



HAL
open science

L'emploi du broyat de bois, une solution durable pour traiter les eaux ménagères ?

Florent Brun, Vivien Dubois, Catherine Boutin

► **To cite this version:**

Florent Brun, Vivien Dubois, Catherine Boutin. L'emploi du broyat de bois, une solution durable pour traiter les eaux ménagères ?. TSM. Techniques Sciences Méthodes – Génie urbain, génie rural, 2021, pp.37-53. hal-03186151

HAL Id: hal-03186151

<https://hal.science/hal-03186151>

Submitted on 30 Mar 2021

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.

1 **Titre** : L'emploi du broyat de bois, une solution durable pour traiter les eaux ménagères ?

2 **Nom et prénom des auteurs**

3 Florent BRUN, Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) -
4 unité de recherche Reversaal - 5 rue de la Doua CS20244 - 69625 Villeurbanne Cedex

5 Vivien DUBOIS, Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) -
6 unité de recherche Reversaal - 5 rue de la Doua CS20244 - 69625 Villeurbanne Cedex

7 Catherine BOUTIN (auteur correspondant), Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et
8 l'environnement (INRAE) - unité de recherche Reversaal - 5 rue de la Doua CS20244 - 69625 Villeurbanne
9 Cedex – catherine.boutin@inrae.fr ;

10 **Résumé**

11 L'emploi de broyat de bois pour le traitement des eaux ménagères tend à s'amplifier en France depuis une
12 décennie dans un contexte favorable à la séparation à la source des effluents liquides et au développement
13 de filières issues de l'économie circulaire.

14 Le broyat de bois est un terme générique qui englobe différents types de fragments de bois d'origine
15 industrielle ou produit par des artisans, des agriculteurs ou des particuliers. Il se décline en bois énergie,
16 bois broyés ou particules du bois avec des usages aussi très variés comme le paillage ou le chauffage.

17 Cet article se focalise sur l'efficacité potentielle du broyat de bois pour le traitement des eaux ménagères par
18 filtration. Il est proposé d'apporter une analyse physique et chimique de ce matériau dont la nature est
19 évolutive contrairement au sable habituellement employé qui est inerte. Dès lors, une analyse croisée (i) de
20 mesures physiques (granulométrie, densité, porosité et capacité d'absorption), (ii) de mesures chimiques
21 (carbone, azote, phosphore et teneurs en : cendres, extractibles, lignine, cellulose et hémicelluloses) et (iii)
22 d'observations de filtres en fonctionnement est réalisée. Les mesures portent essentiellement sur quatre
23 broyats de bois dont les évolutions, à la suite d'un apport d'eaux ménagères, sont comparables deux à deux
24 en échantillons frais ou utilisés pendant plusieurs années.

25 À partir de l'ensemble de ces éléments, l'étude montre l'absence de la nécessité de fixer des bornes aux
26 courbes granulométriques du broyat de bois à utiliser. Selon leur granulométrie initiale, les quatre broyats de
27 bois évoluent, soit vers un matériau plus fin, soit vers un matériau plus grossier, pour tendre vers une
28 granulométrie unique. L'étude conclut également à la conservation dans le temps de conditions hydrauliques
29 favorables aux écoulements par un maintien de la capacité d'absorption initiale du massif filtrant. De plus,
30 même si la porosité initiale diminue, les proportions sont suffisamment faibles pour ne pas avoir d'impact sur
31 les écoulements.

32 **Lexique de l'article**

33 Bois de classe A : Bois non traités et autres bois sains de type palettes, cagettes, etc.

34 Eaux ménagères (EM) : Ensemble des eaux liées aux équipements et aux usages suivants : évier, lave-
35 vaisselle, lave-linge, lavabo, douche, baignoire.

36 Eaux vannes : Eaux issues des toilettes, elles sont générées lors de l'évacuation des fèces et urines.

37 Epandage : Technique de distribution des eaux sur une surface donnée.

38 Filtres à broyat de bois (FBB) : Procédé de traitement d'eaux ménagères par des tranchées creusées dans
39 le sol en place, garnies de broyat de bois et alimentées en alternance avant infiltration.

40 Infiltration : Technique d'évacuation des eaux traitées dans le sol en place.

41 Lixiviats: Liquides récupérés à la base d'une cuve étanche de toilette sèche, résultant de la percolation
42 d'urine et d'eau de nettoyage à travers le compost en maturation.

43 **Mots-clés**

44 Broyat de bois, dégradation, eaux ménagères, filtre, traitement, sol

45 **Title**

46 Use of woodchips: a sustainable solution for the treatment of grey water?

47 **Abstract**

48 The use of woodchips for greywater treatment has been on the increase in France for the past decade in a
49 context that favors source separation and the development of circular economy processes.

50 Woodchips is a generic term that encompasses different types of wood fragments of industrial origin or
51 produced by craftsmen, farmers or private individuals. Woodchips can be used for insulation (mulch) or be
52 burned to provide heating.

53 This article focuses on the potential efficiency of woodchip filters for the treatment of grey water. The study
54 focusses physical and chemical analysis of woodchips, whose nature is evolutionary over time (contrary to
55 classical media like the sand, which is inert). Therefore, a cross-analysis of (i) physical measurements
56 (granulometry, density, porosity and absorption capacity), (ii) chemical measurements (Carbon, Nitrogen,
57 Phosphorus and contents of: ash, extractables organic matter, lignins, cellulose and hemicelluloses) and (iii)
58 observations of filters in operation has been conducted. The measurements were conducted on four types of
59 woodchips whose changes, following an input of grey wastewater over the course of several years, are
60 compared against unused samples.

61 This study shows that there is no need to set limits to the particle size distribution of the woodchips to be
62 used in woodchip filters for greywater treatment. Depending on the initial granulometry, the four woodchips
63 evolve towards a single granulometry. The study also concludes that the hydraulic conditions favourable to
64 flow are maintained over time because the initial absorption capacity of the filter stay stable. Moreover, even

65 if the initial porosity of the woodchip layer decreases, the proportions are sufficiently low not to impact the
66 flow of greywater through the filter.

67 **Keywords:** degradation, grey-water, organic filter, soil, treatment, woodchips,

68 **Introduction**

69 Les bois broyés composent une famille de matériaux issus de l'économie circulaire dont les filières de
70 production-commercialisation-utilisation se multiplient depuis une dizaine d'années. D'abord produit dans un
71 objectif de réduction des volumes d'élagage et d'optimisation logistique, la littérature internationale présente
72 une forte diversité de matériaux organiques dédiée à des usages variés comme (i) le bois raméal fragmenté
73 (BRF) en paillage en agriculture [LEMIEUX, 1985] ou en ornement, (ii) le bois énergie [ADEME, 2018] pour
74 le chauffage ou (iii) les bois broyés dans le traitement des effluents [DALAMAH *et al.*, 2011]. En effet, le bois
75 est de plus en plus utilisé en tant que média, support du développement bactérien dans les procédés de
76 traitement d'effluents, qu'ils soient gazeux comme dans certaines stations d'épuration ou liquides comme en
77 assainissement non collectif (ANC) [VILLALOBOS GARCIA, 2018]. En France en particulier, l'emploi de bois
78 dans le traitement des effluents fait face à un manque de travaux académiques, tant sur sa caractérisation
79 que sur ses usages.

80 Par ailleurs, la considération des différentes sources d'émissions d'effluents [BOUTIN et EME, 2016] et leur
81 séparation à la source¹ prend de l'ampleur en France. Dans ce contexte, le traitement des eaux ménagères
82 est de plus en plus considéré et l'arrêté prescription technique relatif à l'ANC de 2009 [MEEDDM, 2009] a
83 ouvert la possibilité d'un traitement séparé des eaux vannes et des eaux ménagères. Pour autant, le
84 dimensionnement des ouvrages de traitement des eaux ménagères seules reste celui des eaux dites
85 « complètes ».

86 Des filtres à broyat de bois (FBB) schématisés en *figure 1*, issus de l'expertise américaine [ALLEN *et al.*,
87 2012; LUDWIG, 2009], se sont multipliés en France jusqu'à en dénombrer plus d'une centaine² en 2019
88 bien que l'installation d'un tel dispositif ne soit pas autorisé par la réglementation. Les FBB français sont
89 issus directement des préconisations techniques émises par la collectivité de San Francisco [SFPUC, 2017]
90 qui les autorisent en soulignant leurs bienfaits économiques et sociaux depuis les années 2010. Concernant
91 l'emploi de broyat de bois (BB) pour un traitement des eaux ménagères directement dans le sol en place et
92 sans recirculation, ni emploi d'un matériaux tiers (type sable, gravier ou autre) en Europe, la littérature
93 scientifique internationale n'est pas foisonnante [MOREL et DIENER, 2006].

94 Le BB employé est varié et dépend des matières disponibles auprès des usagers de l'ANC désirant mettre
95 en œuvre une telle filière [BRUN *et al.*, 2017]. C'est bien dans une démarche globale d'économie circulaire
96 des déchets verts issus des parcs et jardins que cette filière est conçue. Avant de quantifier les
97 performances épuratoires d'un tel dispositif, il convient de préciser par une approche technique et
98 scientifique quelles sont les caractéristiques du broyat de bois et comment il pourrait participer à l'épuration.

¹ https://www.leesu.fr/ocapi/wp-content/uploads/2019/02/Escolier_2018_Propositions-pour-une-%C3%A9conomie-circulaire-des-nutriments.pdf

² Données du Réseau de l'Assainissement Ecologique 2019. <https://reseau-assainissement-ecologique.org>

99 Cette approche s'avère nécessaire pour considérer, dans un second temps, les rendements épuratoires des
100 filtres à broyat de bois. Rappelons que tout comme pour les eaux usées, il est nécessaire de traiter les eaux
101 ménagères avant leur infiltration dans le sol en place [LOPEZ-ZAVALA, 2007].

102 Suite à la réflexion portant sur les éléments de caractérisation de BB, une analyse de matériaux employés
103 pour le traitement des eaux ménagères est conduite progressivement. Cette analyse est d'abord conduite
104 sous l'angle des caractéristiques physiques qui guident les écoulements. Une analogie est réalisée avec
105 l'emploi du matériau inerte habituellement utilisé, le sable, dont les capacités de media apte à l'épuration
106 sont prouvées et comprises [DOTRO *et al.*, 2017; LIENARD *et al.*, 2000]. Puis, à partir d'échantillons, le suivi
107 de l'évolution des paramètres chimiques constitutifs du BB permet d'évaluer et quantifier la dégradation de
108 BB aux âges variés. Cette analyse permet aussi de mieux comprendre les processus qui guident leur
109 dégradation. De ces 2 étapes, s'engagent des réflexions autour de l'évolution du comportement du massif
110 filtrant dans le temps en s'appuyant sur des visites de sites.

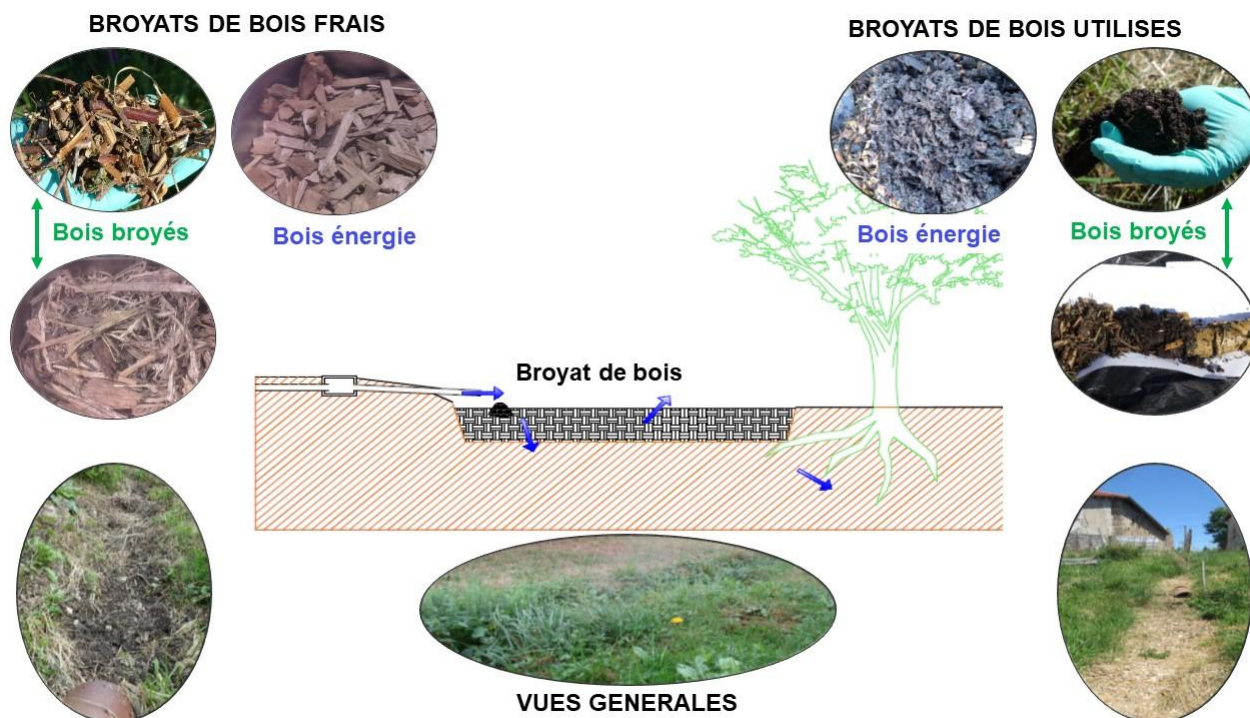
111 **1. Qu'est-ce qu'un broyat de bois ?**

112 Constatant que l'usage du BRF est répandu en production végétale (maraîchage, horticulture), c'est d'abord
113 par le point de vue de l'agriculture que nous avons voulu répondre à cette question. En effet, l'emploi du
114 BRF entraîne plusieurs effets positifs sur les sols dont certains sont en adéquation avec des effets
115 épuratoires tels que (i) diminuer le ruissellement et l'altération du sol, (ii) augmenter la capacité de rétention
116 d'eau, (iii) améliorer la structuration du sol, (iv) augmenter l'activité biologique, (v) réguler la température du
117 sol ou (vi) améliorer la circulation de l'air dans le sol [LEMIEUX et LACHANCE, 2000; BARTHES *et al.*,
118 2010; BRETON *et al.*, 2015].

119 Des effets du BRF en agriculture, une ouverture est réalisée vers une forte diversité des matières
120 organiques utilisées dans la littérature pour le traitement des effluents. Une liste non exhaustive pourrait
121 ressembler à :

- 122 • Les écorces (terme anglais correspondant : bark),
- 123 • La sciure, les copeaux (terme anglais correspondant : woodchips),
- 124 • Les pailles agricoles (terme anglais correspondant : straw),
- 125 • Le bois raméal fragmenté ou BRF,
- 126 • Les composts,
- 127 • La tourbe (terme anglais correspondant : peat),
- 128 • Les tailles de haie broyées,
- 129 • Les grumes ou de bois de classe A, broyés,
- 130 • Les plaquettes,
- 131 • Les feuilles, les tontes, les sons de céréales, etc.

132



133

134

135

Figure 1 : Le filtre à broyat de bois : 3 vues générales, 3 matériaux « frais » et 3 matériaux « utilisés »

136

137

Au regard de cette diversité des matériaux organiques existants et utilisés en filtration, une nomenclature a été élaborée avec un code couleur présenté dans la *figure 2* :

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

148

149

- Les bois énergie (en bleu) : ils sont généralement produits par l'industrie pour un usage de chauffage.
- Les bois broyés (en vert) : ils contiennent les Bois Raméaux Fragmentés et d'autres bois broyés ne respectant pas toutes les exigences des BRF. Ils sont produits par des industriels, professionnels des espaces verts, agriculteurs ou particuliers pour des usages en agriculture ou en espaces verts.
- Les particules du bois (en orange) : il s'agit de particules générées par des industriels ou professionnels du bois lors des usages du bois (sciures, copeaux). Elles peuvent être utilisées dans le cadre de filières de transformation (granulés, papiers), composts, litières.
- Autres matériaux organiques rapportés (en violet) : ils sont généralement utilisés et générés en lien avec le sol (paillage, amendement) par les agriculteurs ou particuliers comme c'est le cas pour les tontes, sons, pailles.

150

151

152

153

154

155

156

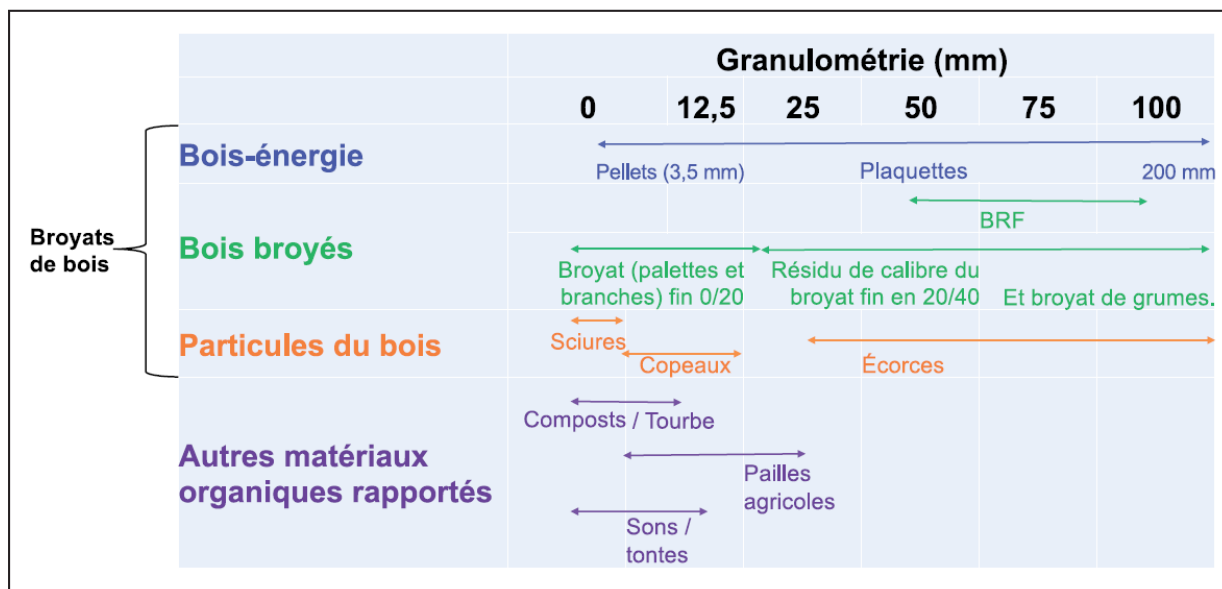
157

Pour le traitement des eaux, il n'est pas apparu nécessaire de se focaliser sur les matières organiques trop fines et facilement biodégradables comme les feuilles, tontes, sons et composts ainsi que sur celles difficiles à se procurer pour les particuliers comme les pailles agricoles, écorces, fibres de coco et tourbes. Les californiens, précurseurs de ce type de filière, ne précisent pas davantage la nature de la matière organique utilisée dans leurs filtres, tandis que dans sa transcription en France depuis 2012, c'est le terme générique de « BRF » qui est employé [PIERRE ET TERRE, 2017]. Cependant, le BRF fait référence à une description précise [LEMIEUX, 1985] avec notamment :

- Raméaux inférieurs à 7 cm de diamètre, broyés à l'automne,

- 158 • Présence de moins de 20 % de résineux,
- 159 • Granulométrie du produit final comprise entre 5 à 10 cm.

160 Les prescriptions ci-dessus ne s'avèrent pas toujours respectées par les producteurs, qu'ils soient des
 161 professionnels ou des particuliers. Dès lors une caractérisation plus précise basée sur la granulométrie a été
 162 opérée en 4 familles. Sur la base des éléments bibliographiques disponibles, la *figure 2*, représentant les
 163 amplitudes de variation granulométrique pour chaque classe retenue, a été élaborée.



164 BRF : bois raméal fragmenté.

165 **Figure 2 : Granulométrie des matériaux organiques filtrants**

166 Notons que le spectre granulométrique est très large pour chacune des familles décrites débutant à
 167 quelques mm et atteignant plus de 100 mm. Seule la classe des « autres matériaux organiques » bénéficie
 168 d'une amplitude de granulométrie plus faible, réduite à un facteur d'environ 10.

169 Par ailleurs, lors d'échanges avec des professionnels gérants de plateforme de broyage, techniciens des
 170 parcs et jardins des collectivités, maîtres composteurs ou jardiniers, apparaît un terme plus générique, celui
 171 de broyat de bois (BB), qui est très présent dans tous les discours. Il est apprécié par sa notion englobante,
 172 plus large que celles des « bois broyés », intégrant « les particules de bois » et le « bois énergie » provenant
 173 des déchets de la découpe du bois. C'est ce terme de broyat de bois que nous garderons et qui constitue le
 174 cœur de cet article.

175 2. Méthode de caractérisation du broyat de bois

176 La méthode développée vise, sur la base de critères physiques et chimiques, à caractériser l'évolution du
 177 broyat de bois au sein d'un massif filtrant sur lequel est réalisé un épandage d'eaux ménagères avec une
 178 alternance de phases d'alimentation et de repos.

179 2.1. Echantillonnage

180 23 broyats de bois « frais », c'est à dire issus directement de leurs lieux de production et sans usage
181 préalable, ont été collectés en recherchant non seulement l'hétérogénéité de leur composition (essence et
182 granulométrie) mais aussi celle de leur provenance (matière première et producteur) afin de disposer d'un
183 panel de BB représentatif de la diversité des situations rencontrées :

- 184 • Essences : peupliers, résineux, bouleaux, haies, etc. en fonction de la ressource disponible.
- 185 • Granulométries : de fine (copeaux, sciures) à 0/20 mm ou résidus de criblage 20/40 mm (si ces
186 granulométries sont mentionnées). Le criblage est réalisé par tamis rotatif de 20 mm sur plateforme.
- 187 • Type de matière première : bois de classe A (palettes), grumes d'abattage, tailles de bord de route,
188 déchets verts, etc.
- 189 • Producteurs-distributeurs : particuliers, élagueurs, plateformes de gestion des déchets organiques,
190 agriculteurs et déchetteries.
- 191 • Conditionnements : au détail, GRVS³ ou sacs de 12,5 et 25 Kg.

192 Les 23 échantillons collectés ont été classés dans les quatre typologies définies précédemment : bois
193 énergie (5 échantillons), bois broyés (13 échantillons), particules de bois (2 échantillons), et autres
194 matériaux organiques (3 échantillons).

195 Pour évaluer la dégradation des BB, des échantillons, appelés BB « utilisés », ont été collectés sur des
196 installations en fonctionnement visitées en septembre 2019. Ces BB ont été utilisés pendant plusieurs
197 années, de 1,5 à 9 ans, et souillés par un épandage d'eaux ménagères dans le sol en place. En revanche,
198 ce ne sont que sur quatre sites installés dans les départements du Gers (1), du Lot-et-Garonne (2) ou de la
199 Haute-Loire (1) que les mêmes broyats de bois « frais » ont pu être prélevés. Pour ces quatre sites aux
200 caractéristiques décrites en *tableau I*, broyats « frais » et « utilisés » sont donc comparables deux à deux.

201 Le prélèvement d'échantillon des broyats « frais » suit la méthode des quartas [DEBAGHI, 2013]. Cette
202 méthode permet d'obtenir un échantillon homogène et représentatif du tas de broyats de bois dans lequel le
203 prélèvement est réalisé. Pour cela, il s'agit de répartir « au jugé » la totalité des matières à disposition
204 (plusieurs kg) en quatre tas de même volume. Deux de ces tas sont rassemblés et homogénéisés pour
205 former un nouveau tas, lequel est à nouveau réparti en quatre tas de mêmes volumes. Cette opération est
206 répétée 4 fois jusqu'à l'obtention du tas final dans lequel est prélevé l'échantillon de 6 L à analyser.

207 Pour les prélèvements de broyat de bois « utilisés » sur des installations en fonctionnement, le prélèvement
208 est réalisé à la pelle, sur toute la hauteur de la tranchée et dans le premier mètre depuis le point
209 d'alimentation. L'utilisation d'une carotteuse n'a pas été possible au regard de la tenue générale des broyats
210 « utilisés » concernés. Les différents prélèvements d'échantillons ont été réalisés sur la partie la plus
211 sollicitée du filtre dans des conditions météorologiques d'un mois de septembre classique : beau et sec. Ces
212 prélèvements ne sont pas représentatifs de l'ensemble de la tranchée mais ils sont caractéristiques de la
213 zone alimentée en eau à traiter. Le rythme d'alimentation de la tranchée, en court ou au repos, est toutefois
214 connue. Le volume moyen des échantillons collectés est de 6 litres, ce volume important intègre la faible
215 densité de certains BB afin de fournir une masse d'échantillon adaptée aux contraintes analytiques
216 développées ci-après.

³ Grand récipient pour vrac souple ou big-bag.

217 2.2.Parcours analytique

218 Le parcours analytique suivi a pour but de caractériser le média filtrant. Ainsi les caractéristiques mesurées
219 sont définies par analogie avec celles généralement utilisées pour les milieux filtrants inertes. Ont ainsi été
220 ciblés les paramètres physiques qui conditionnent les écoulements. Une vigilance particulière a été apportée
221 aux méthodes de mesures utilisées. Contrairement à un matériau minéral, le parcours analytique relatif aux
222 aspects physiques, développé dans l'étude tient compte des spécificités du broyat de bois qui résident dans
223 (i) la forte présence d'espaces interstitielles favorables à la rétention de bulles d'air et (ii) sa flottabilité. Ainsi
224 des adaptations des protocoles classiques [LERAMEY et ROGEAU, 1999; VILLALOBOS GARCIA, 2018] se
225 sont avérés nécessaires, elles sont précisés pour chaque paramètre.

226 Des mesures chimiques sont également réalisées pour évaluer la dégradation du broyat de bois dans le
227 temps et, si possible, les cinétiques d'évolution des différents paramètres.

228 2.2.1.Mesures physiques

229 Les mesures physiques sont au nombre de 4 : la granulométrie, la porosité, la densité et la capacité
230 d'absorption. Ces mesures ont été réalisées sur 23 broyats de bois « frais » et 7 broyats de bois « utilisés ».

231 L'interprétation de la mesure de la granulométrie permet d'établir une corrélation entre la distribution de la
232 taille des grains du matériau (et donc la taille des pores) et les écoulements au sein du milieu filtrant. Les
233 broyats de bois ont d'abord été séchés à l'étuve à 50°C pendant 24h pour éviter le colmatage des tamis à
234 cause de leur humidité. Ensuite, une mesure de la granulométrie de chaque échantillon a été réalisée avec
235 23 tamis répartis de 0,08 mm à 12,5 mm. La connaissance du faisceau granulométrique du DTU 64.1⁴
236 donne un référentiel pour l'interprétation des résultats en appliquant l'hypothèse (ce qui n'est pas le cas ici)
237 que les matériaux sont sphériques.

238 La porosité consiste à évaluer le volume des vides dit « espace poral », comparé au volume total. Elle
239 s'exprime en %. C'est ce volume qui est laissé libre à l'écoulement. Deux éprouvettes graduées de 1000 mL
240 sont remplies d'un échantillon foisonné et légèrement tassé de manière à représenter les conditions d'emploi
241 dans un filtre. L'une est remplie d'un échantillon saturé en eau pendant 24h ($g_{\text{broyat humide}}$), l'autre d'un
242 échantillon passé à l'étuve jusqu'à poids constant ($g_{\text{broyat sec}}$). Ces deux échantillons sont le reflet du
243 fonctionnement des filtres à broyat de bois en condition de fonctionnement alterné (phase d'alimentation
244 suivie d'une longue phase de repos). Les masses introduites ($g_{\text{broyat humide}}$ et $g_{\text{broyat sec}}$) dans les éprouvettes
245 sont connues par pesées.

246 Ensuite, un volume d'eau mesuré (V_{eau}) est introduit dans chaque éprouvette jusqu'à atteindre la graduation
247 de 1000 mL. Un poids placé au niveau de la graduation de 1000 mL maintient en place l'échantillon de BB
248 en flottation partielle et sans débordement. La porosité volumique s'exprime en volume d'eau introduit par
249 volume total d'éprouvette ($V_{\text{eau}} / 1000 \text{ mL}$). La porosité massique s'exprime en masse d'eau par masse
250 d'échantillon ($g_{\text{H}_2\text{O}} / g_{\text{broyat sec ou humide}}$), la porosité calculée ainsi s'apparente à la macroporosité entre les

⁴ Documents Techniques Unifiés : norme française relative aux techniques traditionnelles d'assainissement non collectif.

251 assemblages élémentaires autour et à l'intérieur desquels les fluides (air ou eau) vont circuler [CHOSSAT,
252 2005]. Pour les deux conditions, il est aussi possible de calculer la densité apparente du BB par sa masse
253 volumique ($g_{\text{broyat sec ou humide}} / 1000 \text{ mL}$).

254 La capacité d'absorption d'eau est un indicateur de l'effet "éponge" du BB. Les échantillons saturés en eau
255 pendant 24 h sont simplement égouttés. Ils sont ensuite pesés avant d'être placés en étuve à 105° C jusqu'à
256 l'obtention d'une masse constante. La différence entre ces deux masses définit la masse d'eau évaporée. La
257 capacité d'absorption peut être calculée de différentes façons : rapportée à une masse ou à un volume ou
258 selon qu'il s'agisse de BB « frais » ou « utilisé ». Selon le besoin, les équations suivantes sont utilisées :

259 (i) Capacité d'absorption massique du broyat « frais » ou « utilisé » : Capa_m (%)

260
$$\text{Capa}_m = [g_{\text{H}_2\text{O}}] / [g_{\text{broyat sec}}]$$

261 (ii) Capacité d'absorption volumique du broyat « frais » ou « utilisé » : Capa_{vol} (%)

262
$$\text{Capa}_{\text{vol}} = \text{Capa}_m * D_s$$

263 Avec la densité du broyat sec : $D_s = [g_{\text{broyat sec}}] / [\text{mL}_{\text{éprouvette}}]$

264

265 (iii) Capacité d'absorption volumique du broyat « utilisé » ramenée à la densité du broyat « frais » sec
266 (%)

267
$$\text{Capa}_{\text{vol utilisé sur } D_s \text{ frais}} = \text{Capa}_m \text{ utilisé} * D_s \text{ broyat frais}$$

268 Avec la densité du broyat « frais » sec : $D_s \text{ frais} = [g_{\text{broyat frais sec}}] / [\text{mL}_{\text{éprouvette}}]$

269 Avec :

- 270 • $g_{\text{H}_2\text{O}}$: Masse d'eau évaporée à 105°C en gramme correspondant à la différence entre la
271 masse de l'échantillon saturé en eau pendant 24 h et la masse constante finale de
272 l'échantillon étuvé à 105°C.
- 273 • $g_{\text{broyat sec}}$: Masse constante finale de l'échantillon en gramme étuvé à 105°C.
- 274 • $\text{mL}_{\text{éprouvette}}$: Volume utile de l'éprouvette en mL.

275 Appliqué au matériau « utilisé », l'équation (ii) tient compte simultanément de deux évolutions : celle de la
276 capacité d'absorption du matériau « utilisé » et celle de la densité de ce même matériau « utilisé ». Ainsi,
277 l'équation (iii) permet de tenter de dissocier leurs effets et d'évaluer la part d'évolution à attribuer réellement
278 à la capacité d'absorption ; les calculs sont donc conduits en utilisant la densité sèche initiale du matériau
279 « frais » et non plus la densité sèche du matériau « utilisé ».

280 Des comparaisons deux à deux des capacités d'absorption entre broyats « frais » et « utilisé » sont réalisées
281 pour quatre broyats.

282 **2.2.2.Mesures chimiques**

283 Des mesures chimiques classiques sont réalisées dans le but de connaître les compositions chimiques
284 élémentaires des BB dont leur taux de minéralisation. Les mesures classiques réalisées sont les suivantes :

- 285 - Teneur en cendres, mesurée à partir de la combustion de l'échantillon à 550°C selon les conditions
286 de la norme XP CEN/TS 14775.
- 287 - Carbone total et azote total, mesurés à l'aide d'un analyseur élémentaire CNS (carbone, azote,
288 soufre) selon les normes qualité du sol NF ISO 10694 et NF ISO 13878.
- 289 - Phosphore, analysé par minéralisation micro-onde puis extraction à l'eau régale et dosage par
290 spectrométrie d'émission optique de type ICP-OES selon les normes qualité de l'eau NF EN ISO
291 11885 et ISO 15587-1.

292 Ces mesures sont complétées par d'autres mesures chimiques, plus spécifiques à la dégradation de la
293 matière organique du bois. Pour identifier le parcours analytique le plus adapté, une revue bibliographique a
294 été réalisée. Elle concerne d'une part, les procédés chimiques utilisés pour caractériser la dégradation de
295 matériaux plus fragiles ou facilement dégradables comme les pailles, et celles des matériaux aux faibles
296 tanins comme le fourrage, les boues et les composts. Il est possible d'estimer l'indice de stabilité de la
297 matière organique (ISMO) par la norme XP U44-162 et la composition de la matière organique par
298 fractionnement chimique [TREMIER, 2009; VEDRENNE, 2007]. D'autre part, des méthodes analytiques,
299 proches de l'ISMO mais dédiées à la caractérisation de la dégradation du bois sont également identifiés
300 [DAMAY, 2014; HANNOUZ, 2014]. Ainsi, une technique de fractionnement chimique de la matière organique
301 adaptée au bois par l'industrie du papier est apparue comme la plus pertinente pour caractériser l'évolution
302 temporelle des broyats de bois « utilisés ». Les paramètres analysés et les méthodes associées sont :

- 303 - La teneur en matières extractibles est mesurée à l'aide d'un extracteur ASE (Accelerated Solvent
304 Extractor). Deux cycles ont été réalisés à 1500 psi (pound per square inch), le premier à l'eau à
305 110°C et le deuxième à l'acétone à 95°C. La précision de la mesure est à +/- 0,5 %.
- 306 - La teneur en lignine est mesurée à partir des matières extractibles. La teneur en lignine Klason a été
307 déterminée par pesée du résidu obtenu par une double hydrolyse acide dans les conditions décrites
308 par la norme TAPPI T222 om-83 [TAPPI, 2018]. La teneur en lignine soluble est estimée par
309 spectrométrie UV-visible à partir des filtrats.
- 310 - Les teneurs en sucres neutres et polysaccharides (glucose, xylose, mannose, galactose, arabinose)
311 sont mesurées à partir des analyses obtenues par double hydrolyse des échantillons préalablement
312 extraits dans les conditions décrites dans la norme TAPPI T249 cm-85. Les teneurs en cellulose et
313 hémicelluloses sont calculées ensuite par déduction. Le niveau de précision des analyses est élevé
314 à +/- 0,1 - 0,2 %.

315 Certains échantillons, riches en matières minérales, ont dû subir un lavage pour isoler uniquement le bois et
 316 ses résidus afin de ne pas perturber les méthodes analytiques. *In fine*, certaines quantités analysées sont
 317 des proportions faibles des masses initiales, ce qui questionne quant à la réelle représentativité des résultats
 318 analytiques, c'est pourquoi, afin de prendre le recul nécessaire dans l'interprétation, les proportions de
 319 l'échantillon analysé par rapport à l'échantillon de BB initial sont mentionnés dans les tableaux de résultats.

320 Ces analyses sont réalisées sur huit échantillons de broyats de bois « frais » et « utilisés » prélevés lors des
 321 visites de sites en fonctionnement et pour lesquels les comparaisons deux à deux sont possible.

322 2.3.Retours d'expériences

323 La conception et la construction de FBB en France est aujourd'hui principalement l'œuvre d'acteurs du
 324 Réseau de l'Assainissement Ecologique (RAE) ou de particuliers ayant bénéficié d'informations ou de
 325 formations délivrées par le RAE et basées sur le concept développé en Californie. L'interprétation et
 326 l'appropriation des pratiques américaines par les différents acteurs, associés aux propres retours
 327 d'expériences de chacun, engendrent pourtant une certaine hétérogénéité des réalisations. Pour
 328 appréhender concrètement le sujet, il nous est apparu nécessaire d'analyser des réalisations existantes et
 329 d'investiguer les éléments de fonctionnement. C'est dans cette démarche que quatre installations aux profils
 330 hétérogènes ont été identifiées puis visitées.

331 2.3.1.Description des quatre installations

332 Chacune des installations visitées a fait l'objet d'une description technique (*tableau I*) étudiée dans la partie
 333 suivante. Cette description comporte :

- 335 - Le type de ménage, les types d'eaux collectées et l'âge de l'installation.
- 336 - Le nombre et les dimensions exactes d'un filtre.
- 337 - Les conclusions de l'étude de sol réalisée par un bureau d'étude quand elle existe.
- 338 - Son garnissage.

Nature du broyat frais	Type de ménage	Type d'effluent	Âge	Nbre de filtres	Périodicité d'alimentation du filtre	Dimension d'un filtre (L*l*h) en m	Type de sol	Consommation en eau potable (m ³ /an)
Broyat de déchet vert autoproduit	4 usagers	EM+Lixiviat	4,5 ans	5	1 s avec 4 s de repos	5*0,3*0,2	Sol argileux	84
Broyat de déchet vert autoproduit	5 usagers	EM+Lixiviat	4 ans	5	2 s avec 8 s de repos	2,5*0,4*0,3	Sol argileux	45
Plaquettes	4 usagers	EM+Lixiviat	1,5 an	2	1 s avec 1 s de repos	4*0,5*0,4	Sol granitique K = 66,2 mm/h	48
Compost de toilettes sèches	4 usagers	EM	9 ans	1	Alimentation en continu	5*0,4*0,3	Sol argileux	116

EM : eaux ménagères ; K : coefficient de perméabilité.

Tableau I. Caractéristiques techniques des quatre filtres à broyat de bois

339

340 2.3.2.Fonctionnement des filtres

341 La plus-value d'une visite de site est de pouvoir constater sur place les usages et le fonctionnement des
342 filtres en service. Des observations *in situ*, tant du mode de vie des ménages que du fonctionnement des
343 installations ont ainsi été réalisées dans un premier temps. Puis des entretiens avec les usagers ont permis
344 d'approfondir les observations.

345 Les observations *in situ* d'éléments précis mais difficilement quantifiables se sont focalisées sur :

- 346 - L'état de l'interface sol – BB.
- 347 - Une comparaison d'état entre le filtre en alimentation et ceux au repos.
- 348 - Les écoulements en surface et fond de tranchée, après avoir creusé.
- 349 - La présence d'éventuelles nuisances : odeurs, gîtes à moustiques, eaux stagnantes.
- 350 - La présence visuelle d'une activité biologique dans le filtre.

351
352 Les entretiens avec les usagers ont permis d'aborder différents thèmes tels que :

- 353 - Le fonctionnement de l'installation : apport en BB depuis la mise en route, périodicité d'alternance de
354 l'alimentation des filtres et régularité des consignes proposées, dysfonctionnements.
- 355 - Regard critique de l'utilisateur sur le fonctionnement et les contraintes du FBB depuis sa mise en
356 service: comportement du filtre en période inhabituelle (pic ou absence d'eaux ménagères à traiter),
357 impacts des intempéries (sécheresse ou excès d'eau), contraintes d'entretien,
- 358 - Critères de choix initiaux pour ce type de dispositif.
- 359 - Appréciation du dispositif après plusieurs années de fonctionnement.
- 360 - Autres commentaires libres.

361

362 **3. Résultats et discussion**

363 Les résultats présentés ici détaillent tout d'abord les caractéristiques physiques des BB frais ou usagers. Le
364 paramètre granulométrique présenté est le seul à porter sur la totalité des 23 prélèvements de broyats de
365 bois « frais » et aux 7 prélèvements de broyats de bois « utilisés ». Afin de mieux cerner les évolutions du
366 BB au cours du temps et suite à son utilisation dans le traitement des eaux ménagères, les résultats autres
367 portant sur les analyses physiques et chimiques se limitent volontairement aux BB frais et utilisés lorsqu'ils
368 sont comparables deux à deux.

369 L'ensemble des résultats d'analyses relatifs aux 23 prélèvements de broyats de bois « frais » et aux 7
370 prélèvements de broyats de bois « utilisés » sont disponibles dans le rapport d'étude [BRUN *et al.*, 2020].

371 Bien qu'il n'entre pas dans la classification des BB définie en *figure 2*, le cas particulier du compost est
372 maintenu ci-après. Il est à considérer comme un repère vis-à-vis de caractéristiques connues.

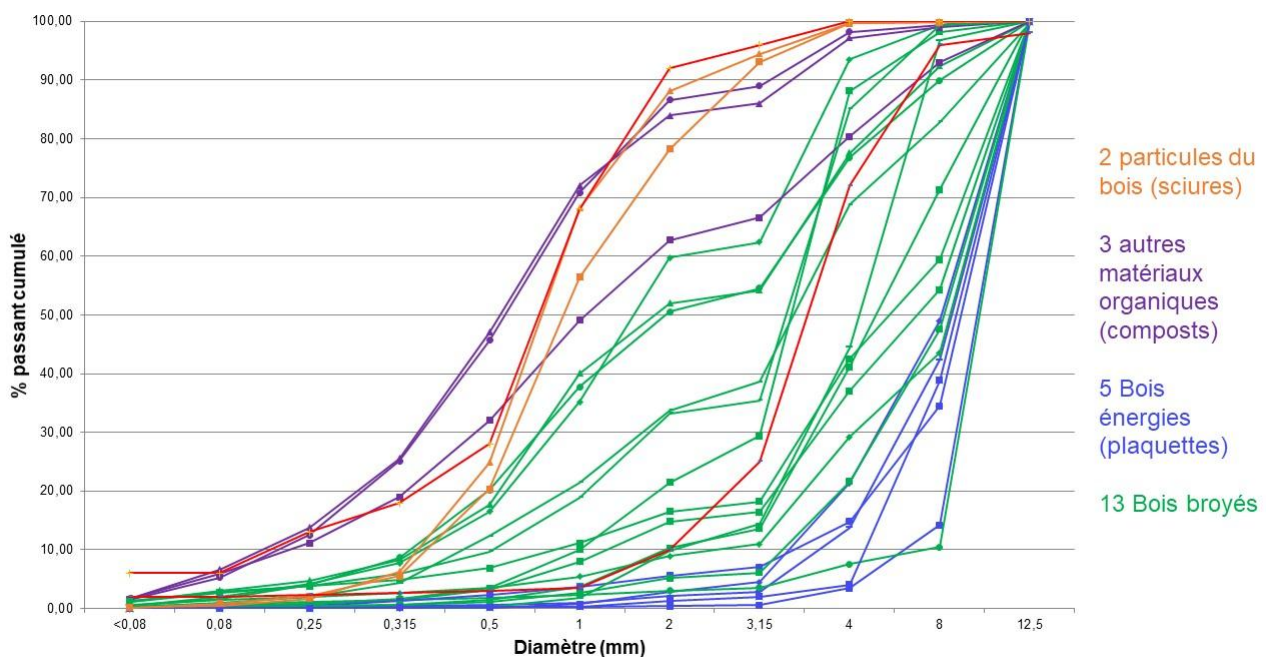
373 **3.1. Comportement physique du broyat de bois**

374 **3.1.1. Granulométrie**

375 La *figure 3* montre l'ensemble des courbes granulométriques des 23 broyats de bois « frais » analysés. Elle
376 souligne leur forte hétérogénéité. Le choix a été fait de signaler, en rouge dans les *figures 3 et 4*, les courbes
377 granulométriques de la norme NF-DTU 64.1. Il est important de rappeler que ce référentiel de l'ANC

378 s'applique à des matériaux inertes de type « sable » et dont les grains sont sphériques. Ces différences
 379 notables font de ces courbes un repère mais ne constituent a priori en rien un objectif pour les
 380 granulométries des BB. La limite haute du diamètre identifié est un artefact de mesure et correspond à la
 381 taille maximale de 12,5 mm du dernier tamis utilisé pour réaliser les mesures de granulométrie.

382 En violet, 3 BB correspondants à des composts se situent dans la partie des granulométries fines du
 383 faisceau du NF-DTU 64.1. Toujours dans cette partie, on retrouve en orange, 2 BB issus de particules du
 384 bois. Il s'agit de sciures de bois. En vert, on observe un large panel de bois broyés aux granulométries
 385 hétérogènes, situés au cœur du faisceau du NF-DTU 64.1 et dans les parties plus grossières. Enfin, en bleu,
 386 se trouvent les plaquettes de bois, matériau le plus grossier.



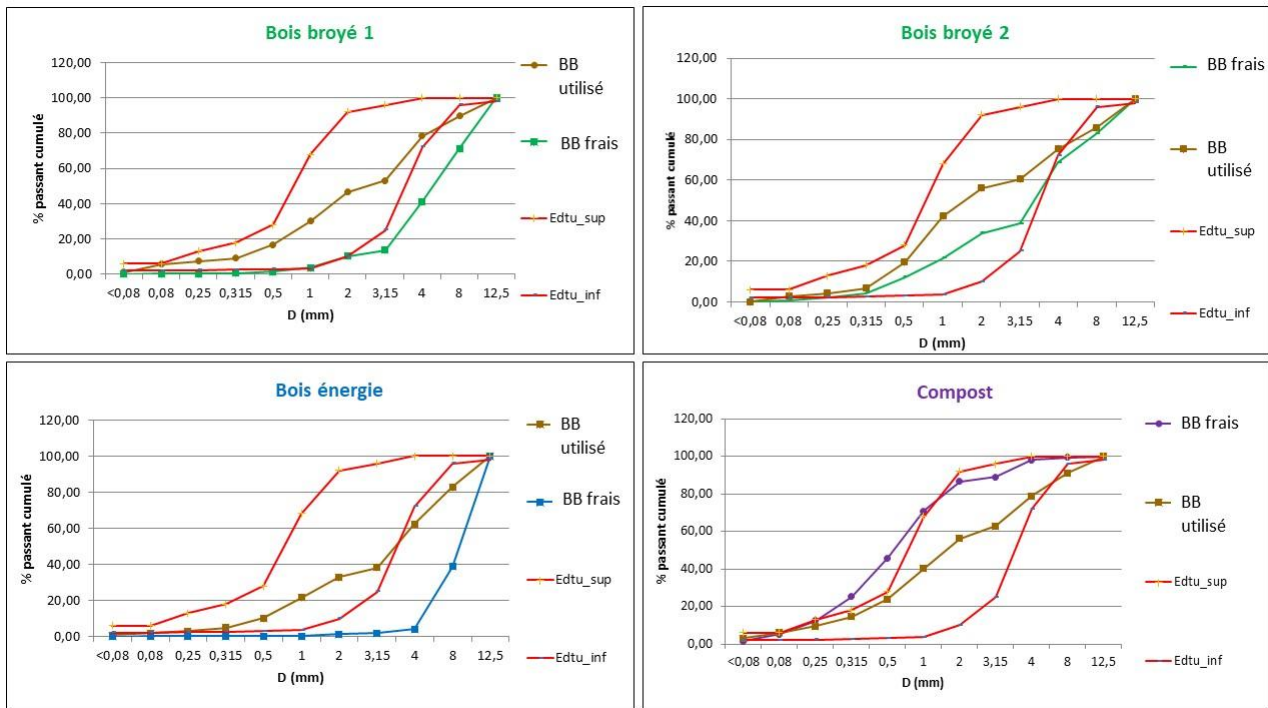
387
 388 **Figure 3 : Courbes granulométriques des broyats de bois frais.**

389 On observe que les d_{10}^5 des BB mesurés sont situés entre 0,25 et 8 mm et les d_{60} entre 0,5 et 10 mm.
 390 Excepté pour les sciures et les composts, on observe que 80 % des particules ont une taille supérieure à
 391 3,15 mm. Ainsi, les broyats de bois mesurés sont plus grossiers que les sables préconisés en ANC.

392 Les coefficients d'uniformités (CU), définis par le ratio entre le d_{60} et le d_{10} , ont été calculés pour les 14
 393 échantillons dont les d_{60} sont inférieurs à la taille de l'avant dernier tamis utilisé, c'est-à-dire 8 mm. Ainsi, ils
 394 n'ont pas été calculés pour les cinq échantillons de bois énergie, et quatre de bois broyés sont ainsi exclus.
 395 Pour les sciures et les composts, les CU moyens sont respectivement de 2,4 et 3,3. Ces faibles valeurs,
 396 comparées à celle utilisée pour les sables ($CU > 3$ dans la NF DTU 64.1), attestent que les matériaux sont
 397 d'une granulométrie resserrée. Pour neuf échantillons de bois broyés, les CU sont très différents allant de 3
 398 à 9, avec une moyenne de 5,4 qui est conforme aux attentes fixées pour les sables ($3 < CU < 6$ dans la NF
 399 DTU 64.1). Parmi ceux-ci, 3 BB, aux CU supérieurs à 8, possèdent une forte amplitude granulométrique.

⁵ dx : diamètre du tamis laissant passer x% de la masse de l'échantillon

400 La *figure 4* montre que les 4 broyats « utilisés » ont tendance à uniformiser leur distribution. Cette tendance
 401 est confirmée par l'analyse comparative de leurs évolutions deux à deux. Avec le temps, on observe un
 402 lissage de la diversité des broyats « frais » vers une homogénéité des broyats « usagés » intégrant l'intérieur
 403 du faisceau granulométrique. Ainsi, pour le bois broyé n°1 et le bois énergie, les tailles des grains diminuent
 404 avec le temps, alors que pour le bois broyé n°2, elles restent dans le faisceau, et pour le compost, les tailles
 405 des grains augmentent. Selon leur granulométrie initiale, les quatre broyats de bois évoluent, soit vers un
 406 matériau plus fin, soit vers un matériau plus grossier, pour tendre vers une granulométrie unique désormais
 407 comprise dans les enveloppes inférieure (Edu_inf) et supérieure (Edu_sup) du fuseau granulométrique de
 408 la NF DTU 1 mentionnée en rouge en *figure 4*.



409
 410 **Figure 4 : Evolution des courbes granulométriques des broyats de bois**

411 Ce constat surprenant ne trouve pas d'explications spécifiques à ce jour. Il convient de souligner ici que les
 412 broyats « frais » ont une granulométrie moins sphérique que les broyats « utilisés ». Lors de la mesure
 413 granulométrique des broyats de bois « utilisés », des agglomérats (petites boules) ont été observés dans les
 414 différents tamis. Il semble logique que les matériaux se désagrégant dans le temps, leurs tailles diminuent.
 415 En revanche, il est surprenant qu'un matériau fin à l'origine évolue vers une granulométrie plus grossière.
 416 Les agglomérats peuvent provenir, soit de l'interaction avec le sol en place, soit de la dégradation des
 417 broyats par des organismes comme les vers qui produisent des excréments. Une hypothèse plausible est
 418 que, pour les broyats les plus fins, il y ait un phénomène régulier de perte des fines par lessivage au cours
 419 du temps. Notons que la teneur en fines, granulométrie inférieure à 80 μm , des broyats « utilisés » ne
 420 dépassent pas 3 % de la masse.

421 Ainsi, a priori, la taille initiale des particules de broyat n'impacterait pas la granulométrie du massif sur le long
 422 terme. Il n'y aurait donc pas nécessité à caractériser par sa granulométrie le broyat de bois avant emploi.
 423 Toutefois, la présence de broyat de bois avec une granulométrie plus forte ralentirait le processus de

424 dégradation [IQBAL *et al.*, 2014]. Ces résultats ne permettent pas de fournir une limite de taille maximale. En
425 revanche, les analyses montrent que les particules de taille de 12.5 mm (limite du tamisage utilisé) sont
426 acceptables.

427 **3.1.2.Densité**

428 La densité des tissus du broyat conditionne les caractéristiques de stockage de l'eau (rétention et transport)
429 dans le BB. Les densités mesurées des broyats « frais » sont très hétérogènes et varient dans une
430 amplitude proche d'un facteur multiplicatif de 3 à 4, qu'ils soient secs ou humides : de 81 à 789 kg de broyat
431 par m³ sur les 23 échantillons collectés (*tableau II*). Le compost, unique matériau n'entrant pas dans la
432 famille des BB définie en *figure 2*, semble se distinguer avec des valeurs de densité plus importantes qu'il
433 soit sec ou humide. Les valeurs de densité humide des broyats de bois « frais » bien que très hétérogènes
434 présente une moyenne proche de celle identifiée dans la littérature qui avance une moyenne à 350 kg / m³
435 [MARCHE et NOEL, 2006].

436 Un ratio densité humide / densité sec variant de 2,24 (bois énergie) à 3,53 (particules du bois) est observé
437 sur le broyat « frais » ; il souligne les facultés d'adsorption de l'eau des BB, résultat qui sera conforté ci-
438 après.

439 L'augmentation de la densité du simple au double, voire davantage, de la densité du broyat « utilisé »
440 comparée à celle du broyat « frais » est vraie pour tous les types de BB que les mesures soient conduites en
441 milieu sec ou humide. Cette augmentation est due à une déstructuration du broyat de bois associée à une
442 évolution de la granulométrie et à la compaction du matériau.

443 Pour les 4 sites aux matériaux comparables deux à deux, les calculs des ratios de densités sèches (ou
444 humides) entre les broyats de bois « frais » et « utilisés » d'un même matériau sont des moyens de
445 quantifier cette évolution intégrant vieillissement et usages (*tableau II*). Les ratios, tous supérieurs à un, sont
446 variables, dans une amplitude de deux à presque six (pour les plus décomposés), pour les matériaux secs.
447 Pour les matériaux humides, on observe une certaine homogénéité avec des valeurs proches de deux
448 qu'elle que soit la typologie de broyat de bois initiale.

Échantillons		Densité (kg _{broyat} /m ³)		Ratio densité BB utilisé / BB frais		Porosité (V _{eau} /V _{total})	Capacité d'absorption volumique calculée avec la densité	
		Sec	Humide	Sec/Sec	Humide/ Humide		du BB frais	du BB utilisé
Bois broyé 1 4,5 ans	BB _{frais}	230	379	1,95	2,46	68 %	21 %	–
	BB _{utilisé}	448	933			64 %	24 %	52 %
Bois broyé 2 4+2 ans	BB _{frais}	153	482	5,97	1,92	66 %	24 %	–
	BB _{utilisé}	914	928			56 %	24 %	45 %
Bois énergie 1,5 an	BB _{frais}	81	344	2,9	1,99	71 %	11 %	–
	BB _{utilisé}	235	685			70 %	14 %	40 %
Compost 9 ans	BB _{frais}	117	789	5,36	1,84	76 %	37 %	–
	BB _{utilisé}	627	1455			47 %	11 %	60 %

Tableau II. Évolution des densités, porosité et capacité d'absorption des broyats de bois (BB)

449

450 Outre le vieillissement, ces différents ratios intègrent les conditions de fonctionnement du filtre : alternance,
451 durée de l'alimentation, charge appliquée, conditions météorologiques. Ces conditions sont tellement
452 diverses qu'il est complexe de tirer davantage de conclusions de ces ratios. En résumé, quel que soit le
453 matériau initial, son évolution dans un filtre à broyat de bois conduit à une densification d'un facteur toujours
454 supérieur à 1,8.

455

3.1.3.Porosité

456 Les broyats « utilisés » ont une porosité légèrement plus faible que les broyats « frais » dans le *tableau II*.
457 L'espace inter-granulaire pourrait se combler au cours du temps. La plus faible porosité de 47 %, obtenue
458 pour le compost au bout de 9 ans de fonctionnement, correspond à une situation d'alimentation en continue
459 d'un filtre garni de compost. Le prélèvement du matériau « bois énergie » analysé a eu lieu sur un site jeune
460 en fonctionnement depuis 1,5 ans seulement, sa jeunesse relative associée à sa forte granulométrie initiale
461 sont peut-être les explications de la très faible diminution de la porosité de ce matériau. Pour les deux autres
462 situations aux conditions de fonctionnement d'alimentation alternée, on observe une porosité comprise entre
463 55-65 % au bout de 4,5 ans de fonctionnement. Ainsi, la porosité des BB « utilisés » reste supérieure à celle
464 d'un sol non colmaté que la littérature fixe entre 30 et 50 % [GIS sols, 2011].

465 Dans toutes les filières basées sur les processus d'épuration par cultures fixées sur support fin, le
466 développement du biofilm sur le média inerte conduit à une baisse de porosité et donc de la perméabilité du
467 massif au cours du temps. Dans le cas des FBB, la perte de perméabilité due à la croissance bactérienne
468 semble être accompagnée d'un maintien de la porosité auquel contribue le mode d'alimentation alternant les
469 phases de repos et d'alimentation [MORVANNOU *et al.*, 2015]. Après plusieurs années de fonctionnement
470 le BB du filtre possède encore une porosité favorable aux écoulements.

471

3.1.4.Capacité d'absorption d'eau

472 Les capacités d'absorption sont le reflet des capacités de stockage de l'eau dans le matériau, conditionnées
473 par la densité des tissus. Calculées sur les 23 broyats de bois, les valeurs sont conformes à celles issues de
474 la bibliographie de 1,28 à 3,81 $\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{broyat sec}}$ [IQBAL *et al.*, 2013] puisque leur moyenne s'établit à
475 1,3 $\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{broyat sec}}$. A titre comparatif, pour un substrat minéral, la capacité d'absorption reste inférieure à 5 %,
476 elle est essentiellement due à la capillarité. Pour des sables de granulométrie comprise entre 0 et 4 mm, elle
477 est de 0,4 à 3,8 % [DUBOIS, 2018].

478 Les capacités d'absorption augmenteraient avec la décomposition des tissus, générant des pores favorables
479 à l'augmentation de la porosité intra-matériaux [IQBAL *et al.*, 2013]. Les équations (ii) et (iii), disponibles
480 dans la partie 2.2.1. permettant de comparer les capacités d'absorption volumiques entre broyats « frais » et
481 « utilisés » conduisent aux résultats résumés dans le *tableau II*. Une évolution du simple au double, voire
482 plus, de la capacité d'absorption volumique de l'eau du broyat de bois « utilisé » par rapport au BB « frais »
483 est observée. En revanche, en neutralisant l'évolution de la densité dans le temps par emploi de la densité
484 du broyat « frais » dans le calcul, la capacité d'absorption du broyat « utilisé » devient équivalente ou très
485 proche de celle du broyat frais, excepté dans le cas particulier du compost utilisé sur le long terme. Ainsi, à
486 volume constant, la capacité d'absorption reste stable alors que la masse de broyats de bois de type bois
487 broyé ou bois énergie augmente au cours du temps.

488 Les capacités d'absorption des bois broyés ou bois énergie, utilisés dans une tranchée recevant des eaux
489 ménagères se maintiennent au cours du temps. L'expérience est issue de trois BB et leur période
490 d'évolution couvre plusieurs années et atteint 4,5 ans pour l'un des deux bois broyés.

491 **3.2. Mesures chimiques sur les broyats de bois**

492 Les bois broyés n°1 et 2 utilisés présentent une forte part de matières minérales qui ont dû être lavées afin
493 de répondre au mode opératoire de la plupart des analyses chimiques réalisées (cf 2.2.2). Ainsi, les
494 analyses chimiques présentées ne concernent parfois qu'une faible part de l'échantillon initial et se limitent,
495 par exemple, à 8 % de l'échantillon initial pour le bois broyé n°1. Le compost, quant à lui est si minéralisé,
496 (voir ci-après les résultats des teneurs en cendre en 3.2.2), que les mesures spécifiques relatives à la
497 composition du bois n'ont pas pu être réalisées. Dès lors, l'interprétation des résultats associés doit être
498 considérée avec précaution. C'est pourquoi la proportion en masse du matériau analysé est rappelée dans
499 les *tableaux III et IV*.

500 **3.2.1. Paramètres agronomiques**

501 Les teneurs en carbone total des BB sont relativement stables les premières années d'utilisation ; il apparaît
502 une tendance à la décroissance suite à l'utilisation pendant plusieurs années des matériaux (*tableau III*). Le
503 ratio C/N des BB, généralement utilisé pour caractériser un compost, systématiquement supérieur à 20 est
504 élevé. Cette lente dégradation du carbone et les forts ratio C /N mènent à considérer que la dégradation
505 n'est pas du ressort d'un compostage aérobie. La dégradation durant plusieurs années est lente. On
506 suppose, que cela est dû au faible développement des microorganismes. En effet, il y a une situation de
507 maintien de « faim d'azote » dans le massif filtrant c'est-à-dire que l'azote est peu disponible pour les
508 bactéries en charge de la dégradation ce qui pourrait limiter leur développement. En revanche,

509 contrairement aux teneurs en carbone total, celles de l'azote et du phosphore total ont tendance à
 510 augmenter dans le temps sauf dans le cas du compost pour lequel le pas de temps est beaucoup plus long.

Échantillons		Proportion analysée (%)	C total (% MS)	N total (% MS)	P total (% MS)	Ratio C/N	Ratio C/N/P
Bois broyé 1 4,5 ans	BB _{frais}	100	45,4	0,97	0,14	47	85 / 1,8 / 0,3
	BB _{utilisé}	16,9	43,4	1,71	0,20	25	85 / 3,3 / 0,4
Bois broyé 2 4+2 ans	BB _{frais}	66,8	43,7	0,86	0,09	51	85 / 1,7 / 0,2
	BB _{utilisé}	7,6	41,7	1,56	0,17	27	85 / 3,2 / 0,3
Bois énergie 1,5 an	BB _{frais}	100	46,6	0,25	0,01	186	85 / 0,5 / 0
	BB _{utilisé}	46,3	46,1	0,79	0,09	58	85 / 1,5 / 0,2
Compost 9 ans	BB _{frais}	100	42,4	1,81	0,50	23	85 / 3,6 / 1
	BB _{utilisé}	-	12	1	0,17	12	85 / 7,1 / 1,2

511 **Tableau III. Évolution des paramètres agronomiques des broyats de bois (BB)**

512 Le rapport DBO/N/P est optimal lorsqu'il est de l'ordre de 100/5/1, pour un équilibre nutritionnel du
 513 développement microbien nécessaire au traitement biologique d'un effluent liquide [METCALF et
 514 EDDY,1991]. En absence de référence équivalente concernant le développement bactérien au sein d'un
 515 solide, on utilise ce même ratio pour évaluer l'équilibre nutritionnel des BB. Exprimés en C/N/P qui s'établit à
 516 85/5/1 [RISCH *et al.*, 2011], les équilibres ne sont pas atteints. Que ce soit pour les broyats « frais » ou
 517 « utilisés », ce rapport montre une carence en azote et en phosphore. Pour les broyats « utilisés »,
 518 l'augmentation au cours du temps des teneurs en azote et en phosphore contribue à réduire les carences
 519 initiales. Ainsi, tant « frais » qu'« utilisés » les BB resteraient peu biodégradables et les cinétiques de
 520 dégradation sont très lentes. Le compost est ici un cas particulier puisque son ratio confirme qu'il est bien
 521 biodégradable.

522 **3.2.2. Teneurs en cendre**

523 Une augmentation des taux de cendres des échantillons de broyats « utilisés » par rapport aux broyats
 524 « frais » traduit, sans ambiguïté, un accroissement des matières minérales et correspond de fait, à une
 525 baisse généralisée de la teneur en matière organique dans les BB au cours du temps (*tableau IV*).

	Échantillons	Proportion analysée (%)	Teneurs en cendres totales (%)	Teneurs en extractibles solubles		
				à l'eau (%)	à l'acétone (%)	totaux (%)
Bois broyé 1 4,5 ans	BB _{frais}	100	4,8	5,7	2,3	8,0
	BB _{utilisé}	16,9	42,3	2,5	1,7	4,2
Bois broyé 2 4+2 ans	BB _{frais}	66,8	16,7	2,7	1,8	4,6
	BB _{utilisé}	7,6	56,6	3,1	2,8	5,9
Bois énergie 1,5 an	BB _{frais}	100	0,4	2,4	0,9	3,3
	BB _{utilisé}	46,3	42,1	1,8	0,7	2,5
Compost 9 ans	BB _{frais}	100	16,6	8,4	1,5	9,9
	BB _{utilisé}	–	76,5	–	–	–

Tableau IV. Teneurs en cendres et en matières organiques extractibles des broyats de bois (BB)

526

527

528

529

530

531

532

533

534

535

536

537

538

539

540

541

542

543

544

545

546

547

548

3.2.3. Teneurs en extractibles

549

550

551

552

553

554

Les matières minérales sont apportées, soit (i) par la minéralisation du broyat de bois à la suite de sa dégradation soit (ii) par la faune du sol (transport), soit (iii) par les eaux ménagères. Même si les phénomènes peuvent être combinés, l'hypothèse (i) semble prédominer. En effet, l'hypothèse (ii) peut être écartée. Si la faune du sol (vers et insectes) importe des matières minérales du sol environnant dans la matrice du filtre, cela revient à considérer leurs excréta dans la matrice d'aliments organiques en provenance externe ou l'introduction par déplacement d'éléments minéraux de petite taille de l'extérieur vers l'intérieur. Cette hypothèse (ii), même si elle peut correspondre à une réalité, n'a pas fait l'objet de mesure scientifique identifiée dans la littérature. L'apport par les eaux ménagères de l'hypothèse (iii) peut être évalué. En effet, sur la base d'une concentration moyenne en matières sèches (MS) des eaux ménagères de 582 mg/L [BOUTIN et EME, 2016] associée à une charge hydraulique annuelle évaluée de 86 m³ par ménage [BRUN *et al*, 2020], la masse annuelle de MS apportée par ménage s'établit à 50 kg MS. Les broyats de bois occupent un volume de 1,2 m³ constituant une masse moyenne de 420 kg lorsque le bois est « frais ». En appliquant les teneurs en cendres mesurées pour le bois broyés frais (0,4 % à 16,7 %), les quantités de MS présentes dans le FBB sont comprises entre 1,7 et 70 kg MS. Ce calcul approximatif permet de relativiser l'apport en MS des eaux ménagères, il n'est certes pas négligeable mais il n'explique pas la totalité de l'accroissement des teneurs en cendres d'autant que les hypothèses retenues surestiment les apports par les EM par rapport aux situations des installations utilisant des bois broyés (*tableau I*). De plus, il est peu probable que l'ensemble des MS soit retenu au sein du BB. Ainsi, par déduction, l'hypothèse (i), correspondant à la minéralisation progressive du BB du massif est à retenir également comme l'un des mécanismes expliquant l'augmentation des teneurs en cendres du massif filtrant au cours du temps.

555 Le lessivage des broyats « utilisés » par les eaux ménagères et/ou une consommation par le biofilm qui se
 556 développe sur les BB engendrent une perte des extractibles qui a pour effet de fragiliser le broyat de bois et
 557 peut ainsi favoriser sa dégradation.

558 3.2.4. Teneurs en lignines et sucres

559 Le *tableau V* résume les caractéristiques des BB frais et utilisés comparables deux à deux, exprimées par
 560 les teneurs en lignine, en cellulose et hémicelluloses. Les broyats « utilisés » exposés aux eaux ménagères
 561 présentent une nette augmentation de teneur en lignine, au minimum de 23 % jusqu'à 89 % par rapport aux
 562 broyats « frais ». On peut attribuer cette augmentation à la dégradation du matériau sur la base d'éléments
 563 bibliographiques mentionnant que la forte présence de lignine dans le BB frais est souvent inversement
 564 corrélée à sa dégradation [COPPENS *et al.*, 2007].

565 Une réduction importante de la teneur en cellulose, au minimum de 33%, est observée systématiquement
 566 dans le *tableau V*. Les teneurs des autres sucres constituant les hémicelluloses sont également réduites, au
 567 minimum de 20%, après l'exposition aux eaux ménagères. Cette réduction semble néanmoins moins
 568 importante que celle observée pour la cellulose.

569 Les hémicelluloses se dégradent généralement plus rapidement que la cellulose quel que soit le procédé
 570 appliqué au bois comme les traitements chimiques, biochimiques ou thermiques. Cette dégradation rapide,
 571 dès 1,5 ans pour le bois énergie étudié, favorise la porosité entre les tissus de lignine du bois et donc
 572 favorise l'absorption de l'eau.

Échantillons		Lignine		Cellulose		Hémicelluloses	
		Totale (%)	Gain (%)	Total (%)	Perte (%)	Total (%)	Perte (%)
Bois broyé 1 4,5 ans	BB _{frais}	28,5		32,9		15,8	
	BB _{utilisé}	53,9	+89	12,1	-63	12,7	-20
Bois broyé 2 4+2 ans	BB _{frais}	36,6		21,0		17,8	
	BB _{utilisé}	50,3	+37	12,9	-39	12,6	-29
Bois énergie 1,5 an	BB _{frais}	29,0		41,2		24,7	
	BB _{utilisé}	35,7	+23	27,4	-33	18,6	-25
Compost 9 ans	BB _{frais}	42,4		23,4		15,3	

573 **Tableau V. Teneurs en lignine et sucres des broyats de bois (BB)**

574 L'augmentation de la lignine est à analyser avec vigilance car elle peut être due à plusieurs raisons : tout
 575 d'abord, un artefact qui résulte du calcul de la masse de référence, intégrant de fait la diminution de poids
 576 due à la dégradation des autres composés du bois dans l'échantillon. Mais aussi, l'expérience du laboratoire
 577 ayant effectué les analyses confortée par des protocoles analytiques complémentaires [HANNOUZ, 2014]
 578 mentionne que certains produits de dégradation de la lignine sont comptabilisés simultanément avec la
 579 lignine elle-même, du fait du mode opératoire. Enfin, un apport extérieur de lignine par les fibres alimentaires
 580 des EM ou par la faune du sol peut également être considéré. Une combinaison de ces évolutions est

581 probable, pour autant la réduction de la masse de référence a déjà été montrée (cf 3.1.2). Lorsque le BB
582 frais se dégrade, la lignine ainsi que certains de ses produits de dégradation semblent rester dans le massif
583 filtrant.

584 Sachant que les sucres représentent une partie du carbone du bois et qu'ils se dégradent, il est probable
585 que l'effluent soit enrichi en DCO à l'issue de sa filtration dans le BB [GORINI *et al.*, 2011]. En absence de
586 mesures fines avec prélèvement de cette eau en cours de traitement, il n'est pas possible d'évaluer cette
587 dégradation de qualité de l'effluent vis-à-vis de ce paramètre DCO.

588

589 **3.3.Enseignements issus des installations en fonctionnement**

590 L'analyse conduite dans les chapitres précédents a été construite sur la base du principe suivant : c'est la
591 dynamique d'écoulement des eaux à traiter dans le substrat (cheminements, régimes d'épandage) qui dirige
592 sa dégradation. Cependant, il est aussi important de considérer que d'autres facteurs entrent en jeu comme
593 les caractéristiques chimiques du broyat et la présence ou l'absence d'interfaces avec le sol ou l'atmosphère
594 [DIETRICH *et al.*, 2019]. En effet, le sujet des filtres à broyat de bois est novateur et associé à une forte
595 hétérogénéité d'installations en fonctionnement. Les rares références de suivi sur le territoire français [BRUN
596 *et al.*, 2017] et l'absence complète de référence de suivi à l'international font qu'il est légitime de s'appuyer
597 sur des observations de terrain et sur le retour d'expériences d'utilisateurs.

598 Lors des visites, l'observation de filtres en fonctionnement d'âges variés permet de souligner l'absence de
599 nuisances olfactives et l'absence de problème d'écoulement de surface, conduisant à des débordements ou
600 du flaquage. Par ailleurs, il est constaté que, même après plusieurs années, aucune plante ne se développe
601 dans le filtre. Aucun recouvrement du filtre par la végétation n'a été observé même après neuf ans de
602 fonctionnement. Ainsi, la tranchée composant le filtre, reste visible et facilement ouvrable à la pelle. Ce sont
603 les plantes poussées dans la périphérie de la tranchée qui recouvrent le filtre et viennent y puiser grâce à
604 leurs racines les éléments nutritionnels nécessaires à leur développement. L'impact de l'alternance de
605 l'alimentation des filtres est aussi clairement visible, tant sur la végétation alentour (desséchée pour les
606 filtres au repos et verdoyante pour le filtre en fonctionnement) que sur la surface du massif (dessèchement
607 du « gâteau » et génération d'interstices pour les filtres au repos).

608 Sur tous les sites, une activité biologique au cœur du massif est visible à l'œil nu du fait de la présence de
609 macro-organismes comme de la pourriture blanche (mycélium), des vers ou des insectes (collembolles,
610 cloportes). Dès 1,5 ans de fonctionnement, le broyat de bois est recouvert par un biofilm formant localement
611 un « gâteau » homogène et friable, largement visible dans la zone d'arrivée des eaux ménagères. Cette
612 évolution semble être hétérogène dans l'espace, dépendante des écoulements des eaux. Pour le site de 1,5
613 ans, en dehors du secteur d'alimentation, les BB sont plus secs en surface, mais ils sont plus humides en
614 profondeur. Pour les autres sites, les niveaux de dégradation paraissent être plus homogènes au sein des
615 filtres ; il est possible d'observer de petites boules de terre, ressemblant à la création du complexe argilo-
616 humique car elles s'écrasent et tâchent les doigts. Notons que la dégradation des matières organiques serait
617 alors ralentie par la création d'un complexe argilo-humique [CHENU, 2001]. Sur tous les sites, à l'interface

618 avec le sol en place, la présence de fragments de terre entre les particules de BB et l'existence de petites
619 fissures tracées dans les sols argileux attestent de passages de la microfaune (turricules de vers, insectes).

620 Le tassement des broyats dans le massif semble être un phénomène généralisé, dans une amplitude
621 variable de 5 à 15 cm selon les sites. Ce constat fait par certains usagers, les amènent à ajouter du broyat
622 dans les filtres pour maintenir leur niveau à celui du sol. En effet, un réapport annuel de BB semble être une
623 pratique courante. Ce tassement est vraisemblablement dû à une combinaison de phénomènes :
624 agencement des morceaux entre eux, typologie du broyat, nombre d'années de fonctionnement de
625 l'installation. Un tassement annuel, calculé sur les sites visités est en moyenne de 3,3 cm / an et varie dans
626 une amplitude de 1 à 7 cm / an.

627 Les usagers rencontrés soulignent leur satisfaction quant au bon fonctionnement du système et à sa
628 simplicité d'exploitation, raisons pour lesquelles ils ont généralement recours à ce système. Sur les sites les
629 plus argileux, les usagers soulignent une amélioration des écoulements dans le sol environnant,
630 correspondant aux capacités d'infiltration, au cours du temps car les rares stagnations visibles au sein du
631 filtre ne se sont produites que dans les premiers mois uniquement. Tous soulignent que le filtre, dans sa
632 zone d'alimentation, paraît fonctionner comme une éponge favorable au développement de la biodiversité du
633 sol et qui ne génère aucune nuisance ni flaquage : les eaux ménagères semblent « disparaître » et le
634 creusement à la pelle des BB des sites visités atteste de l'absence d'eau résiduelle.

635

636 **3.4. Analyse croisée entre mesures et observations**

637

638 Les analyses granulométriques traduisent l'hétérogénéité des broyats frais qui a tendance à s'homogénéiser
639 dans le temps. C'est effectivement ce qui est observable sur les filtres en fonctionnement puisqu'il était
640 impossible de différencier à l'œil nu les différents échantillons de broyats utilisés. Alors que la granulométrie
641 du BB frais n'apparaît pas comme étant un critère scientifique de choix, les usagers ont semble-t-il déjà pris
642 le parti de garnir leur filtre avec les BB à disposition qu'elles qu'en soient leurs granulométries.

643 Les broyats utilisés sont plus spongieux et plus lourds que leurs « ancêtres » les broyats frais. C'est bien en
644 accord avec les résultats obtenus, d'augmentation de la densité et du maintien de la capacité d'absorption et
645 de la porosité. En effet, les analyses chimiques confirment que le broyat se densifie au cours du temps : la
646 fraction organique du bois se minéralise progressivement. En revanche, cette évolution reste lente et la
647 lignine, avec ses sous-produits de dégradation est toujours présente. On ne retrouve pas visuellement les
648 fragments durs de la lignine au sein des massifs observés. Cependant, l'absence de colmatage, de flaquage
649 et d'odeur est un élément traduisant de bonnes conditions hydrauliques observées sur les sites visités dont
650 la responsabilité revient, au moins partiellement à la présence de lignine associée à l'absence des
651 celluloses. La lignine seule n'est pas responsable des bonnes capacités d'absorption et de stockage de
652 l'eau, c'est la densité des tissus des broyats qui lors de leur décomposition génèrent des pores favorables à
653 cela [IQBAL *et al.*, 2013]. Il est probable que l'alimentation alternée en eaux ménagères contribue au
654 maintien de ce phénomène pendant les longues phases de repos. Les mécanismes de disparition de l'eau

655 observée par les usagers, probablement par évaporation, absorption par la végétation et infiltration restent à
656 être précisés ainsi que leurs proportions relatives.

657 Le phénomène de tassement observé, en l'absence de flaquage et d'odeurs va également dans le sens
658 d'une réduction de la granulométrie, associée aux maintiens de la porosité et de la capacité d'absorption.
659 Au-delà des parois cellulaires, la dégradation du broyat de bois en profondeur est surprenante. Cette
660 observation pour les sites les plus âgés (plus de quatre ans) laisse présager de l'existence de mécanismes
661 de dégradation hautement complexes faisant intervenir l'ensemble des organismes vivants, non visibles à
662 l'œil nu, comme les bactéries ou les champignons. La moisissure parfois observé sur des filtres en
663 alimentation pourrait être l'élément le plus limitant dans la dégradation du broyat de bois [COPPENS *et al.*,
664 2007]. En effet, l'alternance qui apporte des périodes de sécheresse pourrait ralentir la dégradation en
665 limitant leur développement.

666 Le broyat qui est ici le support de bactéries capables de dégrader la pollution apportée par les EM possède
667 des propriétés physiques initiales bien qu'hétérogènes, favorables à un traitement par voie aérobie. Les
668 évolutions des propriétés mesurées et observés, tant physiques que chimiques, ne montrent pas de signes
669 défavorables au maintien de ces conditions de dégradation aérobie.

670 **Conclusion**

671 Mieux connaître le broyat de bois et son comportement dans un filtre lorsqu'il traite des eaux ménagères est
672 l'objet des réflexions menées ici. C'est en se focalisant sur les évolutions dans le temps, à la fois de sa
673 composition physico-chimique mais aussi de sa mise en fonctionnement sur site que les analyses ont été
674 conduites.

675 Le terme de « broyat de bois » englobe de nombreux matériaux découpés : le bois énergie pour un usage
676 en chauffage, des déchets de l'artisanat du bois, des bois découpés à usage agricole. Ce terme est
677 beaucoup plus large que le BRF dont la définition d'origine québécoise ne correspond de fait qu'à des
678 usages en agriculture. Le BB est caractérisé comme un matériau local, renouvelable et issu de l'économie
679 circulaire.

680 La granulométrie initiale du BB n'est pas un critère de choix à retenir. En effet, des granulométries initiales
681 de broyats frais, des plus grossières au plus fines, évoluent, pendant leur usage en traitement des EM vers
682 des granulométries intermédiaires entrant dans le faisceau théorique fixé par le NF-DTU 64.1 pour les
683 sables (matériau inerte). Le broyat frais se dégrade avec une cinétique lente au sein du massif d'épandage
684 des eaux ménagères, cela se caractérise par une augmentation de sa densité et une augmentation de son
685 taux de cendre dans le temps. En complément, des baisses significatives en extractibles et en sucres
686 soulignent cette dégradation tandis que la porosité et la capacité d'absorption du massif se maintiennent au
687 cours du temps. Par contre, les analyses de la lignine, combinant simultanément les analyses de certains de
688 ses sous-produits sont d'interprétation plus complexes. La combinaison de ces phénomènes trouve leurs
689 illustrations dans les situations observées sur le terrain qui se caractérisent principalement par le
690 développement d'un biofilm sur le broyat de bois associé à l'absence de colmatage, de flaquage et d'odeurs

691 dans un contexte d'alimentation en alternance. Le broyat de bois est bien un support durable (maintien de la
692 porosité et de l'absorption pendant 4 à 9 ans) en lente dégradation selon un processus à dominante aérobie.

693 Par ailleurs, l'emploi de broyat de bois dans des tranchées creusées à même le sol réalise une modification
694 de l'état du sol [IQBAL *et al.*, 2014] comme cela a déjà été démontré et utilisé en agriculture.

695 Ainsi, les résultats analytiques obtenus sur le matériau « broyat de bois » sont encourageants et permettent
696 de soutenir le bien-fondé de l'usage de ce matériau pour le traitement des eaux ménagères même si les
697 recherches conduites ne portent pas sur les performances épuratoires. Sur la base du retour d'expérience
698 des installations développées par le RAE depuis une dizaine d'années et des conclusions des travaux
699 scientifiques résumés ici, les ministères en charge de l'Environnement et de la Santé prévoient d'autoriser la
700 filière de traitement des eaux ménagères par filtre à BB, à titre expérimental, dans le cadre strict du dispositif
701 « France expérimentation⁶ » intégrant un suivi des ouvrages. De plus, de nouvelles questions de recherche
702 se posent, notamment sur les rôles combinés de la biologie et des écoulements, tout particulièrement dans
703 la zone d'interactions du BB avec le sol. Dans un premier temps, en 2021, des travaux de recherche portant
704 sur une meilleure compréhension des évolutions des écoulements dans les sols en présence de BB sont
705 engagés avec l'aide formalisée par une convention de recherche liant le ministère en charge de l'Écologie et
706 l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae). Par la suite, un
707 suivi in situ d'installations pilotes en fonctionnement avec une méthodologie adaptée de caractérisation des
708 écoulements dans le sol, associé à des essais en laboratoire pour déterminer la qualité de l'effluent,
709 permettrait d'apporter des éléments de réponse en matière de compréhension des mécanismes à l'œuvre,
710 mais aussi de quantification des performances.

711 **Remerciements**

712 Les auteurs remercient le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire pour son aide financière sans
713 laquelle cette recherche n'aurait pas pu avoir lieu ainsi qu'à l'équipe de l'écocentre Pierre et Terre.

714 **Bibliographie**

715 Ademe. (2018). *Classification "Combustible bois énergie" du CIBE*. Angers.

716 Allen, L., Bryan, S., et Woelfle-Erskine, C. (2012). *Residential Greywater Irrigation Systems in California: An*
717 *evaluation of soil and water quality, user satisfaction, and installation costs*. Berkeley.

718 Barthès, B. G., Manlay, R. J., et Porte, O. (2010). Effets de l'apport de bois raméal sur la plante et le sol :
719 une revue des résultats expérimentaux. *Cahier de l'Agriculture*, 19, 280–287.

720 Boutin, C., et Eme, C. (2016). Caractérisation et traitabilité par voie biologique des effluents domestiques
721 selon leur source d'émission. *Techniques Sciences et Méthodes*, 12, 54–76.

722 Breton, V., Rey, F., et Crosaz, Y. (2015). Le bois raméal fragmenté (BRF) pour la lutte contre l'érosion : un
723 exemple de valorisation d'un déchet organique. *Sciences Eaux et Territoires*, 16, 46–49.

724 Brun, F., Merotto, C., Campan, C., et Torrent, B. (2017). *Caractérisation des Eaux Ménagères domestiques*
725 *et de filières de traitement associées - Rapport de suivi in situ*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal->

- 726 01803150
- 727 Brun, F., Dubois, V., Lombard-Latune, R., Boutin, C. (2020). *Le traitement des eaux ménagères par filtres à*
728 *broyat de bois - Rapport scientifique*. INRAE - Lyon-Villeurbanne
- 729 Chenu, C. (2001). *Comptes rendus des séances de l'Académie d'agriculture de France* (Académie
730 d'Agriculture de France, ed.). Paris.
- 731 Chossat, J.C. (2005). *La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols. Choix des méthodes*
732 (Lavoisier, ed.). Paris.
- 733 Coppens, F., Garnier, P., Findeling, A., Merckx, R., et Recous, S. (2007). Decomposition of mulched versus
734 incorporated crop residues: Modelling with PASTIS clarifies interactions between residue quality and
735 location. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(9), 2339–2350.
- 736 Dalahmeh, S. S., Hylander, L. D., Vinnerås, B., Pell, M., Öborn, I., et Jönsson, H. (2011). Potential of organic
737 filter materials for treating greywater to achieve irrigation quality: A review. *Water Science and*
738 *Technology*, 63(9), 1832–1840.
- 739 Damay, J. (2014). *Développement de nouveaux traitements du bois basés sur le procédé d'imprégnation*
740 *axiale* [Thèse]. Vandoeuvre-lès-Nancy: LERMAB, France.
- 741 Debaghi, F. (2013). *Mise en place d'un test rapide pour l'aptitude hydrodynamique des sables utilisés en*
742 *assainissement non collectif*. Rapport. IRSTEA Lyon-Villeurbanne, France.
- 743 Dietrich, G., Recous, S., Pinheiro, P. L., Weiler, D. A., Schu, A. L., Rambo, M. R. L., et Giacomini, S. J.
744 (2019). Gradient of decomposition in sugarcane mulches of various thicknesses. *Soil and Tillage*
745 *Research*, 192(May), 66–75.
- 746 Dotro, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., et Stein, O. (2017). *Treatment Wetlands* (IWA publis, Vol. 7).
- 747 Dubois, V. (2018). *Rapport d'étude: vieillissement des matériaux calcaires destinés à la constitution des*
748 *filiales d'assainissement non collectif*. IRSTEA - Lyon-Villeurbanne, France.
- 749 GIS sols (Groupement d'intérêt scientifique sur les sols), (2011). *L'état des sols de France*. Rapport. GIS.
750 Nancy, France.
- 751 Gorini, D., Choubert, J., Pimpec, P., et Heduit, A. (2011). Concentrations and fate of sugars, proteins and
752 lipids during domestic and agro-industrial aerobic treatment. *Water Science and Technology*, 63.8,
753 1669–1677.
- 754 Hannouz, S. (2014). *Développement d'indicateurs pour la caractérisation mécanique et la durabilité des bois*
755 *traités thermiquement* [Thèse]. Paris: ENSAM.
- 756 Iqbal, A., Beaugrand, J., Garnier, P., et Recous, S. (2013). Tissue density determines the water storage
757 characteristics of crop residues. *Plant and Soil*, 367(1–2), 285–299.

- 758 Iqbal, A., Garnier, P., Lashermes, G., et Recous, S. (2014). A new equation to simulate the contact between
759 soil and maize residues of different sizes during their decomposition. *Biology and Fertility of Soils*,
760 50(4), 645–655.
- 761 Lemieux, G. (1985). *Essais d'induction de la végétation forestière vasculaire par le bois raméal fragmenté*.
762 Laval, Québec: Université de Laval à Québec.
- 763 Lemieux, G., et Lachance, L. (2000). *Une tentative d'évaluation de la technologie BRF pour des fins*
764 *maraîchères* (Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Ed.). Université de Laval à Québec.
- 765 Leramey, C., et Rogeau, D. (1999). *Caractérisation de déchets utilisés comme structurants en compostage*
766 *de boues*. Rapport, IRSTEA. Rennes, France.
- 767 Liénard, A., Guellaf, H., et Boutin, C. (2000). Choix de sable pour les lits d'infiltration-percolation. *Ingénieries*,
768 N° spécial, 59–66.
- 769 López-Zavala, M. A. (2007). Treatment of lower load graywater by using a controlled soil natural treatment
770 system. *Water Science and Technology*, 55(7), 39–45.
- 771 Ludwig, A. (2006). *Create an oasis with greywater (Revised & expanded 5th edition)*. Oasis Design ed.
- 772 Marche, C., et Noël, B. (2006). *Mise en œuvre de la technique du Bois Raméal Fragmenté (BRF) en*
773 *agriculture wallonne*. Strée, Belgique.
- 774 MEEDDM (Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer), MSS (Ministère de
775 la santé). *Arrêté du 7 mars 2012 modifiant l'arrêté du 7 septembre 2009 fixant les prescriptions*
776 *techniques applicables aux installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de*
777 *pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5*. , (2009). Journal officiel de la République
778 Française, NOR: DEVL1205608A.
- 779 Metcalf et Eddy (1991). *Wastewater Engineering. Treatment, Disposal and Reuse*, 3ed Edition. •McGraw-Hill,
780 NewYork, USA.
- 781 Morel, A., Diener, S., (2006). *Greywater Management in Low and Middle-Income Countries, Review of*
782 *different treatment systems for households or neighbourhoods*. Swiss Federal Institute of Aquatic
783 Science and Technology (Eawag). Dubendorf, Switzerland.
- 784 Morvannou, A., Forquet, N., Michel, S., Troesch, S., Molle, P. (2015). Treatment performances of
785 Frenchconstructed wetlands: Results from a database collected over the last 30 years. *Water Science*
786 *andTechnology, IWA Publishing*, 71 (9), pp.1333-1339.
- 787 Pierre et Terre. (2017). *L'assainissement écologique; Pourquoi? Comment? Combien?* Ecocentre Pierre et
788 Terre. Riscle, France.
- 789 Risch, E., Boutin, C., Roux, P., Hédouit, A., (2011). *Modèle ACV - Filière de traitement des eaux usées par*
790 *filtres plantés de roseaux à flux verticaux (FPRv). Rapport d'ACV et données d'inventaire*. Cemagref

- 791 Montpellier - France.
- 792 San Francisco Public Utilities Commission. (2017). *Gray Water design manual for outdoor irrigation*.
793 Retrieved from <https://sfwater.org/modules/showdocument.aspx?documentid=55>
- 794 Tappi. (2018). *TAPPI Standards : Regulations and Style Guidelines*. Retrieved from
795 https://www.tappi.org/content/pdf/standards/tm_guidelines_complete.pdf
- 796 Trémier, A. (2009). Etude de l'influence de la structure physique des déchets et des processus d'aération sur
797 la qualité du compostage et ses impacts environnementaux. In *Projet Precodd*. IRSTEA. Rennes,
798 France.
- 799 Vedrenne, F. (2007). *Étude des processus de dégradation anaérobie et de production de méthane au cours*
800 *du stockage des lisiers* [Thèse]. Rennes : ENSA.
- 801 Villalobos Garcia, J. F. (2018). *Évaluation d'un système de traitement à base de biomasse végétale pour le*
802 *traitement décentralisé des eaux usées : du pilote à l'échelle industrielle* [Thèse]. Toulouse : INP.
- 803