaires nécessaires à l'interprétation des résultats et au choix final des 4 sites. Ces informations sont notamment la charge hydraulique, le type de sol, le type du BB ainsi que des autres spécificités du lieu. Les renseignements seront obtenus par l'observation des sites et par le questionnement des usagers.

À l'issue de cette étape de documentation, nous devons obtenir ou valider les informations suivantes :

- Age / temps de fonctionnement
- Consommation d'eau par habitation (nombre de personnes), incluant des informations sur l'usage de l'eau potable
- Nombre de tranchées
- Dimensions des tranchées
- Type de sol
- Type de bois broyé (acheté, broyé sur place, teneur en résineux)
- Qualité de l'eau potable (conductivité, concentration de sel)
- Nature de l'eau usée
- Système d'alimentation (alternance/fréquence)
- Présence de clôtures métalliques à proximité des filtres
- Accessibilité des tranchées.

Une fiche technique du site contenant l'ensemble des informations est produite. Un modèle de fiche technique est disponible en [Annexe A](#).

4.3.2. Étape 2 : Caractérisation géophysique des sites expérimentaux

L'étape 2 du protocole expérimental concerne la caractérisation géophysique des sols par des mesures de tomographie résistivité électrique ainsi que l'observation des FBB à l'aide de profils de sol en place. Les différentes mesures réalisées pendant cette étape sont détaillées ci-dessous.

4.3.2.1. Tomographie de résistivité électrique

Une caractérisation géophysique du site est nécessaire afin d'identifier les hétérogénéités du sol (à l'intérieur et à l'extérieur de la tranchée) ainsi à l'identification des emplacements les plus représentatifs pour les tests d'infiltration et l'échantillonnage. Cela est possible au moyen de la tomographie de résistivité électrique (TRE). La tomographie permet d'identifier la structure et la lithologie du sous-sol ainsi que les gradients de teneur en eau en apportant une information verticale sur la distribution de la résistivité électrique (Figure 6).

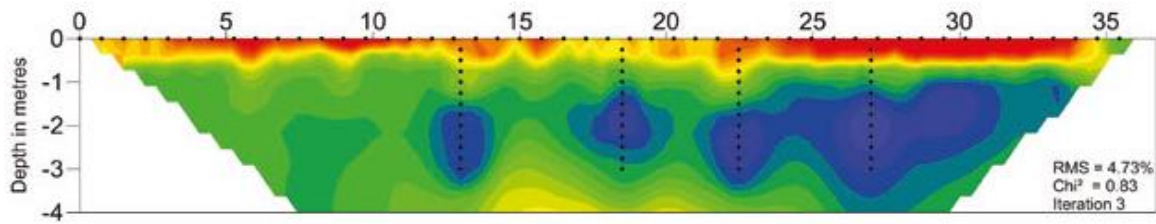


Fig. 7. Exemple d'une tomographie de résistivité électrique 2D (Clement et al 2014)

4.3.2.1.1. Description du principe de fonctionnement.

La TRE permet la mesure de la résistivité électrique (ρ en ohm·m) du sol. La résistivité électrique est le paramètre physique qui détermine l'aptitude d'un milieu à s'opposer au passage de courant électrique (l'inverse de la conductivité électrique). Elle est définie comme la résistance électrique du milieu par unité de longueur selon l'équation 1.

$$\rho = \frac{AU}{l} \quad [1]$$

avec l (m) et A (m²) la longueur et section d'un échantillon de sol disposé entre deux plaques conductrices (Fig.7) entre lesquelles circule un courant électrique d'intensité I (A) et de tension électrique U (V).

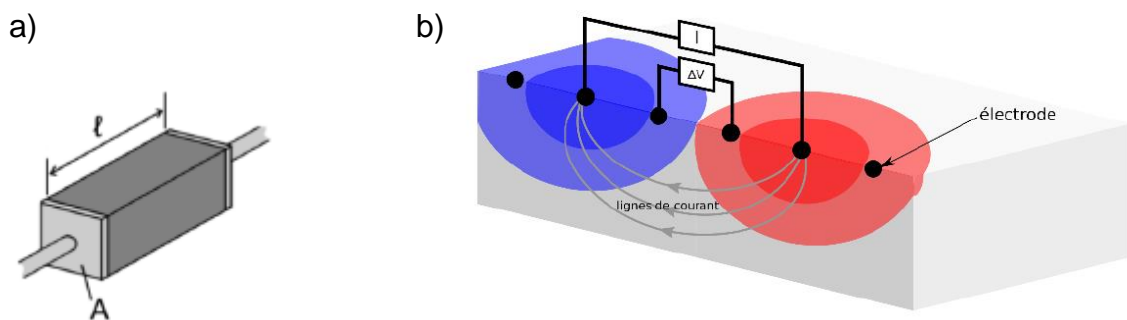


Fig. 8. a) Dimensions d'un échantillon de sol (Audebert, 2015); b) schéma d'une mesure de résistivité électrique (Bisone, Clément et Forquet, 2017).

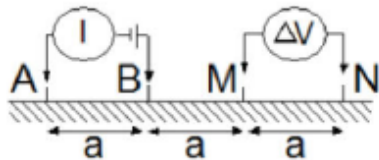
Une série d'électrodes est insérée dans le terrain à intervalles réguliers et connectée à un résistivimètre. Un courant est ensuite injecté entre les deux électrodes et un potentiel électrique est mesuré entre deux autres électrodes, ce dispositif est généralement appelé quadripôle (Fig. 7. b). Le choix des électrodes d'injection et des électrodes de mesures se fait selon des schémas préétablis. Comme résultat de la mesure, on obtient un ensemble de résistivités dites apparentes ρ_a (ohm·m) obtenues en faisant le rapport entre le potentiel mesuré et le courant injecté et en le multipliant par un facteur géométrique K (m) qui dépend du schéma et de la distance entre les électrodes, selon l'équation 2.

$$\rho_a = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad [2]$$

La valeur de la mesure dépendra de la porosité totale du milieu, de la teneur en eau du sol, de la température, de la conductivité électrique de la solution et de la nature de la matrice poreuse.

4.3.2.1.2. Dispositif expérimental TRE

Les mesures TRE seront réalisées avec un résistivimètre Syscal pro Version 12 (Iris Instruments) avec 48 électrodes positionnés suivant la configuration dipole-dipole (Fig. 8). Les mesures sont effectuées sur 2 à 4 lignes d'électrodes perpendiculaires à la tranchée (tomographie 2D) par site, de 9.6 m de long avec un espacement entre électrodes de 0.2 m tel que montre dans la Fig. 9. Le nombre exact de lignes et la distance entre électrodes dépend des spécificités du site expérimental. Les séquences de mesures sont paramétrées pour investiguer le premier mètre du sous-sol.



$$K = 2\pi n(n + 1)(n + 2)$$

Fig. 9. Dispositif d'acquisition dipole-dipole : injection de courante sur A et B, mesure de voltage sur M et N.

Un logiciel d'inversion ResIPY (<https://www.researchgate.net/project/ResIPy-2D-3D-geoelectrical-modeling-inversion-software>) avec interface graphique est utilisé pour l'inversion des profils de résistivité électrique apparente, pour obtenir la vraie distribution des résistivités électrique du sol (tomographie 2D)(Audebert *et al.*, 2015)(Fig. 6).

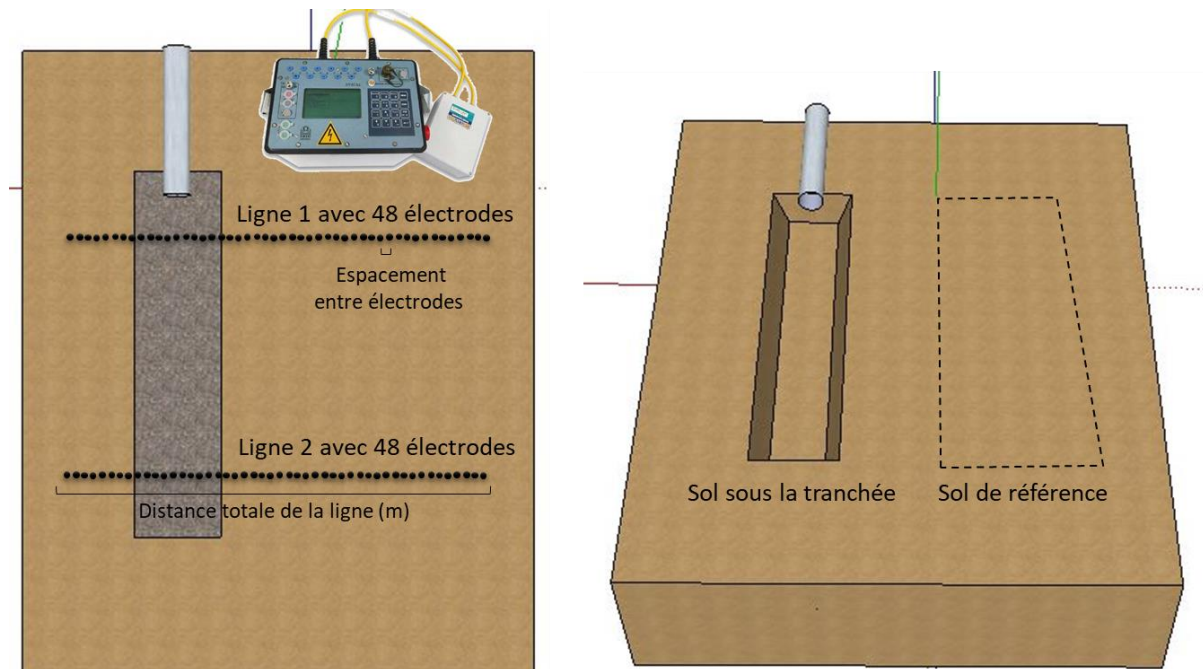


Fig. 10. Schéma de l'emplacement des électrodes dans les FBB pour les mesures de résistivité électrique.

Pour obtenir une bonne reconstruction de l'image, il est souvent nécessaire de mesurer la topographie du terrain en prenant comme référence la position des électrodes. La topographie des sites a été réalisé avec une station totale TS16 (Leica Geosystems).

4.3.2.2. Profil de sol



La réalisation des profils de sol à l'aide d'une tarière / pelle à l'intérieur et à l'extérieur de la tranchée permet d'apporter une image plus complète des différents horizons, des caractéristiques du sol en place et des modifications apportées par la filière.

Fig. 11. Coupe verticale d'un FBB (Source : INRAE)

4.3.3. Étape 3 : Étude de la capacité d'infiltration des sols dans un FBB

Quatre sites expérimentaux font l'objet de campagnes de mesures spécifiques pour étudier la capacité d'infiltration des sols sous la tranchée des FBB. Cette campagne de mesures comprend la caractérisation hydrodynamique et physico-chimique du sol par des tests d'infiltration et l'analyse des

échantillons de sol.

4.3.3.1. Caractérisation de la conductivité hydraulique à saturation

L'estimation de la conductivité hydraulique à saturation (K_s) du sol est réalisée au moyen des essais d'infiltration (essai Beerkan, Braud *et al.*, 2005). Les protocoles permettent la comparaison entre la K_s du sol sous la tranchée et celle du sol de référence.

4.3.3.1.1. Définition





La conductivité hydraulique à saturation d'un milieu poreux caractérise son aptitude à laisser passer l'eau sous l'effet d'un gradient de charge hydraulique (H) lorsque le milieu est complètement saturé (Audebert, 2015). La conductivité hydraulique à saturation (en unités de $m \cdot s^{-1}$) est définie par la loi de Darcy selon l'équation 3 en 1D:

$$K_s = \frac{q}{\Delta H / L_D} \quad [3]$$

avec q ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) le flux volumétrique d'eau, ΔH (m) la perte de charge hydraulique, L_D (m) la distance entre deux points de mesure de la charge hydraulique.

Des ordres de grandeur des valeurs de K selon le type de sol sont présentés à titre de référence dans le Tableau 1.

Tableau 1. Ordres de grandeur de la taille de grain et de la conductivité hydraulique selon le type de sol (Chocat, Brelot et le GT du Graie - septembre

Dénomination des sols	Grave		Sol sableux			Sol limoneux		Sol argileux		
										
Taille des grains	50 mm		2 mm			0.08 mm		0.002 mm		
Capacité d'infiltration en $m^3/s/m^2$	1	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}
Equivalence en cm/h				36	3.6	0.36				
	Très perméable						Imperméable			

4.3.3.1.2. Dispositif expérimental : Infiltromètre à simple anneau automatisé

Les essais d'infiltration mesurent la vitesse d'écoulement de l'eau à travers une surface donnée d'un massif filtrant (sol) déterminant la conductivité hydraulique à saturation (K_s). Ces essais ont fait l'objet de nombreuses études et algorithmes permettant une estimation ; via des hypothèses ; de la conductivité hydraulique à saturation.

L'infiltromètre à simple anneau mesure l'infiltration cumulée ; le volume d'eau infiltré divisé par la surface de l'anneau en fonction du temps. Cette donnée caractérise la capacité d'infiltration du sol. C'est une méthode largement utilisée, rapide et simple basée sur la procédure Beerkan (Braud *et al.*, 2005), lorsque on verse directement l'eau en condition de légère surpression à la surface du sol.

4.3.3.1.3. Description du dispositif

L'infiltromètre est composé d'un réservoir de Mariotte de 9.4 cm de diamètre et 74 cm de hauteur. Le réservoir est fermé en ses parties supérieure et inférieure par des bouchons. Le réservoir repose sur un tripode à pattes réglables (2 – 90 mm de hauteur). Un tuyau d'air régule l'entrée d'air et donc le niveau d'eau à l'intérieur de l'anneau. L'anneau d'infiltration est en acier inox de 15 cm de diamètre interne. L'acquisition de mesures est automatisée au moyen des transducteurs de pression différentielle connectés au système d'acquisition des données, celui-ci pouvant gérer jusqu'à 5 infiltromètres simultanément. Les deux capteurs de pression permettent de mesurer la pression en haut (dans l'air) et en bas du réservoir de Mariotte. La différence de pression (rang de mesure entre 0 et 1000 mmH₂O) est directement corrélée à la hauteur d'eau.

Les infiltromètres automatisés, fournis gracieusement par le LEHNA (Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés), permettent de collecter des mesures simultanées à plusieurs endroits pendant de longues périodes et donc de générer un grand nombre de données ce qui augmente sensiblement la précision de la mesure.

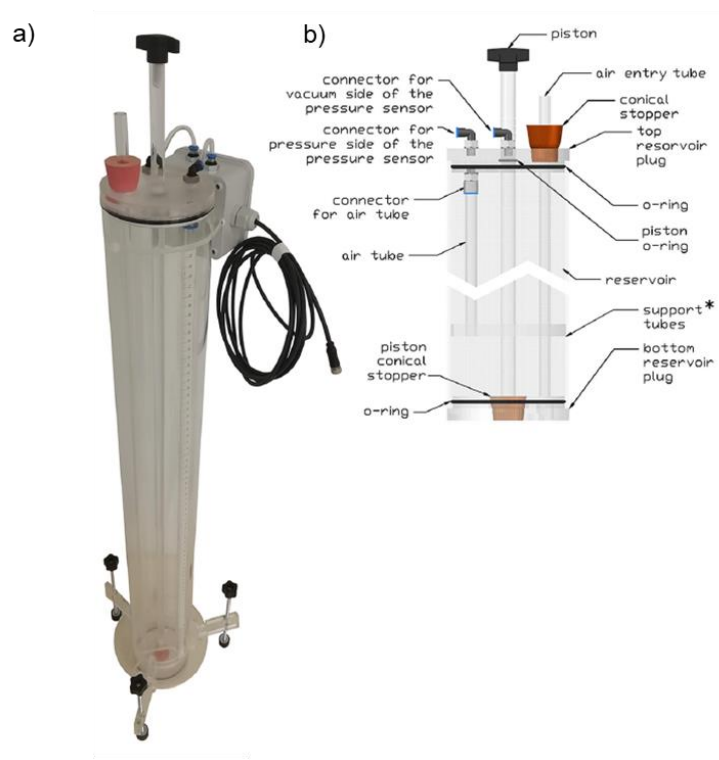


Fig. 12. a) Infiltromètre automatique de type Beerkan ; b) schéma détaillé de l'infiltromètre et ses composants (Adapté de Concialdi et al., 2020).

4.3.3.1.4. Protocole expérimental des mesures d'infiltration

Le protocole expérimental comprend les étapes suivantes

- 1) Préparer le sol : enlever les plantes et préparer une surface horizontale pour l'anneau
- 2) Insérer l'anneau soigneusement dans le sol à une profondeur de 10 mm environ selon la procédure de Beerkan (Fig. 13.a)
- 3) Placer un film transparent à l'intérieur de l'anneau collé à la surface du sol et du cylindre et verser de l'eau à l'intérieur pour créer une colonne d'eau de 2 à 3 mm (Fig. 13.b)
- 4) Enlever le bouchon rouge avec le tuyau d'entrée d'air et remplir le réservoir de Mariotte par de l'eau du robinet jusqu'à environ 70 cm (noter la valeur initiale). Placer ensuite l'infiltromètre à l'intérieur de l'anneau. Régler la hauteur du tripode pour que la base de l'infiltromètre soit en contact avec la surface de l'eau (Fig. 13.c).
- 5) Soulever le piston pour activer l'infiltromètre (Fig. 13.d). Réajuster la hauteur de la base de l'infiltromètre si nécessaire (Fig. 13.e)
- 6) Quelques secondes avant de commencer l'expérience, lancer l'acquisition des données en allumant le système d'acquisition des données. L'infiltration commence au moment du retrait du film plastique.
- 7) Les données sont enregistrées dans une carte SD et affichées simultanément sur l'écran du système d'acquisition des données. De plus, un fichier csv des mesures réalisées est créé par le logiciel.
- 8) Les données générées sont telles que représentées dans la Fig. 14 a). La formation des bulles dans le réservoir crée une réponse oscillante en forme de créneau, qui est traitée de manière automatique par le logiciel Scilab (code open source : bestsoilhydro.net). Cette courbe est convertie en courbe d'infiltration cumulée vs temps (Fig. 14.c).

- 9) Détermination de la conductivité hydraulique à saturation K_s : inversion des courbes infiltrométriques. Les données d'infiltration sont ensuite inversées en utilisant l'approche BEST (*Beerkan Estimation of the Soil Transfer*) pour déterminer la conductivité hydraulique à saturation (Concialdi *et al.*, 2020).

L'application de cette méthode a besoin de la connaissance ou de la détermination des trois paramètres du sol :

- La teneur en eau à saturation ou porosité du sol (θ_s)
- La teneur en eau initiale (avant infiltration) (θ_0)
- La densité apparente sèche (ρ_b)



Fig. 13. Etapes à suivre pour la mise en route de l'infiltromètre automatique de type Beerkan

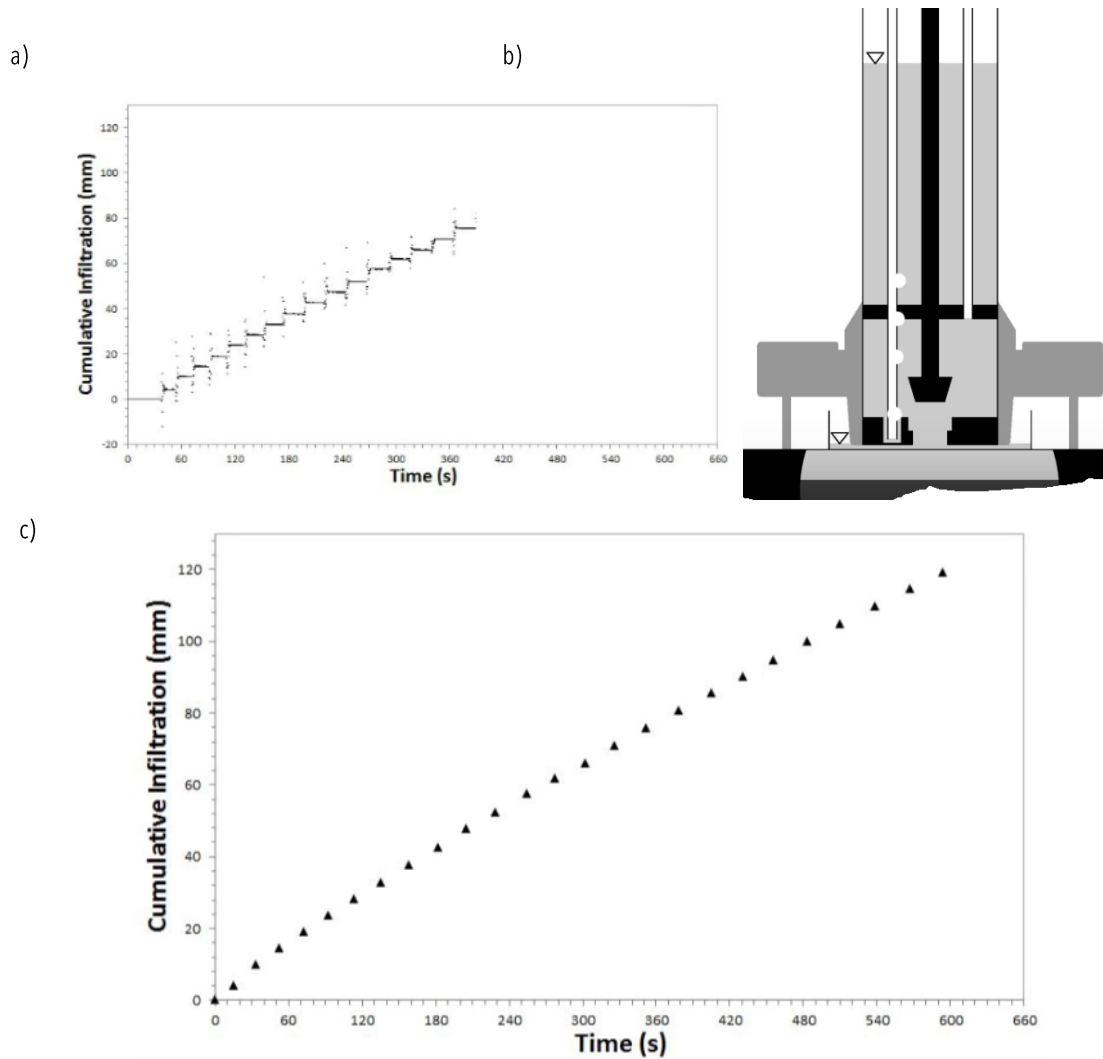


Fig. 14. a) Réponse d'un test d'infiltration : données brutes; b) schéma de l'infiltromètre avec la formation des bulles à l'intérieur qui génère des données tel que représentées sur a); c) données filtrées.

4.3.3.1.5. Spécificités de l'expérimentation

Les essais d'infiltration se font sur au moins 6 points par site tel que représentés dans le schéma ci-dessous (Fig. 15) :

- Points à l'intérieur de la tranchée sur sa longueur ; un point à 60 cm du point d'alimentation et un point à 160 cm du point d'alimentation. Pour les tranchées longues (> 2.5 m), un 3^{ème} et 4^{ème} point intermédiaire pourrait être envisagé afin de caractériser le gradient le long de la tranchée. On s'attend à un impact plus fort près du point d'injection. Ces essais se feront sur, au moins, deux tranchées par site pour avoir un minimum de 4 points. Pour réaliser ces essais, la nappe phréatique doit être à plus de 1m de profondeur. D'autre part, l'alimentation des tranchées est arrêtée 15 jours avant l'expérimentation.
- Points à l'extérieur de la tranchée : sur des points parallèles à la tranchée à une distance comprise entre 1.00 et 1.20 m et à la même profondeur que les points dans la tranchée. Il faut prévoir donc des excavations carrées de 30 x 30 cm et d'une profondeur égale à celle de l'interface BB/ sol dans la tranchée (généralement 30 cm). On veut en effet sonder le même horizon de sol. Il est nécessaire de réaliser au moins deux points par site.

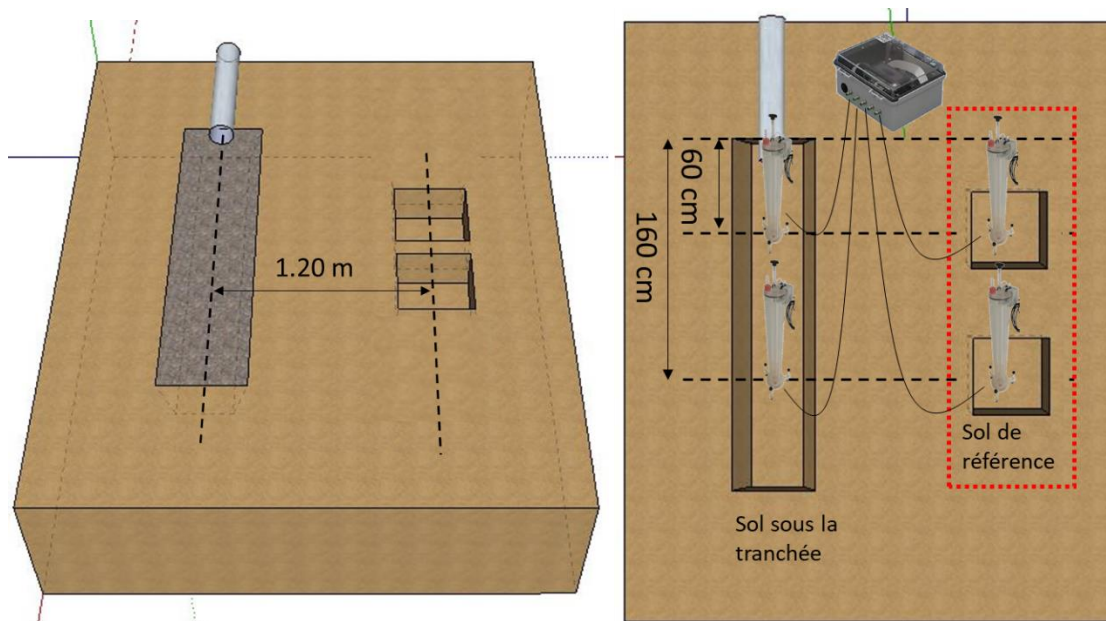


Fig. 15. Schéma des points de mesure des test d'infiltration dans les FBB et le sol voisinant.

Le temps total pour la réalisation de la deuxième campagne qui s'est déroulée en Avril-Mai et donc des Étapes 3 et 4 du protocole est de 1.5 à 2 jours par site.

4.3.3.2. Mesures complémentaires aux tests d'infiltration

Afin de compléter les informations fournies par les tests d'infiltration, d'autres tests complémentaires peuvent s'ajouter :

4.3.3.2.1. Traçage géophysique :

La résistivité électrique est suivie pendant en temps déterminé durant lequel un volume d'eau retenu sur une surface confinée (Fig. 16), s'infiltré dans le sol. Cela permet d'observer la propagation sous-jacente de l'eau au point d'infiltration. En particulier, cette expérimentation complémentaire aux essais d'infiltration a pour but de voir l'effet latérale des tranchées d'infiltration, qui ne seront pas étudiées avec les essais d'infiltration en fond de tranchée.



Fig. 16 Traçage géophysique dans une tranchée à broyat de bois

4.3.3.3. Observation des écoulements avec un traceur coloré :

L'infiltromètre peut être rempli avec une solution de bleu de méthylène (Fig. 17.a), un colorant alimentaire souvent utilisé pour les traçages dans le sol. Sa couleur bleue permet de suivre le chemin de l'eau sous la tranchée (Fig. 17.b). Après l'essai d'infiltration, il faut donc faire une fosse pédologique pour observer l'écoulement de l'eau sous le point d'infiltration. C'est un outil pertinent pour la mise en évidence de chemins préférentiels.

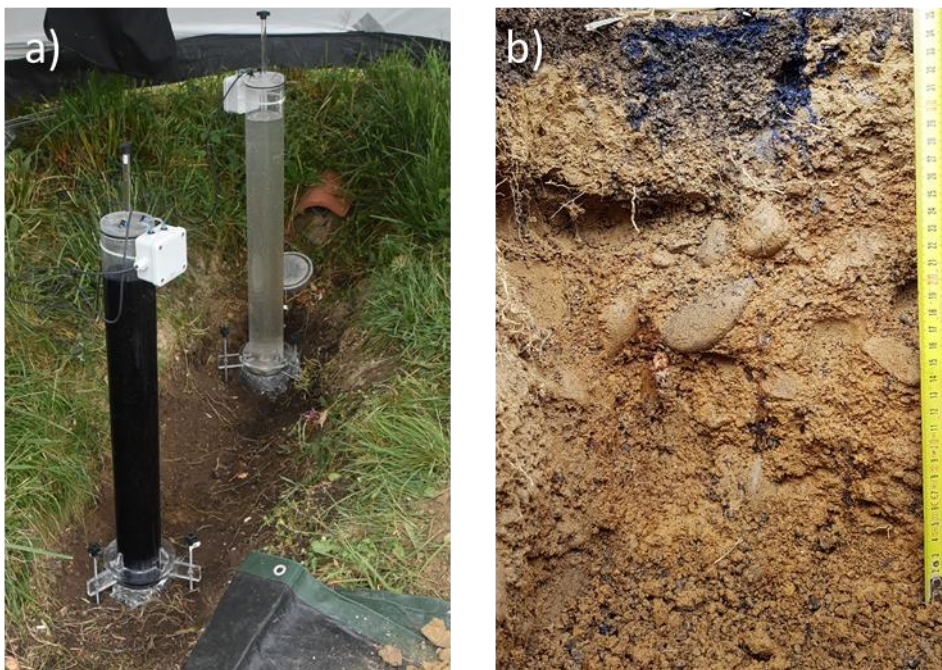


Fig. 17. a) test d'infiltration avec et sans traceur coloré bleu de méthylène ; b) fosse pédologique pour le suivi des écoulements de l'eau après infiltration avec traceur coloré.

4.3.4. Étapes 4 et 5 : Échantillonnage et analyses

Des échantillons de sol permettent sa caractérisation physico-chimique et la détermination des paramètres nécessaire à la

modélisation hydrodynamique du système. Les analyses et mesures seront réalisées au Laboratoire d'Analyse des Sols Arras (INRAE) et au laboratoire de l'unité de recherche REVERSAAL (INRAE).

4.3.4.1. Granulométrie

La détermination de la granulométrie du sol de référence (hors tranchée) et du sol modifié (sous la tranchée) est à réaliser. La prise d'échantillons doit se faire sur trois points : (1) au point d'alimentation à l'intérieur de la tranchée (le sol potentiellement le plus modifié); (2) au point le plus éloigné de l'alimentation dans la tranchée pour témoigner d'un sol le moins sollicité par les eaux usées et (3) sur un point à l'extérieur de la tranchée pouvant être considéré comme le sol de référence. Les échantillons remaniés sont pris à la pelle ou à la tarière dans le sol sous et à côté du point d'infiltration. Trois échantillons de 500 g chacun⁽²⁾ sont à prévoir à chaque point d'échantillonnage (Fig. 20 « carrés jaunes »): (1) dans la section comprise entre l'interface BB / sol et les 5 premiers cm de profondeur (0 – 5 cm); (2) dans la section comprise entre 5 cm et 10 cm de profondeur (5 – 10 cm) et (3) dans la section comprise entre 10 et 20 cm de profondeur (10 – 20 cm), soit un total de 9 échantillons par site.

La distribution des tailles de particules est à déterminer par la méthode à la pipette selon la norme NF X 31-107. Cette méthode détermine la proportion pondérale des différentes tailles de particules du sol : les argiles (0 à 2 µm); les limons fins (2 à 20 µm); les limons grossiers (20 à 50 µm); les sables fins (50 à 200 µm) et les sables grossiers (200 µm à 2 mm).

La détermination des différentes fractions se fait comme suit : (1) Les échantillons bruts sont séchés, broyés et tamisés à 2 mm ; (2) une prise d'essai d'environ 10 g, puis une oxydation à l'eau oxygénée (H₂O₂) pour détruire la matière organique ; (3) les sables grossiers sont séparés par tamisage (> 200 µm) ; (4) le reste de l'échantillon de sol est mis en suspension. Cette dispersion finale est réalisée par un court passage aux ultrasons après addition de dispersant [(NaPO₃)₆ + Na₂CO₃]. (5) Ensuite, pour les fractions les plus fines, les limons et les argiles (< 50 µm), la détermination s'effectue au moyen de 3 prélèvements successifs à la pipette dans la suspension en cours de sédimentation. La fraction des sables fins est séparée par passage sur tamis de 50 µm sous courant d'eau, après prélèvements des fractions fines. (6) Toutes les fractions séparées sont pesées après évaporation et séchage permettant ainsi de déterminer les proportions des différentes classes granulométriques.

- Méthode : granulométrie 5 fractions sans décarbonatation par la méthode à la pipette (NF X 31-107) (Méthode sédimentrométrie)
- Laboratoire : Arras INRAE (préparation de l'échantillon incluse)
- Échantillonnage : une prise d'essai de 10 g remanié est nécessaire pour l'analyse de la granulométrie avec la méthode de la pipette. 9 éch./site sur trois points et trois profondeurs différentes (0 - 5 cm ; 5 - 10 cm; 10 - 20 cm). Attention, une masse totale d'échantillon de 200 g est nécessaire pour la réalisation de toutes les analyses prévus.
- Unités : en % de masse de poids sec (105°C) pour 5 fractions
- Stockage : sachet fermé hermétique

² Cette masse d'échantillon sera nécessaire pour réaliser la totalité des analyses prévus.

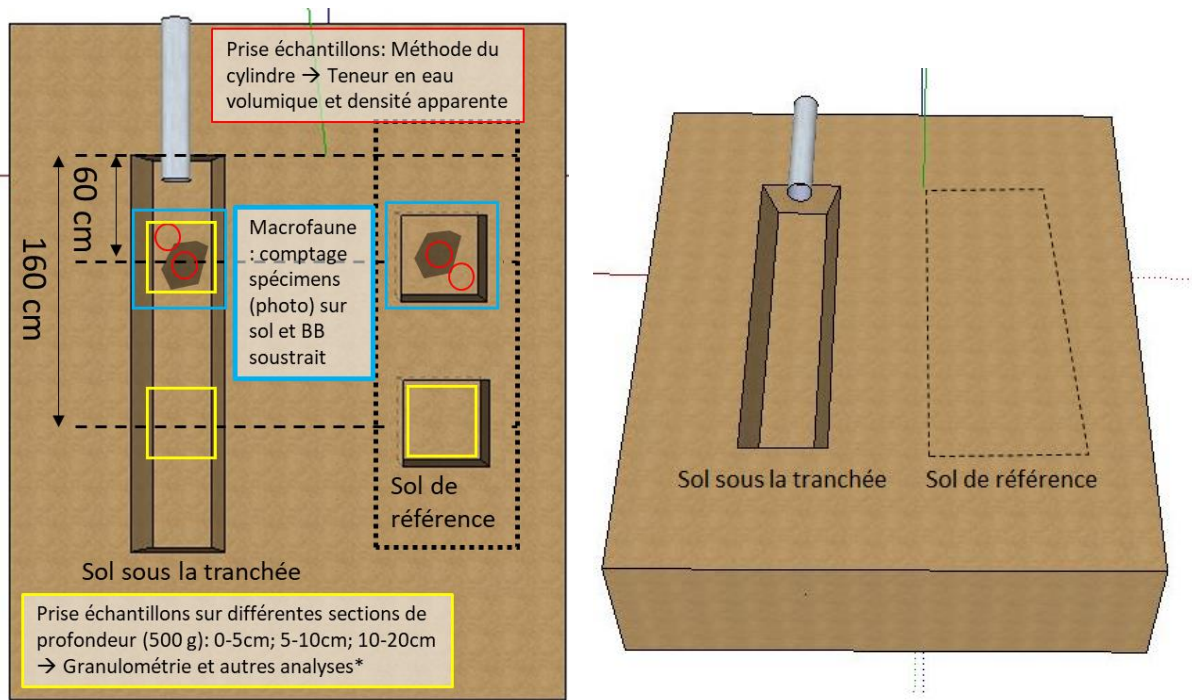


Fig. 18. Schéma des points d'échantillonnage dans la tranchée et sur le sol de référence.

4.3.4.2. Teneur en eau et densité apparente

La teneur en eau peut être exprimée sur des dimensions volumiques (θ , $m^3 \cdot m^{-3}$) ou massiques (ω , $kg \cdot kg^{-1}$). Lorsque le milieu est saturé, la valeur de teneur en eau est égale à la porosité et la teneur en eau est dite alors « à saturation » (θ_s , ω_s)

La teneur en eau volumique est définie par le rapport entre le volume occupé par l'eau ou volume efficace (V_w , m^3) et le volume total considéré (V , m^3) selon l'équation 4. Il s'agit donc du volume relatif de la phase liquide ($m^3 \cdot m^{-3}$).

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad [4]$$

La teneur en eau volumique peut être déterminée expérimentalement selon plusieurs méthodes. La méthode plus utilisée est celle appelé méthode au cylindre dont le volume d'échantillon considéré est celui déterminé par un cylindre métallique

La teneur en eau massique, fréquemment utilisée au laboratoire, est définie comme le rapport de la masse d'eau présente entre les éléments solides du sol (m_w , kg) et la masse sèche du sol après passage à l'étuve (m_s , kg).

$$\omega = \frac{m_w}{m_s} \quad [5]$$

La teneur en eau est déterminée en laboratoire par pesée et séchage en étuve, à 105°C, typiquement pendant 24 heures selon la référence normative NF P94-050 (plusieurs mesures consécutives sans variation de la masse mesurée). Elle est calculée selon l'équation 6 :

$$\omega = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m_h - m_s}{m_s} \quad [6]$$

avec m_h la masse humide de l'échantillon (poids avant séchage à l'étuve) et m_s la masse sèche de l'échantillon (après étuve).

La masse volumique est déterminée par l'équation 7, avec ρ_b ($kg \cdot m^{-3}$) la masse volumique de l'échantillon et ρ_w ($kg \cdot m^{-3}$) la masse volumique de l'eau et V le volume d'échantillon dans le cylindre.

$$\theta = \omega \frac{\rho_b}{\rho_w} = \omega \frac{m_s}{V\rho_w} \quad [7]$$

La densité apparente peut alors être calculée comme suit :

$$\rho_b = \frac{m_s}{V} \quad [8]$$

Il est nécessaire de prendre des mesures de la teneur en eau à saturation et de la teneur en eau du sol avant les essais d'infiltration. Pour ce faire, il est nécessaire de prélever des échantillons, après les essais d'infiltration, de la surface mouillée (teneur en eau à saturation) et de la surface non mouillée, aussi bien dans la tranchée que sur le sol de référence.

- Méthode : densité apparente, méthode du cylindre NF X31-501 ; teneur en eau massique, NF P94-050 méthode gravimétrique par étuve.
- Laboratoire : REVERSAAL INRAE.
- Échantillonnage : des échantillons de sol non remanié pris avec des cylindres de prélèvement. Échantillonnage à faire après les mesures d'infiltration, du sol humidifié (teneur en eau à saturation) et non humidifié (teneur en eau) en au moins deux points, un à l'intérieur de la tranchée et un du sol de référence tel que montré dans la Fig. 20 « cercles rouges »
- Stockage : sachet fermé hermétique
- Unités : % massique et $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

4.3.4.3. Matières volatiles

La teneur en matières volatiles peut être utilisée comme un indicatif de la teneur en matière organique du sol. La comparaison entre la teneur en matières volatiles du sol de référence et du sol sous la tranchée permet de mettre en évidence l'influence des processus en lien avec les transferts de matière organique. Le transport de la matière organique vers le sol peut s'apprécier aussi par l'analyse de la teneur en matières volatiles à différentes profondeurs du sol.

La teneur en matières volatiles est déterminée par gravimétrie. L'échantillon est calciné à 550 °C après la soustraction de la teneur en humidité résiduelle de l'échantillon (mesurée à 105°C). La variation de la masse avant et après calcination permet de déterminer la teneur en matières volatiles.

- Méthode : gravimétrie (méthode interne Arras)
- Laboratoire : Arras INRAE
- Échantillonnage : une prise d'essai de 1 g par échantillon remanié est nécessaire. Analyses à faire sur un total de 9 éch./site : prélèvement sur trois points différents du sol site (Fig.20 "quarrés jaunes») à trois profondeurs différentes par point (0 - 5 cm ; 5 - 10 cm ; 10 - 20 cm).
- Préparation de l'échantillon : broyage à 250 μm et séchage préalable à 105°C (réalisé par le laboratoire Arras)
- Stockage : Sachet fermé hermétique à 4°C.
- Unités : en % de masse de poids sec (105°C)

4.3.4.4. Teneurs en carbone organique et azote total

Le carbone organique est celui provenant de toutes les molécules organiques d'origines animales, végétales ou microbienne,

vivantes ou mortes. On mesure la quantité de carbone organique sur les profils de sol remanié dans la tranchée en comparaison avec le sol de référence. La méthode de détermination du carbone organique repose sur la transformation en dioxyde de carbone (CO_2) de la totalité du carbone présent dans l'échantillon. La réaction s'effectue en portant ce dernier à environ 1000°C en présence d'oxygène. Après séparation chromatographique, la quantité de gaz carbonique formée est quantifiée au moyen d'un catharomètre (conductibilité thermique). Quand l'échantillon contient des quantités non négligeables de carbone minéral sous forme de carbonates, une correction ou un prétraitement de l'échantillon est nécessaire.

La détermination de la teneur totale en azote (organique et minéral) permet une caractérisation assez complète du sol. L'azote total mesure toutes les formes de l'azote (excepté l'azote gazeux) : i) ammoniacal (NH_4^+) soit échangeable, soit fixé sur les argiles ; ii) nitrique (NO_3) des sels solubles facilement absorbables par les plantes et mobiles ; iii) organique, macromolécules organiques issus de la décomposition de la matière végétale, animales ou microbienne ; et iv) labile, des métabolites microbiens issus de l'activité de dégradation des microorganismes et potentiellement minéralisable (Baize 2018). L'azote total est déterminé en le chauffant à environ 1000°C en présence d'oxygène. Les produits de combustion ou décomposition sont réduits à l'état d'azote moléculaire (N_2) et quantifiées après séparation chromatographique, au moyen d'un catharomètre.

- Méthode : par combustion sèche : NF ISO 10694 pour le carbone organique ; NF ISO 13878 pour l'azote total
- Laboratoire : Arras INRAE
- Échantillonnage : une prise d'essai de 50 mg par échantillon remanié est nécessaire pour chaque mesure (azote total et carbone organique). Analyses à faire sur un total de 9 éch./site : prélèvement sur trois points différents du sol site (Fig.20 "quarrés jaunes») à trois profondeurs différentes par point (0 - 5 cm ; 5 - 10 cm ; 10 - 20 cm).
- Préparation de l'échantillon : broyage à $250\ \mu\text{m}$ (réalisé par le laboratoire Arras)
- Stockage : Sachet fermé hermétique à 4°C .
- Unités : $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ de poids sec (105°C)

4.3.4.5. pH du sol

Le pH du sol informe de la basicité ou acidité d'un sol et permet de faire une analyse quantitative des caractéristiques d'un sol mais aussi qualitative car il existe un rapport entre le pH d'un sol et l'abondance et type de microbiologie qui s'y développe. Ces mesures permettent d'identifier l'impact de l'infiltration des eaux usées sur le pH du sol en lien avec la chimie et biologie du même sol.

Mesure du pH après mise en suspension de l'échantillon de sol séché à l'air, dans l'eau déminéralisée dans un rapport 1/5 (v/v). La méthode utilisée est celle de la norme NF ISO 10390.

La prise d'essai est d'environ 10 g d'un échantillon broyé à 2 mm

- Méthode : NF ISO 10390.
- Laboratoire : Arras INRAE
- Échantillonnage : une prise d'essai de 10 g par échantillon remanié est nécessaire. Analyses à faire sur un total de 9 éch./site : prélèvement sur trois points différents du sol site (Fig.20 "quarrés jaunes») à trois profondeurs différentes par point (0 - 5 cm ; 5 - 10 cm ; 10 - 20 cm).
- Préparation de l'échantillon : broyage à 2 mm (réalisé par le laboratoire Arras)
- Stockage : Sachet fermé hermétique.
- Unités : unités de pH

4.3.4.6. Métaux

Quelques éléments métalliques majeurs peuvent être aussi mesurés afin d'avoir une caractérisation plus poussée de la nature du sol. Cela requiert la mise en solution de l'échantillon par l'usage de l'acide fluorhydrique (HF). La solution est dosée et mesurée par émission plasma en mode photonique (ICP-AES). Les éléments ici mesurés sont : Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na.

- Méthode : Mise en solution total HF, norme NF X 31-147 ; mesure, NF ISO 22036 (ICP-AES)
- Laboratoire : Arras INRAE
- Échantillonnage : une prise d'essai de 250 mg par échantillon remanié est nécessaire. Analyses à faire sur un total de 9 éch./site : prélèvement sur trois points différents du sol site (Fig.20 « quarrés jaunes») à trois profondeurs différentes par point (0 - 5 cm ; 5 - 10 cm; 10 - 20 cm).
- Préparation de l'échantillon : broyage à 250 μm (réalisé par le laboratoire Arras)
- Stockage : Sachet fermé hermétique.
- Unités : $\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$ ou $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

4.3.4.7. Phosphore total

Le phosphore total contenu dans le sol est aussi mesuré par dosage sur émission plasma en mode photonique (ICP-AES).

- Méthode : NF ISO 22036 (ICP-AES)
- Laboratoire : Arras INRAE
- Échantillonnage : une prise d'essai de 250 mg par échantillon remanié est nécessaire. Analyses à faire sur un total de 9 éch./site : prélèvement sur trois points différents du sol site (Fig.20 « quarrés jaunes») à trois profondeurs différentes par point (0 - 5 cm ; 5 - 10 cm; 10 - 20 cm).
- Préparation de l'échantillon : broyage à 250 μm (réalisé par le laboratoire Arras)
- Stockage : Sachet fermé hermétique.
- Unités : $\text{g P}_2\text{O}_5 \cdot 100\text{g}^{-1}$

4.3.4.8. Capacité d'échange cationique et cations échangeables

La capacité d'échange cationique (CEC) fait référence à la quantité totale des cations qu'un échantillon de sol peut retenir sur son complexe adsorbant (pas de réaction chimique) à un pH donné. La surface des particules a généralement une charge négative mais cette charge peut évoluer en fonction du pH qui affecte l'hydratation de la surface et l'ionisation des groupes fonctionnels. La CEC est associée majoritairement à la présence d'argiles et des molécules organiques.

La détermination de la CEC selon la méthode de Metson comprend trois étapes : (1) L'échantillon est d'abord saturé en ions ammonium (NH_4^+) par percolations successives d'une solution d'acétate d'ammonium ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{NH}_4$) à $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$. Le pouvoir tampon de cette dernière permet de ramener le pH du milieu aux environs de 7, ce qui constitue une des caractéristiques essentielles de cette méthode. (2) Après avoir éliminé l'excès d'ions ammonium par percolations d'alcool éthylique, (3) on procède ensuite à leur échange par une solution de chlorure de sodium à $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$. Les ions ammonium déplacés sont dosés par spectrophotométrie sur la solution précédente, une fois filtrée. Les concentrations trouvées sont converties en cmol^+/kg (centimoles de charges positives par kilogramme de sol).

Les cations échangeables les plus couramment retrouvés sur les complexes d'échanges dans le sol sont : Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} c'est-à-dire les cations alcalins et alcalino-terreux ; ainsi que Al^{3+} et H^+ . Ils sont dosés à partir de la solution d'extraction d'ammonium utilisé pour la CEC et analyses par ICP-AES.

- Méthode : CEC, Méthode Metson AFNOR NF X 31-130 ; cations échangeables, NF ISO 22036
- Laboratoire : Arras INRAE
- Échantillonnage : une prise d'essai de 2,5 g par échantillon remanié broyé à 2 mm est nécessaire. Analyses à faire sur un total de 9 éch./site : prélèvement sur trois points différents du sol site (Fig.20 « quarrés jaunes») à trois profondeurs différentes par point (0 - 5 cm ; 5 - 10 cm; 10 - 20 cm).
- Préparation de l'échantillon : broyage à 2 mm (réalisé par le laboratoire Arras)
- Stockage : Sachet fermé hermétique.
- Unités : $\text{cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ (centimoles de charges positives par kilogramme de sol) équivalent à 1 méq·100 g⁻¹.

4.3.4.9. Présence de la macrofaune

La présence des anéciques (lombrics) dans le sol peut être identifiée par l'observation de leurs déjections (turricules) à la surface du sol ainsi que par les galeries creusées dans le sol. Ces galeries peuvent être visibles et quantifiables aussi bien sur des profils de sol verticaux que horizontaux comme le montre la Fig. 19. Une différence de densité de galeries (nombre·cm⁻²) entre le sol sous la tranchée et le sol de référence pourrait être à l'origine d'une différence entre la capacité d'infiltration des deux sols.

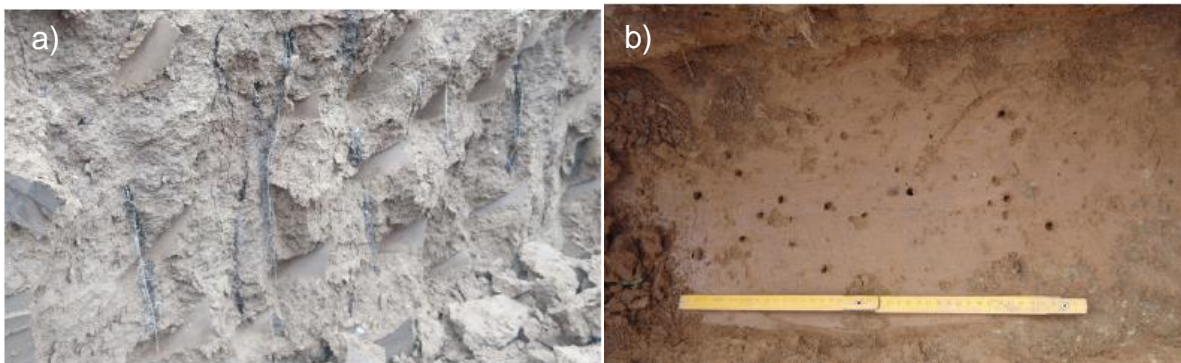


Fig. 19. Galeries des anéciques sur des profils a) verticaux et b) horizontaux

Pendant le printemps ou l'automne, une quantification est aussi possible au moyen des méthodes chimique et/ou physique. Dans un premier temps, on applique une solution chimique qui stimule les vers de terre à remonter à la surface où ils peuvent être prélevés facilement. Ensuite, par une extraction manuelle, on récupère des vers de terre restant dans un volume de sol de 30x30x10 cm (largeur x largeur x profondeur). La procédure suivie est décrite ci-dessous (Fig. 20):

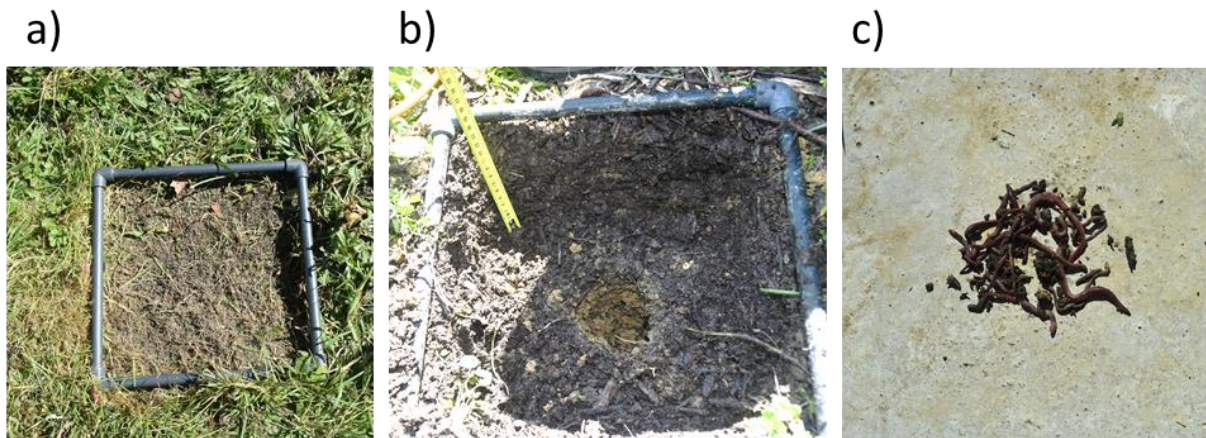


Fig. 20. a) préparation de la surface d'investigation ; b) tri manuel sur une profondeur de 10 cm c) prélèvement et comptabilisation des vers de terre.

- 1) Couper la végétation au ras du sol et l'évacuer sur un carré de 30 cm de côté.
- 2) Arroser avec une solution réalisée à partir de 10 litres d'eau mélangés à 300 grammes de moutarde fine très forte (Ex. Moutarde de Dijon). La moutarde, urticante, fait remonter les vers. Répéter l'action au bout de 15 minutes.
- 3) Récupérer les individus et les quantifier (prise de photo)
- 4) Dans le broyat de bois, l'effet de la solution peut être mitigé par la plus grande porosité du milieu. On peut alors remuer le garnissage pour trouver les vers de terre cachés jusqu'à 10 cm de profondeur. La même procédure peut être appliquée sur le sol de référence.

4.3.5. Étape 6 : Analyse des données

Un grand nombre des données est produit lors des campagnes de terrain demandant leur traitement et analyse :

- Estimation des charges hydrauliques apportées sur le filtre à partir des données de consommation d'eau potable
- TRE : filtrage, inversion de données et interprétation
- Traçage géophysique : filtrage, inversion de données et interprétation
- Traçage avec bleu de méthylène: traitement d'images avec algorithme spécifique
- Comptabilisation des vers de terre et identification des groupes
- Analyses physico-chimiques : détermination des rapports paramétriques d'intérêt et analyse statistique.
- Données d'infiltration : filtrage, inversion et analyse statistique des données en utilisant la méthode statistique d'analyse de variance (ANOVA). Traitement d'images et calcul des ratios capillarité/ gravité. Modélisation hydrodynamique.

Une explication détaillée des méthodes de traitement, de l'analyse des données et des résultats retrouvés sur l'action *in situ* du programme MATCARB fera l'objet d'un nouveau rapport à fournir en fin 2021.

5. Synthèse d'intervention sur un site

La Fig. 21 recueille une synthèse des interventions requises pour l'évaluation des FBB sur un site en particulier. Une cohérence chronologique existe de gauche à droite, sur les jours d'intervention ainsi que de haut en bas, dans les opérations à réaliser lors

d'un jour d'intervention. Des schémas des différentes opérations sont aussi montrés dans le Tableau 2. Certaines opérations d'échantillonnage ou carottage peuvent être réalisées en parallèle aux mesures TRE ou d'infiltration afin optimiser le temps d'intervention sur site. Pour cette raison les étapes 3 et 4 sont regroupés dans une même mission de deux jours. Les particularités des sites et de leur mode de fonctionnement peuvent nécessiter des adaptations du protocole.

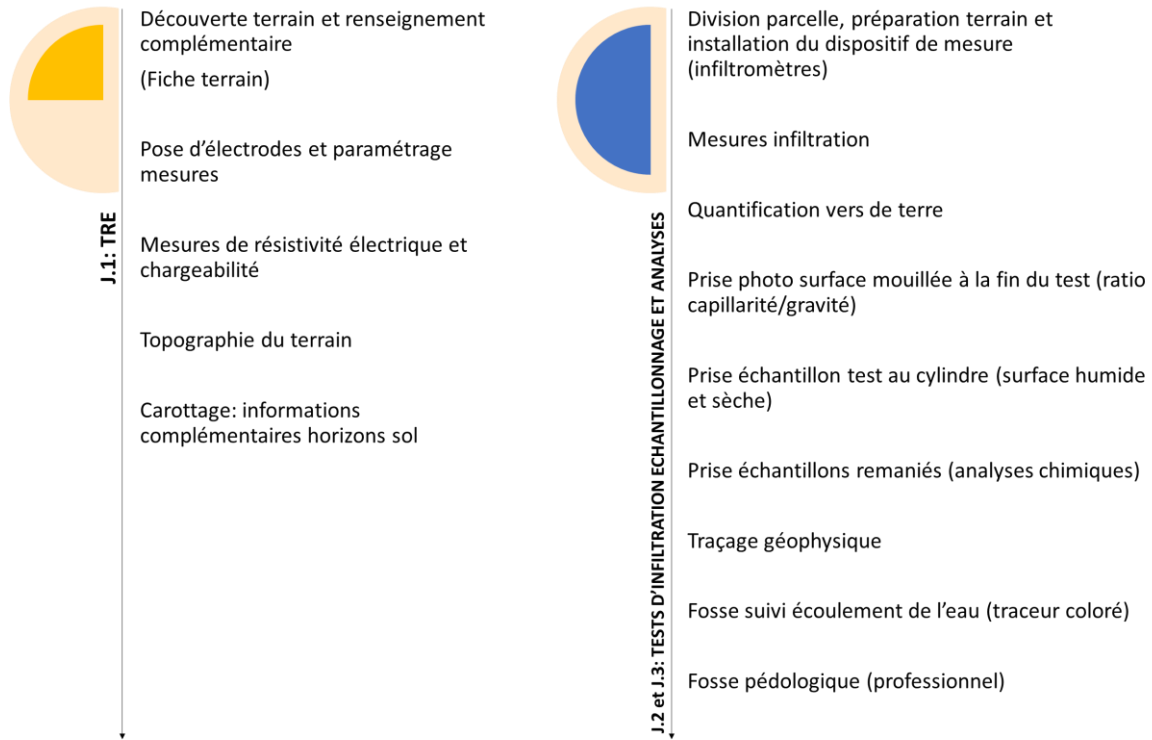
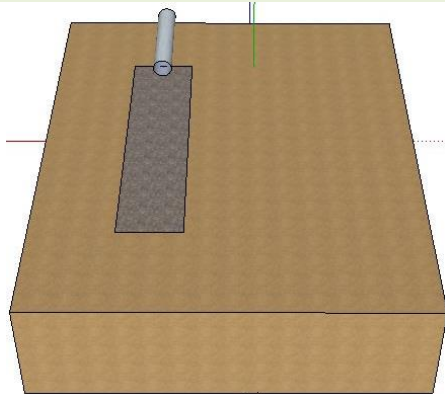


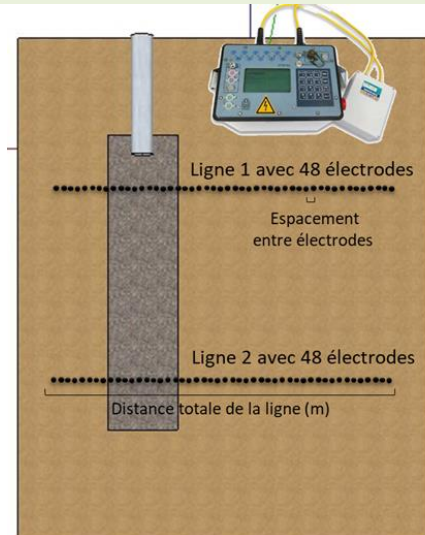
Fig. 21. Synthèse des opérations à réaliser sur un site expérimental

TOMOGRAPHIE DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE (TRE)

1. Découverte terrain (FBB)
Renseignement complémentaire (Fiche terrain)



2. Préparation terrain et pose d'électrodes :
- 2 Lignes
 - 9.60 m/ligne
 - Distance entre électrodes = 20 cm



3. Paramétrage des mesures de résistivité électrique, mesure et renseignement de la fiche TRE
4. Dépose électrodes et carottage du sol et de la tranchée. Remise au propre du terrain

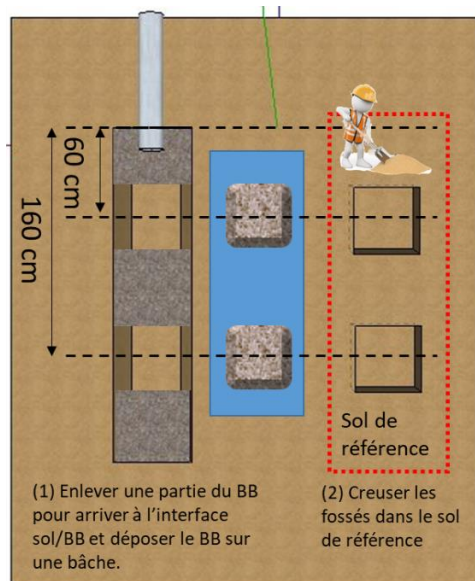
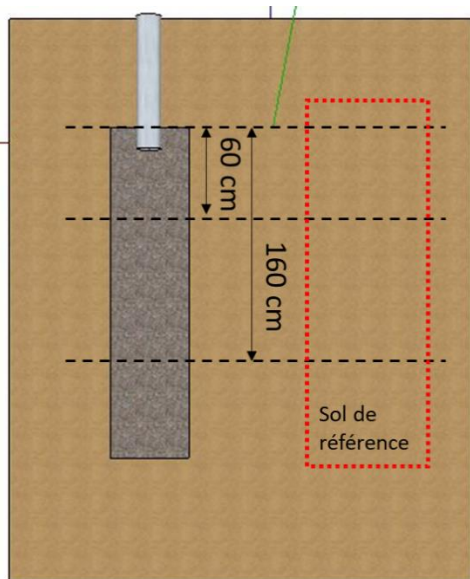
Paramètres :

- **stack min** : 1
- **stack max** : 3
- **Q max** : 5 %
- **Mesure** : Rh0 et IP
- **Temps d'injection** : 4 s
- **V_{mn} request** : 50 mV
- **V_{ab} max** : 800V



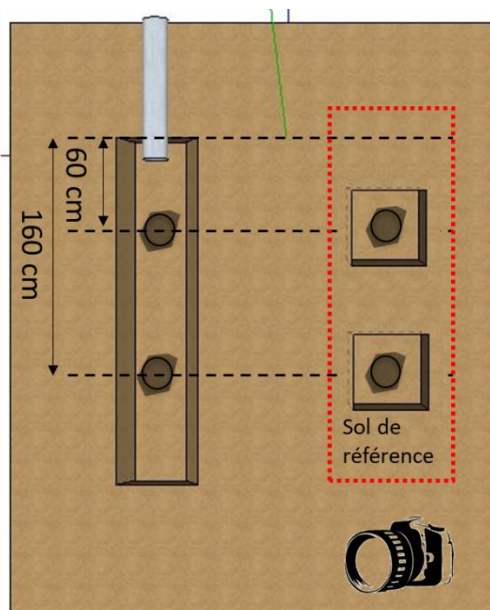
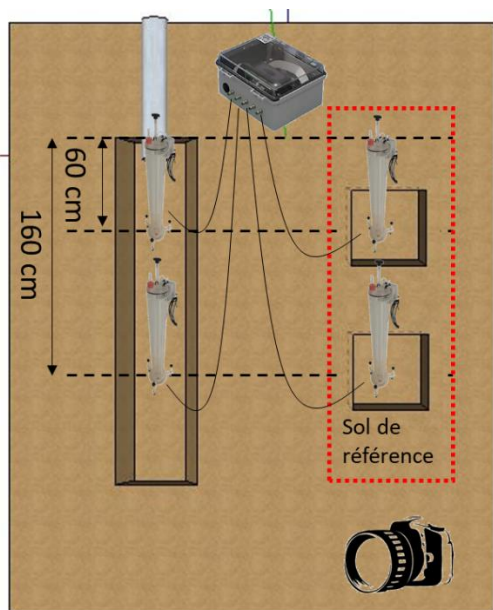
TESTS D'INFILTRATION

1. Division parcelle : marquage des distances au points d'infiltration
2. Soustraire BB tranchée et déposer sur bâche. Creuseur fossés sur sol avoisinant



3. Préparation et lancement des mesures d'infiltration dans la tranchée et dans le sol de référence. Prise des photos de la surface avant infiltration.

4. Réaliser des photos de la surface mouillée en fin de test : calcul du ratio capillarité/gravité



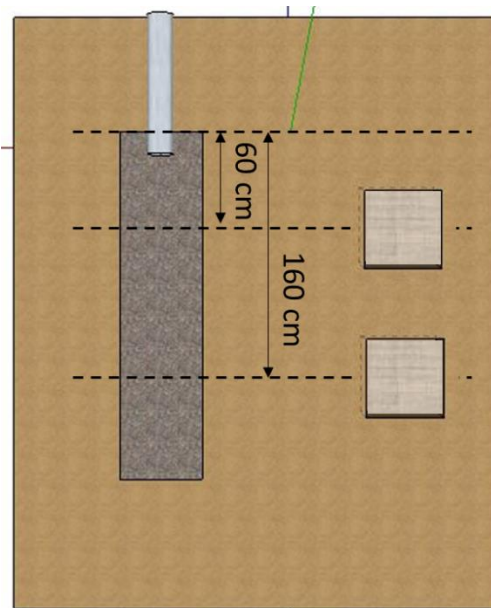
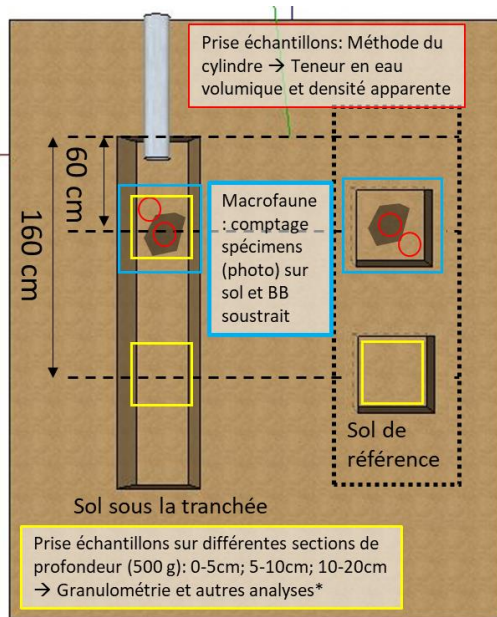
ÉCHANTILLONNAGE

1. Prise d'échantillons :

- Test au cylindre (surface humide et sèche après infiltration)
- Quantification vers de terre
- Échantillonnage remanié

2. Remise en état du site :

- Remplissage des fossés
- Réapprovisionnement du sol sous la tranchée et du BB



6. Planning des campagnes de terrain

- Campagne de validation du protocole : 23 et 24 février (*réalisée*)

Une journée de terrain est prévue sur le site de Malbost en région Rhône-Alpe avec triple objectif :

- Se former au fonctionnement des appareils et du matériel de terrain nécessaires pour les campagnes
- Validation du protocole terrain
- Formation sur l'usage des équipements notamment pour l'infiltromètre et la TRE.

- Campagne de terrain : 22 – 26 Mars (*réalisée*)

Cette campagne est prévue pour la réalisation des mesures de TRE et des profils de sol des sites présélectionnés. Elle sert aussi de pré-visite des sites dédiée à fournir les informations suivantes :

- Identifier les possibles points problématiques : clôtures, accès aux filtres, colmatage des filtres, autres.
- Observation de l'état général du filtre : interface sol/broyat ; état du broyat ; végétation autour
- Remarquer la présence des jardins/potagers/puits qui puissent affecter la consommation d'eau estimée
- Confirmer les informations fournies au préalable
- Choix final des sites

- Campagne de terrain : 26 Avril – 7 Mai (*réalisée*)

Une campagne sur deux semaines est prévue du 26 Avril au 7 Mai Cette campagne a pour objectif la réalisation des essais d'infiltration et la prise d'échantillons pour analyse, étapes 3 et 4 du protocole expérimental. Deux semaines avant cette campagne, il est demandé aux propriétaires des sites de couvrir la surface du sol et des tranchées destinées au suivi pour les protéger de l'eau en cas de pluie. Ces tranchées ne seront plus alimentées après couverture

Références

- Angulo-Jaramillo R, Bagarello V, Di Prima S, Gosset A, Iovino M, Lassabatere L. 2019. Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters (BEST) across soils and scales. *Journal of Hydrology* 576: 239–261 DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.06.007
- Audebert, M. (2015). Développement d'une méthode de contrainte des modèles hydrodynamiques par une stratégie d'analyse des données géophysiques ERT : Application aux écoulements de lixiviat dans les massifs de déchets, Université Grenoble Alpes.
- Baize, D. (2018). Guide des analyses en pédologie. 3ème édition
- Baveye, P., P. Vandevivere, B. L. Hoyle, P. C. DeLeo and D. S. de Lozada (1998). "Environmental Impact and Mechanisms of the Biological Clogging of Saturated Soils and Aquifer Materials." *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 28(2): 123-191. DOI: 10.1080/10643389891254197.
- Bisone S., Clément R. et Forquet N. (2017) Une méthodologie couplant mesures géophysiques et ponctuelles afin d'estimer la perméabilité d'un site destiné à l'infiltration d'eau usée traitée. *Déchets sciences et techniques* N°74, septembre 2017
- Blouin, M., M. E. Hodson, E. A. Delgado, G. Baker, L. Brussaard, K. R. Butt, J. Dai, L. Dendooven, G. Peres, J. E. Tondoh, D. Cluzeau and J. J. Brun (2013). "A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services." *European Journal of Soil Science* 64(2): 161-182. DOI: 10.1111/ejss.12025.
- Braud I, De Condappa D, Soria JM, Haverkamp R, Angulo-Jaramillo R, Galle S, Vauclin M. 2005. Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulic properties (the Beerkan method). *European Journal of Soil Science* 56 (3): 361–374 DOI: 10.1111/j.1365-2389.2004.00660.x
- Brun, F., V. Dubois, R. Lombard-Latune and C. Boutin (2020). Le traitement des eaux ménagères par filtres à broyat de bois, INRAE UR-Reversaal. Ministère de la transition écologique et solidaire <https://hal.inrae.fr/hal-03003572v1>
- Brun, F., V. Dubois, R. and C. Boutin (2019). Note sur le filtre planté à flux vertical pour le traitement des eaux ménagères, INRAE UR-Reversaal. Ministère de la transition écologique et solidaire <https://hal.inrae.fr/hal-02893395v1>
- Brun, F., V. Dubois and C. Boutin (2021). "L'emploi du broyat de bois, une solution durable pour traiter les eaux ménagères ? -Use of woodchips: a sustainable solution for the treatment of grey water?" *Techniques Sciences Méthodes* 3.
- Chocat B., Brelot E. et le GT du Graie (2020). Les techniques alternatives pour la gestion des eaux pluviales : risques réels et avantages
- Clément R., Moreau S., Henine H., Guérin A., Chaumont C., Tournebize J. (2014). On the value of combining surface and cross-borehole ERT measurements to study artificial tile drainage processes. *Near Surface Geophysics*. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2014034>
- Concialdi, P., S. Di Prima, H. M. Bhanderi, R. D. Stewart, M. R. Abou Najm, M. Lal Gaur, R. Angulo-Jaramillo and L. Lassabatere (2020). "An open-source instrumentation package for intensive soil hydraulic characterization." *Journal of Hydrology* 582. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124492.
- Degueurce, A., Clément, R., Moreau, S., Peu, P. 2016. On the value of electrical resistivity tomography for monitoring leachate injection in solid state anaerobic digestion plants at farm scale. *Waste Management*.
- Djedidi, N. and A. Hassen (1991). "Propriétés physiques des sols et pouvoir colmatant des eaux usées en fonction de leur degré de traitement." *Cahiers ORSTOM.Série Pédologie* 26(1): P. 3-10.
- Forquet, N., A. Petitjean, E. Bloem and C. Boutin (2014). L'infiltration d'eau usée traitée dans le sol pour les ZRV : revue

bibliographique, objectifs de l'étude, moyens et méthodes mis en œuvre, Irstea: 34. <https://hal.inrae.fr/hal-02604717v1>

Gonzalez-Merchan, C. (2012). Amélioration des connaissances sur le colmatage des systèmes d'infiltration d'eaux pluviales.

Philippe Duchaufour (1997) Abrégé de pédologie. Sol, végétation, environnement, 5ème édition

Yong, C. F., D. T. McCarthy and A. Deletic (2013). "Predicting physical clogging of porous and permeable pavements." *Journal of Hydrology* 481: 48-55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.009>.

Bioturbation

Remaniement de sols ou de sédiments aquatiques produit par les activités des organismes vivants présents dans ces milieux.

Equivalent Habitant

Dans le domaine de l'épuration (directive européenne 1991), il fait référence à la charge organique biodégradable ayant une demande biochimique en oxygène en cinq jours (DBO₅) de 60 grammes d'oxygène par jour. Dans le domaine particulier de l'ANC, il y a équivalence entre le nombre de pièce principale d'une maison (PP) et l'EH.

Eaux ménagères

Ce sont les eaux usées produites par un ménage, sans les eaux vannes des toilettes. Elles sont considérées comme un tout. Les charges hydraulique et organique moyennes de dimensionnement à retenir pour un ménage type de 4-5 EH, sont : 455 L/j, 140 g DBO₅/j et 338 g DCO/j. (Brun *et al.*, 2019)

Filtres à broyat de bois

Dispositif de traitement des eaux ménagères composé de plusieurs tranchées garnies de broyat de bois.

Tranchée

Excavation longitudinale pratiquée à ciel ouvert dans le sol.

Sol

Horizons de surface compris entre 0 et 5 mètres de profondeur.

ANNEXE A

Identification du site

Site		Coordonnées (carte)	
Propriétaire			
Adresse			
Type de résidence	<input type="checkbox"/> Principale <input type="checkbox"/> Secondaire : présence annuelle _____		
Date mise en service			
Code retenu			

Informations du FBB

Nb de pers./hab.	_____ adultes ; _____ enfants				
Consommation annuelle d'eau					
Présence de puit	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON	Usage			
Présence de potager	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON	Alimentation par	<input type="checkbox"/> Eau puit	<input type="checkbox"/> Eau robinet	
Présence de jardin	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON	Alimentation par	<input type="checkbox"/> Eau puit	<input type="checkbox"/> Eau robinet	
Autres usages d'eau (nettoyage voiture, maison...)					
Nb tranchées					
Dimensions	Longueur		Largeur		Profondeur
Type d'eau	<input type="checkbox"/> Eaux ménagères <input type="checkbox"/> Lixiviats des toilettes sèches <input type="checkbox"/> Autres : _____				
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)				
Alternance alimentation	Semaines d'alim.		Semaines de repos		
Type de broyat					
Fréquence d'apport de BB					
Date dernier apport		Perte hauteur :			
Composition texturale du sol				Référence :	
Présence clôtures à < 20 m de la tranchée	<input type="checkbox"/> OUI	<input type="checkbox"/> Perpendiculaire à la tranchée. Distance :			
	<input type="checkbox"/> NON	<input type="checkbox"/> Parallèle à la tranchée. Distance : _____			
	Type de clôture				
Commentaires					
Schéma du site					

--	--