



Le traitement des eaux ménagères par filtres à broyat de bois

Florent Brun, Vivien Dubois, Rémi Lombard-Latune, Catherine Boutin

► To cite this version:

Florent Brun, Vivien Dubois, Rémi Lombard-Latune, Catherine Boutin. Le traitement des eaux ménagères par filtres à broyat de bois. [Rapport de recherche] UR reversaal. 2020, pp.1-86. hal-03003572

HAL Id: hal-03003572

<https://hal.inrae.fr/hal-03003572>

Submitted on 13 Nov 2020

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.



Eaux Ménagères : Filtres plantés à flux vertical et bois fragmenté

Action n°3 : marché quasi régie DEB 1921 année 2019

Le traitement des eaux ménagères par filtres à broyat de bois

Florent BRUN (INRAE, UR REVERSAAL)

Vivien DUBOIS (INRAE, UR REVERSAAL)

Rémi LOMBARD-LATUNE (INRAE, UR REVERSAAL)

Catherine BOUTIN (INRAE, UR REVERSAAL)

INRAE, CENTRE LYON-GRENOBLE-AUVERGNE-RHONE-ALPES

Mai 2020

Contexte de programmation et de réalisation

L'arrêté du 7 septembre 2009 fixant les prescriptions techniques applicables aux installations d'assainissement non collectif recevant une charge organique brute inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO₅ (et dénommé : arrêté « prescriptions techniques ») autorise l'usage de toilettes sèches. Dans ce cadre-là, mais aussi dans d'autres configurations de séparation à la source, il impose des dispositifs de traitement pour les eaux ménagères d'une taille équivalente à ceux qui reçoivent les eaux usées domestiques composées d'eaux vannes et d'eaux ménagères.

Dans le cadre des discussions autour de cet arrêté, il s'agit d'étudier le dimensionnement approprié de deux filières de traitement des eaux ménagères :

- Les filtres plantés de roseaux à écoulement vertical.
- Les filtres à broyat de bois.

Il est demandé à INRAE de proposer des dimensionnements appropriés de ces filières pour le traitement des eaux ménagères.

Ce rapport concerne uniquement la filière par filtres à broyat de bois. L'analyse de la filière par filtres plantés à flux vertical (FPV-EM) fait l'objet d'un rapport séparé (Brun *et al.*, 2019).

AUTEURS

Florent BRUN, INRAE, centre de Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes, florent.brun@inrae.fr

Vivien DUBOIS, INRAE, centre de Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes, vivien.dubois@inrae.fr

Rémi LOMBARD-LATUNE, INRAE, centre de Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes, remi.lombard-latune@inrae.fr

Catherine BOUTIN, INRAE, centre de Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes, catherine.boutin@inrae.fr

CORRESPONDANTS

Victor LE BOULCH, Chargé de mission assainissement non collectif, Bureau de la lutte contre les pollutions domestiques et industrielles (EARM4), Direction de l'Eau et de la Biodiversité, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.

Sébastien GORECKI, Chargé de prévention et gestion des risques liés aux eaux usées et aux DASRI, Direction Générale de la Santé, Ministère des Solidarités et de la Santé.

Droits d'usage : accès libre

Niveau géographique : national

Couverture géographique : France

Niveau de lecture : professionnels, experts

Sommaire

Sommaire	3
Résumé	5
Mots Clefs.....	5
Remerciements	5
Acronymes.....	6
Glossaire	7
Introduction.....	8
1. Revue bibliographique	9
1.1. Les matériaux filtrants organiques	9
1.1.1. Généralités	9
1.1.2. Focus sur le BRF.....	10
1.1.3. Nomenclature	14
1.2. Emploi des matériaux filtrants organiques dans le traitement des effluents.....	15
1.2.1. Traitement des effluents	16
1.2.2. Traitement des eaux.....	16
1.3. Modalités d'évaluation de la dégradation d'un substrat organique.....	19
1.3.1. Généralités	19
1.3.2. Méthodes analytiques	19
1.3.3. Bilan de la revue bibliographique	21
2. Méthodologie	23
2.1. Problématique	23
2.2. Visite de sites	23
2.2.1. Objet des visites	23
2.2.2. Choix des sites visités	24
2.3. Echantillonnage de broyat de bois	24
2.3.1. Choix des échantillons.....	24
2.3.2. Méthode de prélèvement.....	25
2.4. Parcours analytique	25
2.4.1. Mesures physiques à INRAE.....	25
2.4.2. Mesures chimiques	27
3. Résultats et discussion	28
3.1. Compte-rendu des visites de sites	28
3.1.1. Site 1	28
3.1.2. Site 2	31
3.1.3. Site 3	33
3.1.4. Site 4	35
3.1.5. Site 5	38
3.1.6. Site 6	40
3.1.7. Analyse croisée des sites visités	42
3.2. Mesures physiques	45
3.2.1. Granulométrie.....	45
3.2.2. Densité	48
3.2.3. Porosité	50

3.2.4.	Capacité d'absorption d'eau	52
3.2.5.	Analyse croisée des paramètres physiques	53
3.3.	Mesures chimiques	54
3.3.1.	Hyperlavage	55
3.3.2.	Paramètres agronomiques et nutriments.....	56
3.3.3.	Teneurs en cendres	57
3.3.4.	Substances macromoléculaires.....	58
3.3.5.	Analyse croisée des paramètres chimiques	61
4.	Discussion	64
4.1.	Perception des processus en cours	64
4.1.1.	Analyse croisée visites – physique – chimie.....	64
4.1.2.	Mise en perspective	65
4.2.	Dimensionnement des FBB	66
4.2.1.	Charges surfaciques appliquées	66
4.2.2.	Un dimensionnement unique à confirmer	69
	Conclusion.....	71
	Annexes.....	72
	Annexe 1 : Liste des entretiens réalisés avec des professionnels	72
	Annexe 2 : Liste détaillée des échantillons collectés et analysés.....	73
	Annexe 3 : Détails des mesures granulométriques.	75
	Annexe 4 : Détails des mesures de capacité d'absorption.	76
	Annexe 5 : Détails des mesures de porosité.	77
	Bibliographie.....	81
	Listes des normes	84
	Table des figures	85
	Table des photographies	85
	Table des tableaux	85

Résumé

La possibilité de séparation à la source des émissions d'effluents en Assainissement Non Collectif, dont l'implantation de toilettes sèches, devrait proposer des solutions techniques de traitement adaptées pour les eaux ménagères (EM). Les filtres à broyat de bois (FBB) sont une solution fondée sur la nature à faible impact environnemental qui a pour objectif de traiter et valoriser les eaux usées traitées par infiltration dans le sol.

Une revue bibliographique internationale des usages et de la caractérisation des matières organiques dans le traitement des effluents nous amène à considérer le broyat de bois (BB) comme potentiellement efficace pour le traitement des eaux ménagères.

Dès lors, une analyse croisée par des mesures physiques (granulométrie, densité, porosité et capacité d'absorption) et chimiques (Carbone, Azote, Phosphore et teneurs en : cendres, extractibles, lignines, cellulose et hémicelluloses) de l'évolution dans le temps du BB frais et utilisés montre des évolutions favorables au traitement biologique aérobie des eaux ménagères.

A partir de l'ensemble de ces éléments (des pratiques internationales, de visites de sites en fonctionnement et d'une caractérisation détaillée des BB frais ou utilisés), l'étude conclut sur une proposition de dimensionnement unique pour un ménage: 5 tranchées identiques de 1 m², garnies de broyat de bois (d'origine commerciale ou auto fabriqué) et alimentées de façon hebdomadaire en alternance.

Au regard de la grande variabilité des eaux ménagères produites en ANC et de la complexité des mesures de performances du fait de la dispersion de l'effluent traité dans le sol, l'exercice de dimensionnement des ouvrages devient empirique. Le FBB fait partie des dispositifs qui semblent être en mesure d'accepter de fortes amplitudes d'émission tant hydraulique qu'organique (DCO, DBO₅, MES).

Cette filière d'économie circulaire qui s'appuie sur les interactions avec le sol en place, nécessite des recherches complémentaires pour tenter de mieux comprendre les processus qui garantissent les performances de traitement du dispositif.

Mots Clefs

Assainissement non collectif, broyat de bois, eaux ménagères, granulométrie, matière organique, porosité,

Remerciements

Nos remerciements vont à toute l'équipe Reversaal de INRAE et à l'équipe de Pierre et Terre. Nous tenons également à remercier Stéphane Garnaud-Corbel pour sa relecture attentive.

Acronymes

AC :	Assainissement Collectif
ANC :	Assainissement Non Collectif
BB :	Broyat de Bois
BRF :	Bois Raméal Fragmenté
C :	Carbone
DV :	Déchets Verts
EH :	Equivalent Habitant au sens pièce principale
EM :	Eaux ménagères
ETM :	Eléments trace métalliques
FBB :	Filtre à Broyat de Bois
FCBA :	Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement
FPR :	Filtre Planté de Roseaux
HT :	Hors Taxes
MB :	Matière Brute (taux en %)
MO :	Matière Organique (taux en % de MB ou de MS)
MS :	Matière Sèche (taux en % de MB)
N :	Azote
NF-DTU :	Norme Française du Document Technique Unifié (référence 64.1 dans ce rapport)
PANANC :	Plan d'Action National pour l'Assainissement Non Collectif
PP :	Pièce Principale
RAE :	Réseau de l'Assainissement Ecologique
RCCDV :	Refus de criblage de compost de déchets verts
SPANC :	Service Public d'Assainissement Non Collectif
WC :	Wood Chips ou broyat de bois
WCBR :	Wood Chips Bio-Reactor ou réacteur à broyat de bois

Glossaire

Duramen :	Partie interne d'un tronc d'arbre particulièrement dure et dense.
Equivalent Habitant :	L'équivalent habitant est dans ce rapport considéré comme une pièce principale (PP) et non pas une charge de 60 g de DBO ₅ .
Eaux ménagères :	Ce sont les eaux usées produits 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 DBO ₅ /j et 338 g DCO/j. (Brun <i>et al.</i> , 2019)
Filtres à broyat de bois :	Dispositif de traitement des eaux ménagères composé de plusieurs tranchées garnies de broyat de bois.
Lixiviats :	Urines ayant été en contact avec des fèces dans le cas de toilettes sèches. Dans le contexte de cette étude, les lixiviats sont toujours dirigés vers le dispositif de traitement des eaux ménagères.
Tranchée :	Excavation longitudinale pratiquée à ciel ouvert dans le sol.

Introduction

L'utilisation des matières organiques pour le traitement des effluents et pour la structuration des sols semble provenir du continent nord-américain. Gilles Lemieux de l'Université de Laval au Québec s'intéresse aux usages du BRF (Bois Raméal Fragmenté) en agriculture et en foresterie dès 1978. D'un autre côté, les californiens à la même époque, s'interrogent déjà sur la circularité de la gestion des eaux ménagères (Tarr, 1975). Cela explique pourquoi aujourd'hui des collectivités comme San Francisco sont précurseurs et recommande techniquement et réglementairement (San Francisco Public Utilities Commission, 2017) le traitement des eaux ménagères avec des filières utilisant un massif filtrant organique (Ludwig, 2009). En France, l'importation de l'expertise américaine à l'aide de l'association Toilettes Du Monde, par la venue de Laura Allen (Allen *et al.*, 2012) pour animer une formation, a essaimé. En effet, aujourd'hui sur le territoire français il est possible de dénombrer au moins une centaine¹ d'installations de ce type (Brun *et al.*, 2017). Le recours à un dispositif de traitement avant une évacuation sous-jacente par infiltration dans le sol des eaux ménagères quelle que soit leurs compositions (niveau de traitement non défini) est une nécessité (López-Zavala, 2007) et a déjà été initiée en Assainissement Non Collectif (ANC) (Agence de Bassin Loire-Bretagne, 1980).

En France, le massif filtrant organique employé est varié et fonction des matières disponibles localement. C'est bien dans une démarche globale d'économie circulaire aux sens de recyclage et de valorisation tant des eaux ménagères que des matières organiques issues de l'entretien des parcs et jardins et des déchets issus du bois que cette filière de filtration est conçue. Ce type de filtre correspond à une tranchée de faible profondeur, de 20 à 30 centimètres, garnie de broyat végétal sur laquelle les eaux ménagères sont épandues sans prétraitement. Cette tranchée non drainée favorise ensuite la dispersion sous la surface du sol des eaux ménagères traitées.

La caractérisation du matériau organique composant le garnissage du massif filtrant interroge. Les capacités de traitement de dispositifs appartenant à la famille des cultures fixées sur support fin reposent sur le développement d'un film biologique de bactéries aérobies (ou biofilm) sur le substrat minéral inerte avec de grandes surfaces d'échanges. Pour obtenir des rendements optimisés, il est nécessaire d'éviter le colmatage du filtre tout en ayant un temps de séjour de l'effluent adéquat. Pour cela, des préconisations sont alors émises sur le substrat minéral employé. C'est dans un tel contexte que nous proposons de considérer les différents types de matériaux organiques issus de différents circuits de production (autoproduction, professionnels des espaces verts ou plateformes de déchets organiques). Les caractéristiques physiques et chimiques de ces matériaux vont conditionner l'évolution dans le temps du comportement hydraulique du filtre et éventuellement impacter les niveaux de traitement du dispositif avant dispersion souterraine.

En se concentrant sur la caractérisation des matériaux organiques qui peuvent être employés, nous émettons l'hypothèse qu'en apportant des prescriptions techniques sur la composition du massif filtrant les conditions favorables à un traitement sont réunies. A cet effet, une revue bibliographique internationale axée sur les massifs filtrants organiques est réalisée afin d'affiner dans un second temps une méthodologie expérimentale pour caractériser le broyat de bois et évaluer son évolution dans les « filtres à broyat de bois - FBB » telle qu'elle est développée sur le territoire français. Dans un troisième temps, une discussion plus ouverte permet d'encadrer la conception et l'exploitation dans le développement de cette filière.

¹ Données RAE 2019.

1. Revue bibliographique

Les filtres à broyat de bois ont été initiés en France sous le nom maladroît de « pédoépuration ». Cette terminologie est employée par les acteurs du RAE suite à la formation dispensée par Laura Allen évoquée en introduction. Il s'agit d'un abus de langage puisque le traitement est réalisé d'abord par la biomasse fixée sur le massif filtrant organique rapporté puis par le sol en place, dans des proportions inconnues. Ce vocabulaire est employé dans son usage en agriculture dont le but est d'améliorer les performances d'un sol vis-à-vis d'une production agricole. Ainsi, le terme de filtres à broyat de bois (FBB) est donc préféré dans ce document, considérant cette technique comme un dispositif de traitement dédié aux eaux ménagères.

La revue bibliographique a été menée en se préoccupant dans un premier temps des matériaux filtrants organiques afin d'en proposer une nomenclature. Nous nous sommes intéressés ensuite aux modes d'utilisation de ces matériaux organiques dans le traitement des effluents en considérant en particulier les eaux ménagères. Enfin, dans un objectif de maintien des capacités de traitement pour un massif filtrant organique et évolutif car non inerte, nous regardons les moyens d'en évaluer sa dégradation.

Au-delà d'une revue de publications écrites, il a été nécessaire de rencontrer des professionnels qui sont régulièrement en interaction avec des broyats de bois afin d'obtenir des éléments contextuels (économiques, réglementaires, territoriaux, et techniques) pour alimenter le cadre de notre analyse de ces matériaux. Des entretiens semi-directifs en présentiel ou téléphonique de courte durée (15-30 minutes) ont donc été menés (Annexe 1).

1.1. Les matériaux filtrants organiques

1.1.1. Généralités

1.1.1.1. Les pratiques californiennes

Les travaux d'Oasis Design (Ludwig, 2009) sur des FBB tels que celui décrit en Figure 1, proposent une forte diversité de matériaux organiques rapportés pour le traitement des eaux ménagères : copeaux de bois, d'arbres, foin, sciure, pailles, coupes d'élagage, mauvaises herbes, feuilles, son d'épeautre ou de riz, compost,

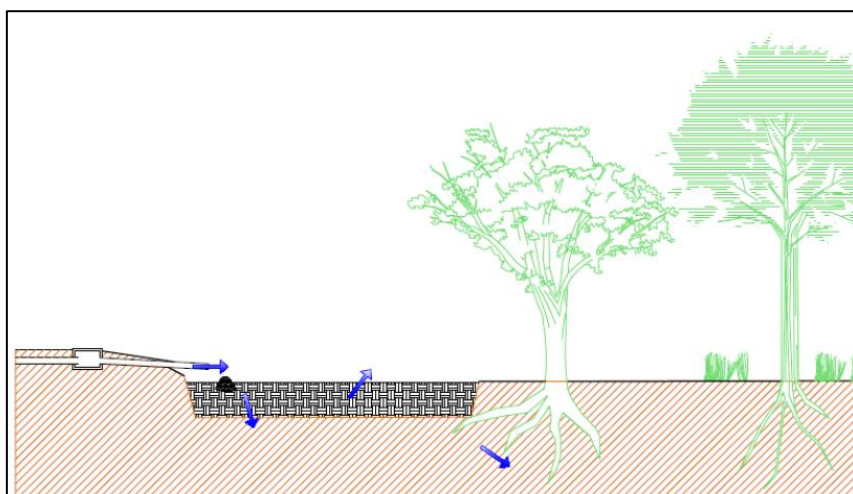


Figure 1 : Schémas d'un filtre à broyat de bois. Source : RAE.

En effet, les anglophones incluent ici un ensemble de matières organiques rapportées d'origine végétale de granulométrie inférieure à 100 mm. Cette liste de matériaux ne fait l'objet d'aucune nomenclature officielle. Il est seulement précisé la nécessité du maintien du niveau de ce matériau dans la tranchée à celui du sol. Aucun autre élément caractéristique n'est mis en exergue comme des précisions sur la granulométrie.

1.1.1.2. Une forte hétérogénéité

Il est possible de trouver plus d'une centaine de références scientifiques sur l'emploi de broyat de bois (« Wood Chips » en anglais ou WC). Les divers usages se retrouvent principalement en lien avec un sol naturel pour un objectif d'amélioration des rendements agricoles et dans le traitement d'effluents gazeux. D'autres usages plus secondaires sont aussi identifiés avec des dispositifs très différents, allant du paillage de surface (« mulch » en anglais), de l'enfouissement dans la couche supérieure d'un sol naturel ou reconstitué, de l'utilisation en colonne (filtres ou bioréacteurs, WCBR en anglais) ou en tranchées. Les usages peuvent se différencier en 2 catégories :

- En interaction avec le milieu naturel, à l'air libre ou enfoui.
- Dans un procédé en vase clos de type « bioréacteur ».

Les matériaux organiques utilisés comme « Wood-Chips » ou « mulch » (écorce, paille, sciure, copeaux, tourbe, coco, etc.) ne sont que rarement caractérisés en détail. Quand cela est fait, il est possible d'obtenir des descriptifs chimiques de leur composition en matières organiques (C, N, C/N, taux de MO), mais les descriptifs physiques, dont la granulométrie par exemple, font défaut (Ridderstolpe, 2007).

Les californiens de GreyWaterAction² utilisent aussi des matériaux organiques apparentés à des plaquettes de bois³ destinées au chauffage. C'est un marqueur de plus de l'hétérogénéité des matériaux employés. En 2012, l'interprétation par le RAE des matériaux organiques rapportés utilisés dans les filtres cible l'emploi de BRF.

Ainsi, nous allons apporter des éléments de définition du BRF afin d'estimer l'aptitude de l'emploi de ce terme à la réalité des pratiques du terrain d'aujourd'hui.

1.1.2. Focus sur le BRF

1.1.2.1. Caractérisation

Les travaux de Gilles Lemieux de l'Université de Laval au Québec sont toujours régulièrement cités jusqu'à aujourd'hui pour les usages du BRF en France⁴. L'emploi de la terminologie « BRF » est rentré dans le langage pour signifier un bois broyé. Ce matériau présenté dans la Photographie 1 montre bien ses aspects fibreux et déchiqueté.

² <https://greywateraction.org>

³ <https://laneforest.com/bedding-ground-cover/wood-chips/>

⁴ <https://brfdelarbreausol.blogspot.com/>



Photographie 1 : Bois Raméal Fragmenté (BRF). Source : Terre Vivante.

Le BRF est ainsi décrit comme :

« Une matière organique fraîche non dégradée issu d'un broyage de branches (raméaux) de faible diamètre (< 7 cm) en fragments de 5 à 10 cm. La section de 7 cm a été définie en référence à la norme de foresterie qui autorise le bûcheron à ne pas ramasser le bois et à le laisser sur le sol ».

Le BRF est composé de plus de cellulose que de lignine, le rameau est encore fin, avec un fort potentiel de développement de la pourriture blanche (champignons basidiomycètes). Pour la restructuration des sols en agriculture, il est préconisé que le BRF ne contienne pas plus de 20 % de résineux car ces derniers sont très riches en lignine, composé difficilement biodégradable. Au-delà de ce pourcentage, le bénéfice pour le sol agricole serait amoindri (Lemieux *et al.*, 2000). Les feuillus sont, quant à eux, riches en polyphénols ; un mélange d'essences d'arbres pour la constitution du BRF est préconisé. Il est recommandé que le BRF ne soit pas stocké pour éviter le démarrage d'un processus de compostage ou de fermentation qui détruit la pourriture blanche (Breton *et al.*, 2015 ; Stevanovic, 2007), notamment s'il y a présence de feuilles. Le BRF, de par sa « fraîcheur » de production est riche en minéraux et présente un C/N élevé qui permet une dégradation lente (Montaigne *et al.*, 2018). D'anciens travaux du Cemagref établissent la densité du BRF à 600 kg/m³ et sa granulométrie de 1 à 4 cm. Une spécificité est sa forte hétérogénéité tridimensionnelle : nature, forme, origine (Cemagref, 1981). Sur la base de travaux Wallon en 2006 (Marche *et al.*, 2006), une caractérisation est proposée dans le Tableau 1. On observe d'ores et déjà une forte variation de certains paramètres comme la masse volumique.

Caractéristiques	(Marche <i>et al.</i> , 2006)		(Tremblay <i>et al.</i> , 1998)	
	BRF	Unité	BRF	Unité
Masse volumique	350	kg/m ³		
Teneur en matière sèche	60	% du poids frais		
Masse volumique sèche	200	kg/m ³		
Capacité d'absorption	350	kg/m ³		
C/N	50	-		
Matière organique / MS	85	%		
Carbone	80	kg C /m ³		
Azote	2	kg N/m ³	0,46 – 1,15	%
Phosphore	0,4	kg P/m ³	0,26 – 1,1	mg P/g poids frais
Potassium	0,7	kg K/m ³	1,4 – 5,3	mg K/g poids frais
Calcium	5	kg Ca/m ³	3 – 13,99	mg Ca/g poids frais
Magnésium	1	kg Mg/m ³	0,42 – 1,2	mg Mg/g poids frais

Tableau 1 : Caractéristiques moyennes du BRF

Pour sa bonne dégradation, il est important que le BRF soit composé de branches fines plutôt que grossières et de l'aubier, la partie périphérique du tronc, plutôt que du duramen, c'est-à-dire le centre du tronc (Asselineau *et al.*, 2007).

1.1.2.2. Comportement au sol

Les effets des BRF sur un sol sont d'ordre physique et impactent, par exemple, les écoulements et la structuration du sol ; ils sont également d'ordre chimique avec des modifications de composition des sols ou d'ordre biologique en modifiant l'activité biologique initiale (Tableau 2). Un même effet est considéré comme favorable ou défavorable selon les usages : ainsi par exemple, l'effet « augmenter le taux de MO » est favorable en agriculture avec le paillage mais devient défavorable (ou neutre) dans le traitement des eaux.

Type d'effet	Effet	Mode d'utilisation du BRF	
		Paillage	Enfouissement
Physique (Ph)	Diminuer le ruissellement et l'altération du sol	X	X
	Augmenter la capacité de rétention d'eau	X	X
	Améliorer la structuration du sol		X
Chimique (C)	Augmenter le taux de matière organique	X	X
	Augmenter les teneurs en nutriments dans le sol		X
Biologique (B)	Augmenter l'activité biologique	X	X
(Ph)-(B)	Réguler la température du sol	X	
	Bloquer la pénétration des UV	X	
(Ph)-(B)-(C)	Améliorer la circulation de l'air dans le sol		X
Agronomique	Favoriser la végétation semée ou plantée	X	
	Défavoriser la végétation concurrentielle	X	

Tableau 2 : Effets du BRF sur les sols. Sources : (Breton *et al.*, 2015 ; Barthes *et al.*, 2010 ; Lemieux *et al.*, 2000).

Il est à noter que la dégradation du BRF nécessite de l'azote et peut créer une carence dans le sol qui engendre le phénomène de « faim d'azote » chez certaines plantes. A l'inverse, les rameaux fragmentés renferment beaucoup d'autres nutriments qui permettent aux micro-organismes, particulièrement certains champignons, de pouvoir créer la matière organique (MO) humifiée et stable. Enfin, il est généralement observé un accroissement des populations de vers de terre, caractérisant un milieu aérobie, dans les zones de sol où le BRF est employé (Caron *et al.*, 1999).

Il est aussi possible d'utiliser le BRF d'autres manières comme la lutte contre l'érosion et la protection des sols (Breton *et al.*, 2015), litière pour le bétail, ou la création de chemins de circulation pour l'humain et les bêtes,

1.1.2.3. Production

La récolte est favorable en hiver quand le processus de compostage est le plus faible et qu'il y a peu de sève dans les rameaux. La fragmentation donne aux basidiomycètes l'accès aux tissus internes du bois. La fragmentation doit être faite, en agriculture en tout cas, à partir de rameaux frais qui sont riches en nutriments et les parties du bois utilisées doivent être dépourvues de feuille pour ne pas favoriser le démarrage du compostage.

Le BRF est un matériau de proximité peu onéreux, mais dont les critères de production sont difficiles à respecter. Le gisement de ce produit renouvelable annuellement est difficilement quantifiable car il est fonction du taux de croissance des essences choisies et qu'il est autoproduit. Des tests de production et de rendement basés sur une exploitation de peupliers dans le Gard ont été réalisés en 2011 (Service Environnement et Territoires du Gard, 2011). En fonction des références et de la granulométrie du broyat obtenu, 1 m³ de branches donne entre 0,2 et 0,5 m³ de BRF (Pépin, 2013) avec un coût de production de 9 € HT.

Les caractéristiques des broyeurs pour un usage professionnel (espaces verts, agriculture, service des routes, etc.) peuvent mentionner les diamètres broyables (de 5 à 9 cm généralement) et les débits de production de broyat (+/- 5 m³/h), mais la granulométrie du broyat produit n'est jamais précisée. Ces professionnels produisent toute une gamme de matériaux organiques (compost, broyat de bois, plaquette, bois énergie, etc.) dont éventuellement du BRF. Par contre, en jardinerie et en magasins de bricolage, le BRF n'est pas commercialisé. Les matériaux organiques proposés pour du paillage, des litières ou des zones de circulation piétonnière sont différents à savoir : écorces, copeaux dépoussiérés, blé ou chanvre déchiqueté, Les propos d'A. Canet, président de l'Association Française

d'Agroforesterie, sur la maîtrise du produit « BRF » (composition, granulométrie, etc.) ainsi que ceux du chargé de la production de granulats organiques d'une plateforme de compostage de la région lyonnaise sont confirmés: « *On fabrique un broyat qui ressemble à du BRF, mais qui ne respecte pas toujours la définition au sens strict, on l'appelle dorénavant 'mulch organique'* », que par la technicienne développement durable du service des espaces verts de la ville de Lyon : « *On n'utilise peu ou pas le BRF, sauf pour faire des tests, on préfère nos déchets verts broyés et les broyats de palettes* ».



Photographie 2 : Broyeurs professionnels. Source : Doppstadt.

Sur les plateformes de broyage, un criblage par tamis est réalisé pour proposer différentes granulométries. Une combinaison de différents types de broyeurs (Photographie 2) permet de passer du déchet initial (palette, grumes, etc.) à un broyat final plus ou moins fin. En collectivité, tout le broyat généré est directement consommé ou laissé sur place. Le non-respect du cahier des charges décrit par Lemieux fait que le terme « broyat de bois » est favorisé au détriment de celui de « BRF ».

Pour les particuliers, il existe différents types de broyeurs électriques ou thermiques (Photographie 3) : à rotor, à disques portes couteaux et à marteaux couteaux (Bosse-Platière, 2016). La gamme de diamètres de morceaux broyables est généralement de 3 à 4 cm.



Photographie 3 : Broyeur de jardin de type Eliet Maestro. Source : (Pépin, 2013).

La production propre aux particuliers ne peut pas être constante, ni identique d'un particulier à un autre. « *L'emploi de plus ou moins de résineux, la non-maîtrise des essences utilisées, le recours à des outils variés sont autant de pratiques qui sont fonction des usages et de l'expérience de chacun* » comme le souligne Alain Canet. Ainsi, le respect de la caractérisation du BRF donnée par Lemieux apparaît

comme impossible à atteindre pour l'auto-production. Dès lors, il convient de lui donner le nom de « **broyat de bois** ».

1.1.3. Nomenclature

1.1.3.1. Généralités

D'une définition claire mais difficile à respecter pour le BRF, c'est en pratique une grande famille de broyat de bois que l'on peut identifier. De plus, la littérature internationale nous apprend que, dans le traitement des effluents, différents matériaux filtrants organiques sont utilisés sans être directement issus du broyage de bois (tourbe, paille, composts, etc.). Dès lors, il convient de préciser le vocabulaire relatif au bois⁵, et précisément, dans notre cas aux matériaux filtrants organiques.

Cette variété de matériaux rend difficile l'émission de prescriptions techniques pour le massif filtrant. En tant que support des bactéries responsables de la dégradation de la pollution dissoute dans l'effluent à traiter, une classification est nécessaire.

1.1.3.2. Description

Différents matériaux filtrants organiques rencontrés dans la littérature ont été classés par granulométrie dans la Figure 2.

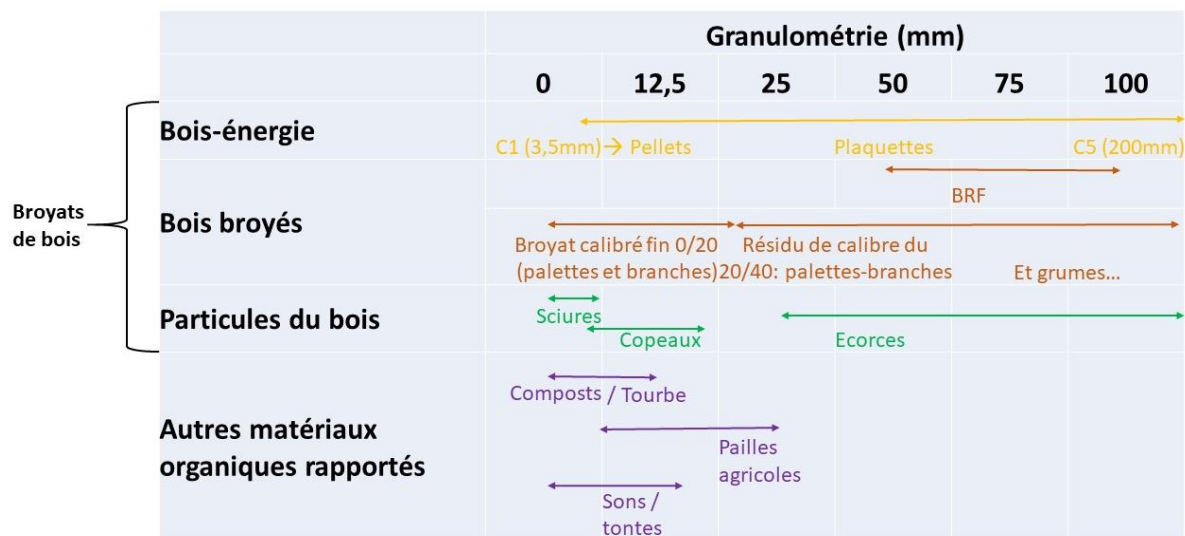


Figure 2 : Granulométries des matériaux filtrants organiques.

Ces matériaux organiques répondent tous à au moins un objectif commun : obtenir une réduction de volume des résidus (d'abattage, d'élague, de récolte, de déchet d'emballage, etc.). Une proposition de nomenclature de la famille « matériaux filtrants organiques » comporte quatre sous-familles telles que décrites dans la Figure 2 :

- **Bois-énergie** : nom officiel qui fait référence aux plaquettes forestières produites à destination des chaudières. Ils sont caractérisés dans l'objectif d'améliorer les rendements thermiques des chaudières. Ainsi, la dimension moyenne des plaquettes est de 2*3*1 cm environ (Ademe, 2018). Ils sont normalisés EN 14961-1 et il est considéré comme un produit. C'est la catégorie qui a la plus grande valeur marchande.

⁵ Voir à cet effet la norme ISO 24294:2013

- **Bois broyés** : nom officiel qui fait référence aux broyats de l'industrie d'emballage en bois, type cagette ou palettes mais de classe A c'est-à-dire des bois naturels sans traitement (Mortelmans, 2012), produits pour être utilisés comme structurant en paillage / compostage (Diara, 2007) ou pour un usage de combustible. On compte aussi les broyats issus de l'élagage comprenant les grumes et autres branches tout venant, les produits pour le paillage / embellissement, les produits par d'autres professionnels ou particuliers. Dans cette catégorie, on compte les BRF qui font référence à la définition de Gilles Lemieux (< 20 % résineux, raméaux de $\varnothing < 7$ cm, $5 < \text{granulo finale} < 10$ cm) (Lemieux, 1985). Leur production est réalisée dans un objectif de considérer ce déchet⁶ comme une ressource en agriculture.
- **Particules du bois** : nom normalisé⁵ pour faire référence aux sous-produits du travail du bois soit les écorces, sciures et copeaux de rabotage. Cette catégorie présente des matériaux moins dégradables que le BRF car constitués du duramen de l'arbre.
- **Autres matériaux organiques rapportés** : nom proposé dans le cadre de cette étude pour faire référence aux différents autres matériaux organiques utilisés comme les pailles agricoles, les sons, la tourbe, les tontes, les composts, Ces matériaux plus fins sont généralement facilement dégradables.

1.1.3.3. Filières

Afin de percevoir les enjeux relatifs à cette famille de matériau, la Figure 3 renseigne pour chacun dénomination, la composition des étapes production-distribution-utilisation. Le code couleur employé dans la dénomination des sous-familles sera réutilisé dans la suite du document.

Dénomination		Production - Distribution	Usage principal
Bois énergie		Industriels: Scieries, forestiers	Chauffage
Bois broyés	Bois raméaux fragmentés	Industriels: plateformes de déchets organiques Professionnels: espaces verts, agriculteurs Particuliers	Agriculture: paillage, amendement des sols
	Autres bois broyés	Industriels: plateformes de déchets organiques Professionnels: espaces verts, agriculteurs Particuliers	Espaces verts: Paillage et embellissement
Particules du bois		Industriels: scieries, forestiers Professionnels: artisans menuisiers	Toilettes sèches, composts, filières de transformation
Autres matériaux organiques rapportés		Agriculteurs Particuliers	Agriculture / potager: paillage, amendement des sols

Figure 3 : Production-distribution-utilisation des matériaux filtrants organiques.

1.2. Emploi des matériaux filtrants organiques dans le traitement des effluents

Les usages des matériaux filtrants organiques sont multiples. Bien souvent, c'est au regard de ces usages que le mode de production évolue pour obtenir une composition adaptée. Ainsi, de l'usage du BRF en agriculture, au traitement de divers types d'effluents, nous verrons que le BB utilisé en traitement des eaux ménagères se concrétise sous différentes formes. Malheureusement, les retours d'expériences collectés ne correspondent pas directement aux pratiques observées sur notre territoire :

⁶<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000029346955&dateTexte=20190407>

épandage d'eaux ménagères sur un filtre composé de BB dans une tranchée non étanche creusée dans le sol et sans recirculation.

1.2.1. Traitement des effluents

Un parallèle avec d'autres types d'effluents et d'autres techniques de traitement peut être riche d'enseignements pour mieux cerner le potentiel de l'utilisation des matériaux filtrants organiques :

- Les effluents gazeux :
 - la filtration d'effluents gazeux (Delhoménie *et al.*, 2002).
- Les effluents concentrés (en azote et matières en suspension) :
 - le traitement des lisiers de porcs sur des colonnes à écorces (Zhao *et al.*, 2014),
 - le traitement des eaux d'aquaculture en WCBR (von Ahnen *et al.*, 2016).
- Les effluents très concentrés traités avec des technologies plus complexes :
 - le traitement de l'azote d'effluents agricoles dans un réacteur par la technologie WCBR très répandue, avec des granulométries moyennes de broyat de bois de 5 cm (Choudhury *et al.*, 2016),
 - le traitement des métaux des eaux de ruissellement de voiries (Ray *et al.*, 2006).

D'autres usages combinent l'emploi d'une filtration par un matériau organique et un filtre à sable. De fait, les bioréacteurs à broyat de bois (ou WCBR) qui généralement associent une recirculation et un substrat mixte organique / minéral sont écartés de notre analyse. Il est toutefois possible de mentionner ici quelques références sur ces technologies dont :

- WCBR pour une filtration pour des sous-produits d'acier recyclé (Hua *et al.*, 2016) ;
- WCBR pour une filtration par un mélange de copeaux de saule (2-32 mm) avec des coquillages broyés dans un ratio 3 :1 (Bruun *et al.*, 2016) ;
- WCBR pour une filtration par un mélange des copeaux (d_{50}^7 : 6 mm) avec du sable pour traiter le phosphore (Christianson *et al.*, 2017).

1.2.2. Traitement des eaux

1.2.2.1. Eaux usées domestiques

Il est proposé ici de regarder plus en détails les enseignements de 3 uniques publications qui mettent en avant les effets des matériaux filtrants organiques dans le traitement des eaux usées domestiques (EUD) :

- Lens *et al.*, (1993) comparent l'efficacité de traitement d'une colonne d'écorce et de copeaux de pin avec une colonne de tourbe. Ces auteurs rappellent qu'il a déjà été démontré que l'emploi d'écorces (red-wood et pin) diminue les éléments traces métalliques dans les EUD (Randall, 1977). La granulométrie moyenne du premier substrat, l'écorce, est d'environ 3 cm sur une épaisseur de 50 cm. Son l'impact sur le traitement de la DCO est faible, l'abattement sur les indicateurs fécaux est de 1 unité log dans des conditions de charge hydraulique est de 10 cm/j. Le dispositif semble bien résister à la sécheresse et aux produits d'entretien ménagers.
- Saliling *et al.*, (2007) emploient broyats et plastiques comme substrats de bioréacteur pour dénitrifier des eaux usées chargées en azote. Cette publication compare 3 bioréacteurs de

⁷ Diamètre équivalent pour lequel la valeur de la distribution cumulée des masses est de 50 %.

40 cm de substrat composé tantôt de copeaux, tantôt de paille et tantôt de Kaldnes (plastique). La taille des copeaux est de 0,8 à 5 cm long sur 0,2 à 1,5 cm d'épais. Les rendements sont bons sur les nitrates (99 %) pour un affluent concentré à 200 mg N-NO₃/L pour les 3 matériaux. Par contre, les 2 substrats organiques présentent des rendements faibles sur la DCO. Au cours des 140 jours de cette étude ci, les copeaux et la paille se dégradent au cours du temps (16,2 % et 37,7 % en masse), la dégradation des copeaux atteint 42 % en masse brute au bout d'un an. La porosité du milieu a tendance aussi à diminuer : de 59,3 % à 22,9 % pour les copeaux, 61,2 % à 25,2 % pour la paille et 81,9 % à 36,5 % pour le Kaldnes. Ils concluent que le renouvellement du massif doit, dans ce contexte, être annuel. Le ratio C/N diminue au cours du temps, cela atteste de la dégradation carbonée du support.

- Rambags *et al.* (2016) étudient la réduction des bactéries fécales, des bactériophages et des nutriments dans un WCBR dénitrifiant à grande échelle et garni de copeaux de pin de taille variant de 1 à 3 cm dans un lit de 15 cm d'épaisseur. Il démontre l'efficacité des copeaux dans le traitement bactériologique avec des abattements de 3 à 4 unités log.

En ANC pour des EUD, il existe plusieurs dispositifs agréés qui utilisent un matériau filtrant organique comme les fragments de coco, les copeaux de coco ou les plaquettes dépoussiérées (1/3 peuplier et 2/3 chêne de calibre 20/50 mm par exemple).

1.2.2.2. Eaux ménagères

Dans le traitement des eaux ménagères, voici les expériences qui ont pu être recensées :

- L'emploi de 20 cm de broyat (« mulch ») de couche de filtration combiné à des matériaux minéraux permet de démontrer, en colonne, une efficacité de traitement des eaux ménagères (Tandlich *et al.*, 2009 ; Zuma *et al.*, 2009).
- Ridderstolpe (2007) utilise quant à lui du « mulch » en amont d'un filtre à sable pour éviter son colmatage.
- En 2017, Boyte *et al.*, étudient la survie d'*E. coli* par ensemencement dans différents « mulch » (écorce, coco et fanes de pois) pour le traitement d'eaux ménagères. L'irrigation se fait sous la surface à 15 cm de profondeur. L'expérience dure 50 jours et démontre que, dans les mulch d'écorces et de coco, une décroissance du nombre de colonies est observée de 2 à 3 log tandis qu'une croissance d'un à 2 log est constatée dans les fanes de pois.
- Les FBB en France et le dispositif « Greywater Oasis » aux Etats-Unis montrent des capacités pour traiter des eaux ménagères pour la maison individuelle (Brun *et al.*, 2017). A la différence des usages agricoles, les recommandations sur les « mulch » employées dans le traitement des eaux ménagères par le « Gray water design manual » (San Francisco Public Utilities Commission, 2017) se basent sur un dimensionnement calculé en fonction de la perméabilité du sol et du volume d'eau à traiter. Les « mulch » utilisés doivent être des copeaux avec de gros morceaux plutôt que de la sciure ou des plaquettes. La décomposition y est plus lente et demande moins d'intervention pour maintenir un niveau constant. Il n'y a pas de préconisation, ni sur l'essence du bois, ni sur la granulométrie, ni sur les performances de traitement. Les structures françaises du RAE ont des préconisations qui diffèrent des références américaines sur certains points. Pour les américains, l'alimentation doit être sous-surfacique (min 55 mm), s'il y a présence d'écoulement de surface ou de saturation / colmatage, il est nécessaire de remplacer le « mulch ». Il faut le faire de toute façon tous les ans ou tous les 2 ans. Pour les français, l'alimentation doit se faire par surverse et aucune recommandation (essence, type ou renouvellement) sur le broyat n'est apportée.

- En 2011, Dalahmeh et ses collaborateurs réalisent une revue internationale encadrée par la Swedish University of Agricultural Sciences (SLU)⁸ sur l'évaluation de la qualité de traitement des eaux ménagères par des filières qui utilisent des substrats organiques / végétaux. L'objectif de ces travaux est une valorisation en irrigation (Dalahmeh *et al.*, 2011). Dans ce manuscrit, ils redéfinissent la conception du terme « mulch » et l'ouvre au maximum jusqu'à intégrer les composts. Pour eux, le « mulch » est un sous-produit organique des plantes en provenance des productions agricoles et forestières. Les rendements des différents systèmes sont très variables. Le Tableau 3 souligne également le recours à des filtres à compost que nous avons peu considéré jusqu'ici. De ces comparaisons émerge la pertinence d'utiliser un filtre garni de broyat, dans toute sa diversité car il peut présenter de bons rendements de traitement. Ils proposent des caractéristiques de filtres de broyat pour assurer les meilleurs rendements. Ces préconisations sont ici résumées dans le Tableau 4. Ils concluent à la stabilité des dispositifs au bout de 20 à 40 jours pour que le développement du biofilm bactérien puisse traiter la MO biodégradable.

Type of material	SS	BOD ₅	COD	TN	TP	Reference
Bark	18	70–95	40	–	–	Lightsey <i>et al.</i> (1976)
Bark	73	97	63	35	–	Lens <i>et al.</i> (1993)
Compost	51	55	51	–	–	Aslam <i>et al.</i> (2007)
Compost	–	78	–	–	–	Savage & Tyrrel (2005)
Kenaf and corncob	71	90	69.9	91	90	Attanadana <i>et al.</i> (2000)
Mixture of peat, wood chips and calcite	–	99.9	83–98	75–84	–	Gilbert <i>et al.</i> (2008)
Mulch	62	NR	37	–	79 ^b	Bongumusa <i>et al.</i> (2007)
Mulch	71	68 ^a	–	–	–	Ridderstolpe & Olofsson (2007)
Peat	91	99	50	38	–	Lens <i>et al.</i> (1993)
Peat	65	90	–	69	NR	Hu & Gagnon (2006)
Wheat straw	–	–	81	–	–	Saliling <i>et al.</i> (2007)
Wood chips	89	91	–	35	–	Lens <i>et al.</i> (1993)
Wood chips	–	–	84	–	–	Saliling <i>et al.</i> (2007)
Wood chips	–	70	–	–	–	Savage & Tyrrel (2005)

– no data reported, NR no removal, ^aBOD₅, ^bmaximum removal

Bark = écorce ; Corncob = épi de maïs ; Peat = tourbe ; Wheat straw = paille de blé

Tableau 3 : Rendements de traitement de filtres organiques pour le traitement des eaux ménagères. Source : (Dalahmeh *et al.*, 2011).

Il est à noter que l'université de suède (SLU) n'a pas poursuivi d'action de recherche suite à cette étude bibliographique. D'un autre côté, l'institut de recherche sur l'eau suisse, EAWAG, qui a publié un document sur le traitement des eaux ménagères (Morel *et al.*, 2006), n'a pas poursuivi non plus de recherches sur les tranchées garnies de broyat de bois (Ludwig, 2009) qui y sont mentionnées.

	Unité	Min	Max	Optimum préconisé
Granulométrie	mm	10	35	Gamme comprise entre 25 et 90 mm
Hauteur du filtre	m	0,2	2	0,6 - 1
Charge hydraulique journalière	m ³ /m ² /j	0,017	0.3	pour les filtres à sable : 0,05 – 0,15 pour les lits bactériens : 1 – 4

Tableau 4 : Prescriptions techniques recommandées : Source : (Dalahmeh *et al.*, 2011).

⁸ slu.se/en

Malgré la diversité des matériaux filtrants organiques décrits dans la littérature internationale, les retours d'expériences en France émis par le RAE mentionnent principalement l'emploi de broyat de bois. L'étude conduite ici se limite donc au **broyat de bois « BB »** et exclue volontairement les « autres matériaux » dont la classification mériterait une réflexion à part entière. C'est seulement dans le cadre de comparaisons spécifiques que l'on fera appel à ces matériaux autres.

1.3. Modalités d'évaluation de la dégradation d'un substrat organique

Le nombre important de références scientifiques sur l'usage de différents types de matériaux filtrants organiques amène à considérer le BB comme pouvant être pertinent pour le traitement des eaux ménagères. De ce large éventail de matériaux biodégradables, devraient découler des comportements de traitement différents dans le filtre. Dès lors, comment caractériser ces évolutions dans le temps ? C'est avec cette question principale que la revue bibliographique s'est poursuivie en vue d'identifier les principaux paramètres caractérisant ces matériaux et les méthodes analytiques associées.

1.3.1. Généralités

Le bois a une composition moyenne de 25 % d'hémicelluloses, de 50 % de cellulose et de 25 % de lignine, ceux-ci variant en fonction de l'espèce. La digestion biologique du bois, souillé ou non par des eaux usées, suit les mécanismes de décomposition conditionnés par les proportions respectives d'hémicelluloses, de cellulose et de lignine dans les broyats de bois employés.

Dans la cellulose, les différentes chaînes placées côte à côte sont liées par de nombreuses liaisons hydrogène donnant à ce matériau une très grande rigidité. C'est le principal constituant du bois. Les hémicelluloses sont des polymères plus courts et de rigidité plus faible que la cellulose. La lignine est le troisième constituant de la paroi cellulaire. C'est un polymère dont la structure est complexe. La lignine est située entre les autres molécules de la paroi cellulaire. C'est pourquoi ses principales fonctions sont d'apporter de la rigidité, une imperméabilité à l'eau et une grande résistance à la décomposition.

Ce phénomène est notamment mis en exergue par Lemieux *et al.* dès 2000, les résineux (contenant jusqu'à 35 % de lignine) se dégradent moins bien et vont jusqu'à bloquer le processus de formation d'un sol ayant un intérêt agronomique en maraîchage (comprendre avec une forte porosité et une grande capacité d'absorption de l'eau). La lignine est plutôt récalcitrante aux transformations biologiques et sera garante de la longévité de la structuration physique du massif, tandis que les hémicelluloses sont plus facilement biodégradables et vont conduire à une réduction des volumes dont les conséquences sont à définir (remplacement, colmatage, etc.). Il est alors intéressant de pouvoir comparer les caractéristiques physiques et chimiques des différents broyats de bois car il est impossible de reproduire deux fois la même matrice de filtration.

C'est par une approche de bilan de masse centrée sur le broyat de bois que nous tacherons de répondre à la question de l'évolution dans le temps du massif et donc du fonctionnement du dispositif.

1.3.2. Méthodes analytiques

1.3.2.1. Caractérisation hydrique

Le Cemagref de Rennes, dans le projet Precodd en 2009, s'est intéressé à l'influence de la structure physique, plus large donc que le comportement hydrique, des déchets organiques sur la qualité du compostage (Trémier *et al.*, 2009). Une large partie de cette étude est très documentée sur le suivi et

l'élaboration d'indicateurs de caractérisation des déchets organiques en termes de quantité d'eau présente dans la matière, de masse volumique, de porosité, de la taille et forme des particules et de la capacité d'écoulement d'un fluide à travers la masse de compost. Ce projet Precodd estime que les paramètres les plus pertinents pour caractériser les cinétiques de dégradation du broyat de bois et les problématiques d'écoulement (avec un objectif d'évitement de genèse de jus ou de lixiviats sans intrant liquide dans le cas du compostage) sont les suivants :

- L'humidité en absence de saturation est un élément nécessaire aux bactéries pour digérer la MO du broyat, mais aussi celle dissoute et contenue dans les jus (eaux ménagères dans notre cas). Le taux d'humidité idéal doit être de 20 à 70 % de la masse totale. L'humidité par le déplacement d'eau apporte de l'air et donc de l'oxygène aux bactéries dans le massif.
- La porosité indique la quantité d'air et/ou d'eau disponible aux bactéries pour participer à la biodégradation. Dans le cas du compostage, c'est la porosité à l'air qui est considérée, elle doit être élevée en début de compostage (60 à 65 %). Les masses volumiques liées à la porosité et à l'humidité mènent au potentiel d'aération du support pour maintenir une biodégradation de type aérobie. Il y a ici comme lors du traitement des eaux usées un lien direct avec les capacités de compaction qui réduisent les circulations à la fois de l'air et de l'eau et peuvent avoir un impact néfaste sur le potentiel d'aération.
- La surface spécifique permet d'exprimer l'accessibilité des micro-organismes à la matière biodégradable. La granulométrie impacte directement les écoulements ; c'est sur la surface accessible du grain que se développent les bactéries assurant la biodégradation.

1.3.2.2. Suivi de la dégradation

La dégradation de la MO peut se caractériser de différentes manières. Cinq méthodes d'ordre physique, chimique ou biologique s'attachent à cette caractérisation :

- Physiquement en regardant les taux de MO et de matières minérales par perte au feu : cette approche intéressante, facilement accessible en lien avec la simplicité des analyses à effectuer, apporte une information globale.
- Par la fragmentation chimique pour estimer plus précisément la composition de la MO en glucides, lipides et protides : c'est une pratique répandue dans le monde agricole notamment pour estimer l'indice de stabilité de la MO (ISMO) par la norme XP U44-162. Ce sont ainsi les fractions glucidique (extraction acide), protéique (extraction basique) et lipidique (extraction à l'éther de pétrole) qui sont évaluées. C'est le fractionnement de Van Soest qui donne par extractions successives la composition de la MO dans un végétal (Vedrenne, 2007). Cette approche a été utilisée dans des études réalisées à INRAE sur la dégradation de la matière organique de composts et de plaquettes de bois (Trémier *et al.*, 2009) sans résultats tangibles. En effet, il a été observé une forte différence de composition pour les composts qui ne permet pas de tirer des enseignements clairs. Pour les plaquettes de bois, les essais du plan d'expérience sont négatifs et il est conclu que la méthode décrite dans la norme ne s'applique pas au broyat de bois. Effectivement, cette approche a été élaborée pour un usage de valorisation agricole de déchets organiques facilement fermentescibles : fourrage, boues de station de traitement des eaux usées, paillage, etc. Cela a été souligné par messieurs Da Silva Perez, Gérardin et Leclerc dans le cadre d'entretiens téléphoniques. Les extractibles polyphénoliques du bois (tanins) avec une structure poreuse viendraient perturber l'estimation de la dégradation en réagissant avec les réactifs utilisés.
Il existe d'autres modalités de fractionnements chimiques dédiées exclusivement aux bois. Ces analyses sont développées par l'Institut Technique du Bois FCBA pour estimer les teneurs en extractibles, lignine, cellulose et hémicelluloses.
- Par minéralisation potentielle du carbone (effet amendement du sol) et de l'azote (effet fertilisant du sol) par la norme XP U44-163 : c'est généralement le cas pour des échantillons

comprenant l'amendement et le sol en place pour suivre son évolution dans le temps. Cette procédure agronomique est cependant relativement longue (> 100 jours) et onéreuse.

- En mesurant les taux d'activité respiratoire sous différentes conditions. Cela permet d'évaluer l'activité biologique de transformation de la matière en condition aérobie. Le suivi consiste à déterminer la baisse de pression au cours du temps d'incubation, baisse de pression directement associée à la consommation d'oxygène de l'air, le dioxyde de carbone produit au cours de la transformation de la MO étant piégé par un flacon de soude. Ces tests se font sur des durées plus ou moins longues (de 5 jours à plusieurs mois), avec des enregistrements réguliers permettant d'estimer des cinétiques de dégradation. Il faut noter qu'au regard de l'humidité, les activités respiratoires évoluent. Par ailleurs, (Choubert *et al.*, 2010) confirment que les mesures d'activités respiratoires sont pertinentes pour évaluer la biodégradabilité des déchets organiques solides (de type boues de station de traitement des eaux usées). Cependant, ils alertent sur le choix du référentiel temporel pour réaliser ce type d'analyses, une échelle d'un an serait plus pertinente. Pour le broyat de bois souillés aux eaux ménagères, l'observation de cinétiques sur 28 jours seraient probablement trop courtes pour observer un quelconque impact sur les broyats les plus inertes comme celui de broyat de palettes. En effet, selon Trémier *et al.* (2009), les essais respirométriques réalisés sur du broyat de palettes humidifiés ont montré, quelles que soient les granulométries choisies, après 70 h, une absence de consommation d'oxygène et donc le caractère inerte de celles-ci à cette échelle de temps et sans ensemencement. En revanche, de fortes activités respirométriques avaient lieu sur des refus de criblage de compost de déchets verts (RCCDV).

Une évolution de la dégradation du broyat de bois ensemencé par des EM peut prendre place entre 70 h et 28 jours. Cependant les retours d'expériences de terrain par une analyse visuelle sur ces FBB, notamment en provenance du RAE, montrent qu'à l'échelle d'un mois, les broyats de bois n'ont pas évolué. Les échelles temporelles doivent donc être a priori bien plus longues.

- Par perte de masse due à une dégradation biologique : la norme NF EN 350-1 (1994) définit la durabilité naturelle comme la « Résistance intrinsèque du bois aux attaques d'organismes destructeurs ». En d'autre terme, la durabilité naturelle d'une essence de bois atteste de sa résistance naturelle face aux attaques biologiques (Damay, 2014). Ces analyses conduites pour estimer la durabilité reposent bien souvent sur des protocoles qui estiment la perte de masse avec ensemencement par un ou des champignons (Hannouz, 2014).

Il existe différentes normes encadrant ces mesures et, en particulier, la norme « XP CEN/TS15083.2 Durabilité vis-à-vis des microorganismes du sol et champignons lignivores » semble être la plus adaptée au contexte du traitement des EM. Cette méthode propose de placer des échantillons de broyat de bois de la taille d'une allumette dans un même sol avec des ensemencements de 2 types de champignons du bois les plus répandus en pourriture cubique et fibreuse. Ce type de test en condition de sol ressemble fortement à ce que pourrait subir du broyat ensemencé en EM dans des tranchées. Ce test paraît donc être adapté à notre besoin, mais il demande des délais de mise en œuvre relativement longs. Il faut compter de 4 à 10 mois d'essais pour comparer la résistance de différents broyats. Il n'est donc pas réalisable dans le temps imparti.

1.3.3. Bilan de la revue bibliographique

Le constat est fait que le BRF a prouvé son efficacité dans la régénération des sols et que l'expérience dans le traitement de certains effluents existe et reste à l'échelle de niche exploratoire.

Aujourd'hui, l'emploi du terme « BRF » est abusif et il conviendrait de parler de « **broyat de bois - BB** » dans un sens plus large. Ces broyats de bois sont copieusement disponibles, mais ils sont difficilement

reproductibles à l'identique, tant par les futurs usagers en autoproduction que par les professionnels du secteur.

Dès lors, il devient pertinent d'évaluer le comportement hydraulique de différents types de broyat de bois avec des mesures physiques comme la granulométrie, la porosité, la capacité d'absorption et la perméabilité.

Concernant les modalités pour caractériser la dégradation du bois, en tenant compte de la durée de la présente étude limitée à 8 mois et des différents retours d'expériences un choix doit être fait. Celui-ci repose sur une combinaison de mesures de durabilité par fractionnement chimique pour estimer les teneurs en extractibles, lignine, cellulose et hémicelluloses d'une part, et des mesures plus classiques de composition totale en carbone, azote, phosphore, potassium, d'autre part. Il nous apparaît nécessaire pour optimiser les parcours analytiques et pour disposer d'éléments comparatifs de réaliser ces mesures sur des broyats de bois frais et des broyats de bois dégradés ou utilisés par ensemencement en EM après différentes durées d'exposition. A cet effet, des prélèvements de terrain sur des dispositifs en fonctionnement sont pertinents.

En complément, la littérature ne présente pas de données de performance de traitement de **FBB** pour des EM autres que celles mesurées par le RAE (2017). Toutefois, les retours d'expériences recensés démontrent plusieurs choses :

- L'emploi d'une kyrielle de matériaux organiques rapportés, dont des BB.
- L'épuration de différents types d'effluents, dont des EM,
- Des performances de traitement très variables.
- Des mesures de performances complexes pour les dispositifs non drainés.

2. Méthodologie

2.1. Problématique

Malgré le suivi *in situ* de filières en fonctionnement, la collecte d'effluents traités s'avère difficile (Brun et al., 2017). La démarche de l'étude s'articule alors autour d'une analyse en absence de connaissance des rendements de traitement des FBB. Pour démontrer que les FBB sont performants pour traiter les EM il faut apporter des éléments tangibles pour répondre à la question suivante :

Comment la décomposition de la matrice « broyat de bois », en interaction avec le sol en place, permet de maintenir des performances de traitement stables dans le temps ?

Ces performances sont maintenues dans le temps en absence de colmatage, en aérobiose et dans un milieu poreux qui favorise le développement bactérien et un temps de contact suffisant.

Pour répondre partiellement à ce 1^{er} objectif, le fonctionnement d'installations aux caractéristiques différentes est observé lors de visites d'installations opérationnelles.

Un second objectif porte sur le comportement du massif filtrant, des hypothèses sont émises :

- Le broyat de bois est un matériau plus évolutif dans le temps qu'un substrat minéral, il est soumis à des phénomènes de tassement et d'agencement qui peuvent accentuer le colmatage du massif filtrant ou du sol bien qu'aucun compactage ne soit prescrit.
- La granulométrie du broyat de bois avec de gros morceaux non calibrés et hétérogènes développe un agencement qui favorise la perméabilité du massif sur la durée.

Ces deux hypothèses guident vers une analyse des paramètres physiques du massif :

- Les cinétiques de décomposition sont différentes en fonction des types de broyat.
- La forte cinétique de décomposition du broyat engendre un changement marqué de sa texture et de sa granulométrie et donc génère un risque de colmatage du massif filtrant et du sol.

Ces 2 points nous amènent à poursuivre des analyses physico chimiques pour une meilleure connaissance de l'évolution du massif au cours du temps.

2.2. Visite de sites

2.2.1. Objet des visites

La conception de FBB en France est l'œuvre principale de particuliers ayant bénéficiés d'informations ou de formations d'acteurs du RAE. Ainsi, les pratiques de conception et de construction de FBB ne sont pas homogènes.

Il apparaît difficile de se rendre compte du fonctionnement effectif des filtres à broyat sans se rendre sur place et les visites de sites permettent d'apporter des éléments tangibles pour l'étude tel que :

- Observation de l'évolution du broyat dans le temps.
- Observation de l'interface sol – broyat.
- Observation des éventuels écoulements dans le filtre.
- Observation d'un éventuel colmatage.
- Comportement de la végétation alentour et de la biodiversité dans le massif.
- Observation des nuisances perçues par les occupants (odeurs, gîtes à moustiques, eau stagnante, etc.)

- Prise d'échantillon *in situ* du broyat de bois utilisé.

2.2.2. Choix des sites visités

L'Association Pierre et Terre en tant que représentant du RAE a été sollicitée pour l'organisation de ces visites. Ainsi, ce sont 6 installations dont 5 conçues par cet opérateur et une conçue par l'association Toilettes Du Monde (également adhérente du RAE) qui ont été sélectionnées pour ces visites. Le choix des installations repose sur la base de leur hétérogénéité :

- En année de fonctionnement : de 1,5 à 10 ans d'ancienneté.
- En nombre d'usagers théoriques: de 3 à 20 EH.
- En conception de filtre :
 - o Diversité de longueur des tranchées (de 2,5 à 4 mètres).
 - o Diversité de périodicité et d'absence d'alternance.
 - o Diversité de typologie des broyats frais (voir ci-après).

Ces 6 sites ont été visités en septembre 2019.

2.3. Echantillonnage de broyat de bois

2.3.1. Choix des échantillons

Nous avons ciblé 22 broyats de bois « frais » différents (Annexe 2) en cherchant l'hétérogénéité, à la fois de leur composition, mais aussi de leur provenance. En effet, les particuliers de l'ANC peuvent avoir recours à différents types de broyat de bois :

- Autoproduits par les particuliers avec des broyeur domestiques.
- Produits collectivement par des professionnels (en plateformes de gestion des déchets organiques, élagueurs, espaces verts, etc).

Il est à noter que les collectivités ne donnent pas de broyat, ni aux particuliers, ni aux professionnels. A l'inverse, les plateformes de déchets organiques fournissent tous les types de broyat, excepté les sciures.

Parmi les 6 sites visités, seuls les broyats de bois frais de 4 sites (dénommés par la suite « broyat à T_0 ») ont pu être prélevés. Les broyats utilisés sont dénommés par la suite « broyat à $T + x$ années ». Le Tableau 5 associe les échantillons frais et utilisés d'un même dispositif pour lesquels les comparaisons sont possibles.

Site	T_0	$T + x$ années
Site 3	E22	E24 (T + 4 ans)
Site 4	E26	E25 (T + 4 ans)
Site 5	E2	E32 (T + 1,5 ans)
Site 6	E33	E2021 (T + 10 ans)

Tableau 5 : Correspondance des échantillons par site visité.

2.3.2. Méthode de prélèvement

Pour les broyats « frais », c'est la méthode des quartas qui a été mise en œuvre. Il s'agit de répartir « au jugé » la totalité des matières à disposition (plusieurs kg) en 4 tas de mêmes volumes. Deux de ces tas sont rassemblés et homogénéisés pour former un nouveau tas, lequel est à nouveau réparti en 4 tas de mêmes volumes. Cette opération est répétée 4 fois avant d'obtenir le tas final dans lequel est prélevé l'échantillon à analyser. Cette méthode de prélèvement permet d'obtenir un échantillon homogène et représentatif des broyats de bois collectés.

Pour les prélèvements de massif filtrant ou broyat de bois « utilisés » sur des installations en fonctionnement, c'est un carottage non remanié qui est réalisé. Les tests à la carotteuse ne se sont pas avérés concluant au regard de la tenue générale de la plupart des broyats utilisés. Ainsi, le carottage est réalisé à la pelle sur toute la largeur et la hauteur du filtre sur une longueur égale à la taille de la pelle (40 cm). Le massif filtrant est alors extrait du filtre.

Les volumes d'échantillons collectés sont de 6 à 7 litres, ces volumes importants intègrent les faibles densités de certains broyats de bois et fournissent des poids d'échantillons suffisants et adaptés aux contraintes analytiques.

2.4. Parcours analytique

2.4.1. Mesures physiques à INRAE

Les mesures physiques de 22 broyats de bois « frais » et de 7 broyats de bois « utilisés » ont été déterminées.

2.4.1.1. Granulométrie

Les travaux de granulométrie partent de l'hypothèse que la distribution de la taille des grains du matériau est en corrélation avec la distribution de la taille des pores. De ces distributions, dépendent les écoulements à travers le matériau.

Ici, les références classiques pour les matériaux minéraux utilisés dans les filtres de l'assainissement collectif (Forquet, 2017 ; Liénard *et al.*, 2000) ne sont pas transposables mais donnent un cadre d'analyse intéressant pour des courbes ayant 100 % du matériau passant dans le faisceau granulométrique, à savoir :

- La teneur maximum en fines ($d < 0,08$ mm) doit être inférieure ou égale à 3 % de la masse pour éviter le colmatage.
- $0,25 \text{ mm} < d_{10} < 0,40 \text{ mm}$
- Le coefficient d'uniformité doit respecter (pour les sables) : $3 < CU = d_{60}/d_{10} < 6$ sans rupture de pente.

Enfin, la connaissance du faisceau granulométrique de la Norme Française du Document Technique Unifié n°64.1 (NF-DTU) donne un cadre complémentaire.

Le matériel disponible à INRAE, constitué de 23 tamis répartis de 0,08 mm à 12,5 mm, permet d'analyser les granulométries des matériaux classiquement utilisés dans le domaine du traitement des eaux usées, tant en assainissement collectif qu'en ANC. Ces dimensions restreintes sont limitantes en terme de précision vis-à-vis des granulométries supérieures à 12,5 mm. Un passage à l'étuve s'est avéré nécessaire pour éviter le colmatage des tamis du granulomètre.

2.4.1.2. Capacité d'absorption d'eau

La capacité d'absorption d'eau permet d'évaluer l'effet "éponge" des broyats de bois. Il s'agit de la quantité d'eau accumulée par quantité de broyat de bois (en poids). Le mode opératoire suivi est celui de la procédure développée par Laraméy *et al.* (1999).



Photographie 4 : Trempage des échantillons pendant 24 h.

Les échantillons sont saturés en eau pendant 24 h (Photographie 4), puis égouttés. Ils sont alors pesés ($g_{\text{mouillé}}$) avant d'être placés en étuve à 105°C jusqu'à poids constant. Nous mesurons alors les poids secs (g_{sec}) afin d'en déduire le poids d'eau évaporée. Il est alors possible de calculer le ratio : $(g_{\text{mouillé}} - g_{\text{sec}})/g_{\text{sec}}$.

Le taux d'humidité des échantillons prélevés n'a pas été calculé. Les prélèvements ont été réalisés indépendamment des conditions météorologiques et du contexte d'alimentation du filtre. Ainsi, la valeur du taux d'humidité est très aléatoire et n'aurait donné qu'une image instantanée de l'état du broyat de bois.

2.4.1.3. Porosité

La porosité consiste à évaluer les volumes de vide, l'espace poral, comparé au volume total. C'est ce volume qui est laissé libre à l'écoulement.

Le mode opératoire est également inspiré de Laraméy *et al.* (1999). Des éprouvettes tarées de 1 000 ml ont été remplies d'échantillon puis légèrement tassées afin de s'approcher d'un FBB en condition de fonctionnement. La mesure se fait donc en « foisonné ». La masse sèche introduite (m) dans l'éprouvette est connue par pesée. Les spécificités des échantillons de broyat de bois résident dans (i) la présence de beaucoup d'espaces interstitielles favorables à la rétention de bulles d'air et (ii) sa flottabilité. Ensuite, un volume d'eau mesuré (V_{eau}) est introduit dans l'éprouvette jusqu'au niveau de 1 000 ml. Il est nécessaire de bien tapoter l'éprouvette lors de la mise en eau pour favoriser la remontée à la surface des bulles d'air. Un bouchon finement percé a été positionné au niveau 1 000 ml de l'éprouvette pour permettre à l'eau de s'infiltrer et à l'air de s'exfiltrer tout en maintenant le niveau supérieur du matériau. Il est alors possible d'exprimer :

- La densité volumique apparente en poids d'échantillon par volume (g / ml).
- La porosité en poids d'échantillon de broyat par poids d'eau (g_{MS} / g).
- La porosité en volume d'eau (donc de vide) par volume total $V_{\text{eau}} / V_{\text{utile éprouvette}}$.

La porosité calculée ici est la porosité inter-grains, il n'a pas été réalisé de mesure de porosité intra-grains.

2.4.2. Mesures chimiques

La revue bibliographique amène à cibler les analyses de fractionnement chimique de la matière organique des broyats de bois comme les plus pertinentes pour suivre leur dégradation. Ces analyses sont déléguées à l'Institut technique du bois FCBA, professionnel en la matière.

Les paramètres analysés, caractéristiques de la matière organique sont :

- La teneur en extractibles.
- La teneur en lignine.
- La teneur en cellulose.
- La teneur en hémicelluloses.

Ces analyses sont réalisées sur 8 échantillons prélevés lors des visites de filières en fonctionnement et pour lesquels la comparaison entre du broyat de bois « frais » (T_0) et du même broyat de bois utilisé ($T_{+X\text{années}}$) est possible.

Certaines mesures chimiques sur des broyats réduits en poudre par FCBA sont réalisées en interne à INRAE. Ces mesures sont les suivantes :

- C_{tot} et N_{tot} : Carbone et Azote total analysés avec un analyseur élémentaire CNS.
- P + K (avec dosage de Ca, Na et Mg) : phosphore et potassium analysés par minéralisation micro-onde par extraction à l'eau régale et dosage ICP-OES.

3. Résultats

3.1. Compte-rendu des visites des sites

Suite à la visite des sites, ce compte-rendu présente, site par site, les différentes caractéristiques techniques et une revue photographique de chacune des implantations. Un comparatif des détails techniques des 6 sites visités est élaboré dans la dernière partie de ce chapitre.

3.1.1. Site 1

La propriété est de grande taille et trois ensembles distincts de FBB ont été installés en 2017 (Figure 4).

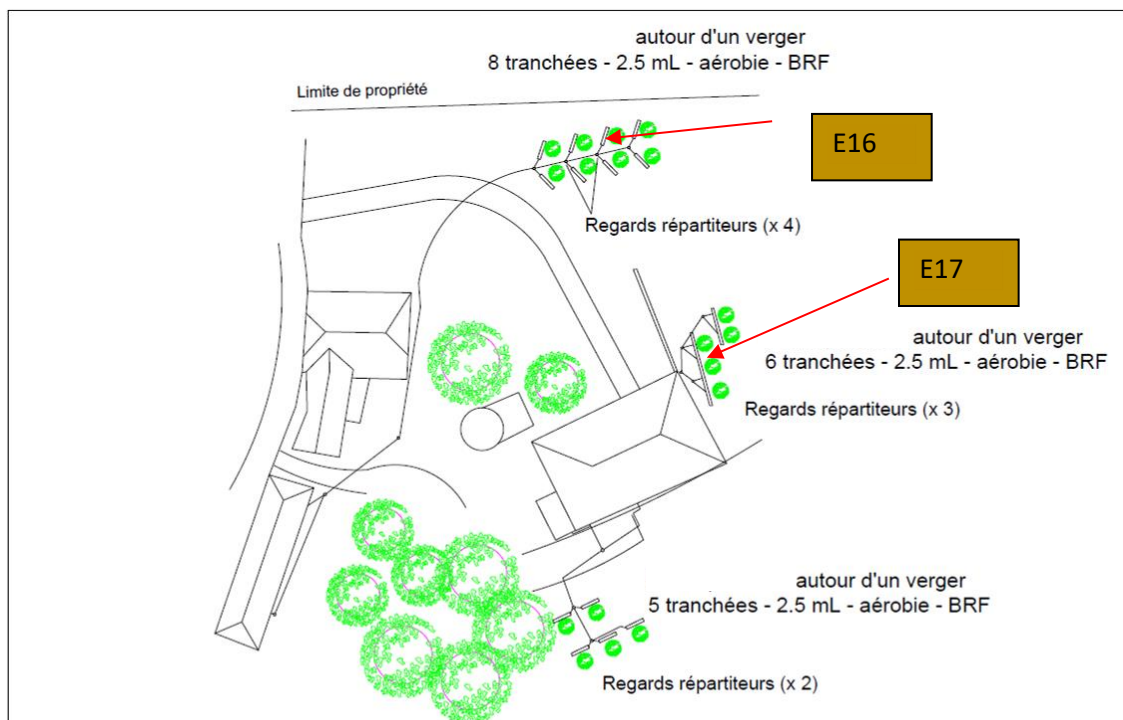


Figure 4 : Plan du site 1 et points de prélèvement.

Les sources des EM traitées par les systèmes mis en place sont résumées dans le Tableau 6. En absence de toutes mesures, ces appréciations sont fournies à titre indicatif après discussion avec les usagers.

Localisation et n° de prélèvement	Eaux ménagères			Urine	EH conception	EH réels
	Eaux de vaisselle	Hygiène personnelle	Lavage de vêtements			
Au Nord : Ensemble 1 : E 16	+++	++	0	oui	8	20
A l'Est : Ensemble 2 : E 17	0	++	++	oui	11	20 (estimés) ⁹
Au Sud : Ensemble 3	++	0	0	non		30 (estimés) ⁸

Tableau 6 : Résumé des dispositifs de traitement par filtre à broyat de bois sur le site 1.

Les tranchées sont toutes similaires et leurs dimensions sont de (Longueur*largeur*épaisseur) = (2,5 m*0,4 m*0,3 m). Les tranchées ont été réalisées à la pelle mécanique dans un sol fortement argileux et très peu perméable (photographies 5 et 6). L'alternance de l'alimentation est régulièrement réalisée sur la base d'une semaine d'alimentation et d'un nombre de semaine de repos fixé par le nombre de filtres installés.

Le broyat est du déchet végétal (DV) d'origine agricole (haies) autoproduit, le matériau d'origine n'est pas disponible et n'a pas fait l'objet d'un prélèvement.

L'alimentation en surface se fait en un point à l'une des extrémités du filtre. L'écoulement à travers le massif est vertical.

On estime à 2 ans de fonctionnement sans nouvel apport de broyat. Le niveau de surface des tranchées s'abaisse et environ 5 cm de rajout serait nécessaire pour un maintien à niveau constant au bout des 2 ans. Deux prélèvements ont été réalisés sur les ensembles 1 et 2 qui sont les plus sollicités pour le traitement des EM.

Prélèvement E16. L'utilisation par 20 personnes est régulière 8 mois sur 12 avec une phase d'alimentation d'une semaine avec 7 semaines de repos. Le dimensionnement de l'ensemble des 8 filtres a été évalué à partir d'une pollution émise par 20 EH et correspondrait à 0,4 m² / EH au total, soit à 0,05 m² / EH de filtre en fonctionnement.

Prélèvement E17. L'utilisation par environ 20 personnes est continue de mai à août, soit 4 mois par an et en pointillé, le reste de l'année. Ces filtres sont prévus pour 2 salles de bains et l'urine de 2 toilettes. Le dimensionnement de l'ensemble des 6 tranchées a été évalué à partir d'une pollution émise par 20 EH et correspondrait à 0.3 m² / EH au total, soit 0,05 m² / EH de filtre en fonctionnement.

Sur l'ensemble 3, il y a 2 guinguettes accueillant 80 personnes chaque semaine et un pic évènementiel à 250 personnes durant l'été. Les EM déversées sont issues de 3 cuisines collectives. Le dimensionnement de l'ensemble des 5 tranchées a été évalué à partir d'une pollution émise par 30 EH et correspondrait à 0,17 m² / EH. Aucun prélèvement n'a été réalisé du fait de l'absence d'apport récent au moment de la visite.

⁹ A partir de la consommation d'eau potable



Photographies 5 : Site 1, aspect général.

On observe, sur les Photographies 5 à gauche, l'aspect aspect général du filtre et à droite, le broyat de bois utilisé (E16) avec du mycélium.

Malgré le caractère très argileux du sol (analyse visuelle), aucun débordement de tranchée n'a été observé par les usagers depuis 2 ans, des racines parviennent à s'introduire dans ce socle. Ces racines créent-elles des chemins d'écoulement ou l'eau est maintenue dans la masse du filtre jusqu'à évaporation ou captation par la végétation latérale.

Sur les Photographies 6, on observe à gauche la nature granuleuse en surface, et à droite la nature argileuse du sol en fond de tranchée



Photographies 6 : Site 1, profil de tranchée.

Au moment de la visite, dans les tranchées alimentées en EM, il n'y a pas d'écoulement visible ni en surface, ni à l'intérieur du broyat de bois, ni en bout de tranchée. Le broyat utilisé, âgé de 2 ans, n'est pas compacté. Par son aspect spongieux, il présente une bonne capacité d'absorption de l'eau et il paraît être moyennement dégradé. Les usagers sont attentionnés à leurs installations, comme l'atteste un tableau de roulement de chacun dans l'affectation de la rotation hebdomadaire de l'alimentation des tranchées des 3 ensembles et de vérifier les bons écoulements.

3.1.2. Site 2

Le système est installé pour une maison individuelle et traite uniquement les EM d'une famille constituée de 2 adultes et 3 enfants.

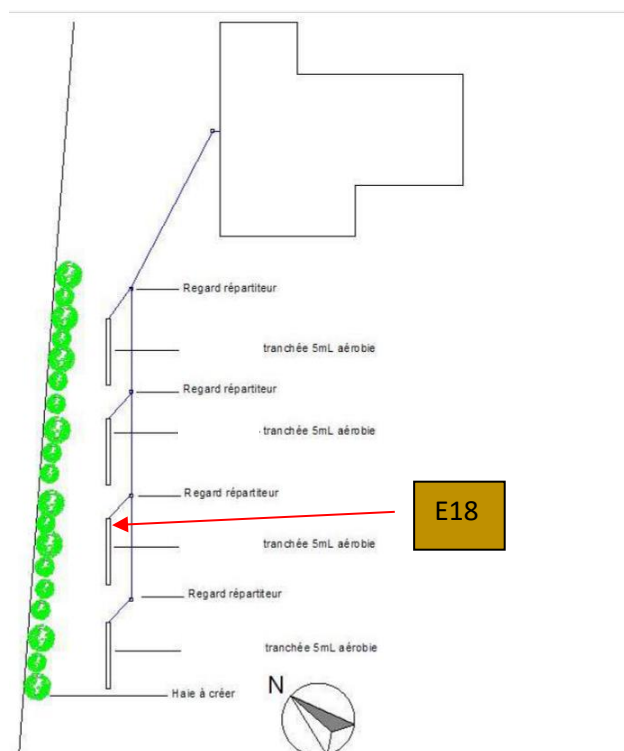


Figure 5 : Plan du site 2 et point de prélèvement.

Les tranchées sont plus longues qu'habituellement avec des dimensions (L*I*e) de 5 m*0,4 m*0,2 m, soit une surface totale de 8 m² pour le ménage de 5 EH, soit un dimensionnement de 1,6 m² / EH (en assimilant enfants et adultes comme habitant), soit 0,4 m² / EH sur le filtre en fonctionnement. Pour éviter des débordements en terrain fortement argileux, les longueurs de tranchée ont été doublées par le concepteur passant ainsi de 2,5 m à 5 m. Le choix a été fait de construire les tranchées dans la ligne de pente pour obtenir une irrigation souterraine de la haie.

Toutes les EM, sans les urines de la maison, sont dirigées vers les tranchées qui sont alimentées pendant 2 semaines avec 6 semaines de repos.

Les consignes d'alimentation en alternance sont bien suivies par l'utilisateur. Aucun débordement d'eau n'a été observé par l'utilisateur.

L'âge de l'installation est de 4 ans. Les tranchées présentent une dépression par rapport au niveau naturel du sol d'environ 10 cm. Il n'y pas d'échantillon initial de broyat disponible sur ce site, le broyat employé était issu de déchets verts de déchetterie.

Les tranchées ont été creusées par une pelle mécanique dans un sol riche en argile. La présence de graviers grossiers type 0/10 dans ce sol laisse à penser qu'un remaniement a certainement déjà eu lieu. La Photographie 7 visualise cet aspect particulier de traces d'argiles mélangées à une granulométrie plus grossière.



Photographie 7 : Site 2, profil du sol

L'étude de sol réalisée par un bureau d'études spécifiait avant la construction de la maison une perméabilité $K < 5 \text{ mm/h}$ avec impossibilité d'infiltration sur une parcelle proche mais différente de celle où les tranchées sont creusées. Il préconisait un rejet au fossé en bordure de route (au nord-est) avec relevage. Ces conditions techniques naturelles ont poussé les propriétaires à murir leur solution d'assainissement, et c'est ainsi que le choix s'est porté sur des toilettes sèches et un traitement des EM séparé. Lors de la visite, aucun écoulement d'eau n'est à constater ni en fond de tranchée, ni en surface, ni en bout de tranchée en cours d'alimentation. De plus, la haie plantée à proximité (Figure 5) n'a que peu poussé en 4 ans et aucune racine n'est apparue dans les fouilles réalisées dans les filtres.

La végétation à proximité de la tranchée en alimentation est d'un vert vif dû à la présence d'eau alors que celle des tranchées non-alimentées se dessèche. La différence entre la tranchée alimentée et celles en repos est très visible (photographies 8). L'activité biologique y est très visible et confirmée par la présence des poules en liberté autour du filtre en phase d'alimentation.



Photographies 8 : Site 2, aspect général du filtre.

Sur les Photographies 8, on observe à gauche un filtre avec 8 semaines sans alimentation, à droite un filtre en cours d'alimentation.

Au bout de 4 ans de fonctionnement, le broyat est très dégradé dans la tranchée (Photographies 9). Le broyat utilisé, apparenté ici visuellement à un sol limono-argileux (E18), reste grumeleux et semble favoriser l'infiltration.



Photographies 9 : Site 2, aspect du broyat de bois utilisé

3.1.3. Site 3

Le système est installé pour une maison individuelle et traite les EM d'une famille constituée de 2 adultes et 2 enfants. Il y a présence de lixiviats de toilettes sèches à séparation gravitaire dans les EM. Le FBB a 4 ans (construction en 2015) de fonctionnement (Figure 6).

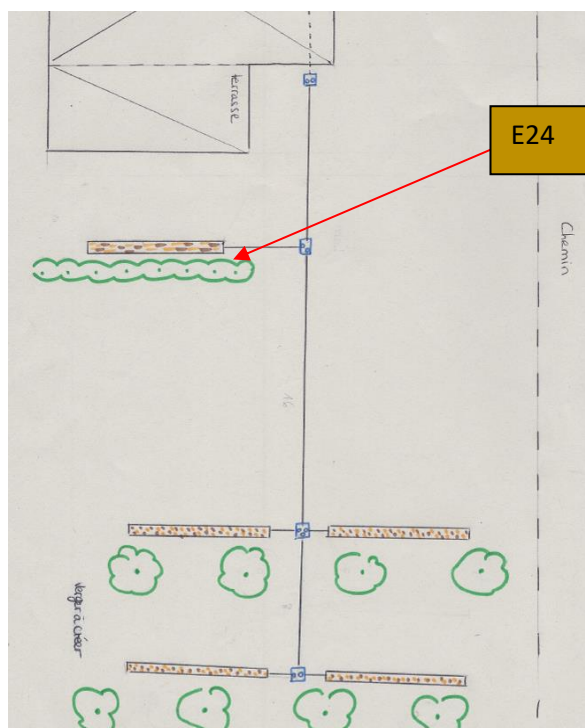


Figure 6 : Plan du site 3 et point de prélèvement.



Photographies 10 : Site 3, aspect général.

Sur les Photographies 10, on observe l'aspect général du filtre à gauche et du broyat frais récemment produit à droite.

Les 5 tranchées ont les dimensions suivantes (L*I*e) de 2,5 m*0,4 m*0,2 m soit une surface totale de 5 m² pour le ménage, soit un dimensionnement de 1,25 m² / EH au total et 0,25 m² / EH sur le filtre en fonctionnement.

Les tranchées ont été creusées à la pelle mécanique dans un sol très argileux avec des argiles grises saturées donc très peu perméables (photographies 11).



Photographies 11 : Site 3, profil du sol.

Sur les Photographies 11, le profil du sol montre clairement la présence d'argiles.

Le broyat utilisé est moyennement dégradé au bout de 4 ans et présente visuellement une bonne capacité de rétention de l'eau.

La baisse du niveau des tranchées par rapport au niveau du sol est faible (environ 5 cm). Le broyat frais est typique de ce que les usagers de l'ANC pourraient autoproduire. Il a été produit avec des coupes

de haies broyées. Depuis 4 ans, il n'y a eu aucun nouvel apport de broyat. L'utilisateur en a fabriqué la semaine de notre passage à base de ronces.



Photographies 12 : Site 3, échantillons de broyat.

Les Photographies 12 présentent à gauche du bois broyé frais (E22) et à droite du broyat utilisé (E24).

L'alimentation est réalisée par l'utilisateur en fonction de la pluie. Pendant la 1^{ère} année, le rythme d'alimentation des filtres a été modifié par l'utilisateur. Ainsi, une tranchée est moins alimentée quand il pleut, l'alimentation est réduite à 1 semaine au lieu des 2 semaines préconisées toutes les 5 semaines. Ce mode de gestion à l'initiative de l'utilisateur est survenu suite à l'observation d'une surverse en bout de filtre la première année de mise en route. La réduction de la phase d'alimentation a effectivement évité les surverses visibles. Ce phénomène de surverses avec un rythme d'alimentation revenue à 2 semaines ne s'est pas réitéré selon l'utilisateur les années suivantes à pluviométrie égale. Il aurait constaté une « amélioration de la perméabilité du sol ».

3.1.4. Site 4

Le système est installé pour une maison individuelle et traite les EM d'une famille constituée de 2 adultes et 3 enfants. Il y a présence de lixiviats de toilettes sèches à séparation gravitaire dans les EM. L'installation a ici 3 ans (construction en février 2016) de fonctionnement (Figure 7).

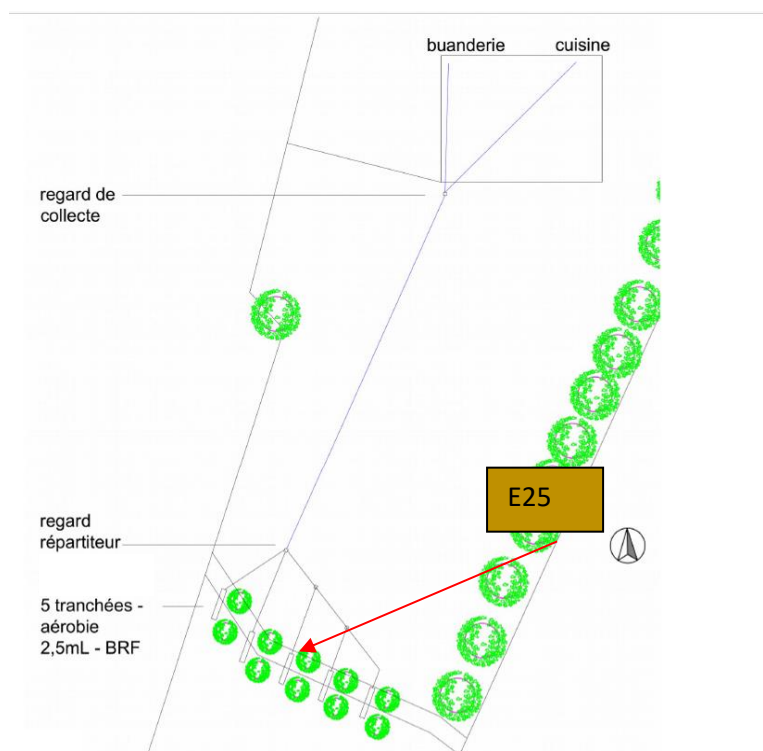


Figure 7 : Plan du site 4 et point de prélèvement.

Les 5 tranchées ont les dimensions suivantes de (L*I*e) de 2,5 m*0,4 m*0,3 m, soit une surface totale de 5 m² pour le ménage, soit un dimensionnement de 1 m² / EH (en assimilant enfants et adultes comme habitants), soit 0,2 m² / EH sur le filtre en fonctionnement.



Photographie 13 : Site 4, aspect général des filtres.

Le broyat a été récupéré en bord de route ; il est donc plutôt issu des branches d'arbres de moyen à gros diamètres. Il a un an d'ancienneté. Une forte dépression par rapport au niveau du terrain est observée dans les tranchées, environ 15 cm (Photographie 13). Le terrain est fortement en pente à l'extrémité des tranchées, il y a une déclinaison naturelle du sol à cet endroit et un entraînement du broyat de bois vers l'aval est suspecté. Un nouvel apport de broyat a eu lieu en 2018.



Photographies 14 : Site 4, échantillons de broyat de bois.

Les Photographies 14 présentent des échantillons de type bois broyés frais à gauche (E26) et broyat utilisé à droite (E25).

Le filtre où a eu lieu le prélèvement est en alimentation depuis 3 semaines. L'utilisateur n'a pas voulu amorcer un changement d'alimentation en sachant notre venue prochaine. Le rythme de rotation habituel est de 2 semaines maximum d'alimentation pour 8 semaines de repos. On y trouve un broyat très dégradé avec un aspect spongieux d'absorption d'eau marqué car aucun ruissellement ni de surface, ni de fond de tranchée n'est observé (

Photographies 14 et 15).



Photographie 15 : Site 4, profil du sol.

Une présence d'eau dans le fond du filtre où a eu lieu le prélèvement, sur le sol argileux est observée (Photographie 15). Cette présence d'eau est limitée aux 20 premiers centimètres de tranchée et sur une hauteur de moins de 1 cm. Elle est probablement due à une alimentation réalisée peu avant notre arrivée.

3.1.5. Site 5

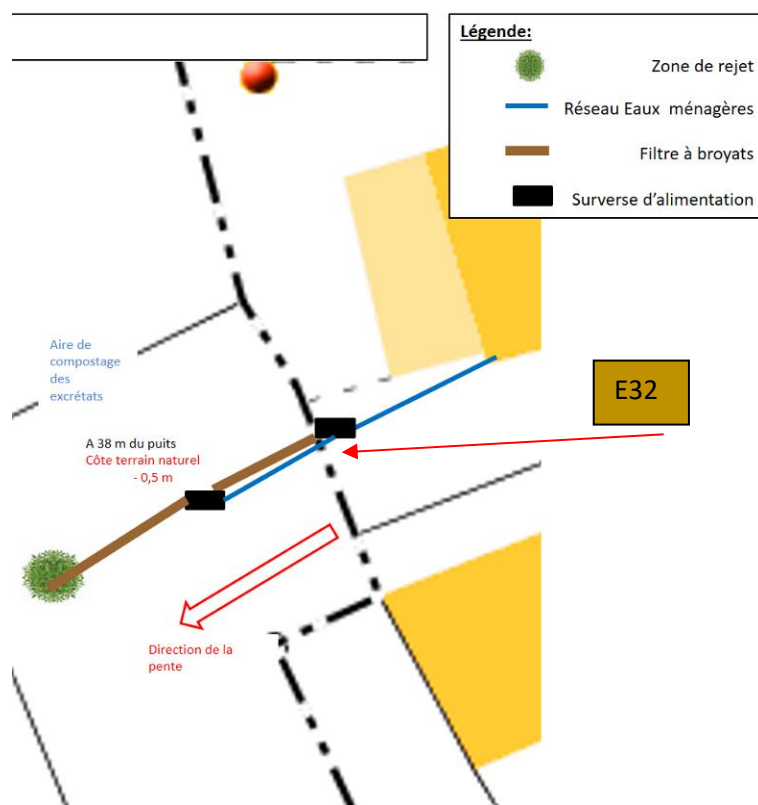


Figure 8 : Plan du site 5 et point de prélèvement.

Le système est installé pour une maison individuelle et traite les EM d'une famille constituée de 2 adultes et 2 enfants. Il y a présence de lixiviats de toilettes sèches à séparation gravitaire dans les EM. L'installation a ici 1,5 ans (mars 2018) de fonctionnement dont une année de résidence secondaire, puis de résidence principale depuis juillet 2019 (Figure 8).

Une tranchée unique de dimensions suivantes de (L*I*e) de 8 m*0,5 m*0,4 m est alimentée en 2 points, soit une surface totale de 4 m² pour le ménage, soit un dimensionnement de 1 m²/EH (en assimilant enfants et adultes comme habitants), soit 0,125 m² / EH sur le filtre en fonctionnement. Aucun écoulement horizontal n'est observé.



Photographies 16 : Site 5, aspect du filtre.

On observe sur les Photographies 16 l'aspect général du filtre à gauche, et le broyat de surface à droite, de type plaquette « bois-énergie » (E2) de dimensions 3*2*1 cm environ. La perte de niveau était d'environ 10 cm en un an par un effet de tassage selon l'utilisateur. Il y a eu un nouvel apport de broyat en 2019 en surface pour maintenir un niveau de garnissage du filtre équivalent à celui du sol. Ce nouveau broyat n'a pas été prélevé.



Photographies 17 : Site 5, échantillon de broyat utilisé.

Sur les Photographies 17, on observe l'échantillon E32 à gauche et le développement d'un biofilm apparenté à des boues avec présences de vers de terre.

Les mesures de perméabilité de sol réalisées en 2014 ont quantifié à 66 mm/h la perméabilité du sol en place à 60 cm de profondeur.

L'alimentation est réalisée en alternance d'une semaine sur l'autre.

Le comportement de la tranchée semble être le suivant : développement d'un film bactérien et organique (Photographies 16) sur le broyat sous la surverse avec une colonisation par la macro-faune (présence d'une « boue » jouant le rôle de rétention d'eau (Photographies 17). Cette « boue » est présente dans les 50 premiers centimètres après la surverse sur toute la hauteur, tandis que sur le reste de la longueur (3,5 m), la colonisation semble n'avoir lieu que dans l'horizon superficiel (10 premiers cm). Le broyat y est humide et semble être stabilisée. Il n'y a pas d'écoulement horizontal observable à l'interface entre le massif de broyat et le sol qui est meuble et spongieux (Photographies 18).



Photographies 18 : Site 5, profil du sol.

Au bout de 1,5 an (âge du site 5), seuls les 50 premiers centimètres de la tranchée montrent des marques de développement d'un biofilm sur le BB.

3.1.6. Site 6

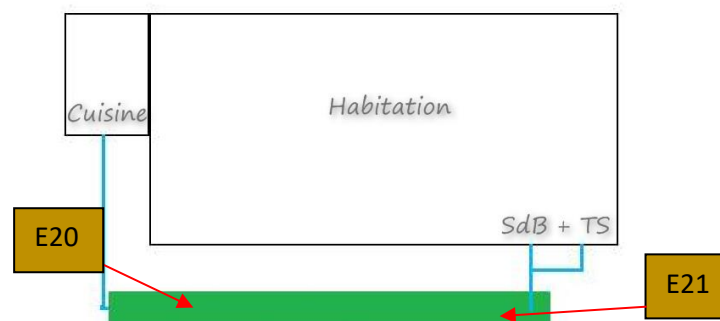


Figure 9 : Plan du site 6 et points de prélèvement.

Le système est installé pour une maison individuelle et traite les EM d'une famille constituée de 2 adultes et 2 enfants.



Photographie 19 : Site 6, aspect général du filtre.

L'installation a ici 9 ans (2010) de fonctionnement (Photographie 19). La conception préconisée ici est ancienne et ne correspond pas à celles des autres sites. Il y a ici absence d'alternance de l'alimentation et séparation à la source des flux de cuisine et de salle de bain. Cette conception ancienne qui n'est plus d'actualité reste, semble-t-il, fonctionnelle sans problème majeur, mais elle sera écartée de l'analyse tant son mode de fonctionnement paraît éloignée des autres installations (Figure 9).

L'unique filtre a les dimensions suivantes de (L*I*e) de 5 m*0,4 m*0,3 m, soit une surface totale de 2 m² pour le ménage, soit un dimensionnement de 0.5 m² / EH (en assimilant enfants et adultes comme habitants). Les toilettes sèches étaient à séparation entre 2010 et 2015 avec une collecte conjointe de l'urine et des eaux de la salle de bain. Les toilettes sèches sont à litière depuis 2015 et l'urine n'est désormais plus dirigée vers le filtre.



Photographies 20 : Site 6, échantillons de broyat de bois.

Le broyat frais employé (E33) est du compost de toilettes sèches d'une granulométrie fine (pPhotographies 20 gauche). Les deux broyats utilisés prélevés (E20) et (E21) ont été mélangés pour obtenir un seul échantillon (E2021). Ce broyat est fortement dégradé jusqu'à obtenir un sol grumeleux de type limono-argileux qui paraît être favorable à la rétention d'eau (Photographies 20 droite). Il est possible de fonctionner pendant 6 ans sans nouvel apport de broyat. Le niveau du filtre marque une dépression d'environ 10 cm par rapport au niveau du sol.



Photographies 21 : Site 6, profil du sol.

Bien que le sol dans lequel la tranchée a été creusée soit fortement argileux (Photographies 21), aucun débordement n'a été observé par l'utilisateur.

3.1.7. Analyse croisée des sites visités

Ces éléments sont issus, soit d'observations issues des visites des sites, soit de la réalité factuelle de chaque installation avec l'analyse de sa conception.

3.1.7.1. Observations et constats

Aucune nuisance n'a été observée sur les installations visitées, ni écoulement de surface, ni débordement, ni flaquage, ni odeur, ni végétation dégradée. Les usagers sont tous satisfaits de leur installation tant en terme d'investissement, que d'entretien ou d'exploitation. En s'intéressant au massif filtrant, il est constaté, même après plusieurs années de fonctionnement, qu'aucune plante ne se développe dans le filtre. Ce sont celles à la périphérie de la tranchée qui le recouvrent et viennent y puiser grâce à leurs racines les éléments dont elles ont besoin (nutriments, eau). Constat est fait que la perméabilité du sol est favorisée. Le massif filtrant présente sur tous les sites une forte activité biologique avec notamment la présence de macro-organismes comme des vers de terre. A terme, dès 2 ans de fonctionnement, le broyat de bois devient un terreau qui ne se colmate pas. La végétation ne pousse pas à l'intérieur des filtres mais à leur périphérie. Même après 9 ans de fonctionnement, la tranchée composant le filtre est facilement visible et accessible à la pelle.

→ **Résultats majeurs**

- Absence de débordement, de flaquage, d'odeur ou de végétation dégradée.
- Forte activité macro-biologique dans les filtres.

3.1.7.2. Données techniques

Les ménages visités sont des ménages types de 4-5 EH (Tableau 7). Le ménage est la base de notre approche de dimensionnement car c'était le cas pour les FPRV-EM. Le coût moyen de l'installation est

faible (environ 1 000 €). Les consommations annuelles en eau potable sont également faibles, en moyenne 86 m³/an/ménage, contre 166 à l'échelle nationale¹⁰ (Tableau 7). Aucune investigation n'a été menée sur la récupération des eaux de pluies. Les EM produites correspondent aux eaux de cuisine, de salle de bain et de nettoyage. Dans certains cas, il est possible d'y retrouver aussi des lixiviats.

	Habitat	Date de mise en route	Coût d'investissement (€ TTC)	Effluent	Conso d'eau potable (m³/an)	
Site 1	Maison individuelle et maison d'accueil de groupes	07 / 2017	2 415 €	3 cuisines collectives + 2 SDB + 1 urinoir	127	
				SDB collective + 1 urinoir		
Site 2	Maison individuelle	2 adultes et 3 enfants	12 / 2015	1 375 €	EM	96
Site 3		2 adultes et 2 enfants	05 / 2015	897 €	EM + Lixiviats	84
Site 4		2 adultes et 3 enfants	04 / 2016	916 €	EM + Lixiviats	45
Site 5		2 adultes et 2 enfants	03 / 2018	500 €	EM + Lixiviats	48
Site 6		2 adultes et 2 enfants	2010	250 €	EM	116

Tableau 7 : Synthèse des données générales des sites visités.

Le Tableau 8 met en avant une hétérogénéité dans le choix des broyats utilisés (compost, plaquettes et bois broyés), dans l'âge des installations (de 1,5 à 9 ans), dans la forme du filtre, dans la rotation de l'alimentation et dans le renouvellement du broyat. 4 sites n'ont pas pratiqué de renouvellement de broyats. Un tassement de massif semble être un phénomène généralisé dont l'amplitude de 5 à 15 cm varie selon les sites. Ce tassement est vraisemblablement dû à une combinaison de phénomènes : typologie du BB, nombre d'années de fonctionnement de l'installation, etc. Un tassement annuel, calculé sur les 6 sites visités est en moyenne de 3,3 cm/an et varie dans une amplitude de 1 à 7 cm/an.

4 sites sur 6 présentent des sols très argileux.

¹⁰ Correspondant à 455 L/j selon Brun *et al.* 2019

	Broyat frais	Broyat utilisé	Usagers réels	Caractéristiques du filtre unitaire L * l * h	Apport de broyat	Tassement moyen (cm/an)
Site 1	DV maison Pas d'échantillon initial	E16 2 ans	20 ¹¹	2,5 m*0,4m*0,3m de hauteur. Sol hétérogène de remblais	2 ans de fonctionnement sans nouvel apport de broyat.	2,5
		E17 2 ans	30 ¹⁰	2,5 m*0,4m*0,3m de hauteur. Sol argileux	2 ans de fonctionnement sans nouvel apport de broyat.	2,5
Site 2	DV de déchetterie Pas d'échantillon initial.	E18 4 ans	5	5 m*0,4m*0,2m de hauteur. Sol existant - Argileux fissuré - K<5mm/h	4 ans de fonctionnement sans nouvel apport de broyat.	1,25
Site 3	DV maison E22	E24 4,5 ans	4	5 m*0,3m*0,2m de hauteur. Sol argileux	4,5 ans de fonctionnement sans nouvel apport de broyat.	1,11
Site 4	DV maison avec 1 an de stockage E26	E25 Mélange 4+2 ans	5	2,5 m*0,4m*0,3m de hauteur. Sol argileux	4 ans de fonctionnement avec nouvel apport de broyat en 2018.	2,5
Site 5	Plaquettes E2	E32 1,5 ans	4	2*4m*0,5m*0,4m. Sol granitique. K=66,2 mm/h	1,5 ans de fonctionnement dont 1 en rés. secondaire.	6,6
Site 6	Compost de toilettes sèches E33	E2021 9 ans	4	5 m*0,4m*0,3m de hauteur. Sol argileux	6 ans de fonctionnement sans nouvel apport de broyat.	-

Tableau 8 : Synthèse des données générales des filtres visités.

	Nombre de filtre	m ² / ménage	Alimentation / Repos (semaine)
Site 1	Ensemble 1 : 8	#NA (19)	1 / 7
	Ensemble 2 : 6		1 / 5
Site 2	4	8	2 / 6
Site 3	5	5	1 / 4
Site 4	5	5	2 / 8
Site 5	2	4	1 / 1
Site 6	1	2	En continue

Tableau 9 : Synthèse des dimensionnements théoriques des filtres visités.

Le Tableau 9 souligne la tendance à un dimensionnement des FBB de 1 m² / EH avec une alternance imposée à l'aide d'au moins 4 filtres.

Regardons plus précisément l'application des volumes hydrauliques estimés¹² à partir de la consommation annuelle d'eau potable sur les surfaces dédiées du tTableau 10.

¹¹ Nombre d'EH moyen estimé

¹² Nous les considérons ici comme équivalents.

Avec un tel dimensionnement, les charges hydrauliques rapportées au filtre en fonctionnement sont dans les gammes habituelles de celles utilisées dans la filière de traitement par filtres plantés de roseaux, à savoir des charges hydrauliques moyennes à 37,5 cm avec un maximum de 60 cm.

	Donnée de conso	Conso journalière : conso*1000/365	Surface		Charge hydraulique sur le filtre en fonctionnement.
			Totale	Du filtre en fonctionnement	
Unité	m ³ /an	L/j	m ²	m ²	L/m ² /j ou cm/j
Site 1	127	348	19	1	34,8
Site 2	96	263	8	2	13,1
Site 3	84	230	5	1	23,0
Site 4	45	123	5	1	12,3
Site 5	48	132	4	2	6,6
Site 6	116	318	2	2	15,9
Moyenne	86	236	4,8*	1,5	17,7

* valeur hors site 1

Tableau 10 : Synthèse des charges observées des filtres visités

Les pratiques de dimensionnement des sites visités ne sont pas stabilisées. Ainsi, les sites visités ont des filtres de dimensions variables. Le principe de construction est un filtre par équivalent habitant pour une surface unitaire comprise entre 0,5 à 1,5 m². Ceci est vrai excepté pour les sites 5 et 6 pour lesquels on compte un seul filtre avec 2 alimentations. Cette alimentation est en alternance pour le site 5 et en continue pour le site 6.

Concernant l'alimentation des filtres, les préconisations sont d'une semaine d'alimentation sur un filtre qui reste ensuite au repos pendant le nombre de semaines en lien avec le nombre de filtres de l'installation.

→ Résultats majeurs

- **Dominance de l'alimentation des filtres en alternance avec des phases de repos de 1 à 8 semaines.**
- **Pas de dimensionnement stabilisé : un filtre par pièce principale pour une surface unitaire comprise entre 0,5 à 1,5 m² avec des charges hydrauliques appliquées classiques.**
- **Les BB employés sont hétérogènes et subissent un tassement dans le temps nécessitant un apport pour un maintien au niveau du sol.**

3.2. Mesures physiques

3.2.1. Granulométrie

Les granulométries des 22 échantillons frais sont présentées dans les 4 graphes de la Figure 10 et l'ensemble des courbes en Annexe 3. Le choix a été fait de prendre comme référentiel les courbes du NF-DTU 64.1 en rouge sur la figure 10. Il est important de rappeler que le NF-DTU 64.1, référentiel en ANC, s'applique à des matériaux sphériques inertes. C'est d'ailleurs l'hypothèse de base de l'essai granulométrique sur tamis. Cette hypothèse de sphéricité n'est pas respectée pour les BB étudiés (voir les photographies 9, 12, 14, 17 et 20).

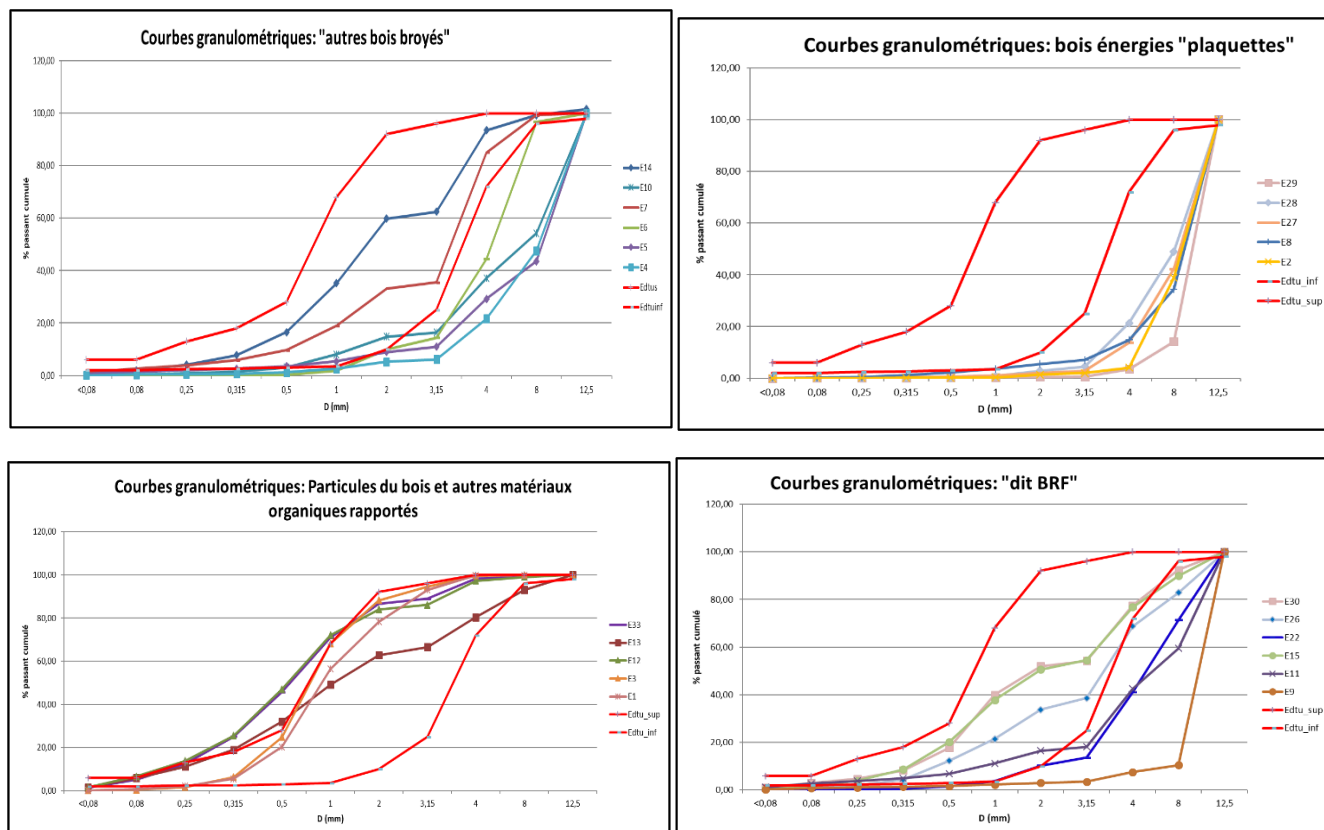


Figure 10 : Courbes granulométriques par typologie de broyat de bois frais.

Les bois broyés industriels de palettes et de grumes en absence d'un criblage en 0/20 mm, sont au-delà du faisceau des courbes de la NF-DTU 64.1 avec une granulométrie supérieure. Les bois broyés de palettes (E14) et de grumes (E7) ont, quant à eux, bien fait office d'un criblage dont la maille de tamis n'a pas été précisée, c'est la fraction « fines » qui a été prélevée, leurs granulométries s'intègrent exactement dans le fuseau du NF-DTU 64.1. Aucun de ces « autres bois broyés » n'a été utilisé dans les sites visités de l'étude.

Les bois énergies sont tous en dessous du faisceau de la NF-DTU 64.1 y compris celui utilisé sur le site 5 (E2).

Les particules du bois et autres MO rapportées sont tous dans la proximité haute du faisceau de la NF-DTU, ainsi que le compost (E33) utilisé sur le site 6 (en violet).

Les bois broyés « dit BRF », y compris ceux des sites 3 et 4, sont dans la proximité basse du faisceau. La typologie « autres bois broyés » présente des échantillons les plus hétérogènes.

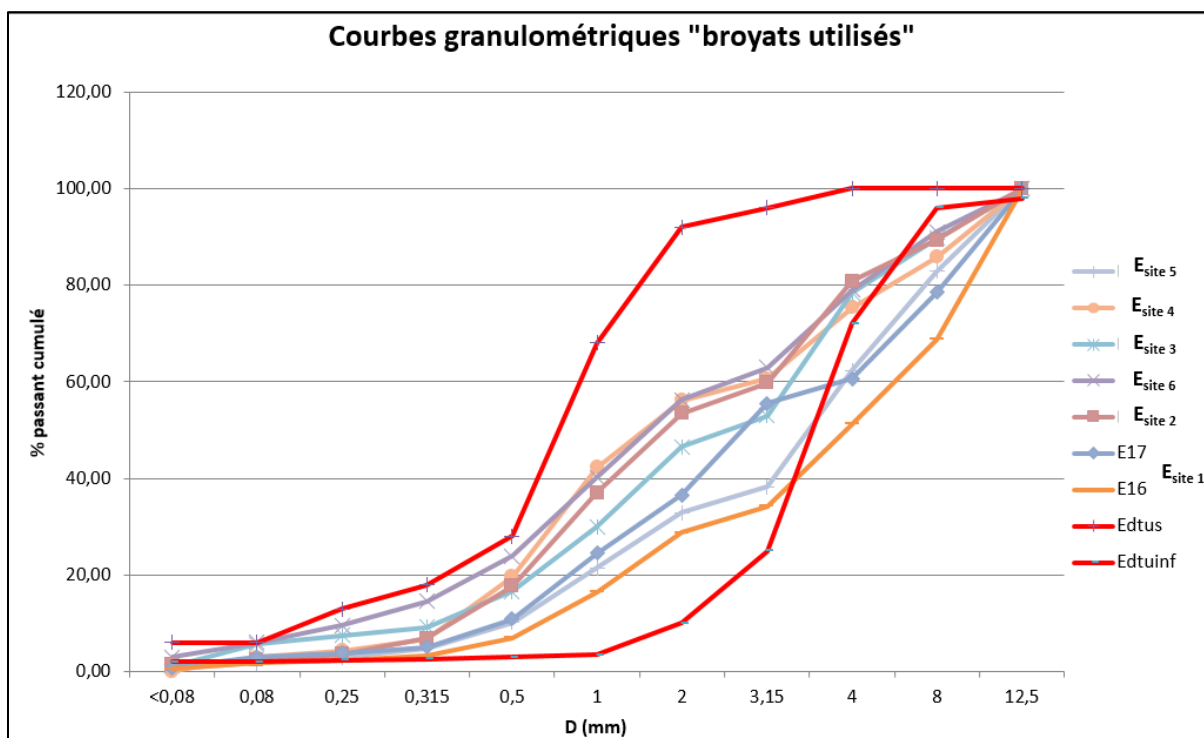


Figure 11 : Courbes granulométriques de tous les broyats de bois utilisés.

Pour les broyats utilisés et âgés de 1,5 à 9 ans, on observe, à l'aide de la Figure 11, un lissage de la diversité des broyats frais vers une homogénéité proche du faisceau granulométrique de la NF-DTU 64.1. Ce constat surprenant ne trouve pas d'explications spécifiques à ce jour. Lors de la mesure granulométrique, des agglomérats (petites boules) ont été observés dans les différents tamis (Photographies 22).



Photographies 22 : Agglomérats de différentes tailles dans l'échantillon E24.

Cette tendance est confirmée par l'analyse comparative de l'évolution des broyats sur les 4 sites visités. Les flèches de la Figure 12 montrent l'évolution du broyat frais vers le broyat utilisé. Ainsi, pour le site 6, la granulométrie du broyat frais se situe à gauche du faisceau de la NF-DTU 64.1 tandis que pour les sites 3 et 5, elles se situent à droite et pour le site 4 elle est dans le faisceau. Selon leur granulométrie initiale, les 4 broyats de bois évoluent, soit vers un matériau plus fin, soit vers un matériau plus grossier, pour tendre vers une granulométrie unique.

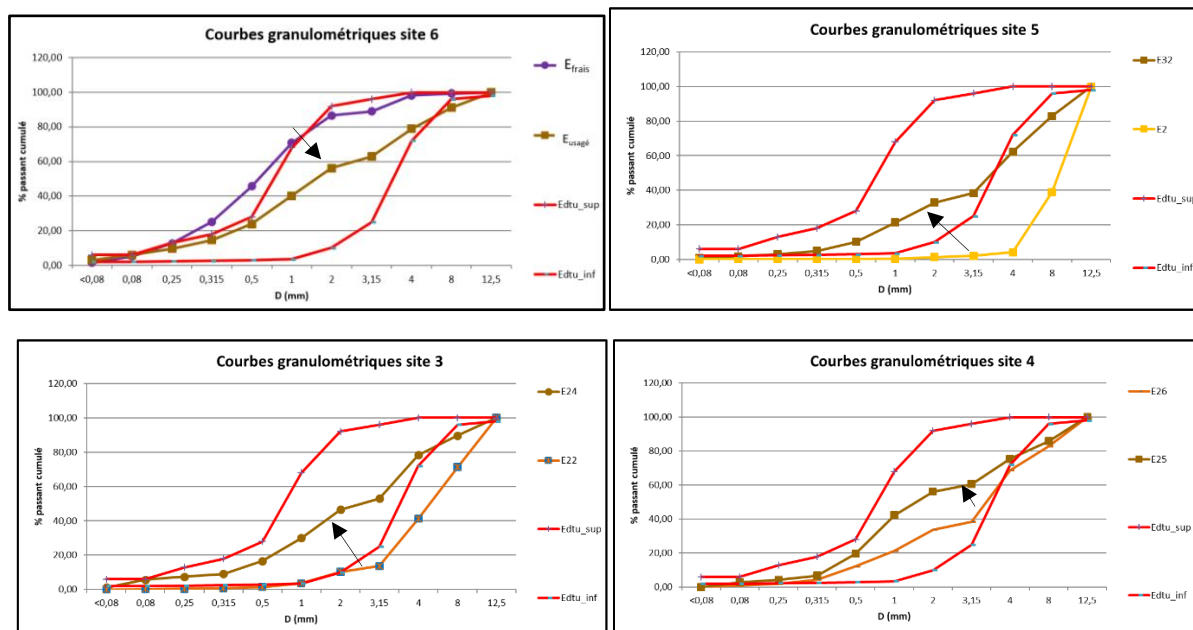


Figure 12 : Evolution des courbes granulométriques sur les sites visités.

Il semble logique que les matériaux se désagrègent dans le temps et que leurs tailles diminuent. En revanche, il est surprenant qu'un matériau fin à l'origine évolue vers une granulométrie plus grossière.

Les agglomérats observés s'écrasent avec la main en collant aux doigts. Il est alors possible d'observer des morceaux de BB très petits comme des échardes enrobées de terre. Cette fraction de terre s'écrase à la main et colle aux doigts. Ainsi, elle est supposée argileuse. Cette fraction argileuse semble provenir, soit de l'interaction avec le sol en place, soit de la dégradation des broyats par des organismes comme les excréments de vers de terre.

La dégradation des matières organiques serait alors ralentie par la création d'un tel complexe argilo-humique (Chenu, 2001). Notons que la teneur en fines (granulométrie inférieure à 80 μm) des broyats utilisés ne dépassent pas 3 % de la masse (valeur max de 2,96 % pour l'échantillon collecté âgé de 9 ans E2021=E_{site 6}). Une hypothèse plausible est que, pour les broyats les plus fins (au-dessus du faisceau NF-DTU 64.1), il y ait un phénomène de perte des fines par lessivage au cours du temps. *A priori*, la taille initiale des particules de broyat n'impacte pas la granulométrie du massif sur le long terme, même si des broyats grossiers ralentissent le processus de leur dégradation dans un premier temps (Iqbal *et al.*, 2014).

La granulométrie des broyats utilisés semble être indépendante de celle du broyat frais.

- ➔ **Résultat majeur :** compte tenu de l'évolution de la granulométrie initiale des substrats, la granulométrie n'est pas un critère de choix du broyat de bois frais.
- ➔ **Perspectives de recherche :** explorer l'interface sol – BB.

3.2.2. Densité

Les mesures de masse d'un volume connu (1 l) ont été réalisées par les échantillons soumis à deux conditions préalables différentes :

- La première sur des broyats secs, c'est-à-dire après un passage à l'étuve à 105 °C.
- La seconde mesure a été réalisée sur des broyats saturés en eau (immersion dans l'eau pendant 24 h, puis égouttés).

Le fait de prendre des broyats secs pour la première mesure pourrait correspondre à un filtre sec en phase de repos depuis plusieurs semaines. Considérer des broyats saturés en eau pour la seconde mesure donne une idée pour un filtre en cours d'alimentation depuis plusieurs jours (voir chapitre 3.1). Notons que lors de la mise en œuvre des BB dans les tranchées, aucun compactage n'est préconisé. On peut assimiler la mesure de densité à une densité en « foisonné ».

Echantillon		Densité du broyat (kg/m ³)		Ratio humide / sec	Moyenne des ratios
		sec	humide		
Bois broyés	E14	135	320	2,37	2,69
	E7	151	354	2,34	
	E6	125	339	2,71	
	E10	133	300	2,26	
	E5	161	349	2,17	
	E4	170	319	1,88	
	E15	86	638	7,42	
	E26	153	482	3,15	
	E30	192	347	1,81	
	E22	230	379	1,65	
	E31	266	414	1,56	
	E11	160	446	2,79	
	E9	85	249	2,93	
Bois énergie	E2	81	344	4,25	2,46
	E27	181	327	1,81	
	E8	167	357	2,14	
	E28	177	338	1,91	
	E29	146	320	2,19	
Particules du bois	E1	147	505	3,44	3,55
	E3	109	399	3,66	
Autres matériaux organiques	E12	341	759	2,23	3,58
	E13	300	535	1,78	
	E33	117	789	6,74	
Broyats utilisés	E2021	627	1455	2,32	1,97
	E25	914	928	1,02	
	E16	671	464	0,69	
	E17	325	905	2,78	
	E24	448	933	2,08	
	E32	235	685	2,91	

Tableau 11 : Densités des broyats¹³.

On observe une forte hétérogénéité des densités des broyats frais (Tableau 11) avec une amplitude de 81 à 789 kg_{MS} de broyat par m³. Les valeurs de densité sont proches de celles identifiées dans la littérature (voir Tableau 1). Il ne semble pas justifié de réaliser une interprétation par typologie de BB. En revanche, une analyse comparant BB frais et BB utilisés, est conduite.

¹³ Le référentiel de la couleur des sites est présenté dans le tableau 5.

Densités moyennes (kg _{broyat} /m ³)	Broyats frais				Broyats utilisés			
	Nbre éch.	Sec	Humide	Ratio humide / sec	Nbre éch.	Sec	Humide	Ratio humide / sec
Bois énergie	5	150	337	2,24	1	235	685	2,91
Bois broyés	13	157	380	2,42	5	589	807	1,37
Particules du bois	2	128	452	3,53	-	-	-	-
Compost*	3	253	694	2,74	1	627	1455	2,32
Broyats utilisés	-	-	-	-	6	537	895	1,67
Médiane	22	153	354	-	7	590	810	-
Moyenne		166	418	-		540	780	-
Minimum		81	249	-		320	460	-
Maximum		341	789	-		910	1020	-

* : valeur en guise de référentiel

Tableau 12 : Densités moyennes par typologie de broyat.

L'augmentation de la densité du simple au double de la densité des broyats « utilisés » comparé aux broyats « frais » est vraie pour tous les types de BB (Tableau 12). Cette augmentation est due à une déstructuration du BB associée à une évolution de la granulométrie et à la compaction du matériau. En effet, les plus fortes granulométries (bois énergie) semblent présenter une augmentation de densité plus faible, mais la mesure des broyats utilisés est réalisée sur des matériaux ayant seulement 1,5 an de fonctionnement.

On observe également une réduction généralisée (sauf pour le bois énergie sur une durée de 1,5 an) du ratio de densité humide/ densité sèche au cours du temps pour les broyats utilisés (Tableau 13).

Le fait de réaliser un ratio entre le broyat utilisé et le broyat frais apporte des valeurs différentes à ceux réalisés sur, soit uniquement sur le broyat frais, ou uniquement sur le BB utilisé.

Densités moyennes (kg _{broyat} /m ³)	Ratio broyat utilisé / broyat frais		
	Nbre de site	Sec / sec	Humide / humide
Bois énergie	1	2,9	2,0
Bois broyés	2	3,5	2,2
Compost*	1	5,6	1,6

* : valeur mentionnée en tant que référence connue

Tableau 13 : Ratio d'évolution des broyats par famille.

En regardant l'évolution des ratios entre broyats frais et utilisés, une certaine homogénéité est observable (Tableau 13) quelle que soit la typologie de broyat de bois initiale. Par ces différents ratios, ce sont les différences de conditions de fonctionnement qui sont exprimées : alternance et durée de l'alimentation. Ainsi, l'écart de densité diminue quand le BB est humide, en cours d'alimentation. En effet, la densité du matériau humide augmente moins que la densité du matériau sec.

- ➔ **Résultat majeur :** la densité du broyat de bois dans le massif a tendance à augmenter du simple au double dans le temps, voir davantage
- ➔ **Perspectives de recherche :** analyser le rôle des périodicités d'alternance de l'alimentation dans l'évolution de la densité.

3.2.3. Porosité

La mesure de la porosité des différents broyats permet d'évaluer la quantité d'eau qui peut circuler au sein du broyat de bois (détail des valeurs en Annexe 5).

Les broyats utilisés ont une porosité légèrement plus faible que les broyats frais (Tableau 14). L'espace inter-granulaire pourrait se combler au cours du temps. La plus faible porosité de 47 %, obtenue pour le compost du site 6, au bout de 9 ans de fonctionnement, correspond à une situation particulière car l'alimentation n'y est pas alternée. Pour les autres sites aux conditions de fonctionnement plus classiques dont l'alimentation alternée, on observe une porosité d'environ 55 % au bout de 4 ans de fonctionnement (site 4). Ainsi, la porosité du massif filtrant à BB reste dans l'ordre de grandeur de celle d'un sol¹⁴ non colmaté à savoir une porosité moyenne comprise entre 30 et 50 % (Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 2011).

D'un autre côté, dans les procédés de traitement par cultures fixées sur un matériau inerte comme le sable, il est observé par le développement du biofilm une baisse de porosité et de perméabilité du massif au cours du temps. Dans le cas des FBB, la perte de perméabilité due à la croissance bactérienne pourrait être compensée par la dégradation du support qui génère de la porosité.

	Echantillon	Porosité ($V_{\text{eau}} / V_{\text{total}}$)		Âge du broyat utilisé
		Broyat frais	Broyat utilisé	
Site 3	E22	68 %		4,5 ans
	E24		64 %	
Site 4	E26	66 %		4 ans (nouvel apport 2 ans)
	E25		56 %	
Site 5	E2	71 %		1,5 ans
	E32		70 %	
Site 6	E33	76 %		9 ans
	E2021		47 %	
Villalobos Garcia (2018)	Géométrie circulaire	+/- 40 %		
	Autres matériaux	70 à 90 %		

Tableau 14 : Valeurs de porosité des broyats de bois « frais » et « utilisés ».

Cette situation du maintien d'une porosité favorable au traitement s'explique par plusieurs hypothèses qui devraient être validées par des mesures complémentaires :

- Rôle des longues périodes de repos (plusieurs semaines).
- Rôle du développement de la biomasse à l'interface entre le BB et le sol.

➔ **Résultat majeur :** le BB possède encore une porosité favorable aux écoulements malgré les évolutions structurelles du matériau au cours du temps.

➔ **Perspectives de recherche :** rôles des longues périodes de repos et du développement de la biomasse à l'interface entre le BB et le sol.

¹⁴ Porosité d'un sable peu compact = 25 à 40 % et d'une argile = 40 à 50 %. Source : Massenet (2019).

3.2.4. Capacité d'absorption d'eau

La mesure de la capacité d'absorption des différents broyats permet de quantifier la masse d'eau qui peut être stockée dans le broyat de bois.

La capacité d'absorption d'eau peut s'exprimer soit :

- en proportion du poids sec.
- en proportion du volume du broyat sec en utilisant sa densité.

Les valeurs des capacités d'absorption d'eau des échantillons sont toutes disponibles en Annexe 4. L'interprétation qui suit ne porte volontairement que sur les évolutions comparées entre broyats de bois frais et utilisés.

Les capacités d'absorption exprimées en proportion des volumes fournissent des résultats plus aisés d'interprétation que celles exprimées en proportion de masses. Un volume de BB est plus concret qu'une masse de BB.

A cet effet, la capacité d'absorption volumique est calculée selon les équations suivantes :

- (i) Densité sèche

$$D_s = [g_{\text{broyat } \lambda \text{ sec}}] / [ml_{\text{éprouvette}}]$$

- (ii) Capacité d'absorption massique du broyat frais ou utilisé (%)

$$Capa_m = [g_{H_2O}]^{15} / [g_{\text{broyat } \lambda \text{ sec}}]$$

- (iii) Capacité d'absorption volumique du broyat frais ou utilisé (%)

$$Capa_{vol} = Capa_m * D_s$$

- (iv) Capacité d'absorption volumique du broyat utilisé ramené à la densité du broyat frais sec (%)

$$\begin{aligned} Capa_{vol \text{ utilisé sur } D_s \text{ frais}} &= Capa_m \text{ utilisé} * D_s \text{ frais} \\ &= ([g_{H_2O}]^{16} / [g_{\text{broyat } \lambda \text{ utilisé sec}}]) * ([g_{\text{broyat } \lambda \text{ frais sec}}] / [ml_{\text{éprouvette}}]) * 100 \end{aligned}$$

Avec :

- g_{H_2O} : la quantité d'eau évaporée à 105°C en gramme correspondant à la différence entre la masse de l'échantillon λ saturée en eau pendant 24h moins la masse de l'échantillon à 105°C à poids constant ($\geq 24h$ d'exposition).
- $g_{\text{broyat } \lambda \text{ sec}}$: masse constante finale de l'échantillon λ en gramme après passage à l'étuve à 105°C.
- $g'_{\text{broyat } \lambda \text{ sec}}$: masse de l'échantillon λ en gramme introduit dans une éprouvette de 1000 mL.
- $ml_{\text{éprouvette}}$: volume utile de l'éprouvette en mL

Une évolution de la capacité d'absorption de l'eau des broyats de bois utilisés par rapport aux broyats frais semble être observée (Tableau 15) lorsque l'on compare les capacités d'absorption rapportées à un volume. Pourtant, ces capacités d'absorption tiennent compte simultanément de deux évolutions : celle de la capacité d'absorption du matériau utilisé et celle de la densité de ce même matériau. Pour évaluer la part d'évolution à attribuer réellement à la capacité d'absorption, les calculs sont également conduits en utilisant la densité initiale du matériau, assimilé à la densité sèche car le matériau n'est pas à saturation.

¹⁵ Au regard des incertitudes, on considère ici que la densité de l'eau à 20°C est de 1 g/cm³, soit 1 g_{eau} = 1 ml_{eau}.

L'analyse complémentaire de l'évolution des capacités d'absorption dans le temps (Tableau 15) :

- Il semble qu'en neutralisant l'évolution de la densité dans le temps grâce au calcul de l'équation (iv), la capacité d'absorption n'évolue pas ou peu dans le massif filtrant. En effet, pour un même volume de BB, la masse augmente au cours du temps et la capacité d'absorption reste stable (iv).
- Pour l'unique compost suivi (site 6), les évolutions sont disparates.

	Echantillon	Capa. d'abs. massique ($g_{H_2O} / g_{broyat\ sec}$) équation (ii)		Capa. d'abs. volumique ($V_{eau} / V_{broyat\ sec}$) équation (iii)		Capa. d'abs. vol. ramené à la densité du broyat frais équation (iv)	Age du broyat utilisé
		Broyat frais	Broyat utilisé	Broyat frais	Broyat utilisé	Broyat utilisé	
Site 3	E22	1,4		21 %			4,5 ans
	E24		1,6		52 %	24 %	
Site 4	E26	1,2		24 %			4 ans (nouvel apport 2 ans)
	E25		1,3		45 %	24 %	
Site 5	E2	1,3		11 %			1,5 ans
	E32		1,7		40 %	14 %	
Site 6	E33	3,2		37 %			9 ans
	E2021		0,9		60 %	11 %	

Tableau 15 : Evolution des capacités d'absorption de l'eau sur les sites visités.

Les valeurs des capacités d'absorption observées sont conformes aux valeurs issues de la bibliographie pour 11 types de broyat de résidus agricoles (Iqbal *et al.*, 2013) et identifiées entre 1,28 à 3,81 $g_{H_2O} / g_{broyat\ sec}$. Selon cette étude, les capacités d'absorption augmentent avec la décomposition des tissus, générant des pores favorables à l'augmentation de la porosité intra-matériaux. La densité des tissus du broyat conditionne les caractéristiques de stockage de l'eau (rétention et transport) dans le sol (Iqbal *et al.*, 2013). A titre comparatif, pour un substrat minéral, la capacité d'absorption reste inférieure à 5 % ; elle est essentiellement due à la capillarité. Pour des sables 0-4 mm, elle est de 0,4 à 3,8 % (Dubois, 2018). Les mesures chimiques sur les BB (voir 3.3 ci-après) et leur évolution viendront apporter des précisions.

Au-delà d'une analyse de flux au sein du massif, le maintien dans le temps de la capacité d'absorption du massif de BB est une information favorable au maintien de conditions adéquates d'humidité favorables au développement bactérien.

- ➔ **Résultat majeur :** la capacité d'absorption du BB dans le massif se maintient au cours du temps.
- ➔ **Perspectives de recherche :** réaliser des mesures adaptées de perméabilité sur le massif.

3.2.5. Analyse croisée des paramètres physiques

L'analyse conjointe des mesures de porosité, de densité et de capacité d'absorption d'eau des broyats de bois, permet d'évaluer les écoulements de l'eau par une approche volumique dans le massif filtrant. Au regard des informations collectées, une hypothèse de modélisation crédible serait la suivante :

- Dans cette phase, le broyat de bois frais et grossier présente une forte porosité grâce à l'agencement des particules favorable à générer des vides accessibles à l'eau. Cette forte porosité engendre une forte perméabilité qui diminue par remplissage des pores libres par de la matière organique provenant soit des EM, soit du développement d'un film bactérien, soit de

l'accumulation de résidus de dégradation du broyat, etc. Simultanément à la diminution de la perméabilité du massif, la capacité d'absorption augmente. L'évolution de la dégradation naturelle du BB sera précisée grâce aux résultats des analyses chimiques ci-après. Pour ce qui est de la perméabilité, il conviendrait de réaliser des mesures avec des colonnes de grands diamètres pour limiter les effets de bord.

- Dans un second temps, les différents types de broyats frais montrent une tendance à l'uniformisation du massif filtrant. Le passage d'une gamme de substrats aux caractéristiques physiques hétérogènes vers une matrice plus homogène est encourageant pour un fonctionnement stabilisé qui est caractérisé par :
 - Une granulométrie du massif similaire à celle du faisceau de la NF-DTU 64.1.
 - Une densification progressive du massif qui pourrait laisser penser à un potentiel colmatage sur les sites visités (limités à 2 sites).
 - La porosité et la capacité d'absorption d'origine des BB sont élevées et restent stables au cours du temps. Tandis que pour les matériaux inertes comme le sable ces paramètres sont à l'origine plus faibles et diminuent au cours du temps. Ces 2 éléments viennent s'ajouter aux observations suivantes :
 - L'absence de colmatage et de conditions d'anaérobiose.
 - Une bonne circulation de l'eau dans le massif.

L'ensemble de ces conditions favorise le maintien d'un temps séjour de l'effluent dans le massif favorable à la dégradation de la pollution organique apportée par l'effluent. Il est difficile d'estimer la fin exacte de cette phase si ce n'est par la présence d'eau de surface stagnante ou de débordements, éléments non observés à l'échelle de temps de la présente étude.

- Enfin, une troisième phase de décroissance de cette capacité d'absorption due à une dégradation trop importante du massif menant à une densification de celui-ci en l'absence de renouvellement du broyat. Pour autant, il n'a pas été observé, ni la présence d'eau en surface, ni de débordement. La dynamique biologique au sein du massif filtrant favorise-t-elle l'infiltration dans le sol environnant qui est dans le contexte des visites réalisées très argileux ? Cette troisième phase resterait à être confirmée par les mesures chimiques à venir ou d'autres types de mesures à explorer.

3.3. Mesures chimiques

Le bois est composé d'un réseau structuré de cellules dont la paroi est constituée de substances macromoléculaires. Par ordre de quantité de masse décroissante, on retrouve la cellulose, les lignines, les hémicelluloses et les extractibles. A l'intérieur, la cellule est constituée d'eau, de protéines et de minéraux (Figure 13). Ce réseau influence tant les mécanismes de dégradation du bois que ceux de la rétention et de la circulation en eau.

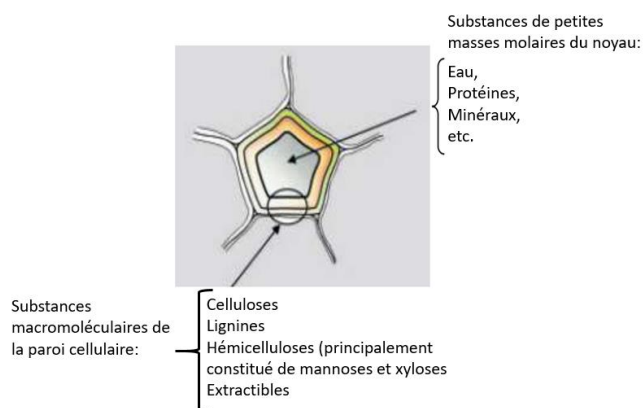


Figure 13 : Constitution d'une cellule du bois. Source : (Damay, 2014).

L'objectif de la mesure de l'ensemble de ces composants chimiques est de mieux comprendre les processus de dégradation du BB et d'identifier les constituants résiduels (Figure 14). Rappelons que des variations des teneurs en substances macromoléculaires peuvent être observées entre différentes essences de bois, types de broyats, mais aussi au sein même d'un individu en fonction de multiples paramètres (point de prélèvement, âge, altitude, etc.).

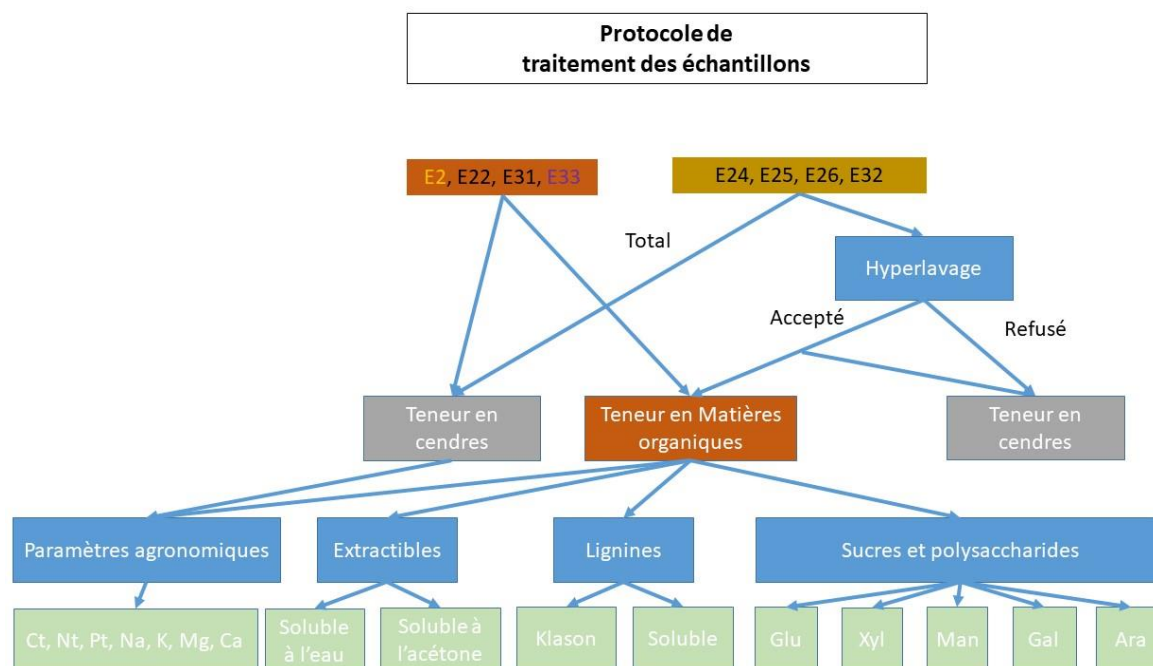


Figure 14 : Résumé du protocole des analyses chimiques.

Les méthodes utilisées pour quantifier les composants sont totalement indépendantes et les résultats, exprimés en pourcentage, font référence à des masses différentes les uns des autres. L'exercice d'élaboration de bilan matière est généralement complexe. De plus la méthode de reconstitution utilisée ici empêche, de fait, le bouclage du bilan matière. Dès lors, il sera évalué de façon indirecte, après avoir rapporté les constituants à des masses fictives identiques.

3.3.1. Hyperlavage

On souhaite, par ces mesures physiques, analyser la part organique du bois. Certains échantillons qui présentent une forte proportion de matière inorganique comme des graviers notamment, ont dû être lavés. Lors de ces lavages, les fractions refusées, c'est-à-dire dissoutes et emportées par les eaux de lavage, ne sont pas mesurées. Tous les échantillons de BB frais n'ont pas nécessité un lavage préalable à l'analyse. Seuls E24, E26, E25 et E32 sont concernés par ce lavage (Tableau 16).

	Echantillon	Fraction		Pertes (%)
		acceptée (%)	refusée (%)	
Site 3	E24 _{utilisé 4,5 ans}	16,9	65,9	17,1
Site 4	E26 _{frais}	66,8	32,2	1,0
	E25 _{utilisé 4+2 ans}	7,6	51,4	41,0
Site 5	E32 _{utilisé 1,5 ans}	46,3	47,7	5,9

Tableau 16 : Résultat des lavages

Les résultats de certains échantillons très riches en matières minérales sont dès lors à prendre avec précaution lorsque les pertes sont importantes. C'est le cas de E25 et de E24 dans une moindre mesure, pour lesquels la fraction acceptée, c'est-à-dire la fraction sur laquelle les analyses chimiques des

constituants du BB ont été réalisées, est très faible. Pour E25, la fraction acceptée est de seulement 7,6%. L'hypothèse que ce BB contienne également du sol en place grâce à un transport par la macro-faune du sol (vers de terre, taupes, etc.) dans le massif est envisagée.

Ainsi, une colonne « représentativité de l'échantillon par rapport à sa masse totale initiale » dénommée « Rep. » sera reproduite dans les tableaux à venir afin d'apporter cet élément analytique contextuel dans l'interprétation des résultats.

3.3.2. Paramètres agronomiques et nutriments

	Echantillon	Rep ¹⁶ . (%)	C _t % MS	N _t % MS	P _t % MS	Na % MS	K % MS	Mg % MS	Ca % MS
Site 3	E22 _{frais}	100	45,4	1	0,1	0,01	0,6	0,2	1,5
	E24 _{utilisé 4,5 ans}	16,9	43,4	1,7	0,2	0,05	0,2	0,2	2,7
Site 4	E26 _{frais}	66,8	43,7	0,9	0,1	0,01	0,4	0,1	1,8
	E25 _{utilisé 4+2 ans}	7,6	41,7	1,6	0,2	0,03	0,1	0,1	3,6
Site 5	E2 _{frais}	100	46,6	0,2	0,01	<LD	0,1	0,01	0,1
	E32 _{utilisé 1,5 ans}	46,3	46,1	0,8	0,1	0,04	0,1	0,1	0,4
Site 6	E33	100	42,4	1,8	0,5	0,47	0,1	0,2	1,6
	E2021		12	1	0,2	0,03	0,2	0,2	1,4

Tableau 17 : Teneurs des paramètres agronomiques et nutriments.

Moyennant conversion, les valeurs obtenues sont dans le périmètre de celles de la littérature présentées dans le Tableau 1. Les teneurs en C_t du BB sont stables dans le temps et soulignent une évolution peu marquée de la composition des BB. Les teneurs de certains paramètres soulignent l'intérêt agronomique de ces BB (Tableau 17) dont les valeurs dépassent les seuils fixés (C_t < 17 %, K_t et P_t < 3 %)¹⁷. La tendance à l'augmentation généralisée des nutriments Mg, Ca et Na pourrait s'expliquer par une captation des apports par les EM.

La quantité d'azote totale dans le massif a tendance à doubler dans le temps. Cette accumulation a déjà été observée sur des BB dans des contextes agricoles (Hua *et al.*, 2016) ; les taux d'accumulation sont associés au temps de contact entre l'effluent et le BB. Toutefois, cette mesure doit être prise avec prudence car il peut aussi s'agir d'un artefact de mesure. En effet, la minéralisation du support engendre une évolution du bilan des masses. L'azote total initialement majoritairement organique dans le BB, évolue aussi au cours du temps. Des mesures des formes organique et minérale de l'azote dans les BB frais et utilisés doivent permettre d'apporter des éléments d'explication sur les processus en cours dans le massif.

	Echantillon	Ratio C / N	Ratio C / N / P
Site 3	E22 _{frais}	47	100 / 2,1 / 3
	E24 _{utilisé 4,5 ans}	25	100 / 3,9 / 4,7
Site 4	E26 _{frais}	51	100 / 2 / 2
	E25 _{utilisé 4+2 ans}	27	100 / 3,7 / 4,1
Site 5	E2 _{frais}	186	100 / 0,5 / 0,2
	E32 _{utilisé 1,5 ans}	58	100 / 1,7 / 1,9
Site 6	E33	23	100 / 4,3 / 11,9
	E2021	12	100 / 8,3 / 14,5

Tableau 18 : Ratio d'équilibre favorable à la dégradation biologique aérobie

¹⁶ Rep =représentativité de l'échantillon par rapport à sa masse totale initiale.

¹⁷ NF U 44-051 et NF U 44-095.

Nous proposons de poursuivre l'analyse en procédant à des comparaisons avec des indicateurs connus :

- Le ration C/N indicateur du processus de compostage : ce ratio C/N est ici trop élevé pour considérer que la dégradation soit du ressort d'un compostage aérobie (Tableau 18). En effet, il y a assez d'azote pour une décomposition aérobie par compostage si $C/N < 20$. Cela montre aussi une situation de maintien de « faim d'azote » pour les bactéries présentes dans le massif filtrant. Comparés au carbone, l'azote et le phosphore total ont tendance à augmenter entre les BB utilisés et les BB frais. Pour ces deux paramètres, l'enrichissement peut s'expliquer essentiellement par les apports issus des EM ou par une fixation biologique due au biofilm.
- Le rapport C/N/P indicateur des conditions de développement microbien : attention cet indicateur concerne les éléments dissous (avec un support liquide : les eaux usées) et le rapport idéal est évalué à 100/5/1. Que ce soit pour les broyats frais ou utilisés, ce rapport sur un support solide cette fois montre une carence en azote et un excès en phosphore dans les BB (Tableau 17). L'augmentation au cours du temps de l'azote et du phosphore entraîne pour les broyats utilisés que la carence en azote se restreint et l'excès de phosphore s'accroît.

Dans la mesure où les EM sont également relativement pauvres en nutriments, l'ensemble BB avec épandage d'EM ne semble pas être, d'un point de vue analytique un écosystème favorable au développement biologique.

- ➔ **Résultat majeur** : le BB utilisé conserve sa composition d'origine en C.
La dégradation du BB n'est pas du ressort d'un processus de compostage. Le BB a tendance à capter de l'azote et du phosphore.
- ➔ **Perspectives de recherche** : identifier les formes organiques et minérales du phosphore et de l'azote pour identifier les processus en cours.

3.3.3. Teneurs en cendres

L'analyse des teneurs en cendres démontre une baisse généralisée de la teneur en MO dans le BB au cours du temps (Tableau 19). En effet, l'augmentation des taux de cendres dans les échantillons de broyats utilisés par rapport aux broyats frais traduit une plus forte présence de matières minérales. Pour les broyats frais, les teneurs en cendres les plus fortes concernent le compost E33 et le BB E26 déjà légèrement dégradé par un stockage extérieur à l'air libre pendant un an. Pour les broyats utilisés, ce sont les sites les plus âgés qui présentent des teneurs en cendres les plus élevés.

	Echantillon	Rep ¹⁸ . (%)	Teneurs en cendres totales (%)
Site 3	E22 _{frais}	100	4,8
	E24 _{utilisé 4,5 ans}	16,9	42,3
Site 4	E26 _{frais}	66,8	16,7
	E25 _{utilisé 4+2 ans}	7,6	56,6
Site 5	E2 _{frais}	100	0,4
	E32 _{utilisé 1,5 ans}	46,3	42,1
Site 6	E33	100	16,6
	E2021	-	76,5

Tableau 19 : Teneurs en cendres sur les sites visités.

¹⁸ Rep = représentativité de l'échantillon par rapport à sa masse totale initiale.

Les matières minérales sont apportées soit par la minéralisation du broyat de bois suite à sa dégradation soit par les EM, soit par la faune du sol (transport). Ces augmentations de la teneur en cendres sont en accord avec les augmentations des densités des massifs filtrants décrites précédemment.

L'échantillon E2021 contient beaucoup de matières minérales (plus de 75 %) et cette composition n'est pas adaptée aux protocoles des analyses chimiques détaillant ses constituants. Il ne fera pas l'objet d'analyses de composition en substances macromoléculaires.

→ **Résultat majeur** : l'augmentation des teneurs en cendres du massif filtrant au cours du temps marque une minéralisation progressive du BB du massif.

3.3.4. Substances macromoléculaires

3.3.4.1. Teneurs en extractibles

Les extractibles du bois sont des molécules se trouvant à l'extérieur des parois cellulaires du bois. Elles confèrent aux arbres des traits distinctifs et sont les principaux responsables de la résistance à la dégradation par des attaques extérieures dont les attaques biologiques (Hannouz, 2014).

D'un point de vue analytique, il est nécessaire de les extraire pour éviter leur comptabilisation comme lignine ou (hémi-)celluloses.

Site	Echantillon	Rep ¹⁹ (%)	Extractibles solubles à l'eau (%)	Extractibles solubles à l'acétone (%)	Extractibles totaux (%)
3	E22 _{frais}	100	5,7	2,3	8,0
	E24 _{utilisé 4,5 ans}	16,9	2,5	1,7	4,2
4	E26 _{frais}	66,8	2,7	1,8	4,6
	E25 _{utilisé 4+2 ans}	7,6	3,1	2,8	5,9
5	E2 _{frais}	100	2,4	0,9	3,3
	E32 _{utilisé 1,5 ans}	46,3	1,8	0,7	2,5
6	E33	100	8,4	1,5	9,9
	E2021	-	-	-	-
Stevanovic et al. (2009)	Résineux	-	-	-	3 +/- 2 %
	Feuillus	-	-	-	5 +/- 3 %
Taux optimaux pour le traitement - Villalobos Garcia (2018)		-	-	-	5 à 8 %

Tableau 20 : Teneurs en extractibles²⁰.

Du fait de la précision des mesures, seuls les écarts de plus de 0,5 % peuvent être interprétés.

Ainsi, les valeurs de E26 et de E25 peuvent être considérées comme quasi similaires.

Les taux d'extractibles solubles des 4 BB frais sont différents car elles sont fonction des essences de bois (Tableau 20). Ainsi un compost riche en bois de chêne (E33) présente un taux élevé donc résistant à la dégradation, tandis qu'un résineux (E22) ou un broyat de bois plus ancien (E26) présentent des taux plus faibles donc moins résistants à la dégradation.

¹⁹ Rep = représentativité de l'échantillon par rapport à sa masse totale initiale.

Les extractibles solubles à l'eau sont majoritaires par rapport aux extractibles solubles à l'acétone. Ainsi, le lessivage des broyats utilisés par les EM engendre une perte des extractibles qui peut avoir pour effet de fragiliser le broyat de bois et ainsi favoriser sa dégradation.

- **Résultat majeur** : les extractibles qui protègent le BB de sa dégradation diminuent au cours du temps ce qui rend les BB plus fragiles.
- **Perspectives de recherche** : étudier les raisons de la diminution en extractibles, 2 hypothèses se dessinent :
 - Lessivé par le passage des eaux ménagères.
 - Consommé par le biofilm.

3.3.4.2. Teneurs en lignines

On constate que les broyats utilisés exposés aux EM présentent une augmentation de la teneur en lignine totale par rapport aux broyats frais (Tableau 21). La forte présence de lignine dans le BB frais est souvent inversement corrélée à sa dégradation (Coppens *et al.*, 2007).

	Echantillon	Rep ²¹ . (%)	Lignine Klason (%)	Lignine soluble (%)	Lignine totale (%)
Site 3	E22 _{frais}	100	26,6	1,9	28,5
	E24 _{utilisé 4,5 ans}	16,9	51,6	2,3	53,9
Site 4	E26 _{frais}	66,8	33,5	3,1	36,6
	E25 _{utilisé 4+2 ans}	7,6	48,2	2,0	50,3
Site 5	E2 _{frais}	100	28,7	0,2	29,0
	E32 _{utilisé 1,5 ans}	46,3	35,1	0,6	35,7
Site 6	E33	100	40,7	1,7	42,4
Stevanovic <i>et al.</i> (2009)	Résineux	-	-	-	28 +/- 3 %
	Feuillus	-	-	-	20 +/- 4 %

Tableau 21 : Teneurs en lignines.

Cette augmentation est à considérer avec prudence car elle peut être due à plusieurs raisons :

- Un artefact qui résulte du calcul vis-à-vis de la masse de référence du lessivage ou de la dégradation des autres composés du bois dans l'échantillon (cellulose, hémicelluloses et extractibles), c'est-à-dire que, si la lignine est moins dégradée que les (hémi)-celluloses (voir ci-dessous), le pourcentage de lignine sur la masse totale du bois augmente de fait.
- Un apport extérieur de lignine (fibres alimentaires des EM ou faune du sol).
- La présence des produits de dégradation de la lignine qui se retrouvent dans la lignine elle-même et dans les extractibles (Hannouz, 2014). En effet, lorsque le BB frais se dégrade, la lignine reste dans le massif filtrant, tout en continuant à se dégrader.

La combinaison des 3 hypothèses listées ci-dessus est certainement l'hypothèse globale la plus réaliste, les proportions de chacune d'entre elles sont inconnues au stade de cette étude.

L'analyse conduite laisse donc la possibilité que la lignine se maintienne, voire régresse. L'hypothèse du maintien de la lignine dans le temps au sein du massif filtrant expliquerait les bonnes conditions hydrauliques observées sur les sites visités et confirmées par les mesures physiques. Le contexte plus général de dégradation du broyat de bois dans le sol, avec maintien de la lignine, va aussi dans ce sens selon Iqbal *et al.* (2013).

²¹ Rep = représentativité de l'échantillon par rapport à sa masse totale initiale.

- ➔ **Résultat majeur** : la lignine semble rester dans le massif. Si tel est le cas, elle participe au maintien de la structure du BB ce qui expliquerait les conditions hydrauliques favorables au traitement décrites au chapitre 3.2.

3.3.4.3. Teneurs en cellulose et en hémicelluloses

Les valeurs obtenues dans ce chapitre ont un niveau de précision plus élevé que précédemment à savoir de 0,1 à 0,2 %. Tous les échantillons de BB utilisés présentent une réduction des teneurs en cellulose et en hémicelluloses par rapport aux BB frais. Une réduction importante de la teneur en cellulose est observée pour tous les broyats utilisés (Tableau 22).

	Echantillon	Rep ²² . (%)	Total cellulose (%)	Perte en cellulose (%)	Total hémicelluloses (%)	Perte en hémicelluloses (%)
Site 3	E22 _{frais}	100	32,9	-63,2	15,8	-19,8
	E24 _{utilisé 4,5 ans}	16,9	12,1		12,7	
Site 4	E26 _{frais}	66,8	21,0	-38,5	17,8	-29,4
	E25 _{utilisé 4+2 ans}	7,6	12,9		12,6	
Site 5	E2 _{frais}	100	41,2	-33,4	24,7	-24,9
	E32 _{utilisé 1,5 ans}	46,3	27,4		18,6	
Site 6	E33	100	23,4	-	15,3	
Stevanovic et al. (2009)	Résineux		42 +/- 2 %	-	27 +/- 2 %	
	Feuillus		45 +/- 2 %	-	30 +/- 5 %	

Tableau 22 : Teneurs en cellulose et hémicelluloses.

La dégradation de la cellulose se révèle plus importante que celle subie par les hémicelluloses et se confirme pour tous les échantillons analysés contrairement à ce que souligne la littérature. En effet, certaines pourritures fongiques ont une préférence pour les hémicelluloses et les lignines avant d'attaquer la cellulose (voir la thèse de Damay, 2014 page 31). Ce constat a d'ailleurs surpris le FCBA qui le mentionne dans le compte rendu analytique fourni.

Cette dégradation rapide, dès 1,5 an sur le site 5, favorise la porosité entre les tissus de lignine du bois et donc favorise l'absorption de l'eau (Iqbal et al., 2013). Cependant, cellulose et hémicelluloses dans la décomposition des paillasses agricoles sont généralement considérées ensemble. Il pourrait être pertinent de mieux comprendre l'impact sur le comportement du massif filtrant qu'engendrent les différences de cinétique de dégradation entre ces deux substances sachant que le glucose est apparenté à la cellulose.

Les teneurs des autres sucres constituant les hémicelluloses, en particulier le xylose et le mannose, sont également réduites après l'exposition aux EM (Tableau 23). Cette réduction est moins importante que celle observée pour le glucose, équivalant à la cellulose.

²² Rep = représentativité de l'échantillon par rapport à sa masse totale initiale.

	Echantillon	Rep ²³ . (%)	Sucres et Polysaccharides (%)				
			Glucose	Xylose	Mannose	Galactose	Arabinose
Site 3	E22 _{frais}	100	32,9	12,3	n.d.*	1,7	1,8
	E24 _{utilisé 4,5 ans}	16,9	12,9	6,6	1,3	1,8	2,2
Site 4	E26 _{frais}	66,8	22	12,9	1,6	1,1	1,3
	E25 _{utilisé 4+2 ans}	7,6	14,2	5,5	2,0	2,1	1,7
Site 5	E2 _{frais}	100	44,4	5,7	13,3	1,4	1,1
	E32 _{utilisé 1,5 ans}	46,3	29,8	4,3	9,7	1,4	0,8
Site 6	E33	100	26	6,0	4,1	1,9	0,6

Tableau 23 : Teneurs en sucres et polysaccharides.

Généralement, quand le glucose (et le xylose en moindre quantité) se dégrade, les autres sucres ont tendance à augmenter en proportion (même phénomène cité précédemment avec la lignine) ce qui est en partie observable sur le Tableau 23 pour le galactose et l'arabinose.

Les sucres, représentant une partie du carbone du bois qui se dégrade, vont enrichir le milieu filtrant et certainement l'eau en cours de traitement (Gorini *et al.*, 2011).

- ➔ **Résultat majeur :** la décomposition plus intense de la cellulose et des hémicelluloses favorise la porosité du massif avec un maintien de la lignine comme structurant ce qui expliquerait les conditions hydrauliques favorables au traitement décrites au chapitre 3.2.
- ➔ **Perspectives de recherche :** identifier les raisons et les impacts sur le massif des cinétiques « inhabituelles » de dégradation des hémicelluloses, cellulose et lignine. Identifier la relation entre dégradation des sucres et évolution de la DCO dans l'effluent.

3.3.5. Analyse croisée des paramètres chimiques

L'analyse conjointe des mesures chimiques permet de préciser le contexte de dégradation des BB dans le massif filtrant (Tableau 24).

Plusieurs paramètres (taux de cendres, rapport C/N) démontrent une dégradation avec une minéralisation du massif filtrant dans le temps dans le cadre d'un processus relativement lent qui n'est pas du ressort d'un processus de compostage. Cette dégradation se confirme notamment par une diminution du taux d'extractibles (lessivage par les EM ou action du développement d'un biofilm sur le BB) qui fragilise les parois des BB. Ce serait alors la cellulose, puis les hémicelluloses qui sont dégradées en priorité puis la lignine. La cinétique de cette dégradation du BB est relativement lente. Cela est favorable pour le traitement des EM car le support qu'est le BB se maintient dans le temps malgré le contact avec les EM.

²³ Rep = représentativité de l'échantillon par rapport à sa masse totale initiale.

Paramètre	Résultat majeur	Perspectives
Cendres	Le massif se minéralise au cours du temps avec une diminution sans équivoque de la matière organique.	-
Extractibles	Les extractibles qui protègent le BB diminuent au cours du temps ; les BB deviennent plus fragiles.	Appréhender les raisons de la diminution en extractibles, 2 hypothèses se dessinent : • Lessivés par le passage des eaux ménagères. • Consommés par le biofilm.
Lignines	La lignine semble rester dans le massif en participant au maintien de la structure du BB et ainsi des conditions hydrauliques favorables au traitement.	-
Hémicelluloses et cellulose	La décomposition plus intense de la cellulose et des hémicelluloses favorise la porosité du massif avec un maintien de la lignine comme structurant.	Identifier les raisons et les impacts sur le massif des cinétiques « inhabituelles » de dégradation des hémicelluloses, de la cellulose et des lignines. Identifier la relation entre dégradation des sucres et évolution de la DCO dans l'effluent.
Agronomiques	La minéralisation du massif est lente, de fait elle n'est pas du ressort d'un processus de compostage. Le massif filtrant a tendance à capter de l'azote et du phosphore. Le ratio C/N/P du BB ne semble pas favorable au développement biologique.	Identifier les formes organiques et minérales du phosphore et de l'azote pour identifier les processus en cours. Apport des EM pour obtention du ratio C/N/P en adéquation pour leur traitement ?

Tableau 24 : Synthèse des paramètres chimiques.

Cette situation manifestement peu habituelle de dégradation prioritaire de la cellulose (voir la thèse de Damay, 2014 page 31) se développe dans un contexte qui semble peu favorable au développement biologique. En effet, deux hypothèses vont dans ce sens :

- La dégradation de la cellulose, préalablement aux hémicelluloses, pourrait être due plus à une consommation par les champignons que par les bactéries. En effet, Coppens *et al.* démontrent en 2007 que c'est principalement du fait du développement d'une moisissure propre au broyat que celui-ci se dégrade dans le sol. Toutefois, un biofilm d'origine bactérienne est observé sur les sites visités. Les bactéries de ce biofilm peuvent trouver également (en même temps ou successivement ?) des éléments nutritifs au sein des EM assurant ainsi le traitement des eaux à traiter. En comparaison à un support inerte, le BB est une source potentielle de carbone pour les bactéries. Mais nous ne savons pas si ces bactéries sont les mêmes que celles impliquées dans les processus de dégradation de la pollution des eaux.
- Le rapport C/N/P habituellement utilisé pour qualifier le potentiel d'un effluent liquide au développement bactérien, ici calculé sur une matrice solide (le BB utilisé réduit en poudre) ne représente pas les conditions optimales au développement des bactéries en charge du traitement (100/5/1). Il y aurait une carence en azote et un excès en phosphore malgré le fait que les données agronomiques de comparaison BB frais vs BB utilisé démontrent une captation dans le temps de ces deux éléments dans notre étude, comme c'est le cas notamment dans l'ajout de BB dans les sols agricoles (Coppens *et al.*, 2006).

Les mécanismes chimiques de dégradation du BB sont favorables au traitement des EM car ils maintiennent une structure de massif qui est globalement favorable au traitement. Au-delà des perspectives de recherche pour chacun des paramètres (Tableau 24) c'est globalement **l'activité biologique dans le massif** qu'il conviendrait de préciser :

- Quel est le rôle de l'interface avec le sol en place dans notre contexte ?
- Quelle est l'action des champignons dans la dégradation du bois ?
- Les bactéries en charge de la dépollution se nourrissent-elles du support ?

La réponse à ces questions dans notre contexte particulier doit pouvoir s'appuyer sur les travaux déjà réalisés. En effet, Coppens *et al.* démontrent également en 2007 qu'il n'y a que peu d'interaction avec le sol dans la dégradation chimique des broyats. En est-il de même pour la dégradation biologique ? C'est la moisissure qui serait l'élément limitant dans la dégradation et non pas l'azote.

4. Discussion

La discussion est initiée en deux temps. Il s'agit d'abord à partir des visites sur sites et des résultats analytiques obtenus sur le BB frais ou utilisés de mieux comprendre les processus d'évolution du BB recevant des EM. Puis, grâce à une analyse s'appuyant sur le génie des procédés des dispositifs de traitement par cultures fixées sur support fin, nous proposons une réflexion autour du dimensionnement des filtres.

4.1. Perception des processus en cours

4.1.1. Analyse croisée visites – physique – chimie

Le volume de BB dans les tranchées diminue au cours du temps, un ajout de BB d'une fréquence annuelle environ pour revenir à un niveau de remplissage équivalent à l'origine est une pratique courante. D'un point de vue analytique, les analyses chimiques confirment que le BB se densifie au cours du temps.

La fraction organique du bois se minéralise progressivement. Par une diminution du taux d'extractibles, il est possible d'établir une fragilisation des parois cellulaires des constituants du bois. En revanche, cette évolution reste lente ; la lignine est toujours présente dans des proportions volumiques équivalentes. Sans pouvoir expliquer l'ensemble de la chaîne de causalité, on établit un lien entre cette évolution structurelle et les évolutions des granulométries. De façon surprenante, les granulométries de quatre BB, très différentes à l'origine, évoluent vers une granulométrie équivalente, non seulement avec une diminution de la taille des BB pour 3 d'entre eux mais aussi une augmentation pour le quatrième. Ainsi, la granulométrie du BB n'est pas un critère de choix initial et les tranchées semblent pouvoir être garnies de tous types de BB.

Les particuliers ne se sont plaints d'aucun débordement ou flaquage dans les tranchées. Les porosités des BB et leurs capacités d'absorption évoluent peu au cours du temps, elles restent donc toujours très supérieures aux valeurs d'un matériau-support inerte tel que le sable. La capacité d'un sol à garder le broyat humide ou non joue également un rôle sur la dégradation de ce dernier (Iqbal *et al.*, 2015). Sans pouvoir le démontrer, il est probable que l'alimentation alternée en EM contribue au maintien de la porosité avec la disparition de l'eau (évaporation, absorption par la végétation, infiltration) pendant les longues phases de repos.

Au-delà des parois cellulaires, la dégradation du BB en profondeur est surprenante : la décomposition plus intense de la cellulose par rapport aux hémicelluloses n'est pas courante selon la littérature. Ce constat laisse présager l'existence de mécanismes de dégradation hautement complexes faisant intervenir l'ensemble des organismes vivants : bactéries, champignons, mais aussi de macro-organismes comme les vers de terre, Les visites de terrain ont permis de constater visuellement cette richesse faunistique. L'interface entre le sol naturel en place et le broyat de bois joue probablement un rôle majeur dans cet équilibre biologique maintenu en aérobie tel que l'atteste l'absence de nuisance olfactive perçue par les particuliers.

Une synthèse de ces réflexions est reprise sous la forme du Tableau 25.

Critère	Visites de sites	Physique	Chimie
Choix du BB	Les BB employés sont hétérogènes (granulométrie, production, distribution, usages).	La granulométrie du BB n'est pas un critère de choix ; les granulométries des BB utilisés sont similaires et indépendantes de celles des BB frais.	
Renouvellement du BB dans le temps	La hauteur de BB dans les filtres (tassement / dégradation) nécessite un apport pour un maintien au niveau du sol.	La densité du broyat de bois dans le massif augmente au cours du temps.	Les extractibles diminuent, ce qui fragilise le BB qui se minéralise lentement (MO en diminution). Ce phénomène n'est pas du ressort d'un processus de compostage.
Evolution dans le temps du BB, en tant que media support au traitement	Absence de débordement, de flaquage ou d'odeurs. Alimentation des filtres en alternance avec des phases de repos très variables (1 à 8 semaines).	Les BB frais ou utilisés possèdent une porosité favorable aux écoulements. Les capacités d'absorption des BB dans le massif restent équivalentes qu'ils soient frais ou utilisés.	La décomposition plus intense de la cellulose puis des hémicelluloses, en l'absence de décomposition de la lignine donne aux BB utilisés une structure favorable au développement des bactéries pour le traitement.
Activité biologique dans le BB	Forte activité macro-biologique dans les filtres.	Le maintien de la porosité dans le temps favorise des conditions aérobies au sein du massif.	Les BB s'enrichissent en azote et en phosphore. Le ratio C/N/P du BB frais ou utilisé ne semble pas favorable au développement biologique.

Tableau 25 : Synthèse des résultats majeurs par critère

4.1.2. Mise en perspective

En complément de la bibliographie, il ressort que la décomposition du broyat pourrait ne pas être homogène au sein du filtre. Il semblerait que le fond du filtre en contact avec le sol se décomposerait plus vite que la surface en contact avec l'atmosphère, le milieu ayant un comportement intermédiaire. Le cas du paillage avec de la canne à sucre a notamment été étudié et montre que les pertes en carbone organique à la base du filtre (minéralisation) sont fonction du taux d'humidité. (Dietrich *et al.*, 2019). Cependant, la dégradation chimique des broyats ne serait pas due aux interactions avec le sol, mais davantage issue du développement d'une moisissure propre au broyat. La moisissure serait l'élément limitant dans la dégradation du BB et non pas l'azote (Coppens *et al.*, 2006). L'alternance qui apporte des périodes de sécheresse ralentirait la dégradation du BB.

Pour d'autres types d'effluents, notamment agricoles, la décomposition du BB a tendance à accroître les concentrations de certains éléments contenus dans les eaux percolant à travers le filtre en DCO dissoute, avec des concentrations élevées lors de la mise en route (lessivage du BB frais), puis en forte diminution avec le temps (Abusallout *et al.*, 2017). Cet accroissement de concentrations est à évaluer pour le traitement des EM.

D'un autre côté, les broyats ont un impact positif sur le traitement des nitrates. Il est démontré en agriculture que durant la première année de fonctionnement d'un filtre, les broyats perdent 50 % de leur réactivité de traitement des nitrates, puis se stabilisent dans le temps. En effet, la captation de nitrates passe de 15,4 à 23 mg N/L/j pour des BB frais, à 12,1 mg N/L/j au bout d'un an, puis à 9 mg N/L/j pour

des BB avec 7 ans de fonctionnement (Robertson, 2010). Il ne s'agit pas nécessairement d'un objectif dans notre contexte, mais il est intéressant de constater ce phénomène de stabilité même si les taux sont relativement faibles. A contrario, pour les FPR, un phénomène de relargage des nitrates est généralement observé lors de la mise en route des filtres.

Le matériau BB que l'on suppose être le support de bactéries capables de dégrader la pollution apportée par les EM possède des propriétés physiques initiales favorables à un traitement par voie aérobie. Les évolutions des propriétés mesurées, tant physiques que chimiques, ne montrent pas de signes défavorables au maintien de ces conditions de dégradation aérobie.

Ces premiers constats n'expliquent pas les mécanismes de dégradation des eaux ménagères au sein du BB ; ils permettent encore moins de quantifier les performances. Pour répondre à ces questions, il conviendrait de développer un programme de recherche complet dont l'une des principales contraintes consisterait à intégrer le rôle de l'interface BB - sol en place. Pour cela, il devient nécessaire de développer une méthode analytique adaptée qui puisse notamment permettre de collecter dans le sol, un effluent traité par le FBB non étanché.

Les constats de terrain et les analyses physicochimiques montrent un fort potentiel de cette technologie simple de réalisation, d'usage et d'entretien. Le paragraphe suivant analyse, avec un regard spécifique de génie des procédés des dispositifs de traitement par cultures fixées sur support fin, les dimensionnements des FBB utilisés.

4.2. Dimensionnement des FBB

Il est proposé d'aborder le dimensionnement des filtres en portant une analyse complémentaire aux données du suivi *in situ* du RAE en 2017 (Brun *et al.*, 2017). Ce suivi *in situ* permet d'alimenter notre démarche basée sur l'analyse des charges surfaciques appliquées aux FBB à partir de la connaissance des charges réelles en EM à traiter.

4.2.1. Charges surfaciques appliquées

Pour chacun des sites du suivi *in situ*, une moyenne des 3 bilans 24 h réalisés sur chaque site (excepté pour le site 15 avec 2 bilans) avec des préleveurs automatiques est présentée dans les Tableau 26 et 27.

Pour l'ensemble des sites, les charges moyennes journalières de pollution produites par ménage en volume, en DBO₅ et en DCO sont inférieures aux valeurs repères de dimensionnement (Tableau 26), à savoir respectivement 455 L/j, 140 g/j et 338 g/j pour un ménage type de 4-5 EH. Les valeurs du ménage du site 16 se situent au maximum de l'échantillon pour les paramètres DCO et DBO₅, mais n'atteint pas la moitié de ce standard. Il est précisé que les ménages suivis ne sont pas particulièrement engagés dans un mode de vie écologique et sont considérés comme représentatifs de l'ANC.

N° du site	Nbre de filtres	Surface totale de filtration (m²)	Volume d'eau consommé (L / j ²⁴)	Charge organique	
				DCO	DBO ₅
				(g / j)	
13	3	4,5	74	29	6
14	4	6	255	88	41
15	1	4	266	107	63
16	4	6	258	198	77
17	2	2	313	-	-
18	1	3	112	30	-
Moyenne	2,5	4,25	222	87,4	46,5
Valeurs repère pour le dimensionnement			455	338	140

Tableau 26 : Charges hydrauliques et organiques de 6 filtres à BB suivis en 2017 selon Brun et al. (2017).

La consommation moyenne en eau potable des 6 sites visités en 2019 (Tableau 7) de 236 L/j est également en deçà de la valeur repère. Cette valeur repère pour le dimensionnement des ouvrages de traitement intègre les variations quotidiennes des consommations journalières et elle correspond au percentile 90 % des valeurs de charges en EM. L'élaboration de la caractérisation des EM sur la base du percentile 90 % (455 L/j) inclue une marge de sécurité confortable par rapport aux pratiques moyennes de terrain et permet d'accepter des pointes de charges hydrauliques induites par la simultanéité entre la production d'EM et leur traitement. Le FBB, ayant probablement un effet tampon à quantifier (voir le chapitre sur les capacités d'absorption), devrait être en mesure d'absorber ces pics.

Les charges organiques mesurées des sites suivis sont toutes très en deçà des valeurs repères et atteignent aux mieux 50 % de ces références. Il n'est pas possible de savoir comment se comporteraient les différents filtres si leur charge atteignait ces valeurs repères.

Les charges hydrauliques appliquées au filtre en fonctionnement (Tableau 27) varient dans une amplitude importante (4 à 32 cm/j). Sur le site n°17, elle est proche de la valeur seuil de dimensionnement, déterminée pour un 1^{er} étage de filtres plantés de roseaux et fixée à 37,5 cm/j sans atteindre le maximum acceptable de 60 cm/j. Notons que c'est sur ce site qu'il y avait le plus grand nombre d'usager lors des prélèvements. Même avec de telles valeurs, aucun flaquage n'a été observé, le filtre ayant été dimensionné en fonction de la perméabilité du sol. En moyenne, elles correspondent à une lame d'eau journalière de 13,7 cm/j. Elles sont du même ordre de grandeur que celles calculées (Tableau 10) lors des visites réalisées en 2019.

²⁴ Consommation réelle relevée au compteur

N° du site	Surface totale (m²)	Sur le filtre en fonctionnement			
		Surface (m²)	Charge hydraulique (cm / j)	Charges organiques	
				DCO (g / m² / j)	DBO ₅
13	4,5	1,5	4,9	19,5	3,8
14	6	1,5	17,0	58,7	27,3
15	4	4	6,6	26,6	15,7
16	6	1,5	17,2	132,3	51,3
17	2	1	31,3	-	-
18	3	3	3,7	9,9	-
moyenne	4,25	2,1	13,7	48,7	24,5
Réf. FPR (Dotro et al., 2017)	-	-	moy : 37,5 max : 60	350	150

Tableau 27 : Charges surfaciques appliquées au filtre en fonctionnement selon Brun et al. (2017).

En ce qui concerne les charges organiques surfaciques, elles varient dans une gamme de 10 à 132 g/m²/j de DCO et de 4 à 52 g/m²/j de DBO₅. Le site 16 semble être en surcharge par rapport aux autres en supportant des charges organiques appliquées au filtre en fonctionnement plus élevées. Ce site 16 comporte 4 filtres, tout comme le site 14, dont la charge surfacique appliquée est également élevée (58,7 g/m²/j).

Du fait de la conception en plusieurs massifs fonctionnant en alternance, les calculs de charges appliquées surfaciques sont conduits sur la surface complète des filtres à BB. Elles sont comparées aux pratiques courantes des procédés de traitement basés sur les processus du développement de cultures fixées sur des supports fins dont le matériau le plus courant est le sable. Ces charges surfaciques sont comparées à celles des filtres à sable en ANC (Dubois et al., 2016) et à l'infiltration-percolation en assainissement collectif (Dubois et al., 2016). Cette comparaison est réalisée à titre exploratoire, les 2 matériaux étant très différents. Le sable est minéral et inerte tandis que le BB présente une fraction organique importante et évolutive dans le temps.

Site	Surface totale (m²)	Charge organique surfacique totale (g DBO ₅ / m² / j)
Site 13	4,5	1,3
Site 14	6	6,7
Site 15	4	15,7
Site 16	6	12,8
Moyenne des sites 13 à 16	5,1	9,1
Filtre à sable ANC	-	8,4
Infiltration percolation AC	-	12,5

Tableau 28 : Charges appliquées à la surface totale des filtres

En comparant avec les filtres à sable vis-à-vis des charges de DBO₅ appliquées au m² (Tableau 28), les charges organiques appliquées aux filtres varient de 1,3 à 15,7 g/m²/j de DBO₅. La charge moyenne appliquée est de 9,1 g/m²/j de DBO₅ sur les sites du suivi ; elle est comprise entre la charge organique appliquée au filtre à sable de l'ANC et à l'infiltration-percolation de l'AC.

Vis à vis des pratiques en ANC (filtre à sable) et d'un fonctionnement sur un massif unique, il convient d'ajouter les effets probablement positifs de l'alternance de l'alimentation sur de nombreux filtres générant de longues périodes de repos.

4.2.2. Un dimensionnement unique à confirmer

Au regard des charges à traiter et de leurs applications surfaciques, la base empirique de dimensionnement des FBB à $1 \text{ m}^2 / \text{EH}^{25}$ semble être adaptée, les observations de terrain faisant ressortir une absence de risque sanitaire et aucun dysfonctionnement.

Il est donc proposé de traiter les EM par des FBB constitués de plusieurs filtres indépendants alimentés en alternance.

Les éléments disponibles ne permettent pas d'estimer et encore moins de garantir les performances de tels FBB. A contrario, les analyses physico chimiques réalisées laissent à penser que le BB est un bon support pour obtenir une dégradation biologique aérobie, bien qu'il ne soit pas inerte.

Pour une homogénéisation des pratiques de terrain, les recommandations issues de l'ensemble des réflexions conduites au cours de cette étude peuvent se résumer à :

La filière Filtres à Broyat de Bois pour les Eaux Ménagères (FBB-EM) est constituée de plusieurs fouilles uniques indépendantes à fond incliné de type tranchées non étanchées. Chaque tranchée comporte une alimentation, par le dessus, située sur un substrat végétal de type broyat de bois, permettant l'épandage dans le massif.

Chaque tranchée est garnie d'une couche d'une épaisseur de 0,30 m de broyat de bois qui assure le traitement des eaux ménagères.

Une surface filtrante minimale totale de 5 m^2 est construite. Elle est décomposée préférentiellement en 5 filtres identiques.

Les filtres unitaires sont alimentés en alternance. L'un des cinq filtres composant l'installation est alimenté pendant une semaine, les quatre autres étant au repos.

Pour des immeubles d'habitation de taille supérieure à 4-5 EH, une surface de 1 m^2 répartie sur les 5 filtres unitaires est apportée par EH supplémentaire. Si une tranchée excède 2,5 m de longueur ou 1 m de largeur, il est nécessaire d'optimiser la distribution de l'effluent sur le filtre.

En cas d'impossibilité de réaliser cinq filtres unitaires distincts, le propriétaire de l'installation fait réaliser une étude le démontrant. Cette étude peut proposer un nombre réduit de filtres avec des spécifications quant à la distribution de l'effluent.

²⁵ EH ici ne fait pas référence à une charge de pollution réelle (60g de DBO₅) mais à la taille d'une habitation comptée soit en Pièces Principales, soit en EH.

Le Tableau 29 décrit au regard de l'état des connaissances actuelles une liste des opérations d'entretien et leur fréquence pour de tels filtres.

Liste des opérations	Fréquence
Alimentation en eau : changer de filtre en organisant un cycle régulier intégrant l'ensemble des cinq filtres. Surveillance et contrôle général de l'installation.	1 fois par semaine
Entretien des espaces verts autour des filtres : arrachage des mauvaises herbes manuellement, évacuation au compost des végétaux. Curer l'éventuel dépôt de surface et surveiller le bon écoulement dans les filtres.	1 fois par mois
Maintien du niveau de broyat dans les filtres au niveau du sol.	1 fois par an
Renouveler le broyat du massif filtrant.	En cas de colmatage

Tableau 29 : Modalités d'entretien du FBB-EM

Conclusion

Le développement des filtres à broyat de bois pour le traitement des eaux ménagères en France en 2020 est encore faible malgré l'emploi accru de substrats organiques en ANC (Villalobos Garcia, 2018). Cette filière de traitement est cependant intéressante car elle associe à la fois l'utilisation d'un déchet organique, le broyat de bois, à une solution de traitement des eaux d'un ménage dans un objectif de retour au sol des eaux usées traitées. Cette dimension en fait une filière d'économie circulaire d'intérêt environnemental dans un contexte international favorable²⁶. Il demeure pourtant un manque de connaissance permettant de comprendre et de décrire le fonctionnement de ce type de filtres creusés à même le sol. Par ailleurs, les performances de traitement ne sont pas quantifiées.

Toutefois, les premiers éléments collectés dans cette étude rendent optimiste quant au potentiel d'une telle filière. En effet, le massif filtrant composé de BB se dégrade au cours du temps et montre une augmentation de sa densité tout en maintenant à la fois sa capacité d'absorption et sa porosité. D'un autre côté, les granulométries de broyats de bois qui peuvent être variées initialement ont tendance à se rapprocher du faisceau du NF-DTU 64.1 au cours du temps. L'analyse de l'évolution de la composition chimique du massif filtrant dans le temps vient confirmer ce constat de maintien d'interstices favorables aux écoulements et donc au traitement. Ce sont probablement la présence de la lignine dans le substrat et la création de porosités disponibles à l'eau dues à la dégradation de la cellulose et des hémicelluloses qui œuvrent dans ce sens. Ces comportements influent également sur les écoulements et contribuent à expliquer l'absence d'eaux stagnantes, de mauvaises odeurs et d'insectes sur les installations en fonctionnement depuis 1,5 à 9 ans, observée sur le terrain. Comparées aux bases utilisées dans les filières par cultures fixées sur support fin, le dimensionnement minimum fixé à 5 m² pour un ménage, indépendant du sol en place et du type de broyat de bois employé, conduit à des charges organiques surfaciques appliquées moyennes intermédiaires entre les pratiques de l'ANC et celles de l'AC.

Ces filtres à broyat de bois, issus d'expériences internationales et adaptés au contexte français, rentrent dans la nomenclature des « solutions fondées sur la nature²⁷ ». Les résultats analytiques réalisés sur le matériau « broyat de bois » sont encourageants et favorisent le fait de ne pas freiner leur développement. De plus, le potentiel de cette filière s'exprime également dans l'appropriation technique, financière et sociale des citoyens qui pourraient y avoir recours. Toutefois, des parts d'ombre subsistent en termes de connaissance des performances de traitement, d'écoulements dans le massif et de processus d'interactions entre le sol en place et le massif. A cet effet, des recherches complémentaires nécessiteraient des instrumentations et pourraient être menées tant à l'échelle pilote qu'en taille réelle. En complément, un suivi expérimental de nouvelles installations en fonctionnement doit permettre d'améliorer la connaissance en considérant des contextes d'implantation variés.

²⁶ Voir le rapport ONU-Eau 2017.

²⁷ <https://uicn.fr/solutions-fondees-sur-la-nature/>.

Annexes

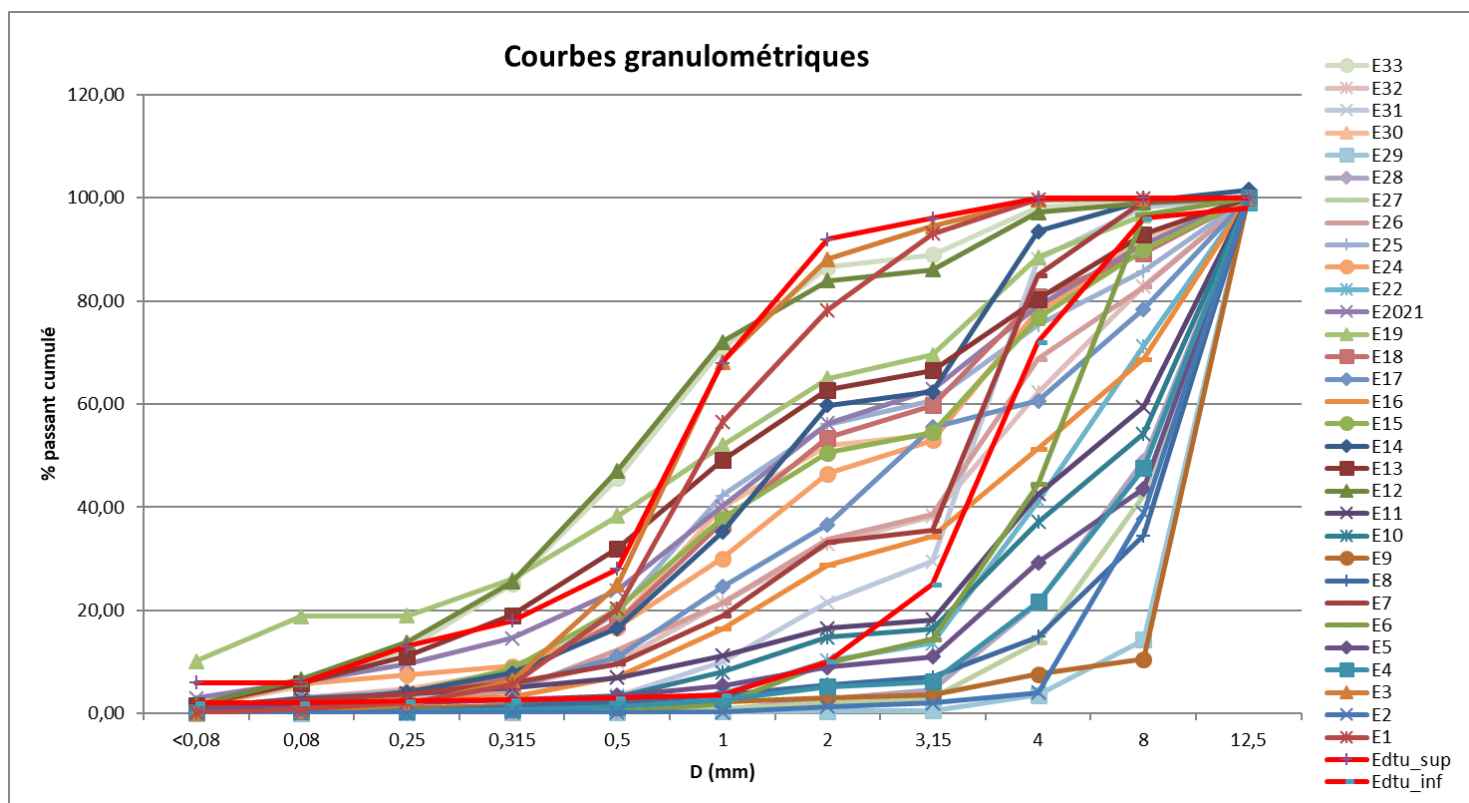
Annexe 1 : Liste des entretiens réalisés avec des professionnels

Nom – Prénom	Structure	Objet
Adler Emmanuel	Réseau Interprofessionnel des sous-produits organiques	Règlementation et usages des broyats.
Allen Laura	Grey Water Action	Retour d'expérience sur les usages de broyats en Californie.
Canet Alain	Association Française d'Agroforesterie	Production et usages des broyats de bois.
Da Silva Perez Denilson	Institut Technologique du Bois - FCBA	Mesures analytiques de la dégradation de broyat de bois.
Descamps Alexandre	SAELEN	Spécificités techniques des broyeurs.
Gérardin, Philippe	Laboratoire d'études et de recherche sur la matériau bois (LERMA) Vandoeuvre-lès-Nancy	Protocoles de mesures de la durabilité du bois
Hugueny Hervé	Trièves Compostage Environnement	Production et usages des broyats de bois en compostage collectif.
Laurent Cloé	Service Développement Durable des Espaces Verts de la Ville de Lyon	Gestion des tailles, production et usages des broyats dans les parcs et jardins lyonnais.
Lebayon Isabelle	Institut Technologique du Bois - FCBA	Mesures analytiques de la dégradation de broyat de bois.
Leclerc Blaise	Institut de l'Agriculture et de l'Alimentation Biologique (ITAB).	Protocoles de mesures de la dégradation du bois.
Leguen Stéphane	Terhao	Production et utilisation de broyat de bois par les particuliers au jardin pour le compostage
Martin Loïc	Racine Ginkgo	Plateforme de production de broyat.
Vacher Julien	Terhao	Production et utilisation de broyat de bois par les particuliers au jardin pour le compostage
Vernus Emmanuel	Provademse	Analyses respirométriques de biodégradation organique.

Annexe 2 : Liste détaillée des échantillons collectés et analysés.

	Provenance	Fournisseurs - Lieux de collecte	Type		Essences
			Catégories	précisions	
E1	Scierie	Scierie Usson en Forez	Particules du bois	Sciures grossières (première coupe)	Résineux
E3	Scierie	Scierie Usson en Forez	Particules du bois	Sciures fines (seconde coupe)	Résineux (Sapin)
E12	Plateforme de déchets organiques	Racines Décines	Autres matériaux organiques rapportés	Compost fin 0-10 NF U44051	NA
E13	Plateforme de déchets organiques	Racines Décines	Autres matériaux organiques rapportés	Compost grossier 0-25 NF U44051	NA
E4	Services des espaces verts de collectivité	Ville de Lyon: Parc de la tête d'or	Bois Broyés	Palette 20-40 Fourni par Racines, morceaux de 10*2*1 fibreux	Peupliers et résineux
E5	Services des espaces verts de collectivité	Ville de Lyon: Parc de la tête d'or	Bois Broyés	Broyat de grumes de Lyon 20-40 Broyé par Rhône Environnement sur place morceaux longs et fibreux	Toutes essences confondus avec dominante résineux
E6	Services des espaces verts de collectivité	Ville de Lyon: Parc de la tête d'or	Bois Broyés	Broyat de palettes 10-30 Fourni par Racines, morceaux longs et lisses	Peupliers et résineux
E7	Services des espaces verts de collectivité	Ville de Lyon: Parc de la tête d'or	Bois Broyés	Broyat de grumes de Lyon - 0-20 Broyé par Rhône Environnement sur place	Toutes essences confondus avec dominante résineux
E10	Plateforme de déchets organiques	Racines Décines	Bois Broyés	Broyat de palettes 10-50	Peupliers et résineux
E14	Plateforme de déchets organiques	Racines Décines	Bois Broyés	Broyat de palettes fines	Peupliers et résineux
E8	Plateforme de déchets organiques	Racines Décines	Bois énergie	Plaquettes forestières	peupliers, aulnes et résineux
E2	Scierie T ₀	Scierie Usson en Forez	Bois énergie	Pour bois énergie 3*2*1 cm	Résineux (Sapin)
E27	Plateforme de déchets organiques	Bois Nergis	Bois énergie	Pour paillage	Aulnes
E28	Plateforme de déchets organiques	Bois Nergis	Bois énergie	Pour paillage	Résineux

E29	Plateforme de déchets organiques	Bois Nergis	Bois énergie	Pour paillage	Peupliers
E9	Plateforme de déchets organiques	Racines Décines	Bois broyés fins	Broyat de bois d'élague appelé « BRF » chez eux, bois déchiqueté très fibreux et long	tous types de bois
E11	Plateforme de déchets organiques	Racines Décines	Bois broyés fins	Mulch organique de plateforme 10-30 refus de criblage en maille 10 et 25 pour produire E12 et E13	Mélange
E15	Particulier	St-Pal-de-Chalencon	Bois broyés fins	Produit par un particulier, mélange de broyats, tontes, etc.	Résineux et feuillus
E22	Particulier T ₀	Riguepeu	Bois broyés fins	T ₀ , produit par lui-même	Mélange
E26	Particulier T ₀	Auch	Bois broyés fins	T ₀ , collecté en bord de route	Mélange
E30	Plateforme de déchets organiques	Bois Nergis	Bois broyés fins	d'élague et de taille sur branchage	Mélange
E16	Particulier	Monbalen	Broyats de bois utilisés	T+2 ans : Broyat employé type « BRF » de particuliers Non disponible sur site	
E17	Particulier	Monbalen	Broyats de bois utilisés	T+2 ans : Broyat type « BRF » de particuliers Non disponible sur site	
E18	Particulier	Estillac	Broyats de bois utilisés	Dit « BRF » de DV de déchetterie Non disponible sur site	
E2021	Particulier T _{+10ans}	Riscle	Broyats de bois utilisés	T ₀ = E33 avec compost de TS	
E24	Particulier T _{+4ans}	Riguepeu	Broyats de bois utilisés	T _{+4ans} sans nouvel apport	
E25	Particulier T _{+4ans}	Auch	Broyats de bois utilisés	4 ans de fonctionnement avec nouvel apport en 2018. En fonctionnement depuis 3 semaines	
E32	Particulier T _{+1,5 ans}	St-Pal-de-Chalencon	Broyats de bois utilisés	T ₀ = E2	
E33	Particulier T ₀	Riscle	Autres matériaux organiques rapportés	Compost de toilettes sèches	Mélange



Annexe 4 : Détails des mesures de capacité d'absorption.

	Poids initial immergé pendant 24h et égoutté (g)	Poids après 24h de séchage à l'étude à 105°C (g)	Poids après 48h de séchage à l'étude à 105°C (g)	Poids après 72h de séchage à l'étude à 105°C (g)	Poids après 96h de séchage à l'étude à 105°C (g)	Poids final sec (g)	Quantité d'eau évaporé (g)	Capacité d'absorption (g H2O/g de broyat)
E9	391	257	257	-	-	257	134	0,5
E15	1446	1105	940	936	936	936	510	0,5
E11	555	301	299	300	-	300	255	0,8
E30	883	541	493	382		382	500	1,3
E22	506	256	253	224	213	213	293	1,4
E26	410	317	287	218		228	282	1,2
E31	619	489	137			137	482	3,5
E10	404	233	232	-	-	232	172	0,7
E6	540	290	290	-	-	290	250	0,9
E7	567	303	303	-	-	303	265	0,9
E5	299	141	141	-	-	141	158	1,1
E14	575	339	309	251	249	249	326	1,3
E4	331	133	133	-	-	133	198	1,5
E8	521	313	313	-	-	313	208	0,7
E27	629	371	349	335		335	294	0,9
E28	483	374	249			249	234	0,9
E29	652	331	328	328		328	325	1,0
E2	337	144	144	-	-	144	193	1,3
E1	469	132	125	126	-	126	343	2,7
E3	455	122	88	85	-	85	369	4,3
E13	791	435	391	369	366	366	425	1,2
E12	1085	761	668	453	447	447	639	1,4
E33	836	243	220	201		201	635	3,2
E19	1253	1055	1051	1026	1023	1023	231	0,2
E18	1012	709	692	679		679	333	0,5
E16	1030	772	715	564		564	466	0,8
E2021	858	507	472	451		451	407	0,9
E17	769	519	512	448	393	393	376	1,0
E25	1584	1101	1036	737		699	885	1,3
E24	1209	860	849	729	458	458	751	1,6
E32	781	299	291			291	491	1,7

Annexe 5 : Détails des mesures de porosité.

A 20°C, la densité de l'eau est de 0,9982 g/cm³.

Porosité à sec (après passage à l'étuve à 105°C).

		Masse de l'éprouvette vide (g)	Masse éprouvette pleine de l'échantillon (g)	Calcul de la masse de broyat (g)	Masse de l'éprouvette remplie d'eau (g)	Masse d'eau ajoutée dans l'éprouvette (g)	Volume utile de l'éprouvette (ml)	Masse volumique apparente ou densité du broyat (g/ml)	(i) Porosité g broyat /g eau	(ii) Porosité $V_{\text{eau}}/V_{\text{total}}$	Moyenne (i)	Moyenne (ii)
T0	E10	234	369	135	1 132	762	1 000	0,14	18 %	76 %	19,6%	74,7%
	E14	236	387	151	1 088	699	1 000	0,15	22 %	70 %		
	E4	231	355	125	1 135	778	1 000	0,12	16 %	78 %		
	E5	233	367	133	1 138	769	1 000	0,13	17 %	77 %		
	E6	239	399	161	1 141	740	1 000	0,16	22 %	74 %		
	E7	240	410	170	1 139	728	1 000	0,17	23 %	73 %		
	E9	231	317	86	1 181	862	1 000	0,09	10 %	86 %	25,0%	69,8%
	E22	239	392	153	1 071	678	1 000	0,15	23 %	68 %		
	E26	241	434	193	1 094	659	1 000	0,19	29 %	66 %		
	E11	231	461	230	1 192	730	1 000	0,23	32 %	73 %		
	E15	231	498	267	1 070	571	1 000	0,27	47 %	57 %		
	E30	238	394	156	1 060	665	1 000	0,16	23 %	67 %		
	E2	234	315	81	1 023	707	1 000	0,08	11 %	71 %	22,7%	67,0%
	E8	232	413	181	1 063	649	1 000	0,18	28 %	65 %		
	E27	240	407	167	1 054	645	1 000	0,17	26 %	65 %		
	E28	232	409	178	1 078	668	1 000	0,18	27 %	67 %		

	E29	240	386	146	1 062	675	1 000	0,15	22 %	68 %	17,2%	75,8%
	E1	230	377	147	1 082	704	1 000	0,15	21 %	71 %		
	E3	230	339	109	1 149	809	1 000	0,11	13 %	81 %		
	E12	232	573	341	1 254	680	1 000	0,34	50 %	68 %	35,9%	69,8%
	E13	235	535	300	1 251	714	1 000	0,30	42 %	72 %		
	E33	236	353	117	1 116	762	1 000	0,12	15 %	76 %		
							Moyenne sur T0	0,17	23,9 %	71 %		
							Médiane sur T0	0,15	22,1 %	70,7 %		
T+xans	E16	232	859	627	1 419	559	1 000	0,63	112 %	56 %	100,4%	57,3%
	E17	240	664	424	1 069	404	720	0,59	105 %	56 %		
	E18	240	879	640	1 240	360	700	0,91	177 %	52 %		
	E2021	235	705	470	1 033	327	700	0,67	144 %	47 %		
	E24	234	559	325	1 204	644	1 000	0,32	50 %	64 %		
	E25	239	687	448	1 244	556	1 000	0,45	81 %	56 %		
	E32	232	467	235	1 167	699	1 000	0,23	34 %	70 %		

Porosité humide (après saturation en eau avec un bain de 24 h).

		Masse de l'éprouvette vide (g)	Masse éprouvette pleine de l'échantillon (g)	Calcul de la masse de broyat (g)	Masse de l'éprouvette remplie d'eau (g)	Masse d'eau ajoutée dans l'éprouvette (g)	Volume utile de l'éprouvette (ml)	Masse volumique apparente ou densité du broyat (g/ml)	(i) Porosité g broyat / g eau	(ii) Porosité (taux de vide: Veau/Vtotal)
T0	E14	237	560	323	1 227	666	1 000	0,32	48 %	67 %

	E7	235	588	354	1 228	639	1 000	0,35	55 %	64 %
	E6	235	574	339	1 212	637	1 000	0,34	53 %	64 %
	E10	238	537	299	1 213	675	1 000	0,30	44 %	68 %
	E5	236	585	349	1 225	639	1 000	0,35	55 %	64 %
	E4	233	552	319	1 199	646	1 000	0,32	49 %	65 %
	E15	235	503	268	672	169	420	0,64	159 %	40 %
	E26	241	718	482	1 247	528	1 000	0,48	91 %	53 %
	E30	2	588	347	1 249	660	1 000	0,35	53 %	66 %
	E22	236	615	379	1 239	623	1 000	0,38	61 %	62 %
	E31	236	650	414	1 209	559	1 000	0,41	74 %	56 %
	E11	235	681	446	1 255	574	1 000	0,45	78 %	57 %
	E9	234	483	249	1 219	734	1 000	0,25	34 %	74 %
	E2	232	576	344	1 203	627	1 000	0,34	55 %	63 %
	E27	238	565	327	1 237	671	1 000	0,33	49 %	67 %
	E8	238	596	357	1 198	601	1 000	0,36	59 %	60 %
	E28	238	576	338	1 171	594	1 000	0,34	57 %	60 %
	E29	236	556	320	1 183	626	1 000	0,32	51 %	63 %
	E1	237	742	505	1 237	494	1 000	0,50	102 %	49 %
	E3	233	632	399	1 220	587	1 000	0,40	68 %	59 %
	E12	236	995	759	1 306	310	1 000	0,76	245 %	31 %
	E13	235	771	536	1 258	486	1 000	0,54	110 %	49 %
	E33	235	866	631	1 227	360	1 000	0,63	175 %	36 %
T+xans	E2021	236	1 255	1019	1 487	231	1 000	1,02	441 %	23 %
	E18	236	> 1 500	Erreur de mesure						
	E25	237	1 165	928	1411	246	1 000	0,93	377 %	25 %

E16	118	582	464	706	123	1 000	0,46	377 %	12 %
E17	241	893	652	1150	257	1 000	0,65	254 %	26 %
E24	237	1 170	933	1480	309	1 000	0,93	302 %	31 %
E32	235	920	685	1280	359	1 000	0,69	191 %	36 %

Bibliographie

- Abusallout, I., & Hua, G. (2017). Characterization of dissolved organic carbon leached from a woodchip bioreactor. *Chemosphere*, 183, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.066>
- Ademe. (2018). *Classification "Combustible bois énergie" du CIBE*. Les clefs pour agir. 4 pages. Angers
- Agence de Bassin Loire-Bretagne. (1980). *L'assainissement-individuel: principes et techniques actuelles*. (Ed. Agence de Bassin Loire-Bretagne). Orléans.
- Allen, L., Bryan, S., & Woelfle-Erskine, C. (2012). *Residential Greywater Irrigation Systems in California: An evaluation of soil and water quality, user satisfaction, and installation costs*. Report. Berkeley.
- Asselineau, E., & Domenech, G. (2007). *De l'arbre au sol - Les bois rameaux fragmentés* (Rouergue E). Arles.
- Bosse-Platière, A. (2016). Banc d'essai: Broyeurs à végétaux. *Les 4 Saisons*, 220, 42–48.
- Boyte, S., Quaife, S., Horswell, J., & Siggins, A. (2017). Survival of *Escherichia coli* in common garden mulches spiked with synthetic greywater. *Letters in Applied Microbiology*, 64(5), 386–391. <https://doi.org/10.1111/lam.12732>
- Breton, V., Rey, F., & Crosaz, Y. (2015). Le bois raméal fragmenté (BRF) pour la lutte contre l'érosion : un exemple de valorisation d'un déchet organique. *Sciences Eaux et Territoires*, 16, 46–49. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2015.16.09i>
- Brun, F., Dubois, V., & Boutin, C. (2019). *Note sur le filtre planté à flux vertical pour le traitement des eaux ménagères*. Rapport. Irstea. Lyon-Villeurbanne.
- Brun, F., Merotto, C., Campan, C., & Torrent, B. (2017). *Caractérisation des Eaux Ménagères domestiques et de filières de traitement associées - Rapport de suivi in situ*. Réseau de l'Assainissement Ecologique. Riscle. Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01803150>
- Bruun, J., Hoffmann, C. C., & Kjaergaard, C. (2016). Nitrogen Removal in Permeable Woodchip Filters Affected by Hydraulic Loading Rate and Woodchip Ratio. *Journal of Environment Quality*, 45(5), 1688. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.11.0583>
- Caron, C., & Lemieux, G. (1999). Le bois raméal pour la régénération des sols agricoles et forestiers. *Echo MO*, 19, 1–2. Retrieved from <http://www.cab.qc.ca>
- Cemagref. (1981). *Etude d'un système de récupération du broyat après débroussaillage mécanique de certains types de végétations*. Rapport. Cemagref. Anthony.
- Chenu, C. (2001). *Comptes rendus des séances de l'Académie d'agriculture de France* (Académie d'Agriculture de France, Ed.). Paris.
- Choubert, J.-M., Druilhe, C., Beline, F., & Gillot, S. (2010). Techniques de fractionnement de la matière organique des déchets liquides pour la modélisation des bioprocédés. *Techniques de l'Ingénieur*, 4(IN98), 1–15.
- Choudhury, T., Robertson, W. D., & Finnigan, D. S. (2016). *Suspended Sediment and Phosphorus Removal in a Woodchip Filter System Treating Agricultural Wash Water*. 802, 796–802. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.07.0380>
- Christianson, L. E., Lepine, C., Sibrell, P. L., Penn, C., & Summerfelt, S. T. (2017). Denitrifying woodchip bioreactor and phosphorus filter pairing to minimize pollution swapping. *Water Research*, 121, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.05.026>
- Coppens, F., Garnier, P., De Gryze, S., Merckx, R., & Recous, S. (2006). Soil moisture, carbon and nitrogen dynamics following incorporation and surface application of labelled crop residues in soil columns. *European Journal of Soil Science*, 57(6), 894–905. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00783.x>
- Coppens, Filip, Garnier, P., Findeling, A., Merckx, R., & Recous, S. (2007). Decomposition of mulched versus incorporated crop residues: Modelling with PASTIS clarifies interactions between residue quality and location. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(9), 2339–2350. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.04.005>
- Dalahmeh, S. S., Hylander, L. D., Vinnerås, B., Pell, M., Öborn, I., & Jönsson, H. (2011). Potential of organic filter materials for treating greywater to achieve irrigation quality: A review. *Water Science and Technology*, 63(9), 1832–1840. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.387>
- Damay, J. (2014). *Développement de nouveaux traitements du bois basés sur le procédé d'imprégnation axiale*. Thèse. Université de Lorraine. Vandœuvre-les-nancy.
- Delhoménie, M. C., Bibeau, L., Bredin, N., Roy, S., Broussau, S., Brzezinski, R., ... Heitz, M. (2002). Biofiltration of air contaminated with toluene on a compost-based bed. *Advances in Environmental Research*, 6(3), 239–254. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(01\)00055-7](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(01)00055-7)
- Diara, A. (2007). *Etude de l'influence des caractéristiques physiques d'un mélange boue / structurant sur sa cinétique de biodégradation*. Rapport de stage. Cemagref. Rennes.
- Dietrich, G., Recous, S., Pinheiro, P. L., Weiler, D. A., Schu, A. L., Rambo, M. R. L., & Giacomini, S. J. (2019). Gradient of decomposition in sugarcane mulches of various thicknesses. *Soil and Tillage Research*, 192(May), 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.022>

- Dotro, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., & Stein, O. (2017). *Treatment Wetlands* (IWA publis, Vol. 7). <https://doi.org/10.2166/9781780408774>
- Dubois, V. (2018). *Rapport d'étude: vieillissement des matériaux calcaires destinés à la constitution des filières d'assainissement non collectif*. Rapport. Irstea. Lyon-Villeurbanne.
- Dubois, V., & Boutin, C. (2016). A Comparison of the Design Criteria of 141 On-Site Treatment Systems Available on the French Market. *Small Water and Wastewater Systems & 5th IWA Specialized Conference on Resources-Oriented Sanitation*. Athens: IWA.
- Forquet, N. (2017). *Lois empiriques pour la transition granulométrique*. Note. Irstea. Lyon-Villeurbanne.
- Gorini, D., Choubert, J., Pimpec, P., & Heduit, A. (2011). Concentrations and fate of sugars, proteins and lipids during domestic and agro-industrial aerobic treatment. *Water Science and Technology*, 63.8, 1669–1677. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.334>
- Groupe d'intérêt scientifique sur les sols. (2011). *L'état des sols de France*. Rapport. GIS. Nancy.
- Hannouz, S. (2014). *Développement d'indicateurs pour la caractérisation mécanique et la durabilité des bois traités thermiquement*. Thèse. ParisTech. Champs sur Marne.
- Hua, G., Salo, M. W., Schmit, C. G., & Hay, C. H. (2016). Nitrate and phosphate removal from agricultural subsurface drainage using laboratory woodchip bioreactors and recycled steel byproduct filters. *Water Research*, 102, 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.06.022>
- Iqbal, A., Aslam, S., Alavoine, G., Benoit, P., Garnier, P., & Recous, S. (2015). Rain regime and soil type affect the C and N dynamics in soil columns that are covered with mixed-species mulches. *Plant and Soil*, 393(1–2), 319–334. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2501-x>
- Iqbal, A., Beaugrand, J., Garnier, P., & Recous, S. (2013). Tissue density determines the water storage characteristics of crop residues. *Plant and Soil*, 367(1–2), 285–299. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1460-8>
- Iqbal, A., Garnier, P., Lashermes, G., & Recous, S. (2014). A new equation to simulate the contact between soil and maize residues of different sizes during their decomposition. *Biology and Fertility of Soils*, 50(4), 645–655. <https://doi.org/10.1007/s00374-013-0876-5>
- Lemieux, G. (1985). *Essais d'induction de la végétation forestière vasculaire par le bois raméal fragmenté*. Rapport. Laval, Québec: Université de Laval à Québec.
- Lemieux, G., & Lachance, L. (2000). *Une tentative d'évaluation de la technologie BRF pour des fins maraîchères* (Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Ed.). Université de Laval à Québec.
- Lens, P. N., Vochten, P. M., Speleers, L., & Verstraete, W. H. (1993). Direct treatment of domestic wastewater by percolation over peat, bark and woodchips. *Water Research*, 28(1), 17–26. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90115-5](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90115-5)
- Leramey, C., & Rogeau, D. (1999). *Caractérisation de déchets utilisés comme structurants en compostage de boues*. Rapport de stage. Cemagref. Rennes.
- Liénard, A., Guellaf, H., & Boutin, C. (2000). Choix de sable pour les lits d'infiltration-percolation. *Ingénieries, N° spécial*, 59–66.
- López-Zavala, M. A. (2007). Treatment of lower load graywater by using a controlled soil natural treatment system. *Water Science and Technology*, 55(7), 39–45. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.124>
- Ludwig, A. (2009). *Create an oasis with greywater* (19ème rééd). Retrieved from oasisdesign.net/greywater. San Francisco.
- Marche, C., & Noël, B. (2006). *Mise en œuvre de la technique du Bois Raméal Fragmenté (BRF) en agriculture wallonne*. Rapport de projet. Centre des technologies agronomiques. Strée, Belgique.
- Massenet, J.-Y. (2019). Propriétés physique du sol. Retrieved from <http://jymassenet-foret.fr/> Site Web. Consulté le 19/11/2019
- Montaigne, W., Debon, H., Domenach, A.-M., Roggy, J.-C., A-m, D., & J-c, R. (2018). Gestion durable de la fertilité des sols par l'utilisation de matières organiques : retours d'expérience en Guyane française. In *Innovations Agronomiques, INRA* (Vol. 64).
- Morel, A., Diener, S., Alderlieste, M., Baumeyer, A., Bino, M. J., Burnat, J., ... Figures, S. (2006). *Greywater Management*. Retrieved from [https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/MOREL and DIENER 2006 Greywater Management.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/MOREL%20and%20DIENER%202006%20Greywater%20Management.pdf)
- Mortelmans, P. (2012). *Le tri optique appliqué aux différentes classes de bois : A – B – C*. Présentation orale. Pellenc selective technologies. Pertuis.
- Pépin, D. (2013). *Composts et paillis: pour un jardin sain et productif* (Terre Viva; Terre Vivante, Ed.). Mens.
- Rambags, F., Tanner, C. C., Stott, R., & Schipper, L. A. (2016). Fecal Bacteria, Bacteriophage, and Nutrient Reductions in a Full-Scale Denitrifying Woodchip Bioreactor. *Journal of Environment Quality*, 45(3), 847. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.06.0326>
- Randall, J. (1977). Variations in effectiveness of barks as scavengers for heavy metal ions. *Forest Prod.*, 27, 51–56.

- Ray, A. B., Selvakumar, A., & Tafuri, A. N. (2006). Removal of selected pollutants from aqueous media by hardwood mulch. *Journal of Hazardous Materials*, 136(2), 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.094>
- Ridderstolpe, P. (2007). *Mulch Filter and Resorption Trench for Onsite Greywater Managment*. Report. Kimberly, South Africa.
- Robertson, W. D. (2010). Nitrate removal rates in woodchip media of varying age. *Ecological Engineering*, 36(11), 1581–1587. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.01.008>
- Saliling, W. J. B., Westerman, P. W., & Losordo, T. M. (2007). Wood chips and wheat straw as alternative biofilter media for denitrification reactors treating aquaculture and other wastewaters with high nitrate concentrations. *Aquacultural Engineering*, 37(3), 222–233. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2007.06.003>
- San Francisco Public Utilities Commission. (2017). *Gray Water design manual for outdoor irrigation*. Retrieved from <https://sfwater.org/modules/showdocument.aspx?documentid=55>. San Francisco
- Service Environnement et Territoires du Gard. (2011). *Evaluation de la production de Bois Raméal Fragmenté (BRF) à partir d'une coupe de peupliers issue d'une parcelle en agroforesterie*. Rapport. Chambre d'agriculture. Nîmes.
- Stevanovic, T. (2007). Les rémanants chimiques du bois et utilisation agro-écologique des bois raméaux fragmentés. In *Les rémanants en foresterie et agriculture - Les branches matériau d'avenir* (Tec & Doc, pp. 54–65). Retrieved from <https://www.lavoisier.fr/livre/agriculture/les-remanants-en-foresterie-et-agriculture-les-branches-materiau-d-avenir/dodelin/descriptif-9782743010317>
- Stevanovic, T., & Perrin, D. (2009). *Chimie du Bois* (Presses polytechniques et universitaires Romandes, Ed.). Paris: Librairie Eyrolles.
- Tandlich, R., Zuma, B. M., Whittington-Jones, K. J., & Burgess, J. E. (2009). Mulch tower treatment system for greywater reuse Part II: destructive testing and effluent treatment. *Desalination*, 242(1–3), 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.031>
- Tarr, J. A. (1975). From city to farm: urban wastes and the american farmer. *Agricultural History*, 49, 598–612.
- Tremblay, J., & Beauchamp, C. J. (1998). Fractionnement de la fertilisation azotée d'appoint à la suite de l'incorporation au sol de bois raméaux fragmentés: modifications de certaines propriétés biologiques et chimiques d'un sol cultivé en pomme de terre. *Canadian Journal of Soil Science*, 78, 275–282.
- Trémier, A., & Le Pecq. (2009). Etude de l'influence de la structure physique des déchets et des processus d'aération sur la qualité du compostage et ses impacts environnementaux. In *Projet Precodd*. Rapport. Cremagref. Rennes. <https://doi.org/10.1038/132817a0>
- Vedrenne, F. (2007). *Étude des processus de dégradation anaérobie et de production de méthane au cours du stockage des lisiers*. Thèse. Ecole nationale supérieure d'agronomie de Rennes. Rennes.
- Villalobos Garcia, J. F. (2018). *Évaluation d'un système de traitement à base de biomasse végétale pour le traitement décentralisé des eaux usées : du pilote à l'échelle industrielle*. Thèse. Institut National Polytechnique de Toulouse. Toulouse.
- Von Ahnen, M., Pedersen, P. B., Hoffmann, C. C., & Dalsgaard, J. (2016). Optimizing nitrate removal in woodchip beds treating aquaculture effluents. *Aquaculture*, 458, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.02.029>
- Zhao, B., Li, J., & Leu, S. Y. (2014). An innovative wood-chip-framework soil infiltrator for treating anaerobic digested swine wastewater and analysis of the microbial community. *Bioresource Technology*, 173, 384–391. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.135>
- Zuma, B. M., Tandlich, R., Whittington-Jones, K. J., & Burgess, J. E. (2009). Mulch tower treatment system Part I: Overall performance in greywater treatment. *Desalination*, 242(1–3), 38–56. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.030>

Listes des normes

EN 14961-1 :	Classes et spécifications des biocombustibles solides.
ISO 24294:2013 :	Terminologie à appliquer dans les domaines forestiers et de transformations du bois.
NF-DTU 64.1 :	Règles de l'art en matière d'installation de dispositifs d'assainissement non collectif.
NF-EN 350-1 :	Définition et tests de durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois.
NF-U 44-051 :	Amendements organiques : matières fertilisantes composées principalement de combinaisons carbonées d'origine végétale, ou animale et végétale en mélange, destinées à l'entretien ou à la reconstitution du stock de matière organique du sol et à l'aménagement de ses propriétés physiques et/ou chimiques et/ou biologiques.
NF-U 44-095 :	Amendements organiques - Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux.
XP CEN/TS15083.2 :	Détermination de la durabilité naturelle du bois massif vis-à-vis des champignons lignivores - méthodes d'essai.
XP U44-162 :	Amendements organiques et supports de culture - Fractionnement biochimique et estimation de la stabilité biologique - Méthode de caractérisation de la matière organique par solubilisations successives.
XP U44-163 :	Amendements organiques et supports de culture - Caractérisation de la matière organique par fractionnement biochimique et estimation de sa stabilité biologique.

Table des figures

Figure 1 : Schémas d'un filtre à broyat de bois. Source : RAE.	9
Figure 2 : Granulométries des matériaux filtrants organiques.	14
Figure 3 : Production-distribution-utilisation des matériaux filtrants organiques.	15
Figure 4 : Plan du site 1 et points de prélèvement.	28
Figure 5 : Plan du site 2 et point de prélèvement.	31
Figure 6 : Plan du site 3 et point de prélèvement.	33
Figure 7 : Plan du site 4 et point de prélèvement.	36
Figure 8 : Plan du site 5 et point de prélèvement.	38
Figure 9 : Plan du site 6 et points de prélèvement.	40
Figure 10 : Courbes granulométriques par typologie de broyat de bois frais.	46
Figure 11 : Courbes granulométriques de tous les broyats de bois utilisés.	47
Figure 12 : Evolution des courbes granulométriques sur les sites visités.	48
Figure 13 : Constitution d'une cellule du bois. Source : (Damay, 2014).	54
Figure 14 : Résumé du protocole des analyses chimiques.	55

Table des photographies

Photographie 1 : Bois Raméal Fragmenté (BRF). Source : Terre Vivante.	11
Photographie 2 : Broyeurs professionnels. Source : Doppstadt.	13
Photographie 3 : Broyeur de jardin de type Eliet Maestro. Source : (Pépin, 2013).	13
Photographie 4 : Trempage des échantillons pendant 24 h.	26
Photographies 5 : Site 1, aspect général.	30
Photographies 6 : Site 1, profil de tranchée.	30
Photographie 7 : Site 2, profil du sol.	32
Photographies 8 : Site 2, aspect général du filtre.	32
Photographies 9 : Site 2, aspect du broyat de bois utilisé.	33
Photographies 10 : Site 3, aspect général.	34
Photographies 11 : Site 3, profil du sol.	34
Photographies 12 : Site 3, échantillons de broyat.	35
Photographie 13 : Site 4, aspect général des filtres.	36
Photographies 14 : Site 4, échantillons de broyat de bois.	37
Photographie 15 : Site 4, profil du sol.	37
Photographies 16 : Site 5, aspect du filtre.	39
Photographies 17 : Site 5, échantillon de broyat utilisé.	39
Photographies 18 : Site 5, profil du sol.	40
Photographie 19 : Site 6, aspect général du filtre.	41
Photographies 20 : Site 6, échantillons de broyat de bois.	41
Photographies 21 : Site 6, profil du sol.	42
Photographies 22 : Agglomérats de différentes tailles dans l'échantillon E24.	47

Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques moyennes du BRF.	11
Tableau 2 : Effets du BRF sur les sols. Sources : (Breton et al., 2015 ; Barthes et al., 2010 ; Lemieux et al., 2000).	12
Tableau 3 : Rendements de traitement de filtres organiques pour le traitement des eaux ménagères. Source : (Dalahmeh et al., 2011).	18
Tableau 4 : Prescriptions techniques recommandées : Source : (Dalahmeh et al., 2011).	18
Tableau 5 : Correspondance des échantillons par site visité.	24
Tableau 6 : Résumé des dispositifs de traitement par filtre à broyat de bois sur le site 1.	29
Tableau 7 : Synthèse des données générales des sites visités.	43
Tableau 8 : Synthèse des données générales des filtres visités.	44
Tableau 9 : Synthèse des dimensionnements théoriques des filtres visités.	44
Tableau 10 : Synthèse des charges observées des filtres visités.	45
Tableau 11 : Densités des broyats.	49
Tableau 12 : Densités moyennes par typologie de broyat.	50

Tableau 13 : Ratio d'évolution des broyats par famille.	50
Tableau 14 : Valeurs de porosité des broyats de bois « frais » et « utilisés ».	51
Tableau 15 : Evolution des capacités d'absorption de l'eau sur les sites visités.	53
Tableau 16 : Résultat des lavages	55
Tableau 17 : Teneurs des paramètres agronomiques et nutriments.	56
Tableau 18 : Ratio d'équilibre favorable à la dégradation biologique aérobie.....	56
Tableau 19 : Teneurs en cendres sur les sites visités.	57
Tableau 20 : Teneurs en extractibles.	58
Tableau 21 : Teneurs en lignines.	59
Tableau 22 : Teneurs en cellulose et hémicelluloses.	60
Tableau 23 : Teneurs en sucres et polysaccharides.	61
Tableau 24 : Synthèse des paramètres chimiques.....	62
Tableau 25 : Synthèse des résultats majeurs par critère.....	65
Tableau 26 : Charges hydrauliques et organiques de 6 filtres à BB suivis en 2017 selon Brun et al. (2017).	67
Tableau 27 : Charges surfaciques appliquées au filtre en fonctionnement selon Brun et al. (2017).	68
Tableau 28 : Charges appliquées à la surface totale des filtres	68
Tableau 29 : Modalités d'entretien du FBB-EM	70