



**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)**

Action MATCARB

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

Avril 2022

Laura DELGADO-GONZALEZ

Vivien DUBOIS

Laurent Lassabatère

Rémi CLÉMENT

UR REVERSAAL INRAE, LENHA, Ecocentre Pierre et Terre

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

Table des matières

Synthèse du rapport	1
1. Projet MATCARB.....	2
1.1. Objectifs	2
2. Résultats	3
2.1. Description des sites	3
2.2. Composition du sol	6
2.2.1. Analyses de sol	6
2.2.2. Étude pédologique	7
2.3. Tomographie de résistivité électrique.....	11
2.4. Comportement hydraulique	12
2.4.1. Essais d'infiltration et conductivité hydraulique à saturation	12
2.4.2. Fosses pédologiques.....	15
2.5. Analyses chimiques.....	19
2.5.1. Carbone organique total	19
2.5.2. Azote total.....	20
2.5.3. Phosphore total.....	23
2.5.4. pH et salinité	24
2.5.5. Les vers de terre.....	26
3. Conclusions et perspectives.....	27

Synthèse du rapport

La Fiche Action 2021 du projet MATCARB avait pour objectif d'évaluer le comportement hydraulique de tranchées d'infiltration à broyat de bois grâce à une étude *in situ* menée sur le terrain. Dans le cadre de ces travaux de recherches sur les surfaces d'infiltrations d'eaux usées traitées l'unité REVERSAAL, s'intéresse à l'usage de matériaux carbonés comme le broyat de bois pour améliorer la capacité d'infiltration des sols peu perméables ou pour maintenir l'infiltration dans le temps.

A ce jour, il n'existe pas de surface d'infiltration broyat de bois en sortie de station d'épuration, mais il existe quelques applications pour le traitement décentralisé ou les questions sont similaires. Grâce à notre partenaire Pierre et Terre, nous avons constitué un ensemble d'échantillons de sites représentatifs à partir des documentations fournis.

Sur 9 sites, au moyen d'une étude pédologique et géophysique nous avons constitué un échantillon de sols de type limoneux et argileux avec des structures très variées et intéressantes pour l'étude du comportement hydraulique des tranchées d'infiltration à broyat de bois.

A l'issue de cette première étape 4 sites, ont été étudiés plus finement. Les tests d'infiltration, les fosses pédologiques, le comptage des lombrics et l'analyse physico-chimique des échantillons de sols ont montré que :

- la vitesse d'infiltration dans la tranchée est égale ou plus rapide que dans le sol de référence pour tous les cas spécifiques étudiés.
- la conductivité hydraulique à saturation du sol sous la tranchée est plus forte par rapport au sol de référence pour tous les sites à l'exception d'un où l'entretien était défaillant ce qui pouvait expliquer ces résultats.
- les fosses pédologiques combinées aux traçages ont mis en évidence la présence des passages préférentiels créés par la macrofaune et les plantes.
- le sol sous la tranchée montre une augmentation de la concentration en carbone organique total, phosphore et azote en comparaison avec le sol sur place. Cette augmentation est restreinte aux premiers 5 cm de sol pour les sites les plus jeunes mais l'épaisseur de la couche de sol impactée augmente avec l'âge du filtre ce qui met en évidence des processus lents qui pourraient nécessiter plusieurs années pour se mettre en place.
- les apports en matière organique proviendraient principalement de l'eau usée et du BB. Par contre, l'absence d'analyses d'eau et d'un historique ne permet pas de déterminer leurs contributions avec précision.
- le sol sous la tranchée des sites plus âgés montre une augmentation plus importante de carbone organique par rapport à l'azote ce qui fait augmenter légèrement le rapport C/N par rapport au sol de référence mais la teneur en azote dans la solution du sol reste suffisante pour ne pas dégrader la qualité du sol
- il y a une légère acidification du sol sous la tranchée qui est en lien avec la dégradation du BB. Les valeurs de pH du sol se trouvent, cependant, dans ou proches de la plage de pH (6,0 à 8,0) qui favorise de manière générale les processus de biofiltration et le développement de la population microbienne et du biote.
- la salinisation du sol n'est pas significative à court et moyen terme mais reste à surveiller
- Plus de lombrics dans la tranchée que dans le sol de manière générale, les données d'infiltration semblent bien se corrélérer avec le plus grand nombre de lombrics retrouvés dans les tranchées par rapport au sol. Le rôle du BB porterait donc sur la constitution d'un écosystème favorable pour les vers de terre

Les hypothèses sur le comportement hydraulique des filtres qui permettraient le maintien de l'infiltration dans le temps ont été confirmées. La présence du broyat de bois et des conditions d'humidité sont responsables de l'enrichissement localisé de l'écosystème autour de la tranchée (lombrics, végétaux). Cela favorise le transport de la matière organique vers le sol, l'amélioration de la structure du sol et la création des passages préférentiels pour l'eau, tous ces facteurs ayant un effet positif sur la capacité d'infiltration du sol.

1. Projet MATCARB

Le Projet MATCARB coordonné par l'unité de recherche (UR) REVERSAAL en partenariat avec le Ministère de la Transition Écologique (MTE), porte sur l'étude du maintien de la capacité d'infiltration des sols utilisant un amendement organique, le broyat de bois (BB), appliquée aux surfaces d'infiltration d'eaux usées traitées (EUT). En effet dans le cadre de ces travaux de recherche sur les surfaces d'infiltrations d'eaux usées traitées l'unité REVERSAAL, s'intéresse à l'usage des matériaux carbonés comme le broyat de bois (BB) pour améliorer la capacité d'infiltration des sols peu perméables ou pour maintenir l'infiltration dans le temps. Il n'existe pas à ce jour de surface d'infiltration en sortie de station d'épuration pour mener ces tests. C'est pour cette raison que nous avons étudié des tranchées d'infiltration sur des systèmes décentralisés.

Les travaux préalables de Brun *et al.*, (2020) menés dans l'UR avaient conduit à l'hypothèse que l'infiltration des eaux ménagères dans des tranchées d'infiltration remplies d'un support carboné (BB) puissent maintenir la capacité d'infiltration des sols dans le temps. Les évolutions des capacités d'infiltration de l'ensemble « sol et BB » seraient donc liées aux interactions entre le sol, le bois broyé et la macrofaune qui peut se développer dans ce nouvel écosystème. Cette hypothèse était, cependant, essentiellement basée sur des observations d'utilisateurs de terrain et une étude scientifique de recherche s'est avérée nécessaire afin valider ou d'invalidier les hypothèses. Il s'agit donc d'évaluer les tranchées d'un filtre à broyat de bois (FBB) défini comme étant un système constitué de tranchées filtrantes non étanches creusées dans le sol et remplies d'amendement organique ayant pour but d'infiltrer les eaux usées. L'approche méthodologique du projet MATCARB se réalise à deux échelles :

- A l'échelle *in situ* permettant d'évaluer et comparer les propriétés hydrodynamiques du sol sous les tranchées et du sol avoisinant des systèmes FBB. Cette approche est principalement basée sur des essais expérimentaux et des analyses sur un échantillon de 4 sites.
- À l'échelle du laboratoire avec des colonnes pilote sous conditions maîtrisées afin de comprendre les phénomènes mis en jeu dans l'évolution de l'infiltration, les interactions entre les différents compartiments du système (sol-BB-faune) ainsi que les performances épuratoires.

1.1. Objectifs

Ce rapport présente une synthèse des résultats collectés lors des campagnes de terrain associées à la Fiche Action 2021 portant sur l'étude *in situ* du programme MATCARB. Ce rapport a pour objectif de répondre à différentes questions scientifiques :

- Q.S.1 – Comprendre les interactions entre les différents compartiments du système : sol ; BB ; faune (micro et macrofaune).
- Q.S.2 – Déterminer l'influence de la matière organique (le BB) sur le sol sous la tranchée : aspects hydrauliques et biogéochimiques.
- Q.S.3 – Déterminer le rôle joué par la faune dans l'hydraulique du système et dans le traitement épuratoire.
- Q.S.4 – Déterminer les mécanismes de maintien de l'infiltration (bioturbation, chemins préférentiels, enrichissement du sol)
- Q.S.5 – Déterminer l'impact sur la qualité du sol.

L'objectif opérationnel est de se prononcer sur les résultats en concluant sur l'apport de la matière carbonée au maintien de l'infiltration ou non.

2. Résultats

2.1. Description des sites

Pour la sélection des sites d'étude, le protocole présenté dans le rapport intermédiaire du « Programme MATCARB : Protocole Expérimental In Situ » fourni à la fin du premier semestre 2021 a été suivi. Le processus de sélection des sites expérimentaux s'est basé sur une procédure en pyramide inversée qui a permis de réduire le nombre de sites de 12 à 4 sites où les campagnes de terrain ont été effectuées. L'objectif étant de produire un échantillon représentatif de ce système, c'est-à-dire, de retenir des sites où les préconisations définies par le maître d'ouvrage sont respectées dans le but de sélectionner des échantillons avec peu de variabilité. Cela concerne à la fois la conception mais également l'entretien du site qui est réalisé par les propriétaires.

Une douzaine des sites ont été donc initialement identifiée par le partenaire « Ecocentre Pierre et Terre ». Pour la sélection, des critères logistiques et de représentativité du système ont été retenus (Figure 1). Cet échantillon initial a été réduit à 9 sites après application d'un second niveau de critères de sélection en lien avec l'âge des systèmes et ses caractéristiques hydrodynamiques. Sur les 9 sites, une première campagne d'une demi-journée par site a été menée. Cette campagne comprenait : une reconnaissance du terrain dans le but de compléter la documentation de chaque site, soit par l'observation soit par questionnement des propriétaires; une étude géophysique pour la caractérisation de la structure du sol ; et la réalisation de profils de sols préliminaires (carottage et observation directe). Grâce à cette première campagne de terrain, les informations sur chaque site ont été consolidées.

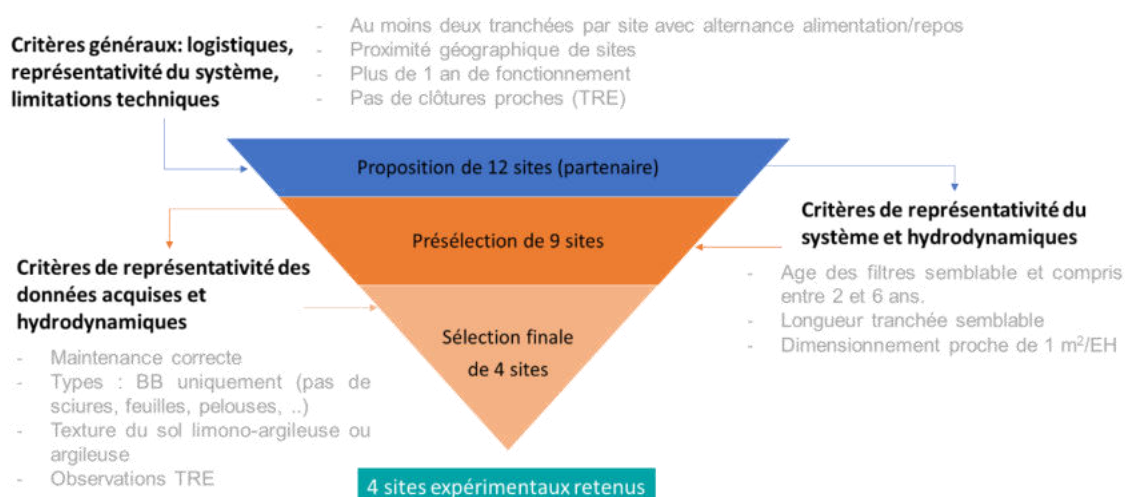


Figure 1. Protocole en pyramide inversée de sélections des sites d'études du projet MATCARB.

Cette première campagne a permis d'affiner les critères de sélections des sites. Parmi l'ensemble des critères, les critères les plus discriminants étaient :

- l'utilisation du bois raméal fragmenté (BRF) ou similaire en tant que BB (les tranchées utilisant, par exemple, des feuilles, ont été refusées afin de réduire la variabilité des systèmes) ;
- un sol en place peu perméable et donc de type, limoneux ou argileux ;
- une maintenance du système selon les préconisations de l'Ecocentre Pierre et Terre (alternance régulière, ajout de BB et entretien de la tranchée) ;
- les sols remaniés, identifiés grâce à la tomographie de résistivité électrique (TRE) ont été exclus du choix final des 4 sites.

Les caractéristiques des sites sélectionnés à l'issue de cette procédure sont synthétisées dans le Tableau 1.

Une deuxième campagne a été réalisée sur les 4 sites retenus. Elle comprenait : des essais d'infiltration, l'échantillonnage

de sol pour analyse des paramètres physico-chimiques et la quantification de la biofaune en particulier des lombrics. Il est utile de mentionner que le choix original des 4 sites ne comprenait pas le site de #Lascazères_2. Celui a dû être ajouté au cours de la campagne à cause du refus d'un propriétaire de nous laisser accéder au site que nous avions sélectionné. Pour cette raison, certaines caractéristiques du site ne sont pas totalement en accord avec nos critères de choix comme expliqué précédemment.

On notera quelques particularités des sites retenus (Tableau 1):

1. l'âge des filtres, la sélection comprend deux sites relativement jeunes, #Toujouse et #Lascazères_1 avec une mise en service en 2018 et 2019 respectivement, et deux sites relativement vieux #Riguepeu et #Lascazères_2 mis en service en 2015 et 2013 respectivement;
2. les eaux infiltrées, étaient des eaux ménagères avec des urines (EM+U) pour les sites de #Toujouse et Lascazères (#1 et #2), et des eaux ménagères avec lixiviats de compostage des toilettes sèches (EM+Lix) pour le site de #Riguepeu. De ce fait, la charge organique arrivant sur les filtres est probablement plus importante que si nous avions eu des EM seules (eaux cuisine et douche). Cela se traduit par une composition azotée sûrement plus proche de celle caractéristique des eaux usées urbaines ;
3. le dimensionnement varie entre 1 et 2 m²/EH et la longueur des tranchées varie entre 2.5 et 5 m. À noter que la notion d'équivalent-habitant (EH) est définie ici en fonction du nombre des pièces principales (maison avec 3 pièces principales = 3 EH) ;
4. la charge hydraulique appliquée varie entre 15 et 50 mm/j ;
5. l'entretien observé était correct pour tous les sites à l'exception du site #Lascazères_2. Sur ce site, l'alternance de l'alimentation des tranchées n'était pas régulière et la quantité de BB présent n'était pas suffisante avec un niveau de BB en-dessous de la surface du sol. En effet, le site de #Lascazères_2 n'est pas issu de la sélection stricte des critères de choix préalablement mentionnés. Toutefois, les résultats ont montré l'utilité d'inclure ce quatrième site dans l'analyse de la filière filtre à broyat de bois.

Tableau 1. Synthèse des informations des 4 sites expérimentaux retenus pour les analyses

	#Toulouse	#Riguepeu	#Lascazères_1	#Lascazères_2
Type de sol (à priori)	limon	argile	limon	limon
Année de mise en service du FBB	2018	2015	2019	2013
Dimensionnement (m ² /EH)	1	1.88	1	1.45
Surface d'infiltration (m ²)	3	7.5	4	2.07
Nombre des tranchées	3	5	4	3
Dimensions: longueur (m)	2.5	5	2.5	2.3
Dimensions: profondeur (m)	0.3	0.2	0.3	0.2
Dimensions: largeur (m)	0.4	0.3	0.4	0.3
Type d'eau	EM + U (eaux pluie sur 1 tr)	EM + Lix	EM + U	EM + U
Charge hydraulique estimée (mm/j)	46	16	17	49
Alternance : alimentation (semaines par tranchée)	1	2	6	14
Alternance : repos (semaines par tranchée)	2	8	6	28
Type de BB	BRF	BRF plusieurs types	branches + BRF	branches + BRF
Dernier ajout de BB	2018	2020	2019	2019
Commentaires	Bon état. Maintenance rigoureuse	Bon état. Maintenance rigoureuse	Bon état. Juste 2 tranchées sont utilisées normalement. Alternance déclarée tous les 2 mois	Limites des tranchées mal définies. Peu de maintenance réalisée. Sol trop mouillé dans la tranchée. Présence de moustiques. BB quasi inexistant. La surface d'infiltration disponible a évolué (de 5 m longueur à 2.3 m). Alternance déclarée tous les 3 à 4 mois.

*EM : Eaux Ménagères ; Lix : Lixiviats de compostage ; U : Urines

2.2. Composition du sol

2.2.1. Analyses de sol

Des propriétés fondamentales des sols tels que la porosité ou la conductivité hydraulique à saturation peuvent être reliées à la distribution granulométrique du sol. Cette composition granulométrique permet aussi de faire une classification selon sa composition relative de sable, limon et argile, en différentes textures. Une analyse granulométrique des sols des différents sites expérimentaux a été donc réalisé afin de pouvoir décrire la texture du sol en place. Le résultat de cette analyse granulométrique est présenté dans le triangle de textures de la Figure 2.a). Chaque point représente une valeur moyenne de 3 échantillons pris à différentes profondeurs du sol. La profondeur d'échantillonnage est référencée à partir de l'interface sol-BB (située approximativement à 20-40 cm de profondeur depuis la surface du sol selon la tranchée et le site). Les prélèvements ont été réalisés jusqu'à une profondeur de 20 cm tel qu'indiqué dans le schéma de la Figure 2.b).

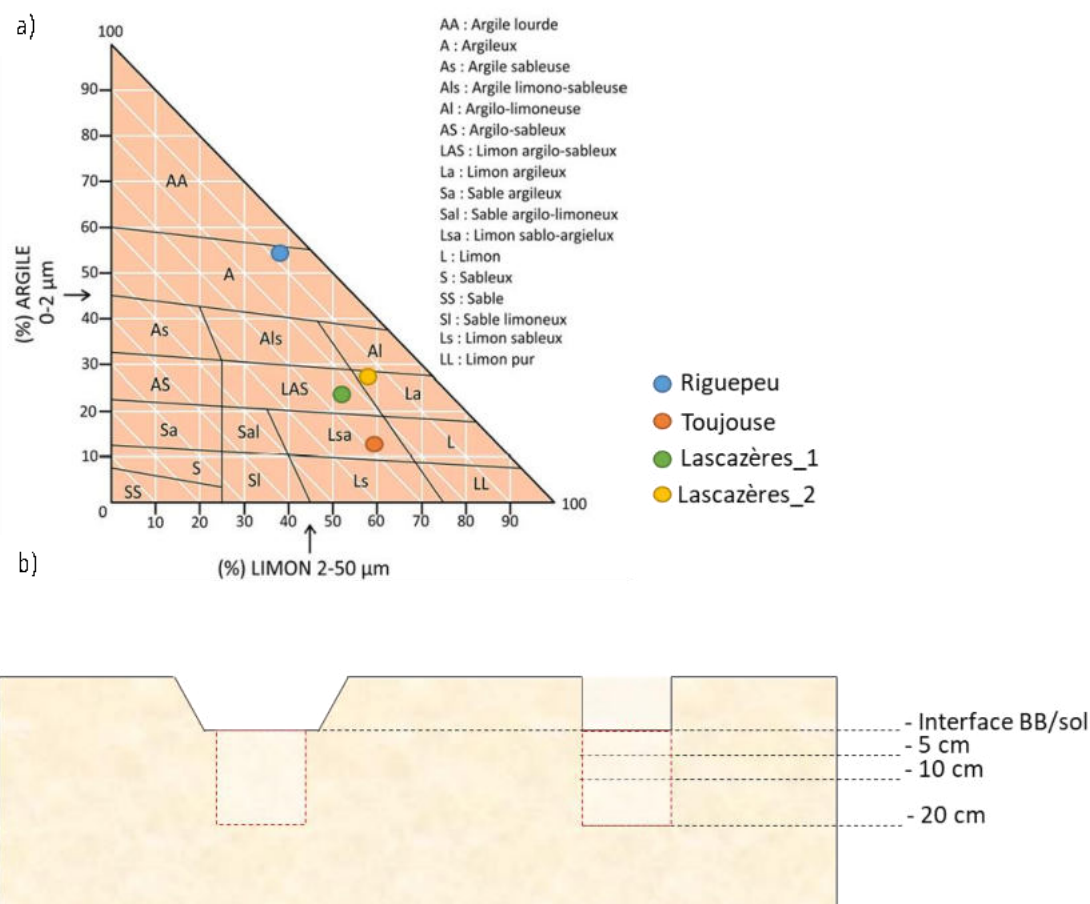


Figure 2. a) Composition granulométrique des échantillons pris dans les différents sites expérimentaux représentés sur un triangle de textures GEPPA 17 classes, utilisé comme référence dans ce document; b) schéma d'un profil vertical de sol représentant la tranchée à gauche et la section de sol échantillonnée à droite de l'image : échantillonnage réalisé à différentes profondeurs de l'interface sol/BB : 5 cm, 10 cm et 20 cm.

Pour faciliter la lecture, la composition granulométrique des sols est recensée dans le Tableau 2. Selon l'analyse granulométrique réalisée sur les quatre sites, on retrouve des sols avec une texture dominante de type limoneuse pour les sites de #Lascazères_1, #Lascazères_2 et #Toujouse et de type argileuse pour le site de #Riguepeu (Figure 2.a). Il s'agit, donc probablement, de sols peu perméables avec des conductivités hydrauliques faibles qui vont varier généralement entre 10^{-7} et 10^{-10} m/s. Ceci confirme la pertinence du choix des sites pour l'étude approfondie étant donné l'intérêt d'évaluer l'impact de la présence du broyat de bois dans des sols à faible perméabilité.

Tableau 2. Composition granulométrique moyenne et texture du sol des quatre sites étudiés.

	#Riguepeu	#Toujouse	#Lascazères_1	#Lascazères_2
Clay	56%	13%	23%	28%
Silt	38%	59%	52%	57%
Sand	6%	29%	25%	15%
GEPPA17	Argileux (A)	Limon sablo-argileux (Las)	Limon argilo-sableux (LAS)	Limon argileux (La)

2.2.2. Étude pédologique

Une étude pédologique s'est avérée nécessaire pour avoir une description complète de la nature du sol en place sur chacun des sites étudiés. L'expertise a été menée par un expert pédologue à l'aide des sondages tarière et du Référentiel Régional Pédologique de Midi-Pyrénées (Party et al. 2014, Party et al. 2015).

#Toujouse

Type de sol : Le sol est un LUVISOL épais, faiblement rédoxique, sablo-limoneux, de Sables Fauves, c'est-à-dire un sol lessivé sableux, présentant un engorgement temporaire peu marqué.

Comportement hydrodynamique : une structure peu marquée de type particulière à continue (homogène), une porosité fine mais développée (lié à la structure sableuse), créent une perméabilité imparfaite dans laquelle les flux hydriques sont assez lents ; l'ensemble fonctionne donc plus en imbibition qu'en transferts hydriques francs (transfert par capillarité au lieu d'un transfert hydrique par les fissures). Une très légère accumulation d'argile en profondeur contraint un peu plus l'infiltration vers la profondeur en créant une rupture de perméabilité assez nette. Ces sols seaturent assez facilement en hiver et au printemps. La stabilité structurale et la capacité de rétention en eau dépendent en grande partie des teneurs en matières organiques dans les horizons (quantité et qualité).

#Riguepeu

Type de sol : Le sol est un Calcosol épais, colluvial, argilo-limono-sableux, c'est-à-dire un sol calcaire épais et plutôt argileux.

Le comportement hydrodynamique : il est différent du sol précédent ; la structure est ici plus affirmée et polyédrique plus ou moins fine, et le cheminement de l'eau peut s'opérer au travers des fissures et des vides inter-agrégats. On constate la présence de fissures qui traversent l'horizon de surface et qui témoignent de la présence d'argiles à comportement gonflant. Les flux hydriques sont donc plus rapides que précédemment, sauf en hiver où la fermeture des fissures peut occasionner une saturation rapide en cas de forts abats d'eau. Ici, on se situe en tête de talweg, donc dans un contexte de départ et d'accumulation d'eau, en situation colluviale mais pas encore alluviale.

#Lascazères

Type de sol : Le sol est un Neoluvisol moyennement épais limono-sablo-argileux, faiblement rédoxique, de glacié de molasse, c'est-à-dire un sol faiblement lessivé et peu hydromorphe, des liaisons entre coteaux et terrasses des rivières.

Comportement hydrodynamique : Ce type de sol fonctionne de manière intermédiaire entre les deux autres : structure fine assez affirmée mais porosité moyenne, accumulation d'argile en profondeur du fait d'un début de lessivage ; les flux hydriques sont donc meilleurs que dans le Luvisol mais moins rapides que dans le Calcosol. En revanche, il n'y a pas à peu de mouvements liés aux argiles. Les horizons présentent un engorgement temporaire peu marqué, plutôt en profondeur. En situation pentue, des circulations latérales de sub-surface peuvent se créer et générer des résurgences à l'aval topographique, surtout si Btg¹ est peu profond.

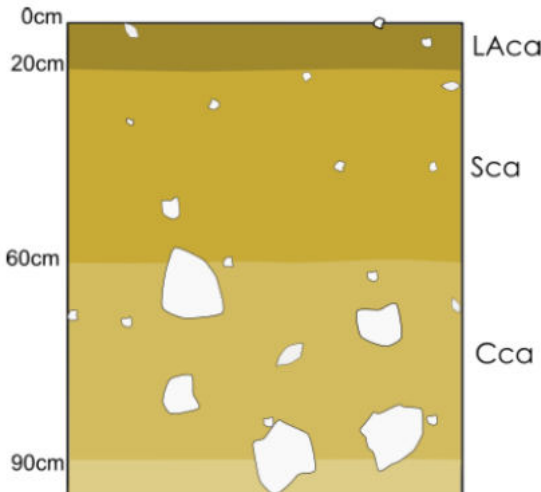
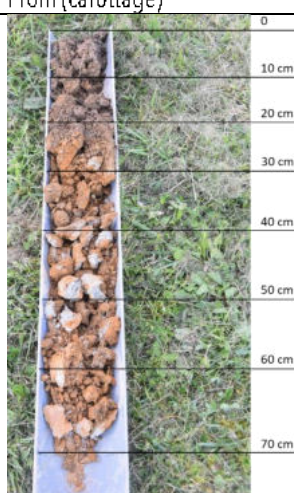
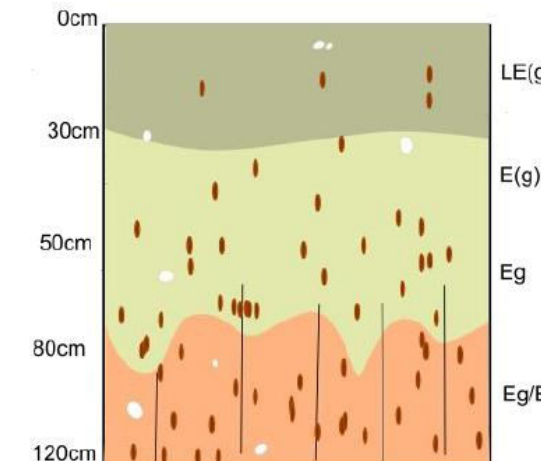
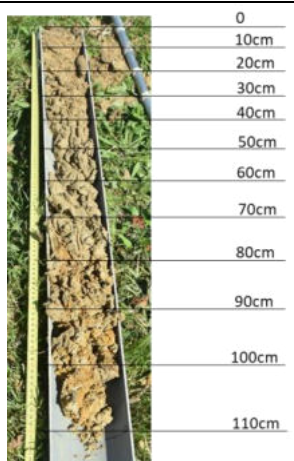
Une synthèse des profils pédologiques utilisant des fiches STIPA est disponible aussi dans le Tableau 3. On s'aperçoit des quelques différences sur les textures déterminées entre l'étude pédologique et l'analyse granulométrique notamment pour le site de #Toujouse². La nature complètement empirique de ce type d'expertise amène des fois à des erreurs de perception

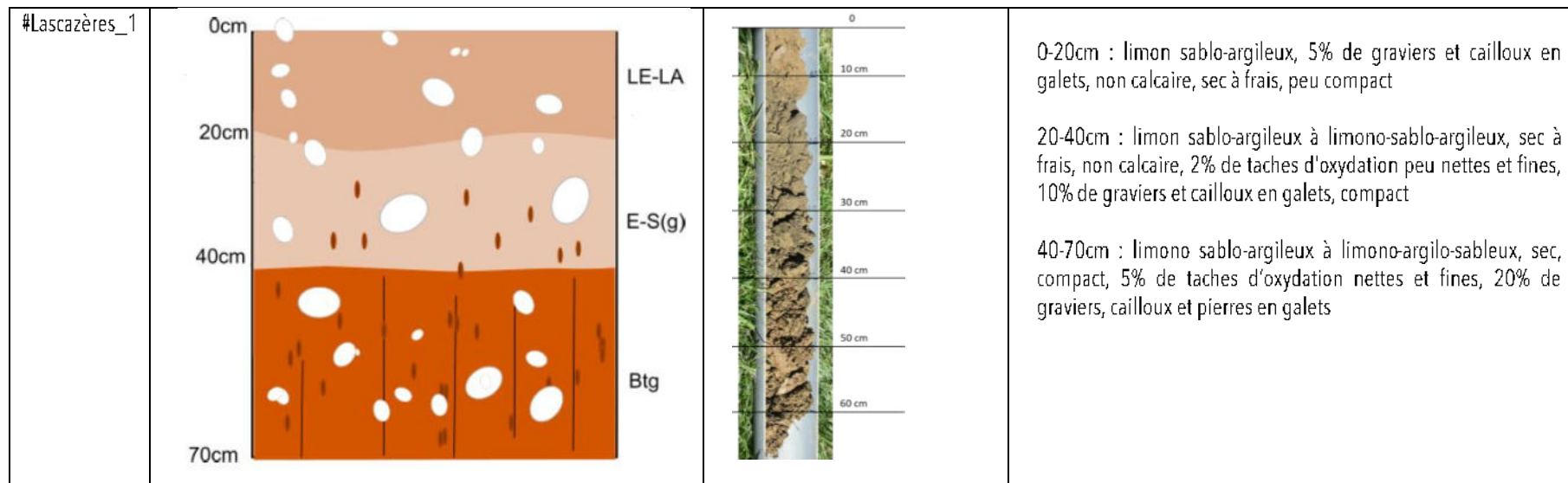
¹ Voir définitions des horizons à la fin du Tableau 3

² À noter que l'analyse physico-chimique est réalisée que sur un échantillon pris entre 25 et 50 cm de profondeur. L'analyse pédologique inclut tout le profil dès la surface du sol jusqu'à une profondeur entre 70 et 120 cm. Pour le cas spécifique de #Toujouse l'étude pédologique considère uniquement une proportion plus importante de sable entre l'horizon 25 / 50 cm que celle déterminée au laboratoire mais la description des caractéristiques du sol reste juste.

ou de précision de la part de l'expert toutefois normales. Face à une étude analytique de la granulométrie, les résultats qui prévalent sont ceux donnés par la distribution granulométrique (cas de #Toujouse).

Tableau 3. Caractéristiques pédologiques des différents sols.

#Site	Horizons	Profil (carottage)	Description
#Riguepeu	 0cm 20cm 60cm 90cm LAcA Sca Cca	 0 10 cm 20 cm 30 cm 40 cm 50 cm 60 cm 70 cm	0-20cm : argile limono-sableuse, calcaire, 10% de graviers et cailloux calcaires, peu compact, avec fentes de retrait, sain, frais 20-60cm : argile limono-sableuse, calcaire, 10% de graviers et cailloux calcaires, compact, sain, frais 60-90cm : argile limono-sableuse à argileux, calcaire, 20% de cailloux et pierres calcaires, compact, sain, frais Présence d'hydromorphisme fossile (taches grises bleuâtres)
#Toujouse	 0cm 30cm 50cm 80cm 120cm LE(g) E(g) Eg Eg/Btg	 0 10cm 20cm 30cm 40cm 50cm 60cm 70cm 80cm 90cm 100cm 110cm	0-25cm : sable limoneux à sableux, non calcaire, comportant quelques fines taches d'oxydation peu nettes, frais, meubles, rares Eg 25-50cm : sable limoneux, non calcaire, 5% de taches d'oxydation nettes, fines, contrastées, frais, peu compact, rares EG 50-80cm : sable limoneux, non calcaire, 15% de taches d'oxydation nettes et contrastées, rares EG, humide, peu compact, limite inférieure ondulée 80-120cm : sable limoneux à limon sableux, 15% de taches d'oxydation nettes, fines et contrastées, humide à saturé, compact, rares EG



LA, LE etc : ils désignent les horizons de surface ; le préfixe « L » signifie « labour » l'horizon est soumis aux itinéraires culturaux et aux engins agricoles. A se rattache aux horizons organo-minéraux, E également mais dans un contexte de lessivage et d'appauvrissement en fer, argile.

S, E, FEM, Bt, Btg, Jpca, C : horizons « médians », non soumis aux itinéraires culturaux sauf sous-solages profonds et drainage. Certains de ces horizons présentent de très fortes contraintes pour les transferts d'eau, l'enracinement etc. Il s'agit notamment des horizons Bt et Btg d'accumulation d'argile dans les sols lessivés et des horizons FEM qui sont les horizons indurés de grepp, gripp etc. communément dénommés ainsi par les agriculteurs.

g, Go, Gr : horizons à engorgement temporaire ou permanent, lorsque cet engorgement justifie que le nom de l'horizon lui soit complètement dédié. Ainsi, Btg est un horizon Bt qui manifeste davantage d'hydromorphie.

M, R, D : horizons de matériau parental ou « roche-mère » : alluvions, roches calcaires, colluvions etc.

Suffixe « g » : signifie un horizon dans lequel un engorgement temporaire apparaît.

Suffixe « ca » : signifie un horizon calcaire ; qui fait effervescence à HCl et qui présente donc du carbonate de calcium.

Suffixe « ci » : signifie un horizon calcique ; qui ne fait pas effervescence à HCl mais qui présente de très fortes teneurs en calcium.

Suffixe « h » : signifie que l'horizon présente une teneur en matières organiques plus élevée que la normale des sols du secteur.

(Baize and Girard 2009)

2.3. Tomographie de résistivité électrique

La caractérisation des sols est complétée par des mesures géophysiques de résistivité électrique des sites afin d'identifier la structure et la lithologie du sous-sol, les hétérogénéités ainsi que les gradients de teneur en eau en apportant une information verticale sur la distribution de la résistivité. Cette méthode géophysique est appelée tomographie de résistivité électrique (TRE). 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 dépend donc en outre de la nature du sol et de sa teneur en eau. Le principe de mesure est largement décrit dans la littérature (Dahlin 2001, Audebert 2015) et sur le rapport intermédiaire du « Programme MATCARB : Protocole Expérimental In Situ » fourni en 2021 et ne sera donc pas rediscuté ici.

Des mesures de TRE ont été réalisées dans le sol et dans les tranchées de tous les sites dessinant des profils verticaux perpendiculaires aux tranchées. La Figure 3 montre, par exemple, la TRE du site de #Toujouse qui présente une structure tabulaire non remanié. On différencie deux couches de sol sur une profondeur de 1.20 m. Une première couche superficielle d'à peu près 40 cm d'épaisseur montre des résistances marquées et assez fortes entre 240 et 1200 ohm.m (couleurs vertes et rouges). En dessous, une couche épaisse (>1 m), homogène et très humide avec des valeurs de résistivité faibles (entre 50 et 100 ohm.m). Les zones blanches sous les tranchées indiquent uniquement des anomalies de sensibilité de la méthode dues à la forte teneur en eau du sol sous la tranchée mais on peut s'attendre à une continuité de la deuxième couche à ces points.

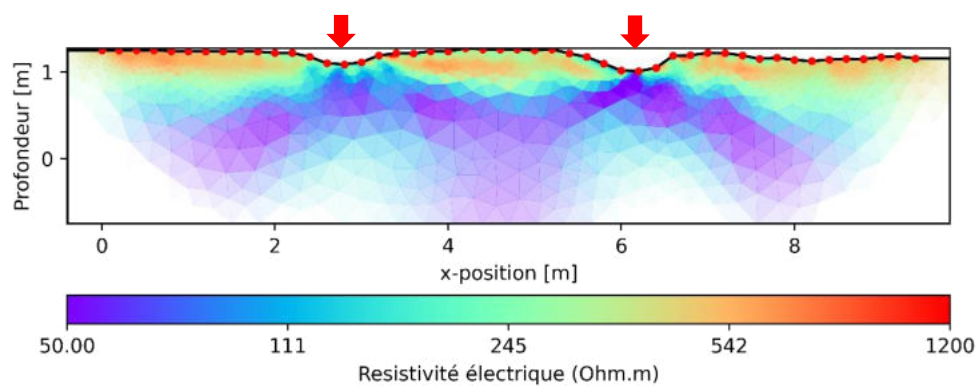


Figure 3. Tomographie de résistivité électrique du site de #Toujouse. Position des tranchées indiquées avec les flèches rouges.

La TRE de la Figure 4 montre la cartographie du sol du site de #Riguepeu. On observe un sol homogène, non remanié, avec des valeurs de résistivité très faibles typiques des sols argileux (< 50 ohm.m). Cette seule couche argileuse descend à plus d'1.5 m de profondeur par rapport à la surface du sol.

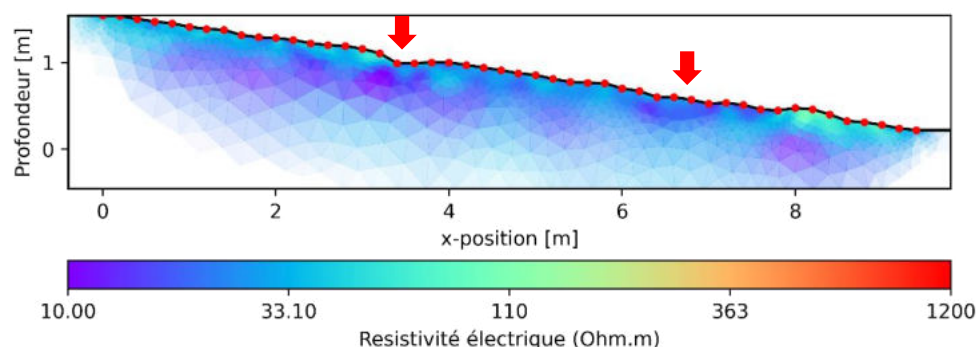


Figure 4. Tomographies de résistivité électrique du site de #Riguepeu. Position des tranchées indiquées avec les flèches rouges.

Le site de #Lascazères_1 montre la présence de 2 couches sur la Figure 5. Une couche de surface représentant un sol remanié

(terre végétale, technosol) entre 10 et 40 cm, suivie d'une couche hétérogène avec des résistivités fortes (200-1200 ohm.m) possiblement créée par la présence d'éléments grossiers de type galettes. On apprécie, comme pour les Figures 3 et 4, une réduction de la résistivité autour de la tranchée liée à la plus grande humidité du sol qui reçoit les eaux usées.

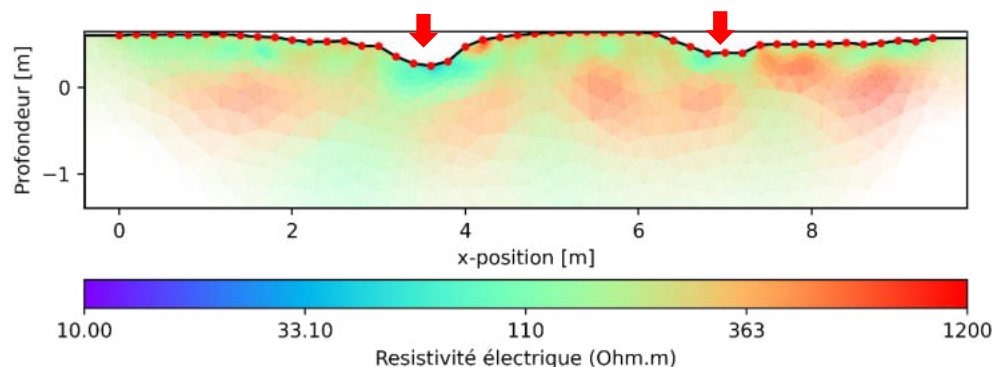


Figure 5. Tomographies de résistivité électrique du site de #Lascazères_1. Position des tranchées indiquées avec les flèches rouges.

Dans le cas de #Lascazères_2, la TRE de la Figure 6 ne montre pas de première couche surfacique remaniée, mais toute l'épaisseur du sol montre une couche homogène avec des valeurs de résistivité les plus fortes comparées aux autres sites. Ces valeurs sont liées à la présence d'éléments grossiers tel qu'observés pour le site de #Lascazères_1. Il s'agit donc d'un sol homogène et non remanié.

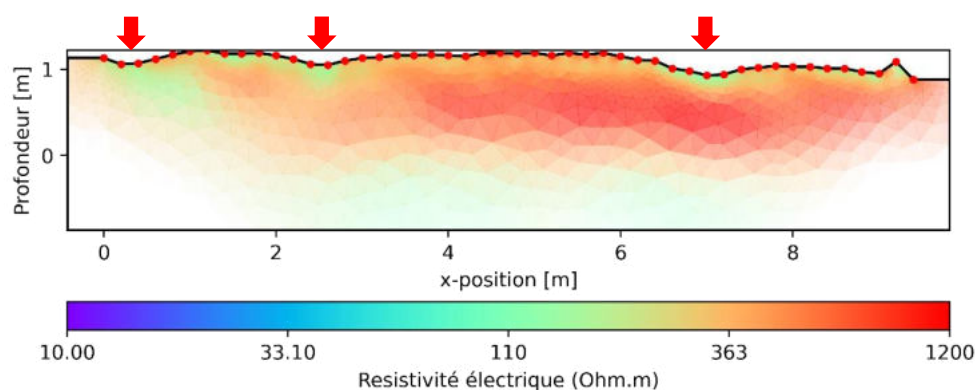


Figure 6. Tomographies de résistivité électrique du site de #Lascazères_2. Position des tranchées indiquées avec les flèches rouges.

En définitive, les images TRE montrent des sites avec des structures de sol très variées : structure tabulaire, structure homogène très conductrice, structure hétérogène peu conductrice et structure homogène peu conductrice. Avoir une telle variabilité dans l'échantillon des sites choisis est intéressante pour l'étude du comportement hydraulique des filtres à broyat de bois. Les sols des sites choisis sont principalement des sols non remaniés.

2.4. Comportement hydraulique

2.4.1. Essais d'infiltration et conductivité hydraulique à saturation

Des essais d'infiltration selon la méthode Beerkan (Braud et al. 2005) ont été réalisés sur chaque site aussi bien dans la tranchée que dans le sol en place à côté de la tranchée. L'essai d'infiltration consiste à mesurer le volume d'eau infiltré en fonction du temps au travers d'une surface de sol délimitée par un anneau d'infiltration. Les essais d'infiltration ont été

réalisés dans la tranchée à l'interface sol-BB à deux positions différentes. La première mesure est située proche de l'alimentation (~60cm) et la seconde loin du point d'alimentation (~1.6m). Les mesures ont également été réalisées dans le sol de référence à une profondeur équivalente à celle de l'interface sol-BB et à une distance d'un mètre de la tranchée (Figure 7). Ces essais d'infiltration ont pour but de mesurer la capacité d'infiltration du sol, pour en déterminer sa conductivité hydraulique à saturation. Au final les valeurs obtenues pour le sol sous la tranchée et pour le sol en place seront comparées.

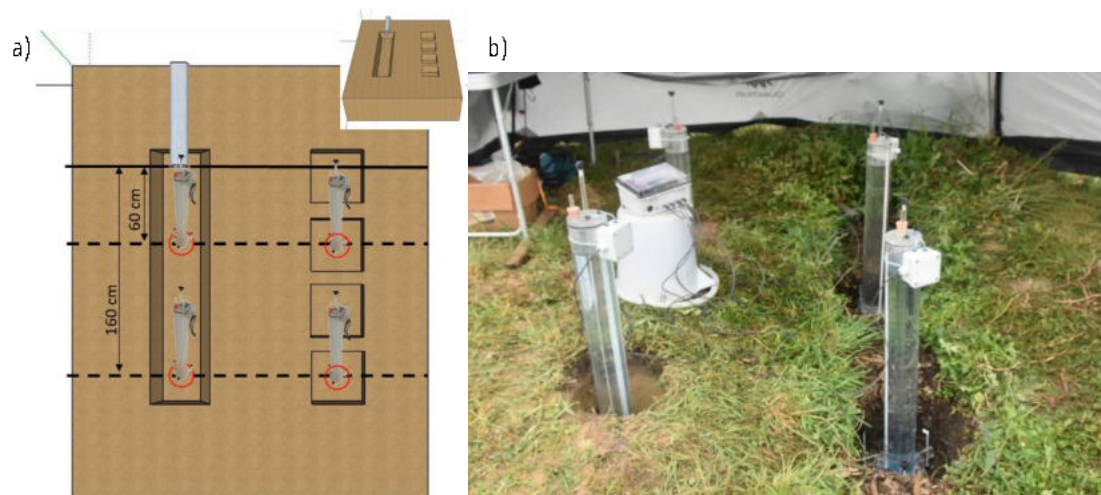


Figure 7. Schéma de principe et photographie d'un test d'infiltration réalisé dans la tranchée et dans le sol de référence.

La Figure 8 présente la variation de hauteur de la colonne d'eau de l'infiltromètre au cours du temps pour chaque site. Ces données ont été acquises grâce à un enregistrement automatique (Concialdi et al. 2020). Cette représentation du jeu des données montre que plus la pente de la droite est importante plus la vitesse d'infiltration, et indirectement la conductivité hydraulique à saturation, l'est aussi. Les données en rouge montrent la diminution de la hauteur d'eau dans la colonne dans le sol de référence, tandis que les données représentées en bleu ont été réalisées à l'interface BB-sol dans la tranchée. On s'aperçoit que la variation de la hauteur de la colonne d'eau avec le temps est moins rapide pour les tests réalisés dans le sol de référence que pour ceux réalisés dans le fond de la tranchée. Autrement dit, la vitesse d'infiltration dans la tranchée est égale ou plus rapide que dans le sol de référence pour tous les cas spécifiques étudiés.

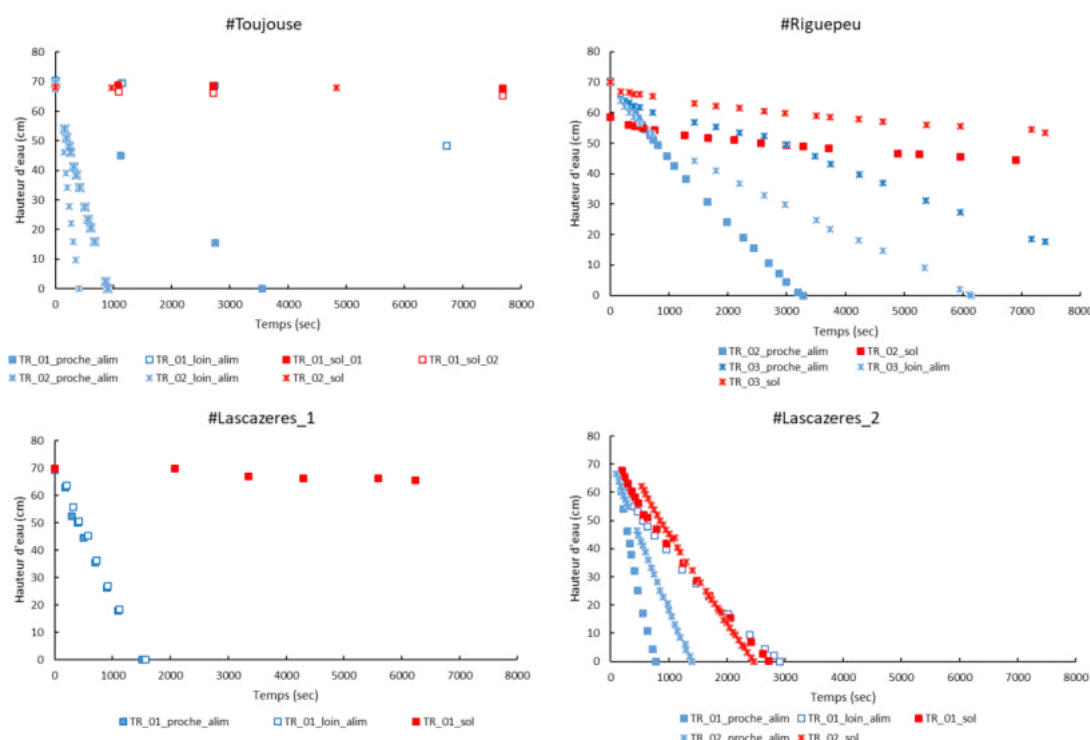


Figure 8. Évolution de la hauteur d'une colonne d'eau avec le temps, pour les tests d'infiltration réalisés dans le sol (rouge) et dans la tranchée (bleu) des différents sites étudiés.

Les essais d'infiltration ont ensuite été traités en utilisant la méthode BEST (de l'anglais *Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters*) pour estimer la conductivité hydraulique à saturation (K_s) caractéristique de chaque point d'essai (Lassabatère et al. 2006, Angulo-Jaramillo et al. 2019). Ce paramètre indique la valeur maximale à laquelle l'eau pourrait s'infiltrer par gravité en conditions de saturation et sans condition limitante. Un récapitulatif des données utilisées pour l'estimation de K_s et de la position relative du point d'essai sont montrées dans le Tableau 4. La perte des données est due à certaines défaillances du système d'acquisition des données et/ou à des problèmes de traitement de la donnée. Néanmoins, le nombre de cas problématique est restreint.

Tableau 4. Données utilisées pour l'estimation de la conductivité hydraulique à saturation des différents sites dans le sol et dans la tranchée.

	#Toujouse	#Riguepeu	#Lascazerès_1	#Lascazerès_2	Total
Nombre des points réalisés	7	6	7	6	26
Nombre des points dans la tranchée	4	4	4	4	16
Nombre des points proches de l'alimentation	2	2	2	2	8
Distance depuis le point d'alimentation (cm)	60	60	60	60	-
Nombre des points loin de l'alimentation	2	2	2	2	8
Distance depuis le point d'alimentation (cm)	160	160	160	160, 135	-
Nombre des points dans le sol	3	2	3	2	10
Distance depuis la tranchée (cm)	100-120	100	100	100	-
Nombre des points exploitables (K_s): total	5	4	7	5	21
Nombre des points exploitables (K_s): tranchée	3	3	4	3	13
Nombre des points exploitables (K_s): sol	2	1	3	2	8

Les valeurs moyennes de conductivité hydraulique à saturation dans le sol et dans la tranchée sont recueillies pour chaque site dans le Tableau 5. On remarque une augmentation de la conductivité hydraulique à saturation du sol sous la tranchée par rapport au sol de référence pour tous les sites à l'exception de #Lascazères_2. Pour ce dernier, les valeurs estimées de K_s montrent une valeur plus faible dans la tranchée que dans le sol même si elles restent du même ordre de grandeur. Ceci est en accord avec les résultats montrés dans les graphiques de la Figure 8. Pour le site de #Lascazères_2, il se peut que le manque d'alternance et la faible quantité de BB retrouvée dans les tranchées soit les causes de ce manque d'évolution positive. Il serait intéressant d'observer si un colmatage des tranchées se produit dans les années à venir.

Tableau 5. Synthèse des valeurs de conductivité hydraulique à saturation estimées pour les différents sites, en fonction du sol de référence ou des tranchées

Ks (mm/j)	#Toujouse			#Riguepeu			#Lascazères_1			#Lascazères_2		
	Moyenne	ET	N	Moyenne	ET	N	Moyenne	ET	N	Moyenne	ET	N
Tranchée	8579	4052	3	1386	688	3	5634	1421	3	1594	1306	3
Sol	62	-	2	247	-	1	1040	766	3	3811	-	2

ET : Écart Type; N : nombre des données considérées

En définitive, le comportement hydraulique observé grâce aux essais d'infiltration permettrait d'affirmer que **l'usage du BB a un effet positif localisé de maintien voire d'amélioration de la capacité d'infiltration des eaux usées dans le sol**. Alors que la pertinence de l'usage du BB dans les tranchées d'infiltration a été mise en évidence, les mécanismes en jeu au sein de la tranchée sont méconnus. Vis-à-vis du dimensionnement et de la compréhension du fonctionnement de la filière, il est important de déterminer comment cette évolution de la capacité d'infiltration du sol sous la tranchée se produit et de répondre aussi au questionnement scientifique soulevé. A ce stade, l'hypothèse qui expliquerait ce comportement hydraulique reposerait sur la présence du support organique (le BB) et des conditions d'humidité favorables à une augmentation des communautés lombriciennes bioturbatrices autour de la tranchée. L'enrichissement local de l'écosystème autour de la tranchée serait donc responsable de la création d'une macroporosité favorable aux écoulements. Cette hypothèse pourra être vérifiée au moyen des fosses pédologiques et de l'analyse d'autres paramètres susceptibles de modifier la qualité du sol et/ou d'affecter la capacité d'infiltration.

2.4.2. Fosses pédologiques

Un suivi des chemins de l'eau sous la tranchée a été possible en combinant des essais d'infiltration utilisant un traceur coloré avec la réalisation d'une fosse pédologique sous le point d'infiltration. Les tests d'infiltration utilisant le traceur bleu de méthylène ont été réalisés dans la tranchée :

1. sur deux essais d'infiltration proches de l'alimentation
2. sur deux essais d'infiltration éloignés de l'alimentation

Les observations réalisées sur chacun des sites sont décrites ci-après :

#Toujouse

La Figure 9 montre les images obtenues de la fosse pédologique du site de #Toujouse. Le sol présente un aspect humide comme résultat d'un contact permanent avec l'eau arrivant sur la tranchée. On s'aperçoit aussi de la présence d'une trace de bleu de méthylène qui traverse le sol vers des couches plus profondes (Figure 9.a). Cette trace met en évidence la présence d'une galerie typiquement creusée par les vers de terre et qui serait responsable de l'apparition d'un passage préférentiel de l'eau. Sur la Figure 9.b) on peut apprécier également les traces de bleu de méthylène sur un réseau de galeries. On notera aussi l'absence d'un bulbe d'infiltration sous l'interface sol/BB, (un bulbe d'infiltration est une sphère plus ou moins ovale qui se forme dans les milieux poreux homogènes sous l'infiltromètre). En effet, un transport latéral du traceur est aussi observé sur la gauche de la Figure 9.c). Ce transport semble avoir lieu grâce à la macroporosité créée par la présence d'un broyat de bois relativement dégradé à des niveaux plus profonds à l'interface, comme un résultat des phénomènes de bioturbation. On va donc différencier deux types d'écoulement sous la tranchée pour le site de #Toujouse, un écoulement lent par imbibition et un écoulement rapide à travers les galeries des lombrics.

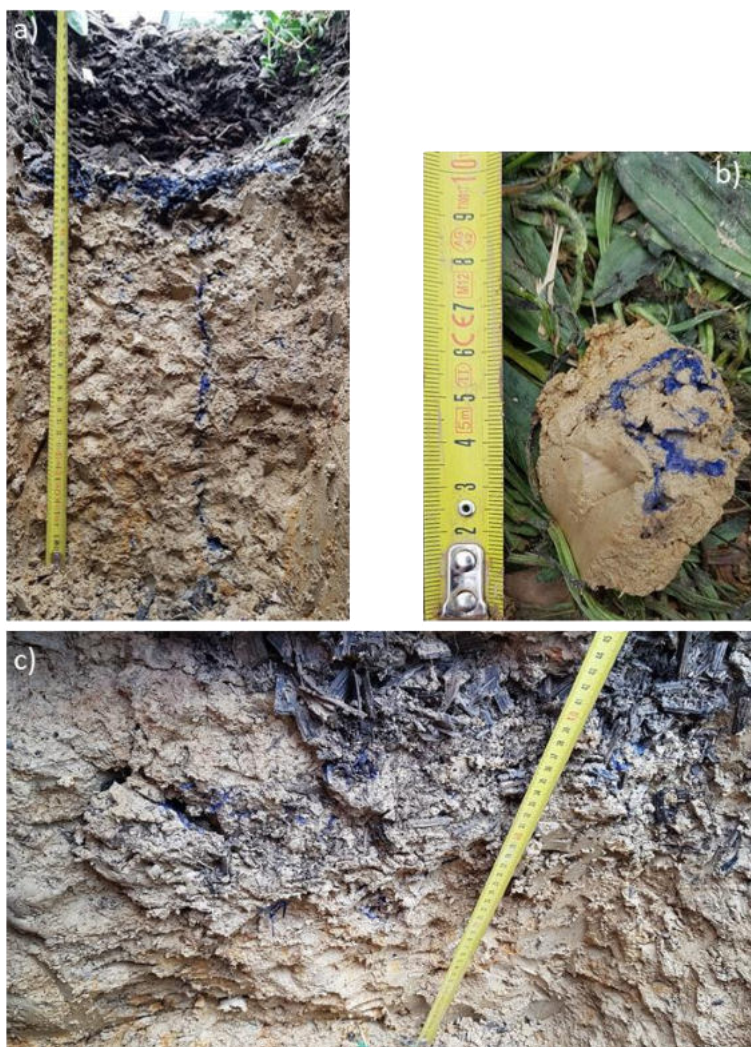


Figure 9. Photographies de la fosse pédologique du site de #Toujouse.

Riguepeu

Le site de #Riguepeu ne présente pas de bulbe d'infiltration mais des taches bleues foncées apparaissent distribuées sans continuité apparente dans les parois de la fosse (Figure 10.a). En effet, du fait de la nature très argileuse du sol, l'eau ne coule pas forcément à travers la microporosité mais plutôt à travers les fissures générées pendant les processus de gonflement-rétrécissement typiques des argiles. Dans la Figure 10.b, on peut apprécier également une densité importante des fines racines et des vers de terre, éléments qui confortent ces hypothèses.

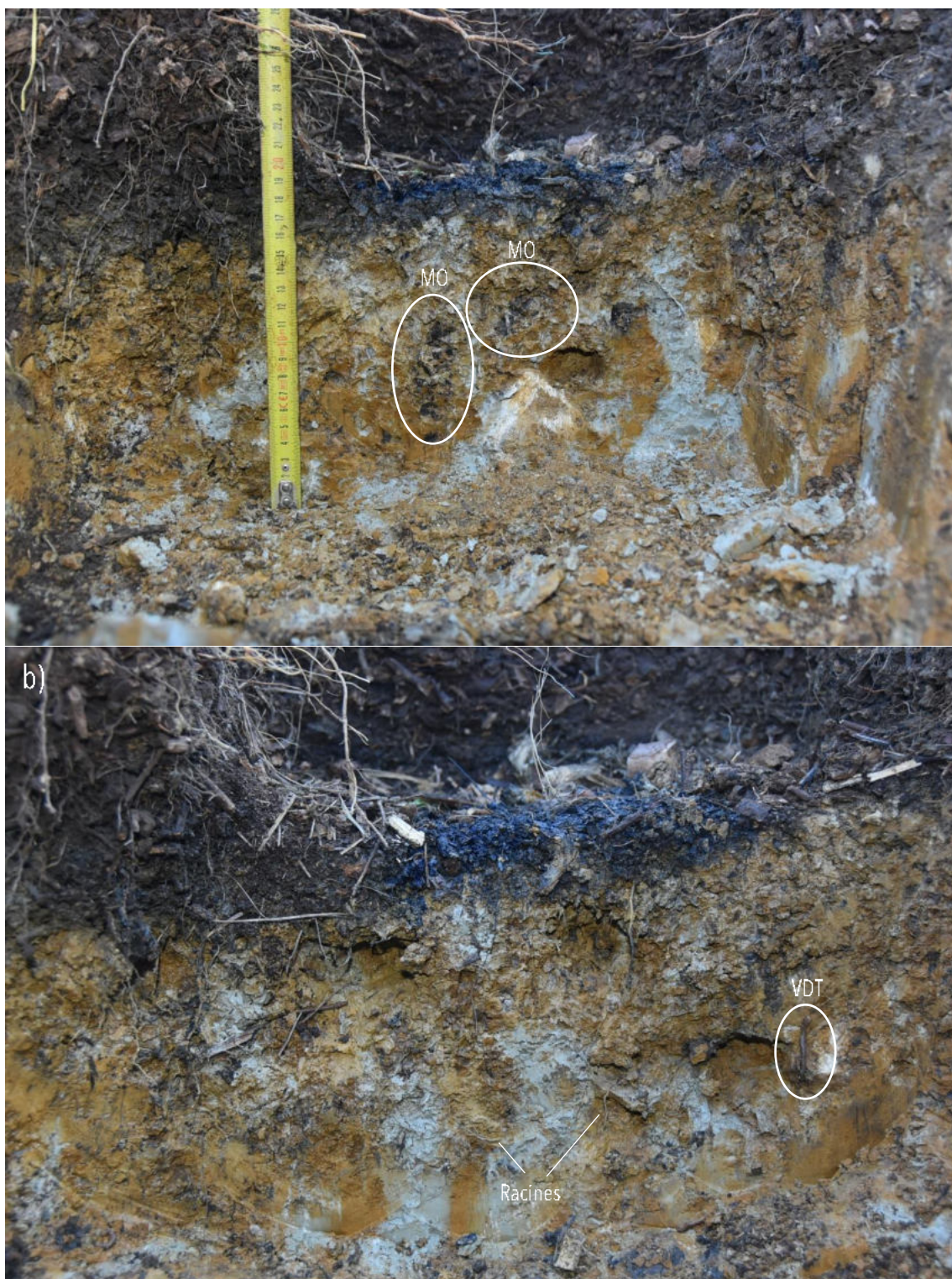


Figure 10. Photographies de la fosse pédologique du site de #Riguepeu.

Lascazères_1 et # Lascazères_2

Les deux sites ont montré une distribution similaire de l'eau sous la tranchée avec la formation d'un bulbe d'infiltration. On retrouve également une présence importante de racines et de galeries creusées par les lombrics, deux éléments producteurs de chemins préférentiels. Comme évidence de ce dernier et de son impact dans le sol, on trouve une galerie de vers de terre sur la Figure 12.a) et un individu coloré par le bleu méthylène sur la Figure 12.b). La présence de vers de terre est justifiée

Marché de Quasi Régie n°2201198180

Compte-rendu 2020 d'avancement des actions et état des livrables

car ils sont attirés par l'eau, les champignons et les résidus de dégradation de broyat de bois. En ce qui concerne les racines, il est probable que l'humidité plus au moins constante autour des tranchées amène les plantes à développer leurs racines sous la tranchée, raison pour laquelle on les retrouve au fond du fossé. L'accompagnement des FBB par une végétation autour des tranchées serait un élément à évaluer lors de la mise en place d'un dispositif expérimental à pleine échelle.



Figure 11. Photographies de la fosse pédologique du site de #Lascazères_1.



Figure 12. Photographies de la fosse pédologique du site de #Lascazères_2.

La présence des cailloux et d'autres particules grossières serait aussi un élément facilitateur de l'écoulement de l'eau ce qui est observable dans les valeurs de K_s du sol de ces sites par rapport aux valeurs beaucoup moins importantes des autres

(#Toujouse et #Riguepeu). En effet, l'eau coulerait plus facilement dans la macroporosité créée par les parois des galets. Il est également possible de faire le lien avec les images TRE qui reflètent des résistances importantes dans le sous-sol (Figure 5 et Figure 6).

En définitive, les fosses pédologiques combinées aux traçages ont mis en évidence la **présence des chemins préférentiels créés par la macrofaune et les plantes dont leur action mécanique serait responsable du maintien ou de l'amélioration de l'infiltration de l'eau dans le sol**. De même, on constate la présence de matière organique sous la tranchée pouvant provenir de la dégradation et du transport du BB vers le sol. Il est donc probable que la combinaison de l'apport d'eau et du broyat de bois amène à l'enrichissement de l'écosystème autour de la tranchée (lombrics, végétaux) ayant un effet positif sur la capacité d'infiltration du sol.

2.5. Analyses chimiques

Les analyses chimiques réalisées ont pour but de comparer les variations des propriétés du sol qui rendent compte de sa qualité vis-à-vis de sa fonction comme support d'infiltration. De même, les analyses permettront de donner un regard sur les paramètres affectant la santé du sol de manière à évaluer leur impact sur l'écosystème et le vivant.

2.5.1. Carbone organique total

La matière organique (MO) du sol peut être évaluée en termes de carbone organique total (COT) qui est son constituant principal suivi de l'azote organique, le phosphore et le sulfure (FAO et al. 2020). Le carbone organique du sol peut se trouver sous forme de macromolécules comme les polysaccharides, les phénols ou les acides aminés. Il joue un rôle majeur sur les propriétés chimiques (pH, adsorption), physiques (rétention d'eau, stabilité de la structure) et biologiques (substrats et nutriments) du sol (Baize 2018). Par exemple, la présence de matière organique dans le sol permet la formation d'agrégats qui stabilisent la structure du sol, augmente sa porosité et sa capacité de rétention d'eau (Krull et al. 2004). Par ailleurs, il a été rapporté que les sols avec des valeurs de COT < 20 g/kg sont en fort risque d'instabilité structurale (Chartin et al. 2015, Shi et al. 2020). D'un autre côté, une plus grande concentration de carbone organique dans le sol est de manière générale associée avec une plus grande concentration de la biomasse microbienne ainsi qu'une plus grande biodiversité à l'échelle globale (FAO et al. 2020). Ceci n'expliquerait pas à lui seul une augmentation de la biodiversité de la faune tel que les vers de terre à cette même échelle mais c'est un facteur à considérer localement (Hendrix et al. 1992) car il y a souvent une corrélation positive entre la teneur en carbone organique d'un sol et sa biodiversité (FAO et al. 2020). Le retour au sol de carbone organique est donc généralement vu comme un élément important pour sa protection (Orgiazzi et al. 2016). Il paraît donc important, d'un point de vue hydraulique et mécanistique, de connaître l'effet d'une tranchée d'infiltration sur la distribution de COT dans le sol.

La Figure 13 montre la teneur en carbone organique total des échantillons de sol pris dans la tranchée (points bleus) à différentes distances du point d'alimentation (soit 60 cm, trait continu ; soit 160 cm trait en pointillé) et dans le sol (points rouges) à différentes profondeurs. Pour le sol de référence (en rouge), on observe des valeurs relativement faibles en COT ainsi qu'une faible variabilité avec la profondeur. Au contraire, on remarque une augmentation importante de la teneur en COT des échantillons pris dans la tranchée avec des variations d'entre +60% et +1400% pour les premiers 5 cm. Cet effet se réduit rapidement avec la profondeur du sol, notamment pour les sites plus jeunes (#Lascazères_1 et #Toujouse), ce qui met en évidence l'importance du temps sur les processus de transfert de matière organique vers les couches plus profondes. D'autre côté, les sites de #Toujouse #Lascazères_1 et #Lascazères_2 présentent une plus grande accumulation de matière organique pour les points dans la tranchée, proches de l'alimentation. Le contraire se produit pour le site de #Riguepeu probablement comme résultat de la forte l'inclination du terrain (voir topographie du terrain sur la Figure 4) qui amène l'eau rapidement le long de la tranchée vers des points plus éloignés du point d'alimentation. On peut voir également comment deux sols relativement pauvres en MO (< 10 g COT/kg (C.Mariage 2019)), ceux de #Toujouse et #Riguepeu, s'enrichissent en matière organique atteignant des valeurs au-dessus de 10 g/kg dans les couches plus superficielles.

Trois sources principales sont susceptibles d'augmenter la teneur en carbone organique dans le sol sous la tranchée : l'eau usée infiltrée porteuse de MO, la microbiologie plus intensément développée dans le sol sous la tranchée et le BB qui une

fois dégradé est transporté par la faune vers des couches plus profondes. On remarquera dans la Figure 13 que le sol montre la variation de COT la plus forte, #Lascazères_2, c'est aussi le site qui a eu le moins d'apport de BB pendant la vie du filtre (uniquement deux fois pendant 9 ans, voir Tableau 1) et là où le BB était aussi le plus dégradé. Cela pourrait indiquer que l'apport de matière organique au sol provient de manière plus significative de l'eau usée. Malgré ce fait, il n'est pas illogique de penser que le BB constitue lui aussi un apport non négligeable de MO au sol. En effet, par rapport au système conventionnel d'infiltration dans le sol avec ou sans lit filtrant minéral intermédiaire (gravier), l'apport du BB serait un élément clé aidant sur la structuration et la stabilisation du sol et donc sur le maintien de l'infiltration.

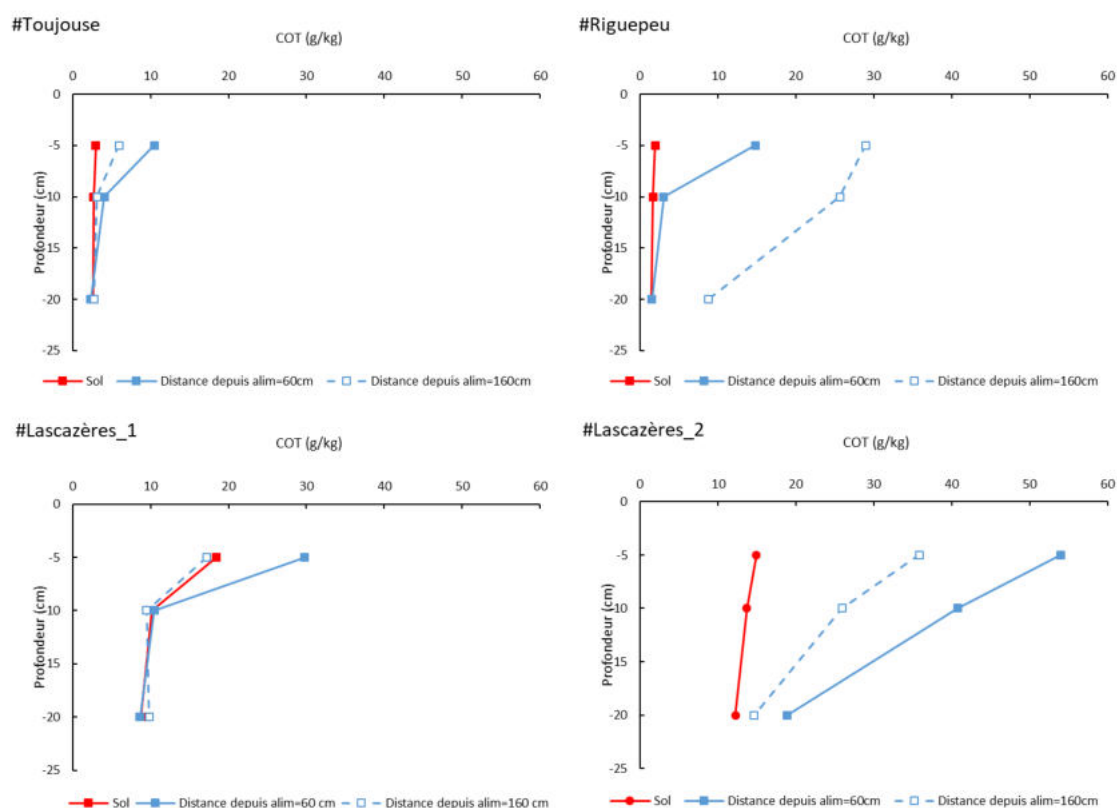


Figure 13. Profils de carbone organique total (g COT/kg sol) en fonction de la profondeur du sol, pour le sol de référence (rouge) et pour le sol sous la tranchée (bleu) mesurés à deux distances différentes par rapport aux point d'alimentation : 60cm et 160cm. Incertitudes minimale et maximale liées à la mesure : 0.62 et 1.62 g /kg (proportionnelles à la concentration mesurée).

En définitive, le sol sous la tranchée montre une augmentation de la concentration en COT en comparaison avec le sol en place. Cette augmentation est restreinte aux premiers 5 cm de sol pour les sites les plus jeunes. En revanche, l'épaisseur de la couche de sol impactée augmente avec l'âge du filtre. Les apports en MO proviendraient principalement de l'eau usée et du BB. Par contre, l'absence d'analyses sur la file eau et d'un historique ne permet pas de déterminer leurs contributions avec précision.

2.5.2. Azote total

La détermination de l'azote total est souvent associé à la détermination du carbone organique afin de caractériser la MO et la fertilité des sols avec la détermination du rapport C/N. L'azote total est l'ensemble de toutes les formes d'azote minéral (ammoniacal et nitrique) et organique présentes dans un échantillon de sol à exception de l'azote gazeux (Baize 2018). L'azote minéral est présent dans la solution du sol et il est constitué de l'azote ammoniacal (NH_4^+) et l'azote nitrique (NO_3^-). L'azote ammoniacal peut se trouver adsorbé de manière réversible ou irréversible sur les complexes adsorbants ou l'argile. Il n'est pas assimilable par les plantes mais les formes adsorbées réversiblement peuvent être transformées rapidement par les microorganismes sous forme d'azote nitrique lequel est facilement absorbable par les plantes. À noter que l'azote nitrique forme des sels solubles qui peuvent facilement lixivier vers des couches plus profondes du sol. L'azote organique, quant à lui et comme pour le carbone organique, c'est l'azote qui fait partie des macromolécules issues de la décomposition

des tissus végétaux et animaux ou de la biomasse microbienne. Ces macromolécules ne sont pas assimilables par les plantes sauf celles de petite taille comme l'urée. À noter que dans la plupart des sols l'azote organique représente 95% de l'azote total (Baize 2018).

Dans les sols agricoles l'usage du BB suscite encore de la controverse. En effet, la présence en grande quantité de la matière carbonée tel que le BB amène à une activation de la microbiologie (croissance de la biomasse bactérienne) afin de dégrader les molécules organiques. La microbiologie consomme de l'azote disponible dans le sol plus rapidement et plus efficacement que les plantes, ce qui pour les cultures peut entraîner un phénomène connu comme la faim d'azote. En contrepartie, la décomposition complexe du BB nécessite l'intervention des champignons et des bactéries qui elles attirent d'autres prédateurs comme les vers de terre. Les vers de terre produisent des déjections ainsi qu'un mucus, qui leurs permet de se déplacer, riches en azote. Donc, de manière générale, la présence du BB ferait appel au développement de la vie qui apporterait de l'azote au sol. De plus, l'activité catabolique des microorganismes produit aussi de l'azote inorganique qui est restitué à la solution du sol de sorte que cette carence en azote constituerait un phénomène temporaire. En définitive, la faim d'azote peut survenir quand l'azote apporté par tous ces mécanismes biologiques est insuffisant pour les plantes. Cependant, dans un sol non agricole filtrant des eaux usées qui contiennent des formes d'azote minéral, le risque de retrouver une carence en azote serait à priori moindre. Pour observer l'évolution de la qualité du sol vis-à-vis de l'azote deux paramètres ont été donc évalués : l'azote total et le rapport C/N.

La **Figure 14**. Figure 14 montre les profils d'évolution de la teneur en azote total avec la profondeur pour le sol de référence et le sol sous la tranchée des différents sites étudiés. On observe une augmentation relativement importante de la teneur en azote total dans le sol sous la tranchée par rapport au sol de référence pour les sites les plus âgés #Riguepeu et #Lascazères_2. Cette différence est moindre ou nulle pour les sites les plus jeunes : #Toujouse et #Lascazères_1. Cette corrélation entre l'âge et l'évolution de la teneur en azote total sous la tranchée met en évidence des processus lents qui pourraient nécessiter plusieurs années pour se mettre en place.

En ce qui concerne le rapport C/N, les résultats sont aussi présentés dans la Figure 14. Pour l'interprétation des données on peut utiliser quelques valeurs de référence : pour les sols de type forestier, des valeurs de C/N inférieurs à 25 indiquent que la concentration en composés azotés minéraux facilement assimilables par les arbres (majoritairement les nitrates) serait suffisamment importante pour permettre leur nutrition (Baize 2018). Pour les sols agricoles, la demande est plus importante et on considère que la minéralisation des composés azotés rencontre des difficultés à des rapports C/N > 12 (Baize 2018). Pour le site de #Toujouse on note une augmentation du rapport C/N pour les couches superficielles mais pas de variation ou réduction pour les couches plus profondes. Les valeurs du sol de référence sont assez équilibrées (selon la perspective d'utilisation comme sol agricole) ce qu'impliquerait une bonne décomposition de la MO. À #Riguepeu le sol de référence a des valeurs très faibles indiquant une décomposition très rapide de la MO. Une augmentation importante du rapport jusqu'à des valeurs normales ou légèrement élevées, selon une perspective agronomique, se produit dans le sol sous la tranchée. Pour le site de #Lascazères_1 les valeurs du sol de référence et du sol sous la tranchée varient très peu entre les valeurs normales et faiblement élevées si on considère les caractéristiques nécessaires pour un sol agricole. Enfin, pour #Lascazères_2 le sol de référence présente un rapport C/N normal. Une augmentation du rapport se produit néanmoins sur le sol sous la tranchée impliquant une dégradation de sa qualité vis-à-vis d'une application comme sol agricole.

En bref, le sol sous la tranchée des sites plus âgés montre une augmentation plus importante de carbone organique par rapport à l'azote ce qui fait augmenter légèrement le rapport C/N par rapport au sol de référence. Cette augmentation n'est pas étonnante car les rapports C/N des BB du type BRF se trouvent souvent autour de 50 (Marche and Noël 2006, Brun et al. 2020). C'est-à-dire que le BB apporte plus de carbone que d'azote au sol. Cet effet est sûrement contrebalancé en partie par l'apport des composés azotés provenant des urines et des lixiviats de compostage. Dans la perspective d'un usage agricole l'apport du BB amène à une dégradation de la qualité du sol vis-à-vis des cultures. Néanmoins, la qualité du sol reste acceptable selon les critères applicables au sols forestiers. Pour les sols utilisés comme support d'infiltration des eaux usées les valeurs de qualité du rapport C/N ne sont pas établies mais on peut faire appel également aux besoins du rapport C/N des microorganismes du sol. La plupart des microorganismes ont besoin d'un rapport C/N=24 (Lal 2004) pour la création d'énergie et le maintien de la vie. En conclusion d'après cette valeur, les rapports C/N des sols sous la tranchée indiquent un apport suffisant d'azote à la solution du sol qui serait disponible pour les plantes. On notera qu'un excès d'azote nitrique dans le sol pourrait entraîner un risque de pollution de la nappe par lixiviation. En définitive, le rapport C/N de l'influent (eau ménagère), du sol et du BB sont des paramètres à étudier en détail lors de l'infiltration des eaux usées dans le sol pour éviter des déséquilibres si bien par excès d'azote que par carence.

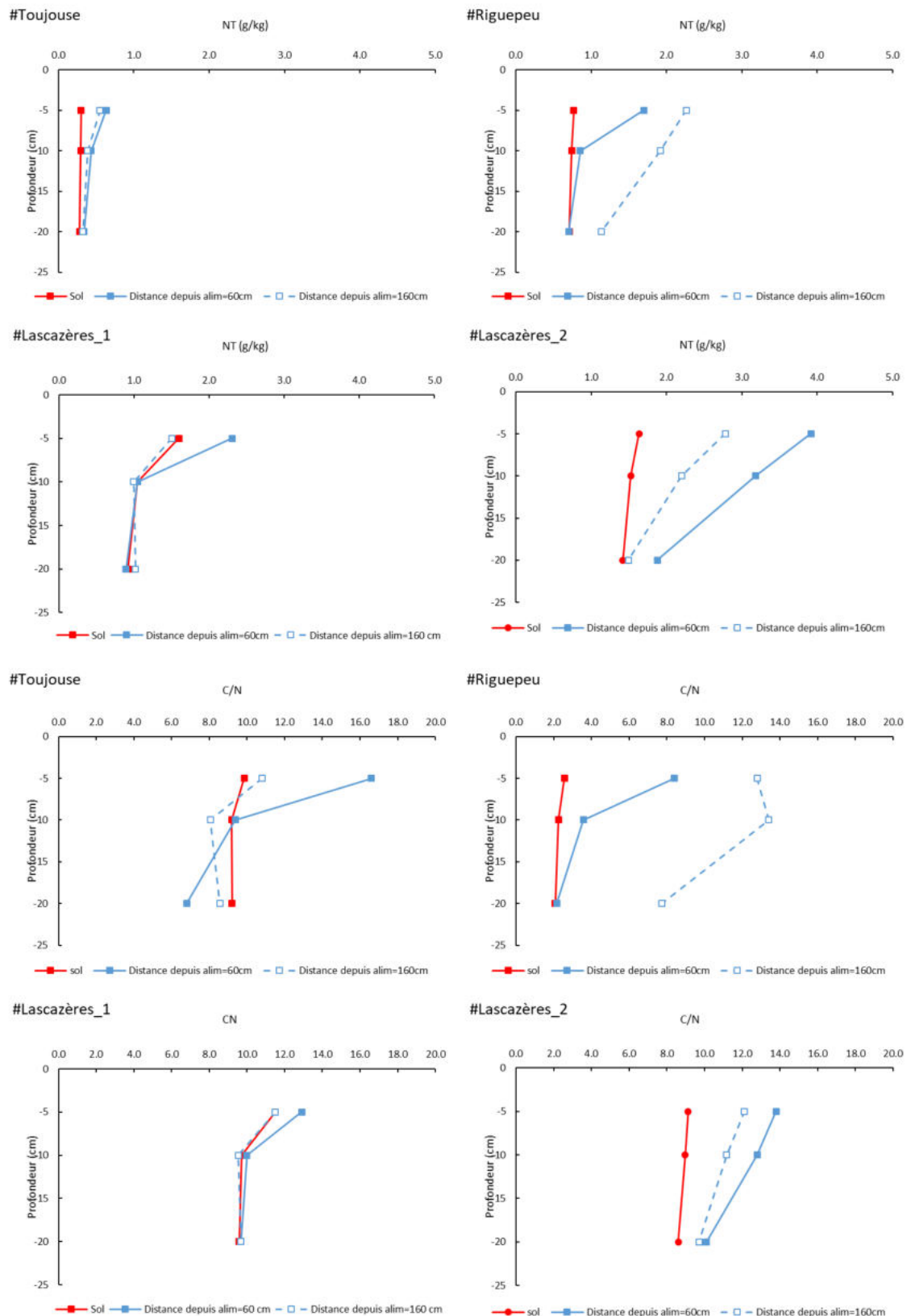


Figure 14. Profils d'azote total (g NT/kg sol) et du ratio C/N en fonction de la profondeur du sol, pour le sol de référence (rouge) et pour le sol sous la tranchée (bleu) mesurés à deux distances différentes par rapport au point d'alimentation : 60cm et 160cm. Les incertitudes liées aux mesures ne dépassent en aucun cas de 0.4 g NT/kg et elles sont proportionnelles à la grandeur de la valeur mesurée.

2.5.3. Phosphore total

Le phosphore total (PT) constitue l'ensemble de toutes les formes de phosphore d'un sol (incluant les formes minérales et organiques). Le phosphore minéral est composé principalement des phosphates de calcium (ex. apatite), de fer ou d'aluminium, généralement peu solubles (en fonction du pH du sol). Le phosphore organique contenu dans les macromolécules organiques constitue 20 à 30% du PT des sols agricoles, et 60 à 80% du PT dans les prairies (Baize 2018). Le phosphore organique devient assimilable par les plantes qu'après minéralisation par les microorganismes. Ces formes du phosphore, anions de l'acide phosphorique, peuvent se trouver dans la solution du sol ou adsorbées sur les argiles ou sur les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium. Une plus grande concentration d'argile ou de fer augmente le pouvoir fixateur des phosphates d'un sol, en revanche, la matière organique peut réduire cette capacité d'adsorption. Pour une application agricole du sol, la détermination du phosphore assimilable ou labile est un paramètre nécessaire à la connaissance des besoins de fertilisation des cultures. En termes de traitement épuratoire, le paramètre le plus utilisé est le phosphore total.

Pour la plupart des sols, la teneur en phosphore total se trouve entre 0.004 – 0.09 g PT/ 100g mais des concentrations plus fortes avec des valeurs notables (0.2 – 1.0 g PT/100g) peuvent se retrouver en fonction du type de sol et des teneurs en argile et composés ferriques (Baize 2018). La Figure 15 montre les profils de PT pour chaque site. Dans les sols de référence, les teneurs en phosphore se trouvent autour de 0.03 pour #Toujouse, 0.06 pour #Riguepeu et 0.08 g PT/ 100g pour les deux sites de Lascazères, en montrant tous une faible évolution avec la profondeur. Cette évolution dans les couches superficielles du sol (depuis la surface jusqu'à 40-50cm de profondeur) n'est pas étonnant. Dans le sol sous la tranchée, les 5 premiers centimètres montrent une accumulation de phosphore relativement faible (entre 0.01 et 0.03 g P/100 g) pour tous les sites sauf celui de Lascazères_2 dont une augmentation de 0.05 g/100g est atteinte. Encore une fois, cette réponse semble être en lien avec l'âge du filtre.

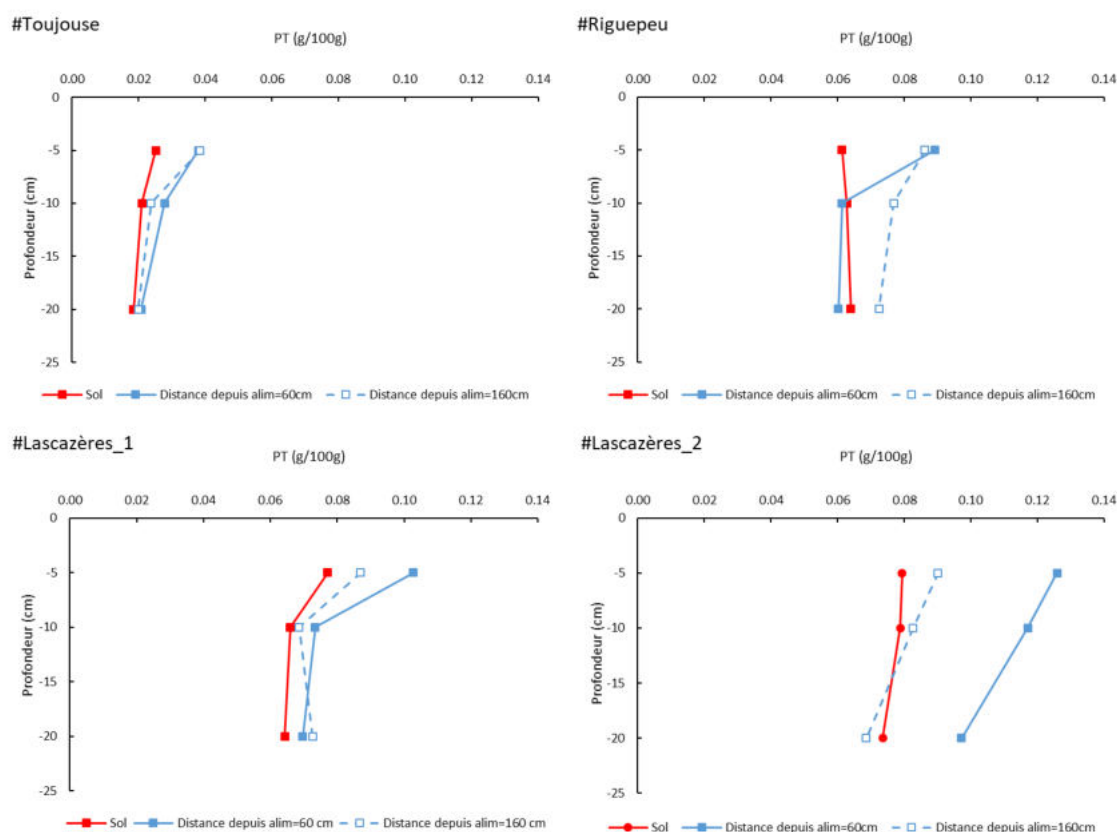


Figure 15. Profils de phosphore total (g PT/kg sol) en fonction de la profondeur du sol, pour le sol de référence (rouge) et pour le sol sous la tranchée (bleu) mesurés à deux distances différentes par rapport aux point d'alimentation : 60cm et 160cm. Incertitudes minimale et maximale liées à la mesure : 0.002 et 0.01 g/100g (proportionnelle à la concentration de phosphore).

Dans tous les cas étudiés, il en résulte que l'accumulation est plus importante dans la couche à proximité de l'interface BB/sol et elle diminue graduellement avec la profondeur. Cette accumulation de phosphore provenant des EUT dans les premiers 20 cm de sol a été déjà reportée dans des nombreux travaux (Ollivier et al. 2013, Turner et al. 2013, Eveborn et al. 2014, Fowdar et al. 2017, Morvannou et al. 2022). De même, les travaux de Morvannou et al. (2022) réalisés sur des lysimètres remplis de sol et plantés avec des *Phragmites australis* ont montré la grande capacité du sol à adsorber le phosphore avec des performances supérieures à 90% pendant 18 mois (Morvannou et al. 2022). L'accumulation de phosphore provenant des eaux usées traitées se trouvait aussi dans le même ordre de grandeur que les valeurs obtenues pour les FBB de cette étude, entre 0.02 et 0.07 g P /100g approximativement. Ces valeurs considérées faibles ne représentaient que du 23 au 25% du potentiel de stockage maximal des sols utilisés. Cette étude montre aussi que des conditions réductrices du milieu pouvaient amener au relargage de phosphore, par exemple, en cas de colmatage du sol. Au contraire, les conditions oxydantes (potentiel redox élevé) sont favorables à la rétention de phosphore. Cela met en avant l'importance de l'alternance des filtres pour non seulement éviter le relargage et donc un potentiel risque de contamination de la nappe, mais aussi pour maximiser le potentiel de rétention de phosphore du sol. Néanmoins, il faut noter que la capacité de rétention de phosphore d'un sol est limitée. Pour le FBB, la question se pose donc sur sa capacité à éviter la saturation en phosphore du sol en considérant tous les mécanismes macro et micro biologiques de dégradation, bioturbation, etc. qui pouvaient rentrer en jeu et permettre au système de retrouver un nouvel équilibre écosystémique.

En définitive, les quatre sites étudiés ont montré une rétention de phosphore dans les premières couches de sol sous la tranchée mais la concentration de phosphore atteinte est toujours relativement faible. Sur la base des travaux précédents, cette augmentation de la concentration de phosphore est sûrement encore loin d'amener le sol à la saturation, cependant il serait intéressant (voire nécessaire) de déterminer le devenir du phosphore accumulé dans le sol d'un système FBB.

2.5.4. pH et salinité

Le pH du sol n'a pas été mesuré sur le terrain mais au laboratoire selon la méthode de la norme NF ISO 10390 (1994). On mesure donc le pH de l'eau (pH_{eau}) dans laquelle un échantillon de sol est mis en suspension utilisant un rapport 1/5 (v_{sol}/v_{eau}). Le pH du sol va influencer les processus physico-chimiques et ses propriétés tels que son pouvoir tampon, la mobilité des éléments traces et du phosphore ou la réactivité vis-à-vis de l'aluminium, ce qui affecterait aussi les processus biologiques. L'acidification du sol est généralement un processus qui veut être évité d'un point de vue agronomique. Par exemple, des pH en dessous de 5 peuvent entraîner des risques de toxicité pour les cultures en présence d'aluminium échangeable (Wong and Swift 2001, Baize 2018).

Les valeurs moyennes des pH obtenus sont montrées dans le Tableau 5 aussi bien pour le sol de référence que pour le sol sous la tranchée et donc après infiltration de l'eau usée. De par sa nature calcaire, le site de #Riguepeu présente le pH le plus basique avec une valeur moyenne sur le profil de profondeurs de 8.5 ± 0.0 unités de pH. Il subit une légère acidification sous la tranchée. En contrepartie, les valeurs de pH des deux sites de Lacazères (#1 et #2) révèlent des sols un peu acides (5.9 ± 0.2) mais avec peu de variation après infiltration. Le sol de #Toulouse présente des valeurs de pH autour de la neutralité (7.0 ± 0.2) et une acidification du sol plus notable que pour les autres sites avec une variation de 1 unité de pH en moyenne. Cette acidification sous la tranchée dans les différents sols étudiés n'est pas étonnante car elle est en lien avec la dégradation du BB. Les valeurs de pH du sol se trouvent, cependant, dans ou à proximité de la plage de pH (6,0 à 8,0) qui favorise de manière générale les processus de biofiltration et le développement de la population microbienne et du biote (Ramírez-López et al. 2003, J. Tejedor et al. 2020). On notera que le pH du sol est susceptible de varier avec les saisons en raison d'une variation de la concentration des sels solubles et de l'humidité du sol (Chartin et al. 2015). Les valeurs plus basses sont souvent retrouvées pendant la saison estivale et les valeurs plus fortes pendant l'automne (Chartin et al. 2015). Les échantillons issus de cette étude ont été récupérés pendant le printemps 2021.

Selon ces résultats, on peut soupçonner que la réponse du pH du sol sous la tranchée soumis à l'infiltration des eaux dépend en grande partie de la nature du sol en place. Cependant, une analyse en profondeur des effets et de l'origine de la variation du pH nécessite aussi d'analyser la capacité d'échange cationique (CEC) du sol, entre autres paramètres, ainsi que la connaissance des paramètres physico-chimiques de l'eau infiltrée. Puisque ce n'était pas l'objectif des campagnes de terrain de suivre la qualité de l'eau on se limitera ici à signaler la nécessité de surveiller l'acidification des sols sous une tranchée FBB.

Tableau 6. Valeurs moyennes de pH_{CaCl_2} du profil de sol de référence et des profils de sol sous la tranchée.

	#Riguepeu		#Toujouse		#Lascazères_1		#Lascazères_2	
	pH sol	pH tranchée	pH sol	pH tranchée	pH sol	pH tranchée	pH sol	pH tranchée
moyenne	8.5	8.1	7.0	6.0	5.9	5.8	5.9	5.7
écart type	0.0	0.4	0.2	0.8	0.2	0.8	0.2	0.2

Concernant la salinité, les analyses ne montrent pas de variations significatives aussi bien pour les cations monovalents (K^+ et Na^+) que divalents (Ca^{2+} et Mg^{2+}). Pour les ions monovalents on peut parler d'une tendance à libérer des ions pour les sites de #Lascazères et #Riguepeu et une tendance à capter pour #Toujouse. Les dites variations sont proches ou en dessus de l'incertitude de la mesure sauf pour quelques exceptions comme pour le cas du site de #Riguepeu qui présente, par exemple, une réduction sensible au niveau de la teneur de K^+ dans le sol sous la tranchée (Figure 16). Au niveau des cations divalents comme le calcium et le magnésium, seul le site de #Riguepeu présenterait des variations un peu plus significatives pour la teneur en calcium. De part sa nature calcaire, les échanges, la mobilité et les interactions avec les autres ions sont sûrement plus importantes mais ne définissent pas une tendance claire au relargage ou à l'adsorption sur le profil tel que montré sur la Figure 17. Le site de #Lascazères_2 présenterait lui aussi une très légère accumulation de Ca^{2+} dans la couche de surface (variation d'entre 0.09 et 0.14 ± 0.02 g/100g). Rien ne se passe concernant le magnésium. De manière générale, on peut conclure que les variations ne montrent pas une salinisation du sol à court ou moyen terme.

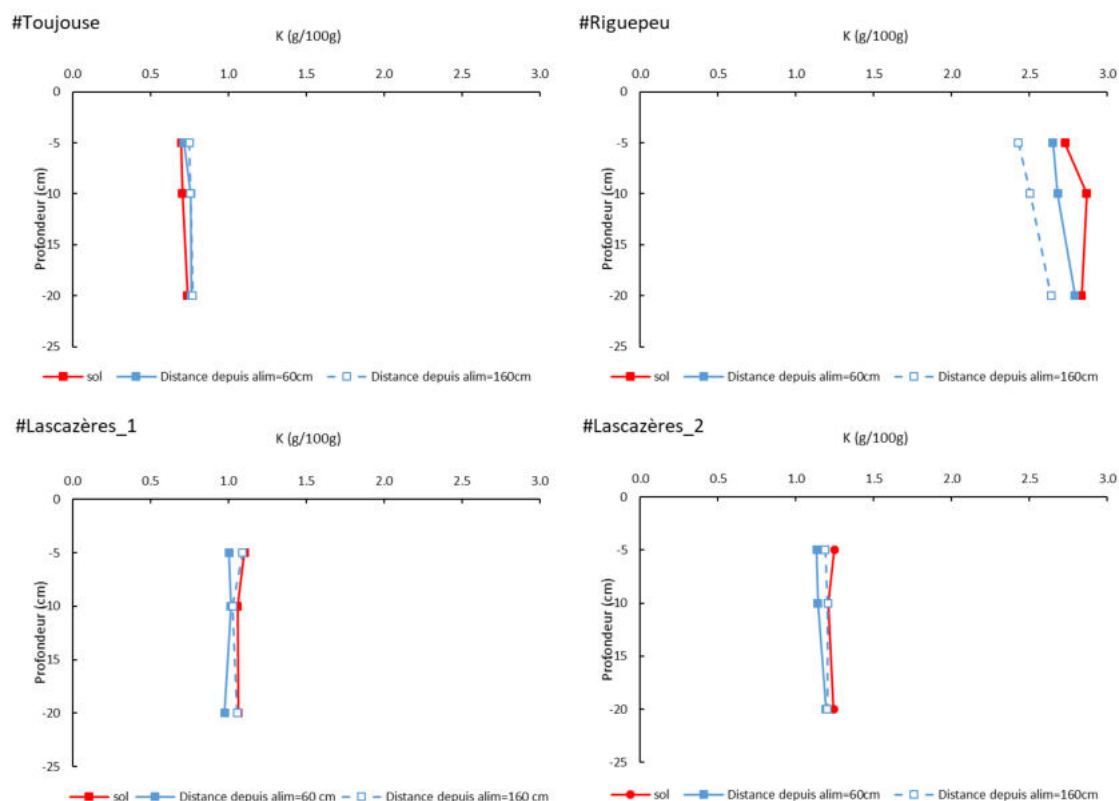


Figure 16. Profils de potassium ($g\ K^+ / 100\ g\ sol$) en fonction de la profondeur du sol, pour le sol de référence (rouge) et pour le sol sous la tranchée (bleu) mesurés à deux distances différentes par rapport au point d'alimentation : 60cm et 160cm.

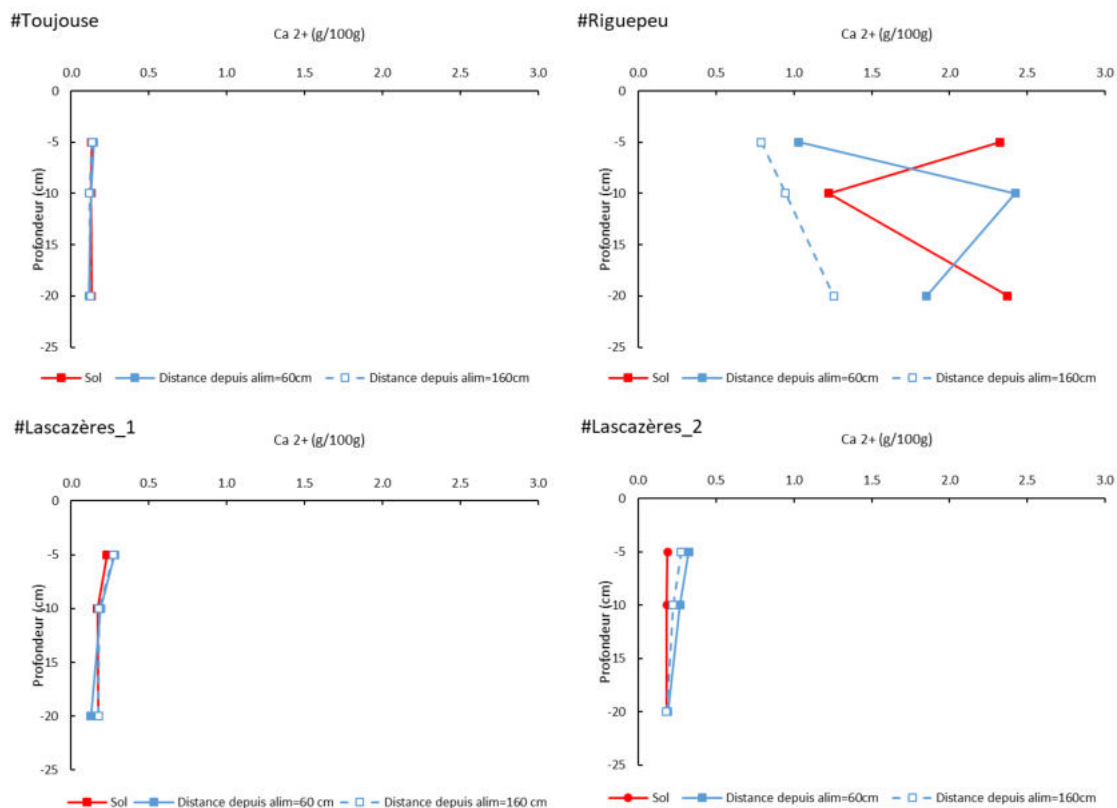


Figure 17. Profils de calcium ($\text{g Ca}^{2+} / 100 \text{ g sol}$) en fonction de la profondeur du sol, pour le sol de référence (rouge) et pour le sol sous la tranchée (bleu) mesurés à deux distances différentes par rapport aux point d'alimentation : 60cm et 160cm.

2.5.5. Les vers de terre

Les vers de terre (VDT) sont considérés des marqueurs biologiques de la qualité des sols tempérés dont leur présence est considérée comme favorable (Chartin et al. 2015). Un sol en bon santé est riche en biote composé aussi bien de microorganismes (champignons, algues, bactéries...) que de macroorganismes comme les VDT (Lal 2004). Les VDT avec des mécanismes comme la bioturbation affectent la dynamique du carbone du sol (Lal 2004). En effet, les vers de terre s'alimentant des déchets végétaux ou d'autres organismes comme les champignons, transportent la MO de la surface vers les couches plus profondes du sol (Edwards 2004). De ce fait, ils jouent aussi un rôle important sur la structure et la stabilité du sol. Entre autres choses, la présence des VDT contrecarre le compactage du sol (FAO et al. 2020). De part ces caractéristiques, il est fort probable que les VDT jouent un rôle important sur l'hydraulique des systèmes de filtration à broyat de bois, raison pour laquelle cette étude inclut leur suivi par comptage du nombre d'individus.

Les VDT ont été extraits par une méthode combinée mécanique et chimique. Dans un premier temps on a rajouté une solution urticante à base de Moutarde de Dijon sur une surface de 30 x 30 cm. Les VDT sortant du sol compris dans le carré sont extraits et comptés. Une extraction manuelle est réalisée par la suite sur une profondeur de 10 cm aussi bien dans le sol de référence à partir de la surface que dans le BB. La totalité des vers de terre ont été comptés, toutes espèces confondues, et photographiés. Le résultat de ce comptage est montré dans le Tableau 7. On remarque que, de manière générale, il y a un plus grand nombre d'individus dans la tranchée que dans le sol. Parfois les conditions d'humidité faible dans la tranchée par manque d'alternance selon les préconisations pouvaient amener à retrouver moins d'individus au moment de l'extraction. En effet, les conditions optimales d'humidité pour les VDT se trouvent autour de 80%, raison pour laquelle un système d'infiltration avec une arrivée continue d'eau constitue des conditions environnementales favorables au développement des communautés lombriciennes. Un autre élément clé affectant l'enrichissement de la tranchée en VDT est la présence du BB qui attire d'une part les microorganismes biodégradeurs et de l'autre part leurs prédateurs comme

les VDT. Le rôle du BB porterait donc sur la constitution d'un écosystème favorable pour les vers de terre. Enfin, les données d'infiltration semblent bien se corrélérer avec le plus grand nombre de VDT retrouvés dans les tranchées par rapport au sol. Ceci pourrait nous amener à dire que l'impact des VDT sur l'hydraulique serait un élément clé dans le maintien de l'infiltration des tranchées. D'autre part, l'apport du BB au sol augmenterait aussi la teneur en COT et donc il jouerait un rôle important sur la structuration et la stabilisation du sol. Il se peut, en conséquence, que l'enrichissement du sol en COT aidé par la bioturbation des VDT soit un élément important contribuant au maintien de l'infiltration.

Tableau 7. Comptage d'individus de vers de terre (toutes espèces confondues) utilisant une méthode combinée mécanique-chimique sur une surface de 30 x 30 cm et sur une profondeur de 10 cm.

	Tranchée - BB (Nb.individus)	Sol - surface (Nb.individus)	Commentaires
#Toujouse	10	6	Tranchée pas alimentée
	62	27	Tranchée alimentée avant expérience
#Riguepeu	64	14	
#Lascazères_1	8	14	Sol : individus petits; tranchée : grands individus, présence importante des taupes
#Lascazères_2	40	5	

3. Conclusions et perspectives

L'étude *in situ* déroulée dans le cadre du projet MATCARB sur des filtres à broyat de bois recevant de l'eau usée avait pour but de déterminer si ce système était capable de maintenir sa capacité d'infiltration avec le temps visant notamment les sols à faible perméabilité. **Les résultats des tests d'infiltration ont montré que, sous le contexte particulier de l'étude (type d'eau, âge des filtres, type de sol), l'usage du broyat de bois a un effet positif localisé de maintien voire d'amélioration de la capacité d'infiltration.** Deux facteurs principaux ont été identifiés comme étant responsables du fonctionnement hydraulique du filtre: 1) d'un côté, l'action conjointe du broyat de bois et des conditions d'humidité favorables génère un enrichissement des communautés lombriciennes autour de la tranchée. Les fosses pédologiques ont montré que les vers de terre avec les racines des plantes, disposées autour de la tranchée, favorisent le cheminement de l'eau dans le sol et créent des phénomènes de bioturbation responsables du maintien de l'infiltration de l'eau dans le sol. 2) De l'autre côté, il peut être espéré que l'enrichissement du sol en matière organique observé sur les analyses chimiques soit responsable d'une amélioration et d'une stabilisation de la structure du sol sous la tranchée. En effet, un sol plus riche en matière organique réduit la densité apparente du sol augmentant en conséquence sa conductivité hydraulique et donc sa capacité d'infiltration.

Les analyses chimiques ont montré une augmentation des teneurs en carbone, azote et phosphore sur les premiers 20 cm du sol sous la tranchée. De manière générale, cela crée un profil de concentration pour ces paramètres montrant une réduction avec la profondeur du sol. La matière organique du sol pouvant provenir de l'eau usée et du broyat de bois, le degré de contribution de ces deux éléments n'a pas pu être établie car l'étude ne comprenait pas le suivi de la qualité de l'eau. Dans ce sens, la Fiche Action 2022 a été conçue pour répondre à cette question et aux questions de performance sur les paramètres de la qualité de l'eau aussi bien au niveau des paramètres majeurs, que des micropolluants et des pathogènes. L'étude permettra aussi d'étudier l'impact des différents compartiments d'un filtre à broyat de bois (eau, sol, bois broyé, lombrics) sur la performance hydraulique des tranchées ainsi que sur le traitement de la pollution de l'eau. L'objectif final du projet sera d'évaluer la faisabilité d'un filtre à broyat de bois pour le traitement des eaux usées traitées. Pour cela, la Fiche Action 2022 se déroulera dans les pilotes sous conditions maîtrisées et soumis à des eaux usées traitées avec des charges organiques variables afin d'évaluer les limites hydrauliques et épuratoires du système.

En définitive, le projet MATCARB a montré des résultats encourageants pour l'usage des filtres à broyat de bois comme pour les systèmes d'infiltration des eaux usées traitées. Cela mérite donc la mise en place d'un suivi plus poussé notamment au niveau de la capacité épuratoire combiné du sol et du FBB afin d'évaluer la faisabilité d'intégrer le système dans les filières de traitement.



Centre siège Antony-Paris
Direction de l'Appui aux Politiques Publiques
1, rue Pierre-Gilles de Gennes
CS10030
92761 Antony Cedex
Tél. : +33 1 (0)1 40 96 61 21



Rejoignez-nous sur :

www.inrae.fr



- Angulo-Jaramillo, R., V. Bagarello, S. Di Prima, A. Gosset, M. Iovino and L. Lassabatiere (2019). "Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters (BEST) across soils and scales." *Journal of Hydrology* **576**: 239-261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.007>.
- Audebert, M. (2015). Development of a constraint methodology of hydrodynamic models by an analysis of ERT geophysical data : Application to leachate flow in municipal waste landfills. *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*. Baize, D. and M.-C. Girard (2009). *Référentiel pédologique 2008*. Association française pour l'étude du sol (AfeS).
- Braud, I., D. De Condappa, J. M. Soria, R. Haverkamp, R. Angulo-Jaramillo, S. Gelle and M. Vaudin (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 E and C. Boutin (2020). Le traitement des eaux ménagères par filtres à broyat de bois, INRAE UR-Reversal Ministère de la transition écologique et solidaire.
- C. Mariage (2019). 'Matières organique et la fertilité du sol.' *Bequette* 21.
- Chartin, C., I. Kruger, B. Van Wesemael and M. Carnal (2015). Carbone organique, biomasse et activité microbienne des sols : vers un indicateur de la qualité des sols en Wallonie., SPW - DG03 - OSD.
- Concialdi, P., S. Di Prima, H. M. Bhandari, R. D. Stewart, M. R. Abou Najm, M. Lal Gaur, R. Angulo-Jaramillo and L. Lassabatiere (2020). "An open-source instrumentation package for intensive soil hydraulic characterization." *Journal of Hydrology* **582** DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124492.
- Dahlin, T. (2001). "The development of DC resistivity imaging techniques." *Computers & Geosciences* **27**(9): 1019-1029. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0098-3009\(00\)00160-6](https://doi.org/10.1016/S0098-3009(00)00160-6).
- Edwards, C. A. (2004). *Earthworm Ecology*. CRC Press.
- Eveborn, D., J. P. Gustafsson, E. Elmefors, L. Yu, A.-K. Eriksson, E. Ljung and G. Renman (2014). "Phosphorus in soil treatment systems: Accumulation and mobility." *Water Research* **64**: 42-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.034>.
- FAO, ITPS, GSBI, CBD and EC (2020). STATE OF KNOWLEDGE OF SOIL BIODIVERSITY: Status, challenges and potentialities. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fowdar, H. S., B. E. Hatt, T. Cresswell, J. J. Harrison, P. L. M. Cook and A. Deletic (2017). 'Phosphorus Fate and Dynamics in Greywater Biofiltration Systems.' *Environmental Science & Technology* **51**(4): 2280-2287. DOI: 10.1021/acs.est.6b04181.
- Hendrix, P. F., B. R. Mueller, R. R. Bruce, G. W. Langdale and R. W. Parmelee (1992). "Abundance and distribution of earthworms in relation to landscape factors on the Georgia Piedmont, U.S.A." *Soil Biology and Biochemistry* **24**(12): 1357-1361. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(92\)90118-H](https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90118-H).
- J. Tejedor, V. Córdor, C.E. Almeida-Naranjo, V. H. Guerrero and C. A. Villamar (2020). "Performance of wood chips/peanut shells biofilters used to remove organic matter from domestic wastewater." *Science of the Total Environment* **738** DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139589.
- Krull, E. S., J. O. Skjemstad and J. A. Baldock (2004). *Functions of soil organic matter and the effect on soil properties*. Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting Canberra.
- Lal, R. (2004). "Soil carbon sequestration to mitigate climate change." *Geoderma* **123**(1): 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>.
- Lassabatiere, L., R. Angulo-Jaramillo, J. M. Soria Ugalde, R. Cuenca, I. Braud and R. Haverkamp (2006). "Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments-BEST." *Soil Science Society of America Journal* **70**(2): 521-532. DOI: 10.2136/sssaj2005.0026.
- Marche, C. and B. Noël (2006). Mise en œuvre de la technique du Bois Raméal Fragmenté (BRF) en agriculture wallonne. Strée, Belgique, Centre des technologies agronomiques.
- Morvanou, A., M. Masson, M. Gautier, S. Bisone, L. Richard, C. Boutin and N. Forquet (2022). "Fate of phosphorus from treated wastewater in soil-based constructed wetlands." *Science of The Total Environment* **816**: 151589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151589>.
- Ollivier, P., N. Surdyk, M. Azaroual, K. Besnard, J. Casanova and N. Rampoux (2013). "Linking water quality changes to geochemical processes occurring in a reactive soil column during treated wastewater infiltration using a large-scale pilot experiment: Insights into Mn behavior." *Chemical Geology* **356**: 109-125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.07.023>.
- Orgiazzi, A., P. Panagos, Y. Yigini, M. B. Dunbar, C. Gardi, L. Montanarella and C. Bellabio (2016). "A knowledge-based approach to estimating the magnitude and spatial patterns of potential threats to soil biodiversity." *Science of The Total Environment* **545-546**: 11-20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.092>.
- Party, J., N. Muller, Q. Vauthier and L. Rigou (2014). Référentiel Régional Pédologique de Midi-Pyrénées - Carte des sols du Gers - s. l. d. d. M. G. CNRS-EcoLab.
- Party, J., N. Muller, Q. Vauthier and L. Rigou (2015). Référentiel Régional Pédologique de Midi-Pyrénées - Carte des sols des Hautes-Pyrénées s. l. d. d. M. G. CNRS-EcoLab.
- Ramírez-López, E., J. Corona-Hernández, L. Dendooven, Rangel, P., and F. Theclazo (2003). "Characterization of five agricultural by-products as potential biofilter carriers." *Bioresour. technology* **88**(3): 259-263. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00315-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00315-2).
- Shi, P., F. Castaldi, B. van Wesemael and K. Van Oost (2020). "Vis-NIR spectroscopic assessment of soil aggregate stability and aggregate size distribution in the Belgian Loam Belt." *Geoderma* **357**: 113958. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113958>.
- Turner, R. B. R., G. D. Will, L. A. Dawes, E. A. Gardner and D. J. Lyons (2013). "Phosphorus as a limiting factor on sustainable greywater irrigation." *Science of The Total Environment* **456-457**: 287-298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.061>.
- Wong, M. T. F. and R. S. Swift (2001). Application of fresh and humified organic matter to ameliorate soil acidity. *Understanding and Managing Organic Matter in Soils, Sediments, and Waters*. R. S. S. a. K. M. Spark, IHSS.