



Parc national
des Pyrénées

INRAE

Écocentre PIERRE & TERRE



Synthèse du projet d'évaluation du traitement des eaux ménagères et matières de toilettes sèches au refuge d'Ayous (64)

Période du projet :

2021-2025

Partenaires :

Parc national des Pyrénées,
INRAE REVERSAAL
Ecocentre Pierre &Terre

Auteurs (INRAE REVERSAAL) :

Rémi CLÉMENT,
Pauline LOUIS,
Arnold IMIG,
Stéphanie PROST-BOUCLE

Cette synthèse est issue de trois rapports scientifiques :

- Suivi des performances d'infiltration de deux filtres à broyat de bois pour l'infiltration des eaux ménagères du refuge d'Ayous (64), Rémi CLÉMENT, Arnold IMIG, Pauline LOUIS et Vivien DUBOIS (2025, <https://hal.inrae.fr/hal-05263539v1>) ;
- Suivi des performances du filtre vertical et d'un filtre à broyat de bois étanché pour le traitement des eaux ménagères du refuge d'Ayous (64), Stéphanie PROST-BOUCLE, Rémi CLÉMENT, Vivien DUBOIS (2024, <https://hal.inrae.fr/hal-04772362v1>) ;
- Suivi du compostage de la matière des toilettes sèches du refuge d'Ayous (64), Rémi CLÉMENT, Pauline LOUIS (2025, <https://hal.inrae.fr/hal-05263520v1>).

Avec le soutien financier de l'Agence de l'Eau Adour Garonne

RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

eAU
GRAND SUD-OUEST
AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE

Contexte de l'étude

Le Parc national des Pyrénées (PNP), en partenariat avec l'Ecocentre Pierre&Terre, a sollicité l'unité de recherche REVERSAAL de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) pour évaluer le dispositif innovant de traitement des eaux ménagères (issues des lavabos et de la cuisine) et de compostage des matières des toilettes sèches. Le système est installé à 1 980 m d'altitude, au refuge d'Ayous (64). L'ancien dispositif était constitué d'une fosse toutes eaux combinée à un filtre à sable avec septodiffuseurs ; il était devenu inadapté du fait de performances médiocres et d'une gestion des matières de vidange de fosse non respectueuse de la réglementation, et représentait alors une importante source de pollution du petit lac situé en contrebas du refuge.

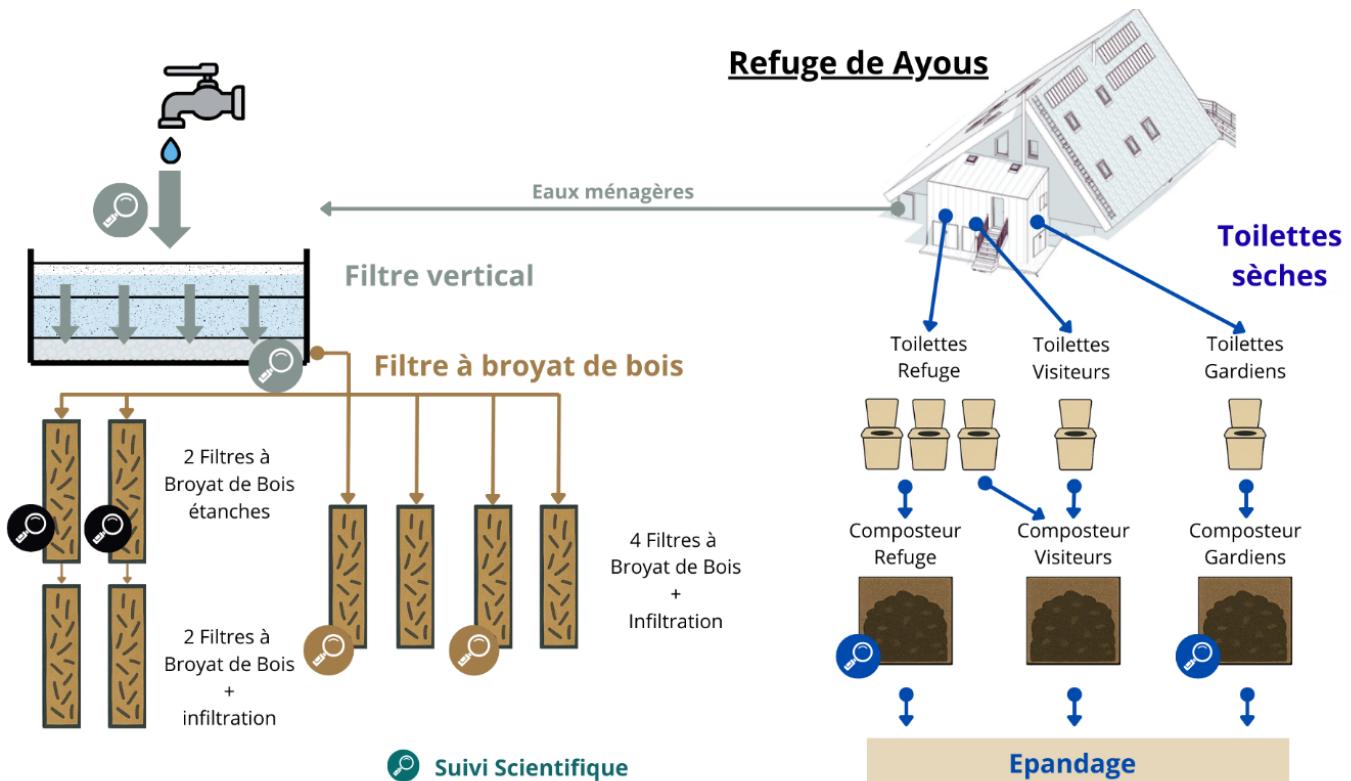


Figure 1 : Schéma conceptuel du système d'assainissement du refuge de Ayous, et identification des suivis scientifiques

La nouvelle filière est composée de :

- ➔ 5 toilettes sèches sans séparation, avec 3 composteurs situés sous les toilettes sèches, dans le périmètre du refuge.
- ➔ Un traitement des eaux ménagères par 1 filtre vertical (réutilisation de l'ancienne fosse septique) suivi de 8 filtres à broyat de bois (FBB) dont 2 sont étanchés pour évaluer les performances de traitement du FBB hors interaction avec le sol.

L'ensemble constitue un traitement économique en ressources, robuste, sans rejet direct vers les eaux de surface, compatible avec les contraintes d'un site isolé en cœur de parc national et en altitude. Le dimensionnement des ouvrages de traitement est complexe car les charges à traiter sont difficiles à estimer du fait d'une fréquentation très variable. La filière n'est en fonctionnement que de mai à octobre chaque année.

Protocole expérimental

Le protocole expérimental mis en œuvre par INRAE REVERSAAL a consisté à étudier chaque ouvrage de manière indépendante durant 3 années consécutives. Les tas de compost des toilettes sèches ont été analysés pour suivre la biodégradation et s'assurer de la qualité des composts sur 3 années consécutives. Les performances de traitement de filtre vertical et des FBB ont été étudiées via 10 bilans 24h par an sur 2 années. Les charges hydrauliques ont été évaluées au regard des volumes journaliers d'eaux ménagères produites par les activités du refuge. Les performances d'infiltration des FBB et du sol ont fait l'objet de suivis par infiltrométrie et tomographie de résistivité électrique en 2021 et 2024. En complément, une étude de la macrofaune des FBB et un suivi d'évolution paysagère des FBB ont été menés.

Résultats clés

1. Caractéristiques des effluents bruts et performances de traitement globales de la filière «eaux ménagères»

La consommation d'eau est fluctuante en fonction de la fréquentation du refuge (nuitées, dîners et déjeuners) avec une fréquentation maximale atteinte tous les jours de mi-juillet à fin août. Le volume moyen d'eaux ménagères se situe autour de 45 L/personne, il est similaire d'une année à l'autre. Ce volume est rapporté au nombre de nuitée individuelle et inclut les repas de midi. La gestion économique de l'eau, l'absence de douche pour les visiteurs et la présence de toilettes sèches ont permis de réduire la consommation d'eau au sein du refuge, mais sont également les raisons qui expliquent que les effluents restent très concentrés en matière organique (Eme et Boutin, 2015 ; Brun et al., 2017).

Les rendements globaux du système « filtre vertical + FBB » sont supérieurs à 60 % pour les paramètres DCO, DBO5, MES et NK en période de fonctionnement normal. Ils sont stables malgré de très fortes charges organiques appliquées et mettent en évidence la robustesse de la filière.

2. Filtre vertical

Le filtre démontre une excellente robustesse et des performances de traitement globalement stables malgré des charges organiques appliquées parfois élevées et une alimentation sans alternance (Figure 2). Les rendements moyens de cet ouvrage sont de 61 à 70 % pour la DCO, de 83 % pour les MES et de 54 à 68 % pour le NK (nitrification) en fonctionnement normal.

Un colmatage en surface du filtre vertical a été constaté chaque année, après 2 mois de réalimentation. Il n'est pas lié à la composition des effluents, mêmes s'ils sont très concentrés, ni aux lames d'eau envoyées car celles-ci sont correctes (0,11 à 0,45 cm/j). Le traitement de l'azote par nitrification est bon ($NK < 10 \text{ mg/L}$) mais des rejets en NK plus élevés sont observés à la fin de chacune des saisons étudiées. Ce paramètre met en évidence le manque d'oxygène disponible à cause du flaillage dû à plusieurs mois d'alimentation continue. Ce sont en effet les critères de conception et d'exploitation qui sont remis en cause : absence de bâches et alimentation sans période de repos.

Ainsi, les règles de l'art de mise en œuvre et de gestion pour ce type d'ouvrage doivent s'appliquer même si le système n'est alimenté que de juin à septembre chaque année, et surtout en contexte montagnard (faibles températures).

Légende : ● 2021 ● 2022 ○ Fin saison 2022 — Rendement 100%

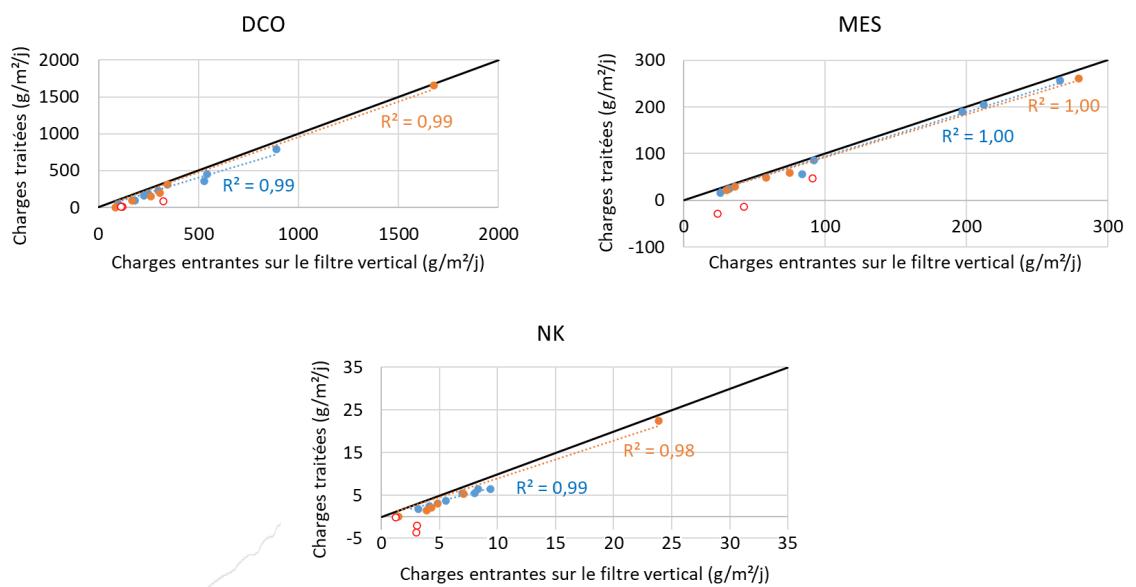


Figure 2 : Charges appliquées et traitées sur le filtre vertical en DCO, MES et NK

3. Filtre à broyat de bois (FBB) étanché

La charge hydraulique appliquée aux FBB est importante : entre 50 et 200 cm/j. Pourtant cela ne semble pas excessif étant données les faibles concentrations en MES en sortie du filtre vertical, de 35 à 98 mg/L en fonctionnement normal. Le risque de colmatage physique est donc très faible. D'autre part, aucun débordement ou colmatage en surface n'a été observé sur les FBB (à l'exception d'une semaine de très forte pluie), ce qui peut aussi s'expliquer par le fait que les FBB bénéficient d'une période de repos de 2 semaines grâce à l'alternance hebdomadaire.

Malgré une certaine variabilité, les rendements du FBB étanché étudié indiquent un complément de traitement entre 10 et 40 % en moyenne pour l'ensemble des paramètres suivis. L'intérêt majeur de cet ouvrage repose sur la rétention des matières particulières.

Il est important de noter que les performances de ce FBB ne représentent pas le fonctionnement normal de ce type d'ouvrage car le fond est équipé d'une géomembrane afin de prélever l'eau traitée. L'eau transite par l'intégralité du fond du filtre ce qui n'est pas nécessairement vrai dans un FBB sur sol en place. Les interactions entre le FBB et le sol sont donc nulles alors que la filière générique de FBB repose essentiellement sur ce principe, avec a priori de fortes interaction avec la biofaune du sol en place. Malgré l'absence de connexion avec le sol, les résultats témoignent de l'avantage des FBB étanchés pour apporter une sécurité voire un complément de traitement à l'issue du filtre vertical, avant infiltration dans le sol.



Figure 3 : Equipement du point de prélèvements en sortie du filtre vertical à l'arrivée sur le FBB (gauche) et le FBB (droite)
(crédit INRAE REVERSAAL, 2021)

4. Filtres à broyat de bois sur sol en place

Les FBB ont été installés à l'aval du filtre vertical sur une zone avec 40 à 50 cm de sol. La capacité d'infiltration a été suivie au fil des années de l'étude afin de s'assurer de l'absence de colmatage. Pour évaluer les performances d'infiltration dans le FBB, une imagerie par tomographie de résistivité électrique a permis d'observer les cheminements de l'eau et des essais d'infiltration ont quantifié l'évolution au cours du temps.

Les images de résistivité montrent un écoulement similaire entre 2021 et 2024. Le sol sous les FBB met en évidence que l'infiltration est restée constante au cours des trois années de suivi. Ces résultats sont confirmés par la mesure de la conductivité hydraulique à saturation (K_s) : la capacité d'infiltration est maintenue après trois ans de fonctionnement (variation du K_s inférieure à 1 log, entre 10^{-4} et 10^{-3} m.s^{-1}) (Figure 4). Le maintien de cette capacité est probablement lié au respect des alternances d'alimentation (durée de repos suffisante), à l'apport régulier de matières organiques susceptibles de favoriser la structuration du sol (limitation des passages préférentiels) ainsi qu'à la présence d'une macrofaune en quantité favorable (notamment des vers de terre). Les observations mettent en exergue une augmentation minimale de 30 % du nombre de vers de terre dans les tranchées entre 2021 et 2024.

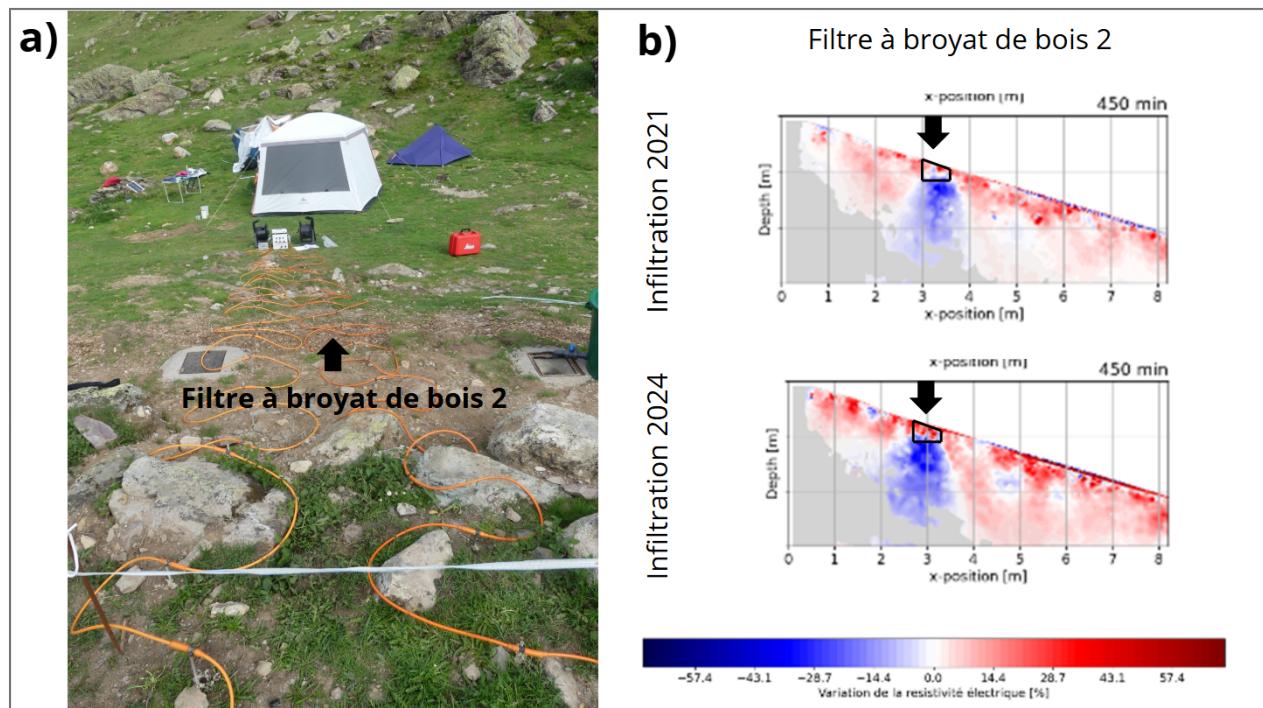


Figure 4 : Tomographie de résistivité électrique (TRE) avec agent de contraste sur les filtres à broyat de bois (FBB) :
a) Photographie du dispositif mis en place, b) Résultats de la TRE sur le FBB 2, 7,5 heures après le début de l'infiltration, en 2021 et 2024

5. Composteurs des toilettes sèches

Deux composteurs ont été suivis dans le cadre de cette expérimentation : « Gardiens » et « Refuge » (Figure 1).

L'étude a porté sur la production des années 2021 et 2022, soit un total de 4 tas de compost. Leur vitesse de dégradation et d'hygiénisation a été évaluée. Des échantillons ont été régulièrement prélevés sur chacun des tas et analysés jusqu'en 2024 afin de caractériser leur composition physicochimique et leur innocuité pour un épandage au sol.

Les composteurs des toilettes sèches fonctionnent globalement bien dans un environnement froid à 1 980 m d'altitude. Après 2 ans de maturation, l'innocuité est atteinte, permettant un retour au sol par épandage (Figure 5). Aucun dépassement des seuils réglementaires pour les métaux lourds n'est observé sur l'ensemble des échantillons.

En ce qui concerne les indicateurs pathogènes, les analyses respectent les seuils exigés par les normes les plus strictes, à l'exception de *Clostridium perfringens*. L'état de maturation et l'innocuité microbiologique des matières ne peut être considérée à Ayous par la mesure de la température seule car la phase thermophile n'a jamais été observée durant le projet (températures systématiquement inférieures à 50°C au cœur des composteurs).

			Matières Séches (%)	Matières Organiques (%)	MO sur sec (%)	Acide Total (%)	C/N (COTN/NT)	MO/Norg	Phosphore (%P ₂ O ₅)	Potassium (%K ₂ O)	Ntot+P ₂ O ₅ +K ₂ O (%)	Cuivre (mg/kg sec)	Zinc (mg/kg sec)	Cadmium (mg/kg sec)	Chrome (mg/kg sec)	Mercure (mg/kg sec)	Nickel (mg/kg sec)	Pb (mg/kg sec)	E. coli (UFC/g)	Entérocoques (UFC/g)	<i>C. perfringens</i> (UFC/g)	Salmonella spp	<i>L. monocytogenes</i>	Œufs d'héminthe
Composteur Gardiens	Tas 2021	19/10/2021	37.10	32.10	86.40	1.20	14.08	40.1	1.1	0.59	2.89	28	144	0.52	<5	0.1	4	<2	<400	6.2E+04	<1000	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g
		03/06/2024	32.70	25.50	78.00	0.92	13.90	44.7	0.92	0.36	2.2	36	325	0.54	5.6	0.1	5.9	3.3	<10	<100	2500	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g
	Tas 2022	05/10/2022	22.30	18.50	82.90	1.21	7.60	21.2	1	0.42	2.63	53	275	0.35	2.7	0.18	5.2	<1	230000	3.6E+03	39000	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g
		03/06/2024	30.20	24.50	81.00	0.95	12.63	14.9	1.6	0.51	3.06	49	250	<0.5	3.3	0.15	5.4	<2	<10	100	12000	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g
Composteur Refuge	Tas 2021	15/06/2022	27.8	22.9	82.4	1.45	8.6	24.1	1.3	0.5	3.25	46	251	0.36	3.5	0.15	3.9	1.2	<100	1.3E+04	9.7E+03	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g
		03/06/2024	34.8	24.2	69.4	1.32	9.2	24.2	2.1	0.56	3.98	57	331	<0.5	6.7	0.18	9.3	4.3	<10	<100	12000	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g
	Tas 2022	05/10/2022	21.3	17.3	81	1.52	7.2	15.2	1	0.34	2.86	48	337	0.35	2.5	0.11	3.8	<1	>1500000	>150000	>150000	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g
		03/06/2024	26.9	19.7	73.2	1	11.1	24.9	2.2	0.7	3.9	74	422	0.5	4.1	0.16	6.2	<2	<10	3200	<10	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g
Référence à titre comparatif	NFU 44-095 compost MIATE	Cultures maraîchères	>50	>20	>30	<3	-	<40	<3	<3	<7	<300	<600	<3	120	2	60	180	1.0E+03	1.0E+05	1.0E+02	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g
		Autres cultures																	1.0E+04	1.0E+05	1.0E+03	abs / 1g	abs / 1g	abs / 1g
	NFU 44-051 autres composts	Cultures maraîchères	>30	>20	-	<3	>8	-	<3	<3	<7	<300	600	3	120	2	60	180	1.0E+02	1.0E+04	-	abs / 25g	-	abs / 1,5g
		Autres cultures																	1.0E+02	1.0E+04	-	abs / 1g	-	abs / 1,5g

Figure 5 : Synthèse des analyses des composts au cours du temps, en comparaison avec les valeurs de référence pour une utilisation normée des matières compostées. Les cellules vertes indiquent que les données respectent les deux normes, les cellules en orange respectent la norme la moins contraignante, et les cellules rouges ne respectent aucune des normes citées.

La teneur en matière sèche (MS) révèle une forte variabilité de l'humidité résiduelle des composts. Elle est faible, autour de 30 % pour 80 % des échantillons. Cette forte teneur en eau est probablement liée à des conditions de gestion peu favorables à une maturation rapide : altitude et températures extérieures basses, conception et exploitation non optimisées.

Plusieurs recommandations sont issues de cette étude :

- La maturation des composts doit être réalisée sur une longue durée, à minima 21 mois, en incluant deux saisons estivales, pour répondre aux critères défavorables. Il s'agit d'assurer d'une part une innocuité microbiologique qui ne peut être atteinte par la montée en température à cette altitude et d'autre part une maturité physique des matières pour garantir une hausse de la teneur en MS et une minéralisation avancée. Il pourrait être envisagé d'installer des composteurs en extérieur, en aval du refuge, afin de permettre une aération et maturation du compost dans des conditions plus favorables.
- L'épandage devra être réalisé en octobre ou novembre, après deux saisons estivales successives de maturation, afin d'ajouter une barrière supplémentaire contre tout risque de contamination pour les animaux de pâture. Il est recommandé de procéder à une analyse de la qualité des composts pendant les trois premières années avant tout épandage. Si, durant cette période, les exigences de la norme NF U44-095 sont respectées, alors les épandages futurs pourraient être réalisés sans analyses systématiques. Le retour au sol à Ayous n'est soumis à aucune réglementation spécifique ; il repose uniquement sur le principe de précaution. C'est dans ce contexte que la norme NFU 44-095 est mentionnée à titre indicatif et comme étant à caractère restrictif.

Perspectives de réplicabilité

Cette filière composée d'un filtre vertical suivi de filtres à broyat de bois (FBB) est simple de conception et d'exploitation. Sa robustesse a été démontrée ; elle la rend pertinente au contexte de variations de charges importantes au cours de la saison estivale et adaptée pour un fonctionnement intermittent à l'échelle annuelle. Sobres, ces dispositifs présentent un fort intérêt pour les sites sans accès routier et peuvent fonctionner sans électricité lorsque la pente est suffisante.

Ce système de traitement est reproductible pour d'autres refuges, sous certaines conditions :

- ➔ Estimation correcte des charges hydrauliques et organiques des eaux usées domestiques à traiter ;
- ➔ Présence d'une épaisseur de sol suffisante pour l'installation des filtres à broyat de bois ;
- ➔ Maintenance minimale régulière : alternance des filtres alimentés (assurer des périodes de repos suffisantes) et aération des matières des toilettes (retournement régulier des matières) ;
- ➔ Respect des règles de dimensionnement du filtre vertical, notamment les charges applicables, ainsi que des règles de l'art quant à sa conception (à minima 2 filtres en parallèle alimentés par bâchées) ;
- ➔ Accompagnement technique initial et partage d'expériences entre refuges.

Il pourrait être envisagé d'utiliser uniquement les filtres à broyat de bois pour le traitement exclusif des eaux ménagères, c'est-à-dire sans fosse septique, ni filtre vertical. Cette possibilité reste toutefois sous réserve de résultats complémentaires qui seront disponibles à l'issue de l'Arrêté « France Expérimentation - filtre à broyat de bois » du 30/03/2023 (<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000047490642>) dont les résultats sont attendus pour 2027 (arrêté demandé par le Réseau d'Assainissement Ecologique, étude scientifique en cours menée par INRAE REVERSAAL).