



Suivi du compostage des matières des toilettes sèches

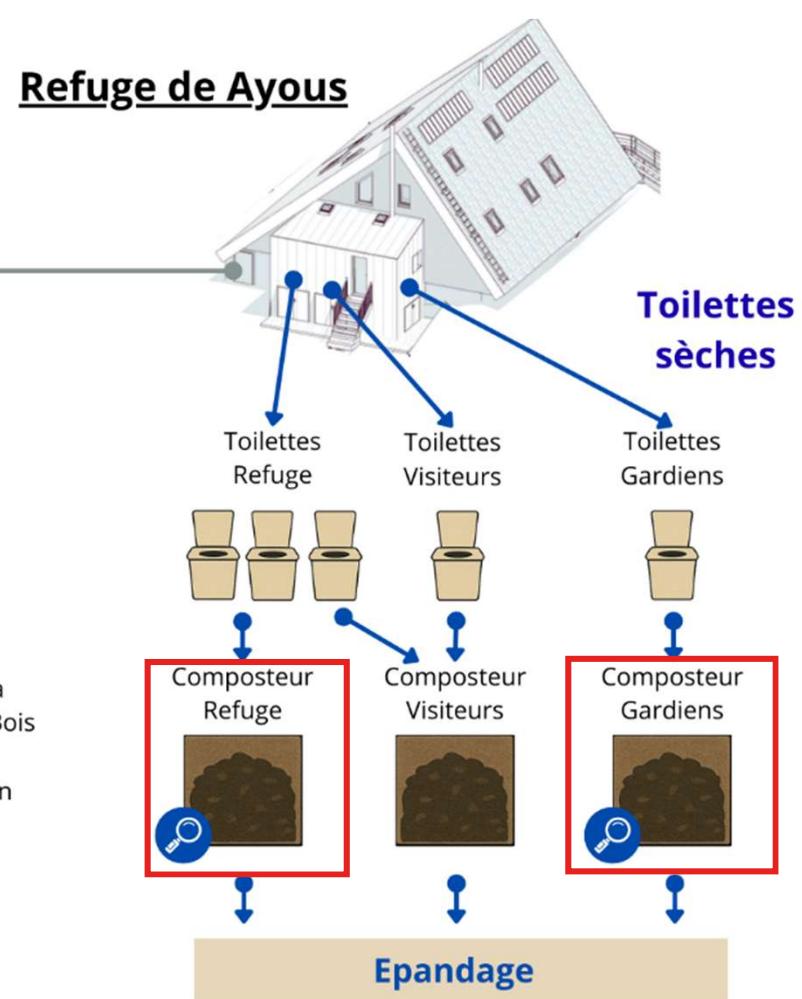
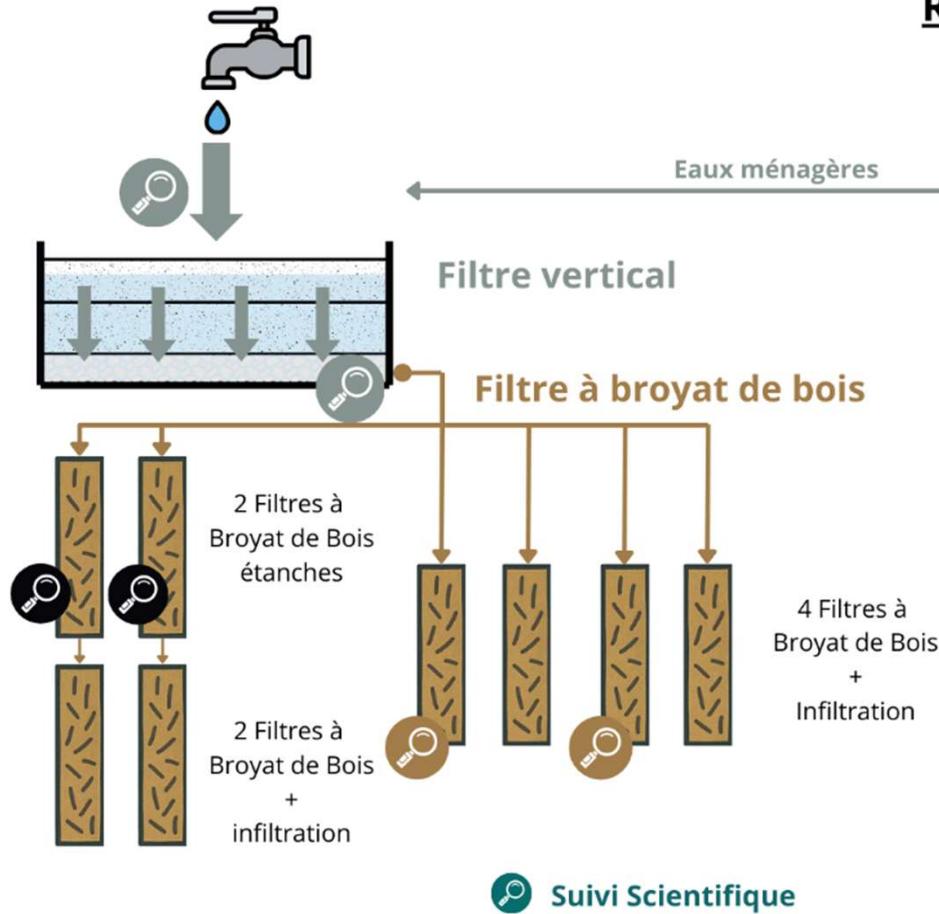
Rémi CLEMENT, Vivien DUBOIS, Pauline LOUIS

Rapport ici: <https://hal.inrae.fr/hal-05263520v1>

Avec la participation de Céline DRUIHLE, INRAE-OPAALE

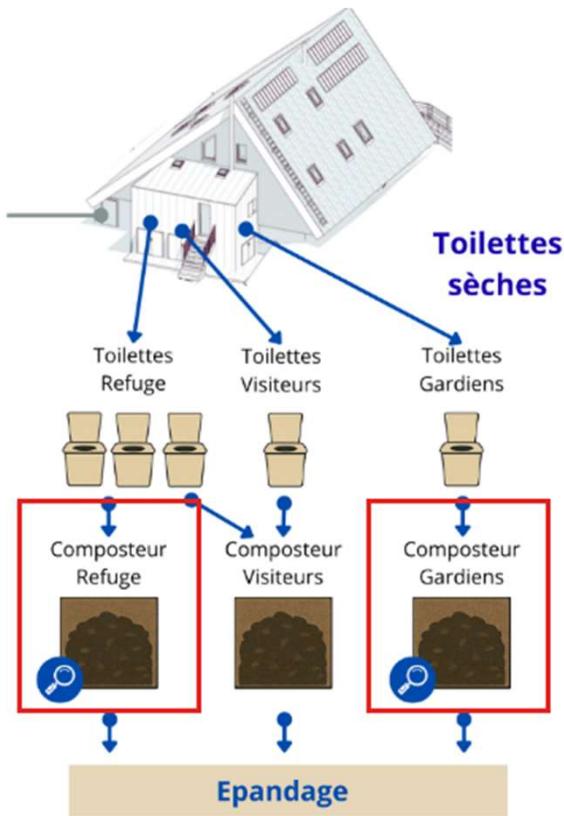
➤ Projet Ayous : compostage des matières issues des toilettes sèches

Filière de traitement des excréta et des eaux ménagères

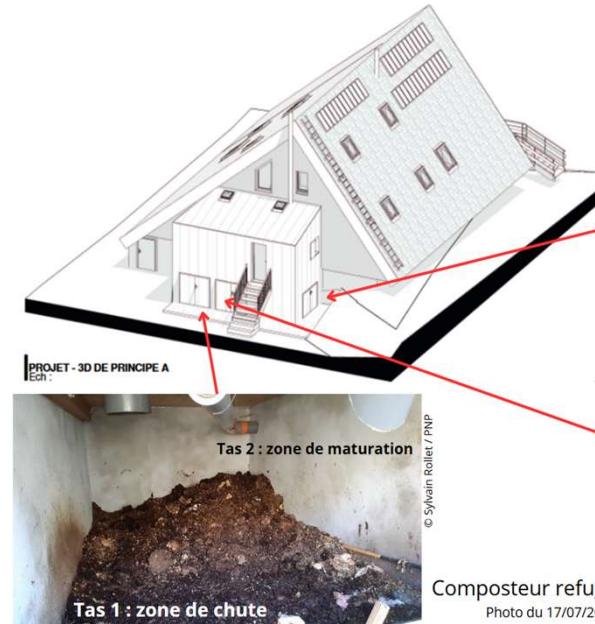


➤ Projet Ayous : compostage des matières issues des toilettes sèches

Filière de traitement des excréta



- Composteur Gardien : composteur des toilettes sèches des gardiens
- Composteur Refuge : composteur de deux toilettes sèches destinées aux clients du refuge prenant gîte et couvert
- Chaque composteur est divisé en deux zones : Tas 2021 et Tas 2022



Composteur gardien
Photo du 17/07/2022



Composteur refuge
Photo du 17/07/2022



Composteur visiteur
Photo du 17/07/2022

➤ Projet Ayous : compostage des matières issues des toilettes sèches

Méthodologie du suivi

- Suivi de la température comme paramètre clé de la dynamique de compostage (sonde au minimum à 20 cm de profondeur),
- Analyses physico-chimiques et microbiologiques des composts :



Bien qu'il ne soit pas envisagé de commercialiser les composts produits au refuge d'Ayous, les analyses se sont basées sur les normes françaises relatives au matières fertilisantes et de supports de culture (normes les plus strictes) :

- **NF U 44-095** : relative aux composts de matières d'origine animale et de matières végétales (composts de type MIATE (matières d'intérêt agronomique issues du traitement des eaux)).
- **NF U 44-051** : relative aux autres types de composts issus de résidus organiques.

➤ Projet Ayous : compostage des matières issues des toilettes sèches

Méthodologie du suivi

- Suivi de la température comme paramètre clé de la dynamique de compostage (sonde au minimum à 20 cm de profondeur).
- Analyses phisico-chimiques et microbiologiques des composts :

Innocuité du compost

	Liste	Méthode analytique	Normes des seuils réglementaires
Eléments traces métalliques (ETM)	Cuivre (Cu), Zinc (Zn), Plomb (Pb), Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Mercure (Hg), Nickel (Ni), et Arsenic (As)	NF EN ISO 11885	NF U 44-051 et NFU 44-095 (seuil dépendant de l'élément)
Indicateurs de pathogènes	<i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella</i> spp., <i>Listeria monocytogenes</i> , Œufs d'helminthes viables, Entérocoques, <i>Clostridium perfringens</i> – totales et spores	NF ISO 16649-2 NF EN ISO 6579-1 NF EN ISO 11290-1 / -2 NF EN ISO 7899-2 NF EN ISO 7937 Méthode OMS 2006 (non normalisée ISO)	NF U 44-051 et/ou NFU 44-095
Paramètres phisico-chimiques	Humidité et matière sèche Matière organique (MO) et carbone organique total (COT) Azote (N) Phosphore (P) Potassium (K)	NF EN 13040 NF EN 13039 / CSOL-MO-0091 NF EN 13654-1 NF EN 13650 NF EN 13650	NF U 44-051

➤ Projet Ayous : compostage des matières issues des toilettes sèches

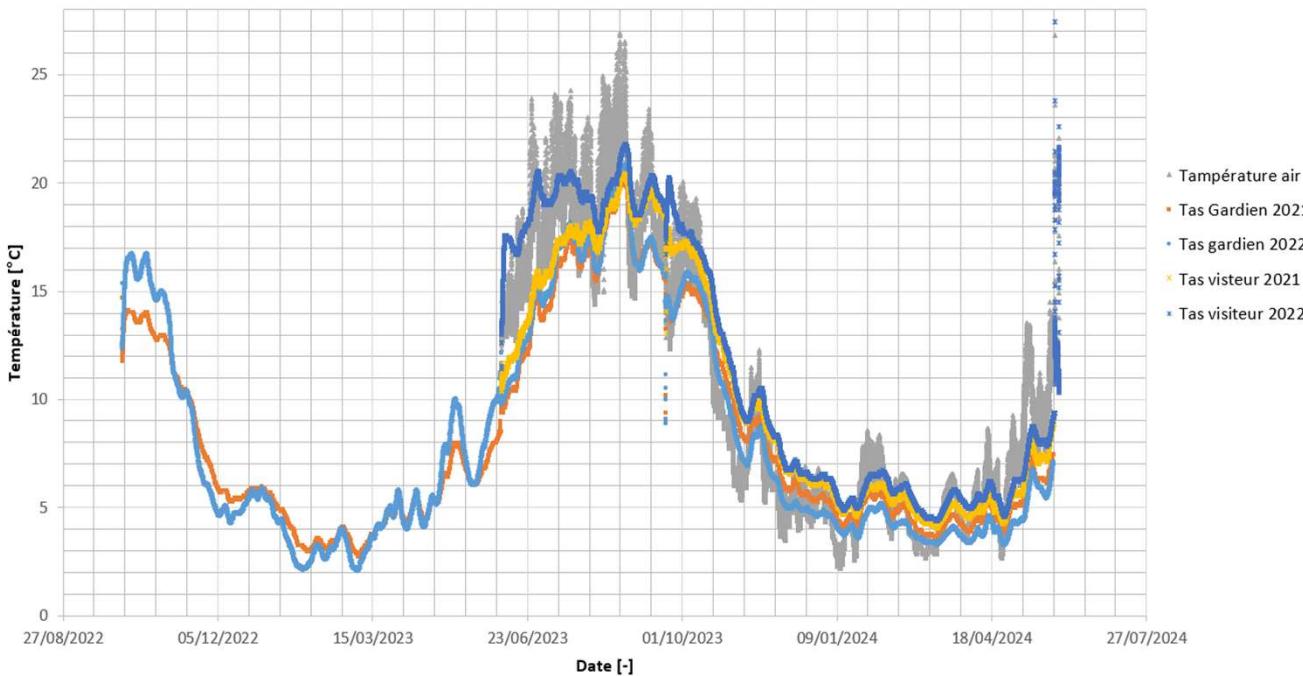
Méthodologie du suivi

- Suivi de la température comme paramètre clé de la dynamique de compostage,
- Analyses physico-chimiques et microbiologiques des composts,
- Calendrier des prélèvements et des mesures :

Période	Prélèvements des sous-produits des tas	Nombre Echantillons	Suivi des températures
2021	Tas 2021, Gardien	1	-
2022	Tas 2021, 2022 Gardien + Refuge	6	Enregistrement continu (10 min)
2023	Tas 2021, 2022 Gardien + Refuge	8	Enregistrement continu (10 min)
2024	Tas 2021, 2022 Gardien + Refuge	4	Enregistrement continu (10 min)

➤ Projet Ayous : compostage des matières issues des toilettes sèches

Résultats : Température



- Les températures relevées restent basses et proches de celles de l'air
 - Production de chaleur probablement insuffisante pour une hygiénisation du compost sur une durée « courte »
- Compostage de type « à froid »
 - Temps de maturation nécessaire plus long pour la dégradation et la minéralisation de la MO, 1 à 2 ans

Absence de phase thermophile impose de s'appuyer sur la durée de maturation pour garantir une bonne hygiénisation.

► Projet Ayous : compostage des matières issues des toilettes sèches

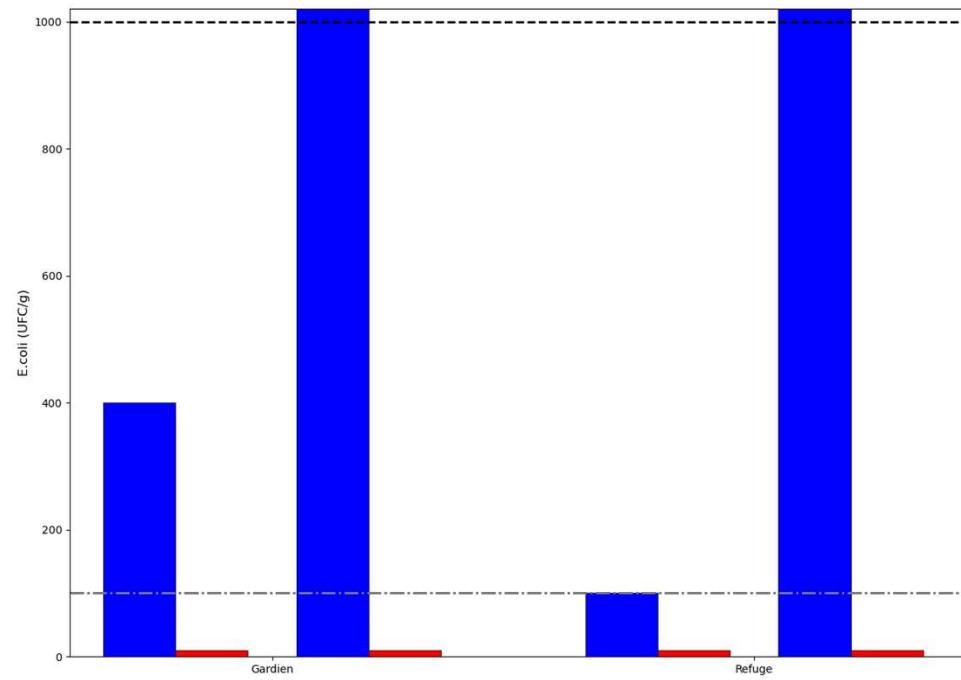
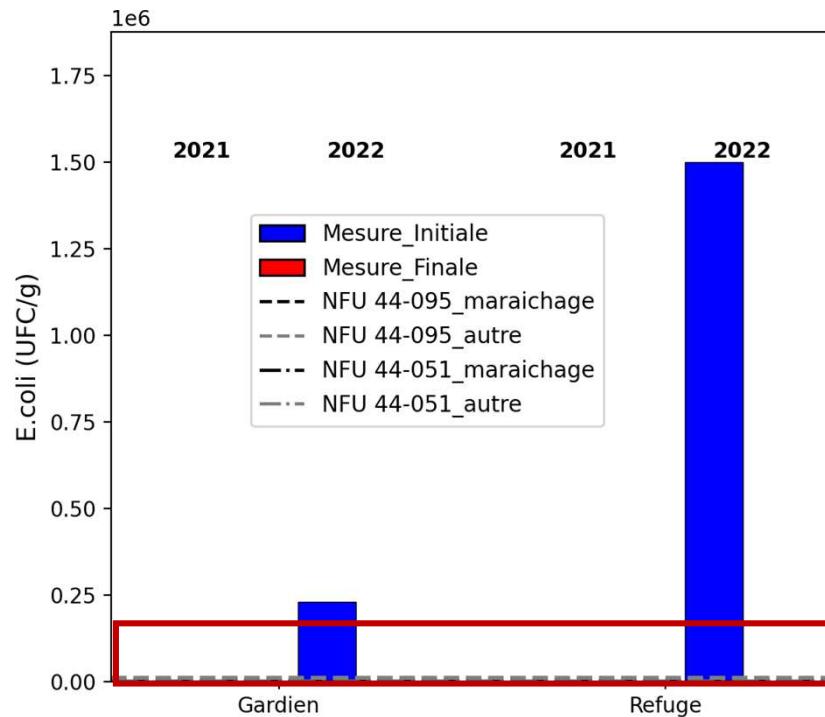
Résultats : Innocuité - ETM

Date analyse	Compost gardien										NFU 44-095 compost MIATE	NFU 44-051 autres composts	Autorisation de mise sur le marché MFSC ANSES (arrêté du 7/4/2020)				
	Tas 2021					Tas 2022											
	19/10/2021	15/05/2022	05/10/2022	05/06/2023	22/09/2023	03/06/2024	05/10/2022	05/06/2023	22/09/2023	03/06/2024	Cultures maraîchères	Autres cultures	Grandes cultures, arboriculture, viticulture, petits fruits	Gazons, prairies	Sylviculture, pépinière ornementale	Cultures florales	Légumes, fraises
Cuivre (mg/kg sec)	28	32	49	56	43	36	53	80	69	49	300	300	300	800	300	300	300
Zinc (mg/kg sec)	144	155	238	329	259	325	275	414	332	250	600	600	600	1	120	120	120
Cadmium (mg/kg sec)	0.52	0.62	0.91	1.1	0.72	0.54	0.35	0.58	0.54	<0.5	3	3	3	1	1	1	1
Chrome (mg/kg sec)	<5	3.5	3.6	4	<5	5.6	2.7	3.9	3.3	3.3	120	120	120	120	120	120	120
Mercure (mg/kg sec)	0.104	0.101	0.075	0.223	0.142	0.099	0.183	0.124	0.22	0.151	2	2	2	1	1	1	1
Nickel (mg/kg sec)	4	4	5.1	5.7	5.8	5.9	5.2	7.6	6	5.4	60	60	60	50	50	50	50
Plomb (mg/kg sec)	<2	2.1	1.6	2	2.9	3.3	<1	<1	2.2	<2	180	180	180	120	120	120	120
Date analyse	Compost refuge										NFU 44-095 compost MIATE	NFU 44-051 autres composts	Autorisation de mise sur le marché MFSC ANSES (arrêté du 7/4/2020)				
	Tas 2021					Tas 2022											
	15/06/2022	05/10/2022	05/06/2023	22/09/2023	03/06/2024	05/10/2022	06/06/2023	22/09/2023	03/06/2024	Cultures maraîchères	Autres cultures	Grandes cultures, arboriculture, viticulture, petits fruits	Gazons, prairies	Sylviculture, pépinière ornementale	Cultures florales	Légumes, fraises	
Cuivre (mg/kg sec)	46	44	60	55	57	48	82	84	74	300	300	300	800	300	300	300	
Zinc (mg/kg sec)	251	267	373	330	331	337	323	413	422	600	600	600	1	120	120	120	
Cadmium (mg/kg sec)	0.36	0.3	0.48	0.45	<0.5	0.35	0.42	0.49	0.5	3	3	3	1	1	1	1	
Chrome (mg/kg sec)	3.5	11	5.4	8.5	6.7	2.5	4.3	5.5	4.1	120	120	120	120	120	120	120	
Mercure (mg/kg sec)	0.152	0.165	0.223	0.18	0.179	0.114	0.161	0.193	0.161	2	2	2	1	1	1	1	
Nickel (mg/kg sec)	3.9	6.2	6.7	9.3	9.3	3.8	4.5	7.7	6.2	60	60	60	50	50	50	50	
Plomb (mg/kg sec)	1.2	2.2	3.1	4.6	4.3	<1	<1	<1	<2	180	180	180	120	120	120	120	

- Tous les échantillons respectent les seuils fixés pour les ETM (normes NFU 44-051 et 44-095), avec des valeurs nettement inférieures.

➤ Projet Ayous : compostage des matières issues des toilettes sèches

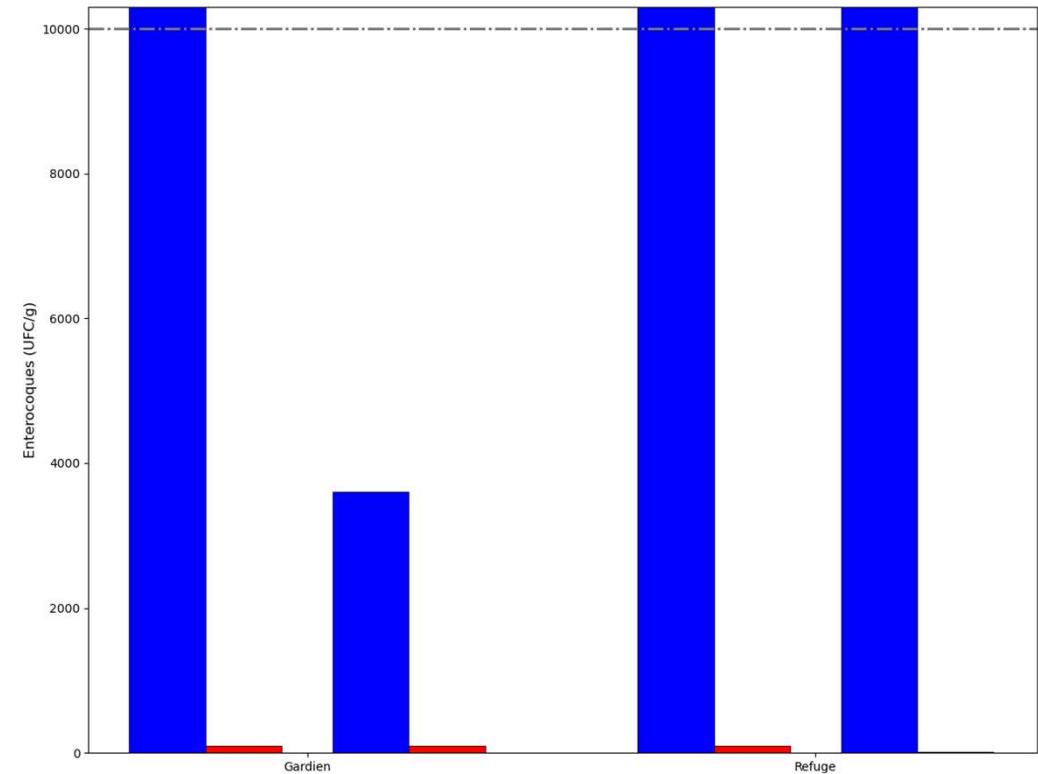
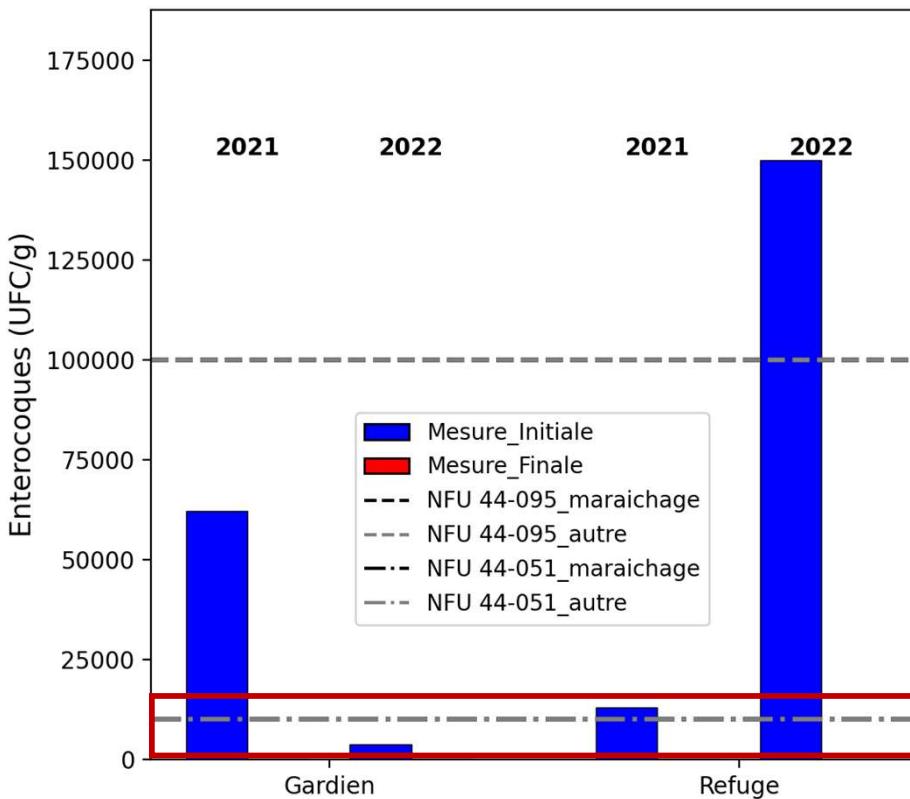
Résultats : Innocuité – Indicateurs de pathogènes



Tous les échantillons finaux respectent le seuil de la norme la plus stricte pour *E. Coli*.

➤ Projet Ayous : compostage des matières issues des toilettes sèches

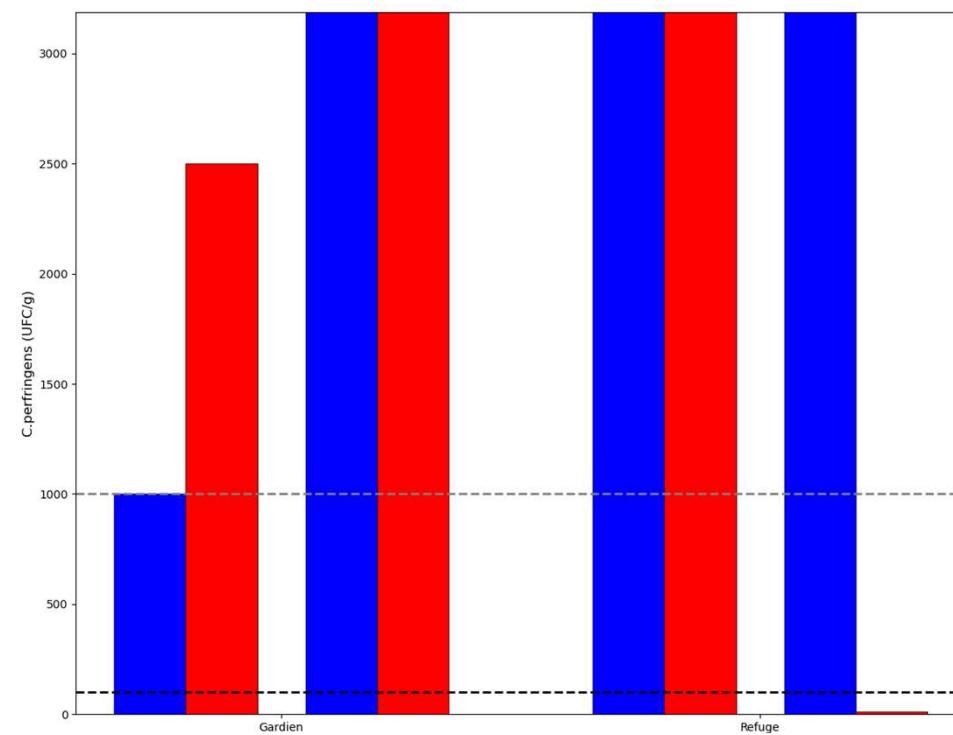
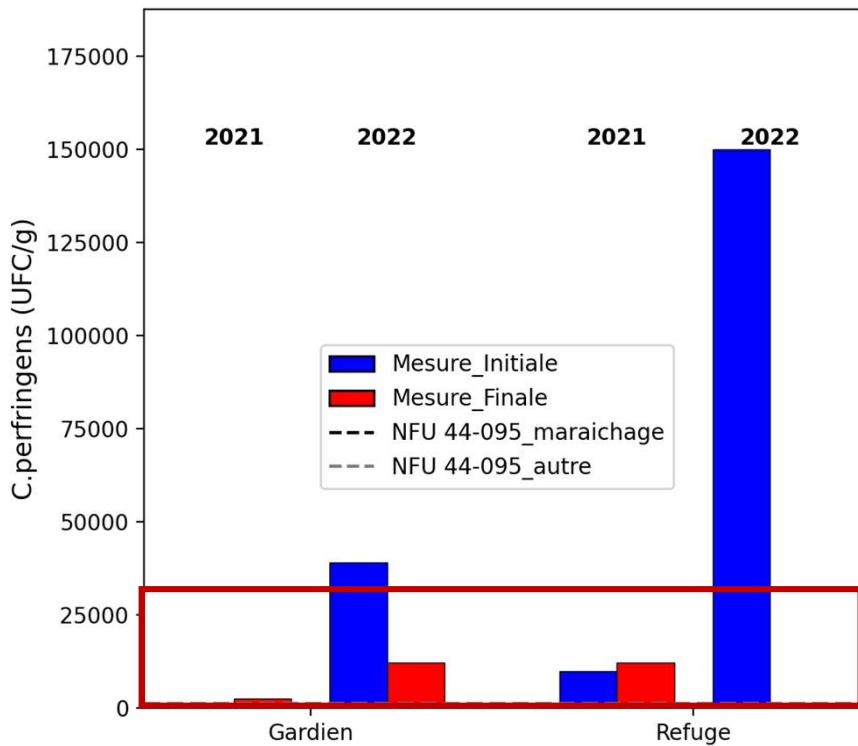
Résultats : Innocuité – Indicateurs de pathogènes



Tous les échantillons finaux respectent le seuil de la norme la plus stricte pour les Entérocoques.

➤ Projet Ayous : compostage des matières issues des toilettes sèches

Résultats : Innocuité – Indicateurs de pathogènes



Seul un échantillon final respecte le seuil de la norme la plus stricte pour les *Clostridium perfringens* (totaux), et les autres ne respectent aucune norme.

> MAIS il y a des questionnements sur les analyses : pour plusieurs échantillons analysés, formes sporulées > totaux.

► Projet Ayous : compostage des matières issues des toilettes sèches

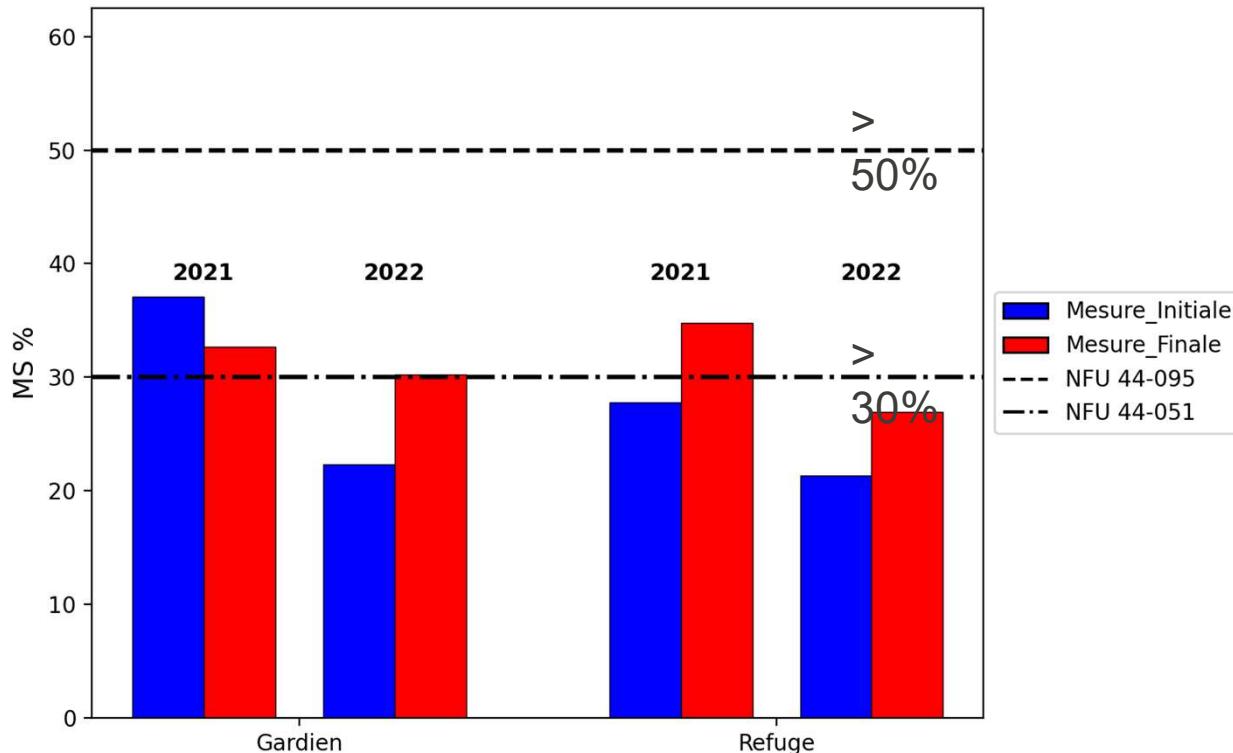
Résultats : Innocuité – Indicateurs de pathogènes

Date analyse	Compost gardien										NFU 44-095 compost MIATE	NFU 44-051 autres composts	Autorisation de mise sur le marché MFSC ANSES (arrêté du 7/4/2020)			
	Tas 2021					Tas 2022										
	19/10/2021	15/06/2022	05/10/2022	05/06/2023	22/09/2023	03/06/2024	05/10/2022	05/06/2023	22/09/2023	03/06/2024						
<i>E. coli</i> (UFC/g)	<100	<100	<100	<100	<100	<10	230000	<100	<100	<10	1.0E+03	1.0E+04	1.0E+02			
Entérocques (UFC/g)	6.2E+04	2.2E+05	5.9E+02	5.0E+02	1.0E+02	<100	3.6E+03	500	4.0E+02	<100	1.0E+05	1.0E+05	1.0E+02			
<i>C. perfringens</i> (UFC/g)	<1000	<1000	28000	3700	20000	2500	39000	3500	65000	12000	1.0E+02	1.0E+03	10			
<i>C. perfringens</i> spores (UFC/g)	2.1E+04	300	2900	4200	3700	-	5000	2000	9200	-	abs / 25g	abs / 1g	abs / 25g			
<i>Salmonella</i> spp	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 1g	abs / 25g			
<i>L. monocytogenes</i>	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 1g	abs / 25g			
Œufs d'helminthe	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 1g	abs / 25g			
Date analyse	Compost refuge										NFU 44-095 compost MIATE	NFU 44-051 autres composts	Autorisation de mise sur le marché MFSC ANSES (arrêté du 7/4/2020)			
	Tas 2021					Tas 2022										
	15/06/2022	05/10/2022	05/06/2023	22/09/2023	03/06/2024	05/10/2022	05/06/2023	22/09/2023	03/06/2024							
<i>E. coli</i> (UFC/g)	<100	14000	<100	300	<10	>1500000	<100	500	<10	1.0E+03	1.0E+04	1.0E+02	1.0E+02			
Entérocques (UFC/g)	1.3E+04	1.6E+02	<100	2.5E+03	<100	>150000	9.2E+03	4.3E+04	3200	1.0E+05	1.0E+05	1.0E+04	1.0E+02			
<i>C. perfringens</i> (UFC/g)	9.7E+03	88000	30000	46000	12000	>150000	100000	98000	<10	1.0E+02	1.0E+03	10	10			
<i>C. perfringens</i> spores (UFC/g)	1.1E+03	4400	8400	2900	-	14000	60000	>150000	-	abs / 25g	abs / 1g	abs / 25g	abs / 25g			
<i>Salmonella</i> spp	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 1g	abs / 25g	abs / 25g			
<i>L. monocytogenes</i>	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 1g	abs / 25g	abs / 25g			
Œufs d'helminthe	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 25g	abs / 1g	abs / 25g	abs / 25g			

Atteinte de l'hygiénisation du compost après 2 ans, dans des conditions non optimales

➤ Projet Ayous : compostage des matières issues des toilettes sèches

Résultats : Paramètres physico-chimiques

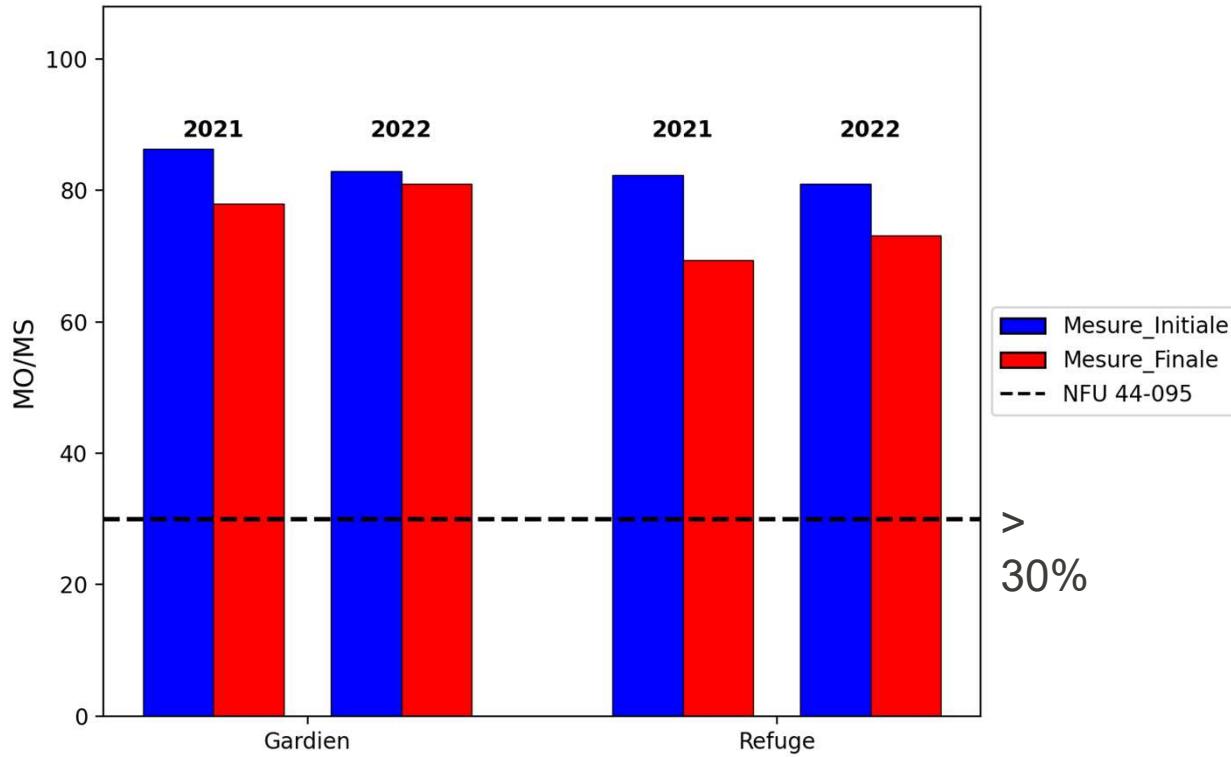


- Aucun échantillon final n'atteint le seuil fixé le plus strict de 50% de MS minimum;
 - Un échantillon final présente une teneur en MS <30%, et ne répond donc à aucun des seuils fixés.
- > Défaut de montée en T° , manque d'aération, persistance des apports, variation non significative

Importance des conditions de stockage, d'aération et de séparation des zones actives et des zones de maturation.

➤ Projet Ayous : compostage des matières issues des toilettes sèches

Résultats : Paramètres physico-chimiques



- Tous les échantillons finaux ont une teneur en MO/MS > 30%, et respectent les exigences de la norme;
- Les analyses temporelles montrent une perte de MO dans le temps, il y a donc bien une faible minéralisation du compost (plus marquée dans le compost Refuge).

Minéralisation non suffisante, manque d'aération et teneur en eau trop importante

► Projet Ayous : compostage des matières issues des toilettes sèches

Résultats : Synthèse

		MS (%)	MO (%)	MO sur sec (%)	Azote Total (%)	C/N (COT/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)	Plomb (mg/kg sec)	E. coli (UFC/g)	Entérocques (UFC/g)	C. perfringens (UFC/g)	Salmonella spp	L. monocytogenes	Œufs d'helminthe	
Composteur Gardien	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	0.104	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	0.099	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	0.183	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	0.151	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	0.152	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	0.179	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	0.114	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	0.161	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

Les paramètres ne suivent pas une tendance constante (persistance des apports)
 Les analyses respectent dans la majorité des cas les normes les plus strictes

➤ Projet Ayous : compostage des matières issues des toilettes sèches

Conclusions

- Le procédé de compostage permet d'obtenir des produits stabilisés et globalement conformes aux exigences réglementaires les plus strictes;
- Malgré des conditions froides et une non montée en température des composts, il y a une hygiénisation;
- Pas de présence significative d'ETM dans les composts
- Des points de vigilances perdurent :
 - La température ne monte pas dans le compost, il faut donc allonger le temps de maturation;
 - La teneur en eau trop élevée dans les composts (cas exceptionnel);
 - L'évolution des paramètres dans le temps n'est pas toujours cohérente avec un arrêt clair des apports.

➤ Projet Ayous : compostage des matières issues des toilettes sèches

Recommandations et perspectives

- Mise en place de composteurs extérieurs : brassage global et maturation isolée des apports de matières fraîches (liquide);
- Temps de maturation des composts sur une longue durée : un minimum de 21 mois, incluant 2 saisons estivales (innocuité et matières sèches);
- Si épandage des matières compostées, celui-ci devra être réalisé entre octobre et novembre, en dehors des saisons de pâtures;
- Analyses de la qualité des composts avant épandage pendant les 3 premières années : si les exigences de la norme NFU 44-095 sont satisfaites, alors les épandages futurs pourront être réalisés sans analyse systématique
- Séparation des urines à la source pour réduire la teneur en eau
 - Il reste des verrous opérationnels (stockage, volumes produits, etc.) et scientifiques (infiltration dans le sol) qu'il faut encore lever et discuter avant de pouvoir se prononcer

➤ Merci de votre attention.