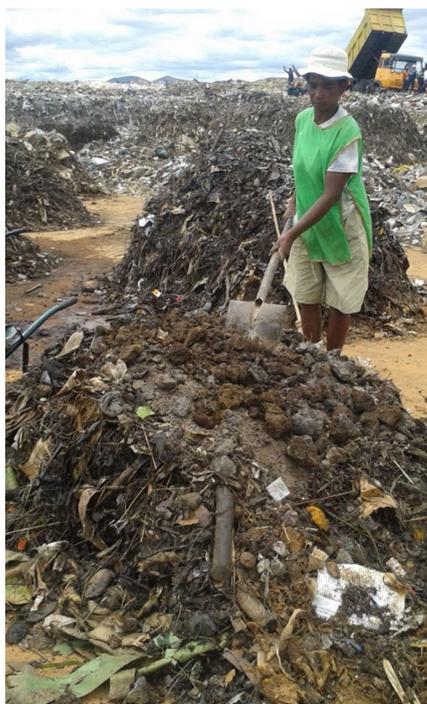


PROJET ALISOTA

**ESSAI DE CO-COMPOSTAGE DU DIGESTAT SOLIDE ET DECHETS ORGANIQUES DE LA VILLE
D' ANTANANARIVO**

PHASE III

Diffusion à : équipe EPAD, Chaire Agriculture urbaine, SAMA, Madacompost, MEAH, CUA



SOMMAIRE

I. CONTEXTE.....	1
II.PRINCIPE DU CO-COMPOSTAGE	2
III.OBJECTIFS DE L'ESSAI DE CO-COMPOSTAGE.....	3
IV.MISSIONS	4
V.ZONES DE CO-COMPOSTAGE	4
VI.MISE EN PLACE DU CO-COMPOSTAGE	5
V.1. Matières premières utilisés	5
V.2. Triage des déchets	6
V.3. Prélèvement des échantillons avant compostage	6
V.4. Type de système de compostage	7
V.5. Modalités de mélange	8
V.5. Procédé de mise en andain lors du co-compostage	10
V.6. Suivi du processus de compostage	11
VII.EVALUATION QUANTITATIVE DU COMPOST OBTENU	14
VIII.EVALUATION QUALITATIVE DU COMPOST OBTENU	18
VIII.1. Qualité sanitaire du compost	18
VIII.1. Qualité agronomique du compost	22
IX.CONCLUSIONS GENERALES DES ESSAIS ET PERSPECTIVES DE L'ETUDE	22
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	24
Annexe 1 : Les helminthes pathogènes excrétés avec les matières fécales	25
Annexe 2 : Fiche de suivi de chaque andain	26

LISTE DES PHOTOS

photo.1.	Essais agronomiques du compost et digestat réalisés en 2019 à Ampitatafika.....	1
photo.2.	Emottage du digestat solide avant épandage, essai agronomique en 2019.....	2
photo.3.	Plateforme de co-compostage sur la décharge d'Andralanitra	4
photo.4.	Triage de déchet avant la mise en andain	6
photo.5.	Forme d'andain mise en place.....	7
photo.6.	Disposition des andains en quinconce.....	10
photo.7.	Mise en andain du co-compostage.....	11
photo.8.	Prise de température d'andain à l'aide d'un thermomètre de compostage	11
photo.9.	Arrosage d'andain par le lixiviat.....	12
photo.10.	Criblage de compost	14

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.1.Modalités d' andain du protocole initial	8
tableau.2.Modalités des andains réalisés	9
tableau.3.Fréquence d' arrosage et retournement par andain	13
tableau.4.Rendement obtenu pour chaque andain	16
tableau.5.Rendement avant criblage pour chaque andain	14
tableau.6.Températures d' hygienisation dans la bibliographie	19

I. CONTEXTE

Dans le cadre du projet ALISOTA, des essais agronomiques des matières organiques urbaines issues du traitement des produits de l'assainissement de la ville d'Antananarivo ont été effectués, depuis 2018 sur 26 sites dans les communes de Tanjombato, Ampitatafika, Mahitsy et Antanetibe Mahazaza.



photo.1. Essais agronomiques du compost et digestat réalisés en 2019 à Ampitatafika

Au cours de ces essais, différents fertilisants à base de compost et digestat ont été testés par les paysans sur des cultures maraichères. Les résultats obtenus ont montré un double intérêt d'utilisation du compost et du digestat en matière fertilisante pour les paysans, d'une part en substituant efficacement les effluents d'élevage et d'autre part l'engrais chimique, tout améliorant le rendement, la qualité de récolte, la vitesse de croissance des plantes et même la qualité du sol. Il ressort également du résultat des essais que le digestat solide possède une valeur fertilisante supérieure à celle du compost et fumier, mais c'est aussi un produit acide très sensible à la sécheresse du sol et son état très compact complique l'épandage pour les paysans, contrairement au compost.

Outre, la performance agronomique, la réalisation de ces essais témoigne déjà l'acceptation sociale d'utilisation du digestat issu du recyclage des fèces humaines par les paysans. Cependant, l'usage du digestat pose encore un risque sanitaire. En effet, les analyses sanitaires des échantillons de pepsay fertilisés par le digestat et le compost ont montré l'acceptabilité des niveaux de contamination microbiologique¹, tandis que les résultats d'analyse parasitologique identifiant la présence d'œufs d'helminthes résistants dans ces PRO ont été affirmatifs.

¹ Absence de *Salmonella* et *Listeria monocytogène* dans 25 g, *Staphylocoques* et *Escherichia coli* < <1000 ufc/g analysés dans les 3 échantillons de digestat solide, compost d'Andralanitra et fumier du paysan.



photo.2. Emottage du digestat solide avant épandage, essai agronomique en 2019

La pollution parasitaire du digestat solide résulte du rejet des œufs d'helminthes (Cf. Annexe 1) avec les matières fécales de l'homme.

L'utilisation du digestat en tant qu'amendement présente donc un risque tant que ces œufs d'helminthes sont viables. A cet effet, ces produits doivent être encore hygiénisés selon le niveau d'acceptation de l'OMS avant sa mise en disposition dans l'agriculture. Une solution envisageable à faible coût pour améliorer la qualité hygiénique du digestat est le co-compostage post-traitement, particulièrement que le mix digestat solide et compost d'Andralanitra a été prouvé efficace pour atténuer l'acidité du digestat lors des essais en milieu paysan. De plus, certains auteurs après des essais réussis, mettent en exergue le co-compostage des boues traitées et déshydratées avec les déchets organiques comme le moyen le plus efficace augmentant la dessiccation des œufs d' helminthes (OMS 2006) en raison des températures élevées produites pendant le compostage anaérobie. Par ailleurs, une fois co-composté avec des déchets organiques municipaux, non seulement, le digestat sera hygiénisé, mais il sera aussi plus riche en divers nutriments composants et sa texture sera plus légère facilitant son épandage.

II. PRINCIPE DU CO-COMPOSTAGE

Le co-compostage consiste au compostage qui combine des déchets tels que les boues de vidange préalablement traités et déshydratés appelés *digestat solide* avec d'autres déchets organiques. En effet, le compostage est un procédé de transformation aérobie des matières fermentescibles par des micro-organismes dans des conditions contrôlées.

Dans le processus de compostage on peut distinguer 4 phases chronologiques, en lien avec le dégagement de chaleur dû à l'activité des microorganismes (Kabore, 2010) :

- **Phase mésophile** : caractérisée par une température entre 20 à 45°C pendant laquelle les bactéries se développent rapidement tout en consommant des composés facilement dégradables. La température augmente également en raison de la vitesse de croissance rapide (due aux réactions cataboliques exothermiques) de ces micro-organismes.
- **Phase thermophile**, pendant laquelle des bactéries thermophiles deviennent actives entre 50 à 75 ° C, décomposant davantage la matière organique. C'est au cours de cette phase cruciale que se produisent la réduction des agents pathogènes et l'inactivation des semences de plantes en raison des températures élevées et prolongées. En effet la plupart des agents pathogènes sont

inactivés à des températures supérieures à 60 ° C qui provoque une condition défavorable à leur survie.

- **Phase de refroidissement** : pendant laquelle les derniers substrats facilement dégradables sont épuisés, l'activité bactérienne ralentit et la température baisse graduellement. Le début de cette phase est identifiable lorsque le retournement ne provoque plus d'augmentation de la température du mélange. C'est aussi une phase de transition entre la phase de fermentation et maturation.
- **Phase de maturation** : pendant laquelle il y a une baisse de la température jusqu'à la température ambiante. Le tas devient plus homogène et moins biologiquement actif bien que des organismes mésophiles recolonisent le compost, en particulier les lombrics lorsque ceux-ci sont présents dans l'environnement du tas. Quand le compost est prêt, le tas devient brun foncé à noir. Les particules sont plus petites et homogènes, et la texture ressemble à celle d'un sol.

Les trois premières phases sont regroupées sous la dénomination "fermentation" qui dure en général quelques semaines, et la dernière phase de maturation peut durer plusieurs mois.

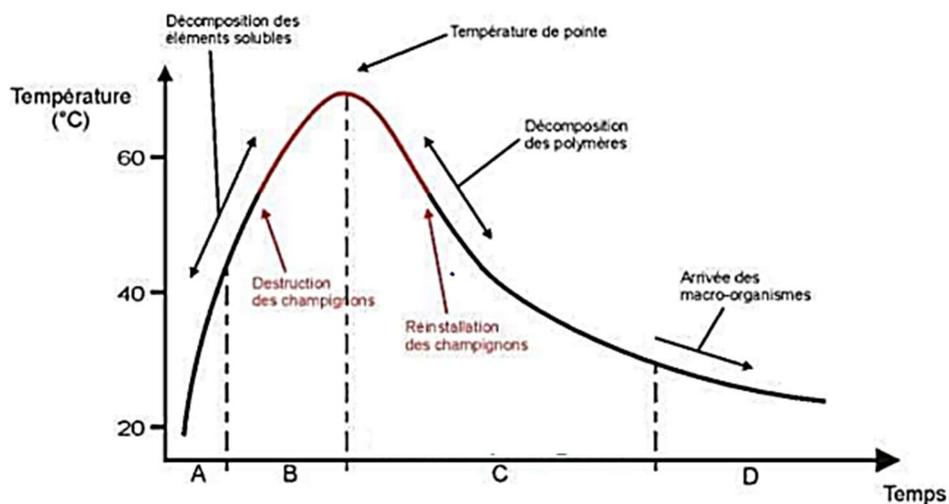


Figure 1 : Allure théorique de l'évolution des températures au cours du compostage (KABORE 2010)

Le compostage permet une réduction des germes pathogènes présents dans le digestat et les déchets grâce aux températures élevées atteintes et prolongées pendant le processus de fermentation.

III. OBJECTIFS DE L'ESSAI DE CO-COMPOSTAGE

L'objectif général de cet essai de co-compostage est d'hygiéniser le digestat pour que ce produit puisse être utilisé en toute sécurité (innocuité) pour les agriculteurs, les consommateurs et l'environnement.

En effet, parmi les problèmes liés à l'utilisation des boues, les plus préoccupants, concernent la présence des parasites résistants ayant un potentiel pathogène élevé.

Ainsi, le niveau d'hygiénisation en termes d'helminthes du produit attendu après le co-compostage doit être conforme aux seuils acceptables imposés par l'OMS.

Outre, aux exigences sanitaires, l'essai de co-compostage permettra également de trouver l'optimum ratio de mélange digestat et déchets organiques qui produit un compost de haute qualité fertilisante et répondant aux attentes des paysans (produit riche en nutriments, agréables et facilité d'épandage).

IV. MISSIONS

L'étude de co-compostage s'étend sur une durée de 6 mois, à commencer le 09 Novembre 2020.

Les activités consistent à :

1. Elaborer un protocole de co-compostage
2. Réaliser un co-compostage de boues de vidange sur la décharge d'Andralanitra
3. Faire un suivi du co-compostage
4. Evaluer quantitativement et qualitativement le compost obtenu
5. Capitaliser les activités de co-compostage en élaborant une fiche technique et un rapport d'étude

V. ZONES DE CO-COMPOSTAGE

Les essais de co-compostage de digestat et déchets organiques ont été réalisés sur la plateforme de compostage de la décharge d'Andralanitra à Ambohimangakely.

La compostière est composée d'une plate-forme totalement à l'air libre d'une surface de 180m² soit 20 m sur 9m.



photo.3. Plateforme de co-compostage sur la décharge d'Andralanitra

La région d'étude est caractérisée par un climat tropical d'altitude, avec alternance d'une saison sèche et froide de mai à août ayant des températures fraîches (totale moyenne 16,7 °C) et de faibles précipitations (totale moyenne 66mm), et d'une saison des pluies de novembre à avril avec des températures chaudes (totale moyenne 21°C) et de fortes précipitations (totale moyenne 350mm), et d'une courte transition saison sèche et chaude entre septembre et octobre.

Les boues de vidange préalablement traitées et déshydratées de la STBV Ampitatafika et Ambatomaro ont été transportées sur la décharge d'Andralanitra. Les déchets organiques utilisés sont issus du triage des déchets de marchés déposés sur la décharge d'Andralanitra par les camions de SAMVA.

VI. MISE EN PLACE DU CO-COMPOSTAGE

V.1. MATIERES PREMIERES UTILISES

Digestat solide : issu des boues de vidange traitées sorties du biodigesteur de la STBV à Ampitatafika et Ambatomaro, transporté sur la décharge puis préséché à l'air libre dans le hangar de la décharge d'Andralanitra. Le traitement des boues de vidange dans le biodigesteur (dans une condition de température ambiante et anaérobie au moins 20 jours) et la durée de stockage lors du séchage contribuent déjà à une partie de l'hygiénisation des boues.

Digestat liquide : la partie liquide obtenue après traitement des boues de vidange dans le biodigesteur de la station d'Ampitatafika et transporté sur la décharge dans des fûts de 250 litres. Le digestat liquide est un effluent très riche en azote, il jouera le rôle d'apport nutritionnel supplémentaire mélangé à l'eau d'arrosage lors du co-compostage. Cela est une des pratiques les plus courantes en termes d'enrichissement du compost.

Déchets organiques : issus des déchets de marché de la Commune urbaine d'Antananarivo transportés sur la décharge d'Andralanitra par les camions de SAMVA. Les déchets de marché sont encore triés pour récupérer les déchets organiques utiles au co-compostage. Pendant ce triage, le volume de déchets compostables et non compostables est identifié.

Des conditions de compostage optimales avec un rapport C/N et une teneur en eau appropriés sont obtenues en mélangeant le digestat solide et les déchets organiques pendant le co-compostage car le digestat est relativement riche en azote et pauvre en humidité, tandis que les déchets organiques peuvent être relativement riches en carbone et en humidité. En effet, une teneur en humidité comprise entre 40 et 60% est considérée comme idéale ce qui correspond à la sensation d'une éponge humide.

Une teneur en humidité plus élevée limite l'approvisionnement en air, crée des conditions anaérobies et entraîne des émissions d'odeurs.

V.2. TRIAGE DES DECHETS

Des déchets de marché sont commandés préalablement au transporteur de SAMVA sur la décharge pour obtenir un maximum de déchets compostables lors du triage.

Le déchargement des déchets se fait sur une aire de réception à proximité de la plateforme de compostage. Le triage se fait manuellement sur le sol et le rendement de triage par agent est évalué à environ 0,6T/Jour/trieur car à la fois il fait le triage et transport des déchets triés et les refus aux emplacements dédiés.

Cependant, dans les circonstances où la décharge est saturée, l'aire de réception est inaccessible et le triage des déchets se fait à proximité du hangar. Cette situation alourdit la charge de travail des agents trieurs et la durée de triage dû à l'éloignement de la zone de tri et plateforme de mise en andain.



photo.4. Triage de déchet avant la mise en andain

V.3. PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS AVANT COMPOSTAGE

Une fois que tous les intrants ont été triés sur la plateforme, un échantillon de chaque intrants composant : digestat solide en provenance de la STBV Ampitatafika et STBV Ambatomaro, digestat liquide de la STBV Ampitatafika et déchets organiques municipaux sont prélevés pour analyser préalablement le taux de viabilité des œufs d'helminthes avant le co-compostage. Un échantillon de l'eau d'arrosage a été aussi prélevé car cela pourrait aussi influencer le taux de contamination du compost étant donné que l'eau d'arrosage est polluée par le lixiviat de la décharge.

Le prélèvement des échantillons solide était comme suit :

- A l'aide d'une pelle des échantillons de 1kg environ sur chaque point d'une diagonale du déchet ou digestat étalé sur le sol sont prélevés
- un seau préalablement lavé a été utilisé pour mélanger tous les échantillons 1kg prélevés afin de former un échantillon final homogénéisé
- l'échantillon composite final à analyser est mise dans un sachet d'échantillon et la date de prélèvement, le type de l'échantillon ainsi que sa provenance ont été noté
- Avant de passer au prélèvement d'un autre échantillon de déchet, chaque matériel utilisé est nettoyé

V.4. TYPE DE SYSTEME DE COMPOSTAGE

Le système de compostage appliqué est le système ouvert en marche avant, qui consiste à former en tas (appelés andains) la matière organique brute et laissée à la décomposition aérobie par humidification et retournement périodique.

La forme des andains mise en place est tabulaire de 3m^3 ($2 \times 1 \times 1,5$), 4m^3 ($2 \times 2 \times 1,5$) et 6m^3 ($2 \times 2 \times 1,5$) de volume pour faciliter le retournement manuel étant donné que c'est un essai de co-compostage à petite échelle.

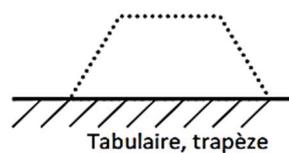


photo.5. Forme d'andain mise en place

En effet, quand l'andain est trop grand, des zones anaérobies apparaissent à proximité du centre. Des odeurs sont libérées quand l'andain est retourné. Par contre, les petits andains perdent rapidement de la chaleur et risquent de ne pas réussir à atteindre une température suffisamment élevée pour permettre l'évaporation de l'eau et l'élimination des pathogènes et des graines d'adventices.

V.5. MODALITES DE MELANGE

2 modalités de mélange ont été testées pour le co-compostage du digestat solide :

🗑️ **Digestat solide + déchets organiques municipaux**

🗑️ **Digestat solide + déchets organiques municipaux + digestat liquide**, l'utilisation du digestat liquide permet aussi d'enrichir le compost.

Il a été prévu dans le protocole initial de réaliser 18 andains obtenus par 3 types de ratio volumique de 2 modalités de mélange et en 3 replicats, tel que décrit dans le tableau ci-dessous :

Tableau.1. Modalités d'andain du protocole initial

	Mélange n°1		Mélange n°2		
	Déchet organique	Digestat solide	Déchet organique	Digestat solide	Digestat liquide
Ratio (1 : 1)	1,5	1,5	1,5	1,5	0,5
Ratio (2 : 1)	2	1	2	1	0,5
Ratio (3: 1)	2,25	0,75	2,25	0,75	0,5
TOTAL (m³)	5,75	3,25	5,75	3,25	1,5

Cependant ce protocole a été modifié par rapport à la quantité de digestat solide disponible pour cet essai.

Le tableau ci-dessous présente les 17 andains formés à la base des 2 types de mélange en 3 ou 2 replicats selon la suffisance de digestat solide :

Tableau.2. Modalités des andains réalisés

	Date de formation	Durée de compostage	Déchet organique	Digestat solide	Digestat liquide
Andain n°1	04/12/2020	102 jours	2 m ³	1m ³	
Andain n°2	07/12/2020	96 jours	3m ³	150 kg	
Andain n°3	07/12/2020	96 jours	3m ³	150kg	
Andain n°4	07/12/2020	95 jours	3m ³	150kg	
Andain n°5	07/12/2020	95 jours	3m ³	100kg	
Andain n°6	08/12/2020	95 jours	3m ³	100kg	
Andain n°7	08/12/2020	94 jours	3m ³	100kg	
Andain n°8	08/12/2020	93jours	3m ³	250 kg	
Andain n°9	08/12/2020	93jours	3m ³	250kg	
Andain n°10	08/12/2020	93jours	3m ³	250kg	
Andain n°11 Témoin	10/12/2020	91jours	3m ³		
Andain n°12	15/03/2021	90 jours	3m ³	1m ³	360 Litres
Andain n°13	15/03/2021	90 jours	3m ³	1 m ³	360 Litres
Andain n°14	16/03/2021	89 jours	3m ³	1 m ³	
Andain n°15	17/03/2021	88 jours	4m ³	2 m ³	360 Litres
Andain n°16	17/03/2021	88 jours	4m ³	2 m ³	
Andain n°17 Témoin	17/03/2021	90 jours	6m ³		

En total, le volume d'intrants utilisés pour former ces 17 types andains est le suivant :

- Digestat solide du STBV Ampitatafika : 5m³
- Digestat solide du STBV Ambatomaro : 7m³
- Déchet municipaux brutes: 115 m³ dont 57m³ ont été des déchets non compostables constitués majoritairement de plastiques et paniers de fruits de litchi
- Digestat liquide : 2 m³

La formation des andains a été faite en deux phases à cause de l'épuisement de digestat solide :

- Première phase : andain n°1 à 11 réalisés en décembre 2020
- Deuxième phase : andain n°12 à 17 réalisés en mars 2021

Pour chaque phase un andain témoin à base de déchet organique uniquement a été aussi mise en place.

Les andains ont été disposés en quinconce sur la plateforme pour éviter toute contamination et faciliter le retournement.



photo.6. Disposition des andains en quinconce

V.5. PROCÉDE DE MISE EN ANDAIN LORS DU CO-COMPOSTAGE

Après le triage des déchets bruts, le volume de déchets organiques et digestat solide a été quantifié avant chaque formation d'andain à l'aide d'un bac de 1m³. Pour les andains n°2 à 10, le digestat solide utilisé a été préalablement pesé sur une balance électronique.

Puis, on a délimité sur le sol l'espace de chaque andain de 2m sur 1m ou 2m sur 2m selon le volume des andains, il a été prévu également une autre espace de même grandeur pour retourner le tas prochainement. Ensuite, une forme de cuvette a été formée avec les déchets organiques à l'intérieur de

laquelle les déchets organiques et le digestat solide ont été disposés en couches successives, en commençant et en terminant par les déchets organiques.

La succession est composée d'une couche de 20 cm de matières carbonées (déchets organiques) et d'une couche de 10 cm de matières azotées (digestat solide), est ainsi répétée jusqu'à ce que le tas atteigne une hauteur de 1,5 m.



photo.7. Mise en andain du co-compostage

Le premier arrosage est fait juste après la mise en andain si le taux d'humidité apporté par les déchets organiques est relativement faible.

V.6. SUIVI DU PROCESSUS DE COMPOSTAGE

Pendant le processus de compostage, les activités suivantes ont été effectuées :

- **Mesures des températures** de chaque côté de l'andain à l'aide d'un thermomètre de compostage et enregistrement des données de température dans une fiche de suivi. Le couple temps-température a été vérifié quotidiennement pour voir s'il y a un besoin d'arrosage ou un retournement.



photo.8. Prise de température d'andain à l'aide d'un thermomètre de compostage

- **Contrôle de l'humidité de l'andain** par un hygromètre. Si le tas est trop sec et qu'une baisse successive de température d'andain apparait alors un arrosage a été effectué.

L'eau d'arrosage a été récupérée manuellement dans un point d'eau du bas fond à l'extérieur de la décharge ou s'il y a suffisamment de lixiviat dans le bassin de rétention cela a été aussi utilisé pour arroser les andains.



photo.9. Arrosage d'andain par le lixiviat

Si après l'arrosage, aucune montée de température n'est constatée alors on effectue un retournement. Dans un autre cas, si le tas est trop humide suite à une succession de jour de pluie, on effectue également un retournement pour corriger l'humidité.

Pendant le retournement, il a été veillé à ce que les zones périphériques soient mises au cœur de l'andain et un triage des déchets plastiques a été encore effectué pour bien nettoyer l'andain.

Le volume total d'eau d'arrosage, la fréquence de retournement ainsi que la quantité d'eau estimée apportée par la précipitation au cours de la saison de compostage sont présentés dans le tableau ci-dessous pour les andains de la première phase :

Tableau.3. Fréquence d'arrosage et retournement par andain

Andain n°	Volume d'andain	Volume total d'eau apporté	Nombre d'arrosage	Volume d'eau de pluie ²	Nombre de retournement
1	3m ³	3,1m ³	14	2m ³	7
2	3m ³	3m ³	14	2m ³	8
3	3m ³	2,6m ³	13	2m ³	7
4	3m ³	2,3m ³	11	2m ³	8
5	3m ³	2,5m ³	12	2m ³	7
6	3m ³	2,5m ³	12	2m ³	7
7	3m ³	2,5m ³	12	2m ³	7
8	3m ³	2,5m ³	12	2m ³	7
9	3m ³	2,5m ³	12	2m ³	7
10	3m ³	3m ³	12	2m ³	7
11	3m ³	2,6m ³	12	2m ³	8
12	4	1,4m ³	9	0,5m ³	6
13	4 m ³	1,4m ³	9	0,5m ³	6
14	4 m ³	1,08m ³	9	0,5m ³	6
15	6 m ³	1,4m ³	9	1,1 m ³	6
16	6 m ³	1,08m ³	9	1,1 m ³	6
17	6 m ³	1,08 m ³	9	1,1 m ³	6

A partir de ce tableau, il est déduit que la fréquence moyenne d'arrosage d'andain est faite une fois par semaine et un retournement toutes les 2 semaines, mais cela n'a pas été systématique à cause de l'influence de la pluie durant le processus de compostage.

Le compostage a durée de 90 jours en moyenne.

² Volume d' eau de pluie calculé à base de la total de la précipitation mensuelle pendant le processus de compostage

VII. EVALUATION QUANTITATIVE DU COMPOST OBTENU

A la fin de la phase de maturation du compostage, le compost est criblé manuellement à l'aide d'un crible avec des mailles de 10 mm. Le refus et le compost criblé mise en sac sont pesés pour évaluer le rendement final en compost.



photo.10.Criblage de compost

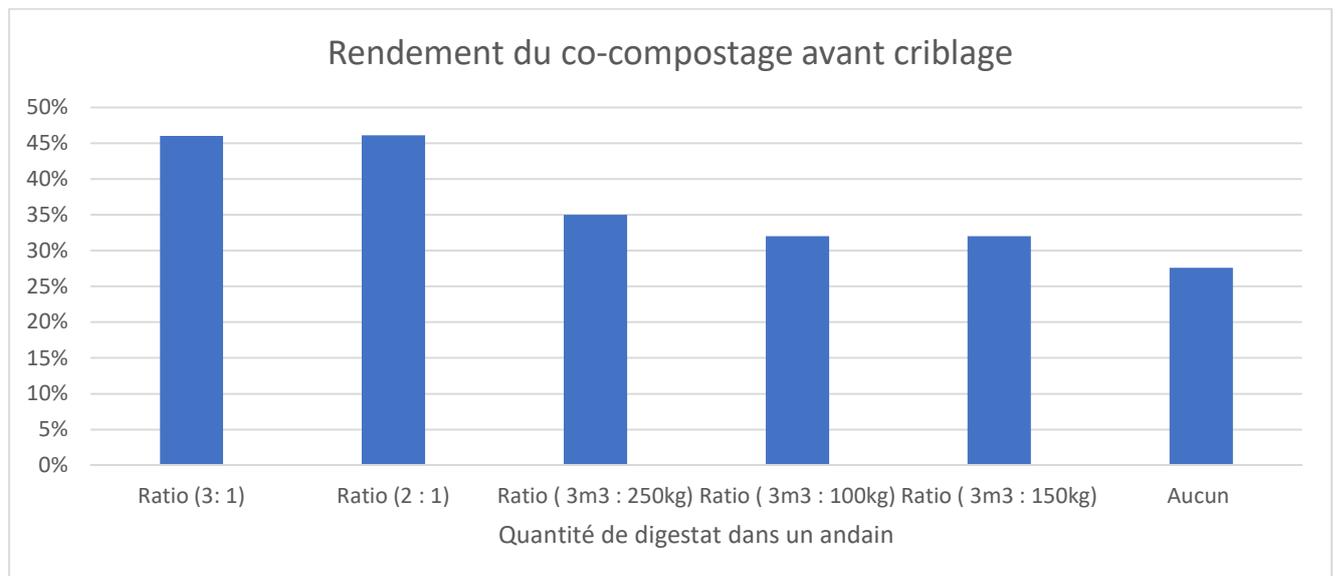
Le rendement total obtenu avant le criblage par type de ratio de mélange est présenté dans le tableau ci-dessous, calculé sur une base de la densité de compost estimée à $0,5T/m^3$:

Tableau.1. Rendement avant criblage pour chaque andain

	Ratio de mélange		Rendement du compostage avant criblage
	Déchet organique	Digestat solide	
Andain -12-13-14	3	1	46%
Andain -1-15-16	2	1	46,1%
Andain -5-6-7	3 m ³	100kg	32%
Andain-2-3-4	3 m ³	150kg	32%
Andain-8-9-10	3 m ³	250kg	35%
Andain -11-17(témoin)			27%

Les valeurs du rendement avant criblage présentés dans le tableau.1 ci-dessus montre que durant le compostage, l'andain n°11 et n°17 sans digestat solide ont été réduite à 80% par rapport à sa quantité initiale contre 50% pour les andains de ratio 2 :1 et 3 :1 ayant été mélangé avec du digestat solide, 70% pour les andains de 3m³ mélangés avec 100 à 250 kg de digestat solide. Contrairement au déchet organique qui se réduise à 80 % en volume en fin de compostage, le digestat solide maintient sa quantité. Le digestat solide ajouté dans l'andain est donc est facteur améliorant le volume du rendement final.

Le graphique des rendements de compostage avant criblage ci-dessous indique que le compostage classique sans digestat solide a un rendement inférieur (moins de 30%) au co-compostage avec du digestat solide pour un même volume d'andain lors des deux phases d'essai de co-compostage. Les andains de ratio 2:1 et 3 :1 n'ont aucune différence significative en rendement. Ils ont obtenu un rendement brut le plus élevé entre 45 et 50% du volume d'andain. Il est remarqué par ces résultats que l'ajout du digestat solide dans le mélange lors du co-compostage a une limite optimal équivalent à un ratio de 3 :1 (ou 75% déchet organique et 25 % digestat solide).



Cet essai de co-compostage de 17 andains a produit en total 7,5 tonnes de compost et 4 tonnes de refus de criblage.

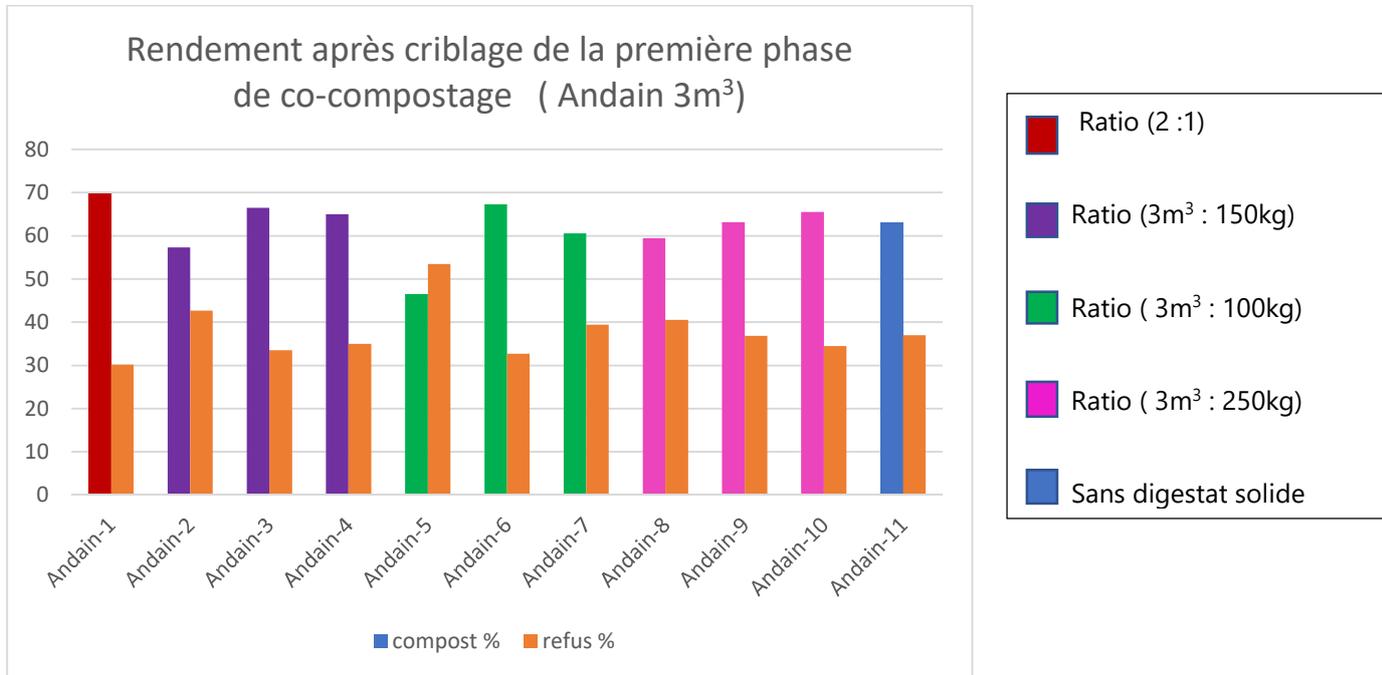
Le tableau.2 suivant présente pour chaque andain, la quantité de compost et refus de criblage en kilogramme :

Tableau.2. Rendement obtenu pour chaque andain

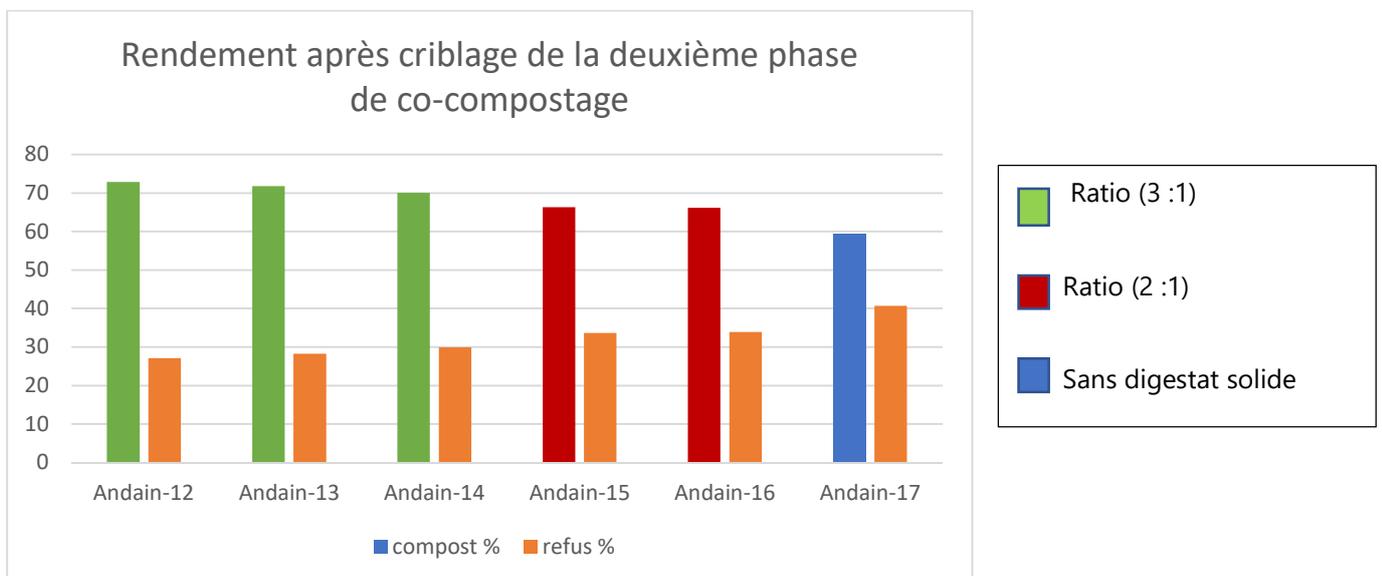
Type d' andain	Déchet organique	Digestat solide	Digestat liquide	Compost obtenu (kg)	Refus de criblage (kg)
Andain-1	2m ³	1m ³	-	450	194
Andain-2	3m ³	150 kg	-	162	121
Andain-3	3m ³	150kg	-	336	169
Andain-4	3m ³	150kg	-	429	231
Andain-5	3m ³	100kg	-	255	293
Andain-6	3m ³	100kg	-	240	117
Andain-7	3m ³	100kg	-	314	204
Andain-8	3m ³	250 kg	-	382	260
Andain-9	3m ³	250kg	-	253	147
Andain-10	3m ³	250kg	-	354	186
Andain-11	3m ³	-	-	165	97
Andain-12	3m ³	1m ³	360 Litres	613	228
Andain-13	3m ³	1 m ³	360 Litres	679	267
Andain-14	3m ³	1 m ³	-	624	264
Andain-15	4m ³	2 m ³	360 Litres	977	496
Andain-16	4m ³	2 m ³	-	918	470
Andain-17	6m ³	-	-	350	240
Total				7,5 T	4 T

Pour une même catégorie de déchet organique, les résultats du premier essai de co-compostage ne sont pas satisfaisants. Le graphe ci-dessous montrent que les refus de criblage des andains contenant ou sans digestat solide (andain-2 à11) lors du premier essai de co-compostage varie majoritairement entre 30 à 40% du rendement total obtenu . Aucune différence significative n'est observée sur les rendements finals même si on a ajouté une quantité de 50 % ou moins de 20% de digestat solide dans l'andain de 3 m³. Cela est expliqué d'une part par le volume de l'andain de 3 m³ qui est assez petit et se refroidisse rapidement en limitant la décomposition des déchets organique. D'autre part la proportion de digestat solide moins de 20% dans l'andain (ratio 3m³ : 100kg à 250 kg) n'est pas suffisante

pour influencer significativement le rendement du co-compostage par rapport au compost classique sans digestat solide. Aussi, l'andain-1 contenant un volume de 50% de digestat solide a effectivement asséché l'andain à cause de la dominance de densité de digestat par rapport à la densité de déchet organique pour un volume d'andain de 3m³.



Pendant la deuxième phase de co-compostage, présenté par le graphe ci-dessous, on a augmenté le volume d'andain à 4 et 6m³ avec une quantité de digestat solide de 25 et 50% du volume d'andain (ratio 3 :1 et 2 :1). Il est apparu une réduction de la quantité des refus entre 20 et 30% du rendement de compostage soit un rendement de 70 à 80% en compost sauf pour l'andain témoin sans digestat solide.



La comparaison des rendements des andains de ratio 3 :1 et 2 :1 confirme que la proportion optimale de digestat solide à rajouter dans le mélange du co-compostage est 25 % ou le ratio 3 :1. En effet, le rendement moyen obtenu par l'ajout d'une quantité de digestat solide 25 % des déchets organiques dans le co-compostage est quasi-égal à celui du digestat solide 50% pour un même volume d'andain. Pour cet essai, le ratio 3 :1 a produit 72% de compost contre 66% de compost pour le ratio 2 :1. En effet, le digestat solide a un effet stimulateur de la dégradation des matières organiques lors du co-compostage en créant un rapport C/N et une teneur en eau appropriés favorables aux conditions de vie des bactéries décomposantes. En surdosage dans le mélange initial du co-compostage, le digestat solide provoque un effet inhibiteur du rendement de compostage.

VIII. EVALUATION QUALITATIVE DU COMPOST OBTENU

Deux types de critères définissent la qualité d'un compost :

- les critères agronomiques qui sont définis par les teneurs en éléments fertilisants et paramètres physico-chimiques (azote, phosphore, potassium, pH, C/N). Ils seront identifiés par une analyse physico-chimique du compost
- les critères d'innocuité principalement basés sur les agents pathogènes, seront identifiés par une analyse parasitologique du compost et température d'andain

VIII.1. QUALITE SANITAIRE DU COMPOST

L'hygiénisation du compost est obtenue grâce aux températures élevées prolongées pendant le processus de fermentation du compostage. Aussi, d'autres facteurs tels que la nature des agents structurants, la compétition entre micro-organismes, le rapport C/N et le taux d'humidité peuvent également influencer la survie des agents pathogènes lors du compostage (Anne-Marie P.,2020).

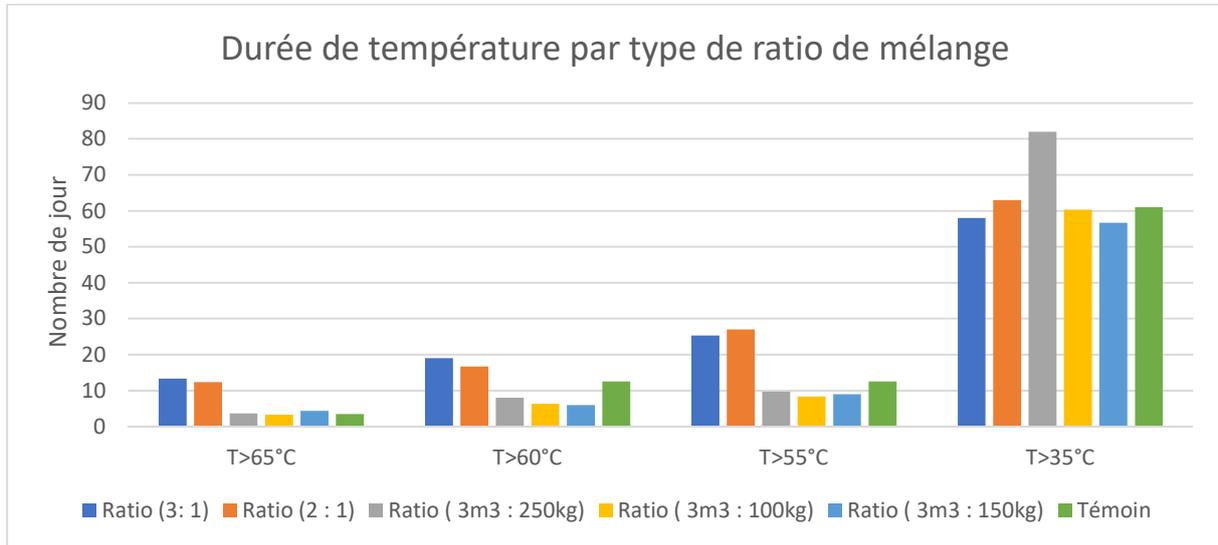
En premier lieu, une vérification et comparaison avec la littérature du couple temps-température des andains est effectuée pour évaluer l'atteinte d'hygiénisation du compost.

Le tableau.3 ci-dessous présente les couples temps/températures d'hygiénisation du compost de différentes études de co-compostage pour un taux d'abattement des œufs d'helminthes supérieur à 80%.

Tableau.3. Températures d'hygiénisation dans la bibliographie

Couples temps / températures d'hygiénisation minimum		Source bibliographique
Référence 1	35 °C x 42 jours	Khalid KHALLAAYOUNE et al (1995). <i>Viabilité des oeufs d' ascaris dans les boues résiduaires</i>
Référence 2	>45°C x 30 jours	Cofie O., Kone D. (2009). <i>Co-composting of Faecal Sludge and Organic Solid Waste Kumasi, Ghana – Case nStudy of Sustainable Sanitation Projects</i> . Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA).
Référence 3	50° C x 30 jours	ADEME (2003c) : Les boues d'épuration municipale et leur utilisation en agriculture »
Référence 4	55°C x 5 jours	Charnay F. (2005) : Compostage des déchets urbains dans les Pays en Développement, Elaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, p277.
Référence 5	55°C x 7 jours	Khalid KHALLAAYOUNE et al (1995). <i>Viabilité des oeufs d' ascaris dans les boues résiduaires</i>
Référence 6	55°C x 15 jours	W.R.A.P (2004): Summary of the BSI specification for composted materials -Introduction to BSI PAS 100, The Waste and Resources Action Programme (W.R.A.P).
Référence 7	60°C x 7 jours	ADEME.,(1998): Le compostage des déchets organiques des ménages en Allemagne, Etat de l'art et retours d'expérience, Paris, France, 188.
Référence 8	60°C x 15 jours	ADEME (2003c). « Les boues d'épuration municipale et leur utilisation en agriculture »
Référence 9	65°C x 7 jours	W.R.A.P (2004): Summary of the BSI specification for composted materials -Introduction to BSI PAS 100, The Waste and Resources Action Programme (W.R.A.P).

Ce sont ces neuf valeurs de référence qui sont comparés aux modèles de couple temps/température de nos andains présentés dans l'annexe II. Une analyse des courbes de température de chaque andain présentés dans l'annexe II a permis de déduire les graphes ci-dessous qui présentent pour chaque type de ratio de mélange le nombre de jour de maintien de la température supérieure à 65°C, 60°C, 55°C et 35°C sans interruption de la chaleur.



La référence n°1 qui impose une température d'hygiénisation supérieure à 35°C pendant au moins 42 jours a été vérifiée par tous les types de ratio effectués lors de nos essais de co-compostage.

Parmi tous les andains formés, seuls les ratios de mélange 2:1 et 3:1 ont atteint une température d'hygiénisation de la référence n° 6, 7, 8 et 9 qui est une température supérieure à 55°C pendant au moins 15 jours et 65°C au plus de 7 jours. Il est tout de même constaté sur la fiche de suivi que le ratio 3:1 a un avantage de plus sur la durée de maintien de température minimum d'hygiénisation par rapport au ratio 2:1.

Les ratios de mélange avec une quantité de digestat solide inférieur à 20% du volume d'andain (ratio 3m³ : 100kg à 250 kg) et les andains témoins sans digestat solide ont montré une tendance de basse température lors du processus de compostage comparés aux ratios 2:1 et 3:1.

Parallèlement, il a été observé que les andains co-compostés avec le digestat solide ont été rapidement décomposés comparés aux andains de type classique sans digestat solide. Aussi, les andains co-compostés ont atteint une température thermophile entre 70 à 80°C en une journée. Cela favorise également l'abattement des œufs d'helminthes. Cependant, les abattements sont plus faibles en surface qu'au cœur des andains, ce qui s'explique par la température plus basse des zones périphériques des tas en contact avec l'air et donc plus propice à la survie des bactéries résistantes. C'est pourquoi le retournement a été crucial lors du compostage.

Bien que les données bibliographiques expliquent que la dégénérescence des œufs d'helminthes se fait progressivement face au maintien prolongé d'une température élevée, sans doute, la dégénérescence des œufs d'helminthes est irréversible en cas de baisse de température de l'andain qui est tout de suite remédié après le retournement ou arrosage. Lors de nos essais, le retournement des andains a été fréquent, ce qui a pu favoriser l'aérobiose ou aération du compost, de maintenir ainsi des températures élevées plus constantes et d'accélérer la décomposition.

Mise à part cette comparaison bibliographique de température d'hygiénisation, une analyse parasitologique des intrants avant le compostage et des composts obtenus, permet aussi de bien confirmer l'atteinte d'hygiénisation. En effet, l'analyse parasitologique a déterminé le taux de viabilité des œufs d'helminthes avant et après le compostage. Le résultat de cette analyse suit le seuil maximum de viabilité des œufs imposé par la norme NFU-44-095 qui exige aucun œuf viable dans 1,5g de matière brute.

Tableau.4. Résultat d'analyse parasitologique avant et après co-compostage, INOVALYS 2021

	Ratio de mélange			œufs d'helminthes viables	Présence larves vivants
	Déchet organique	Digestat solide	Digestat liquide		
Andain n°1	2 m ³	1m ³		Absence /1.5gMB	–
Andain n°2	3m ³	150 kg		Absence /1.5gMB	–
Andain n°3	3m ³	150kg		Absence /1.5gMB	Oui
Andain n°4	3m ³	150kg		Absence /1.5gMB	Oui
Andain n°5	3m ³	100kg		Absence /1.5gMB	–
Andain n°6	3m ³	100kg		Absence /1.5gMB	–
Andain n°7	3m ³	100kg		Présence /1.5gMB	
Andain n°8	3m ³	250 kg		Présence/1.5gMB	
Andain n°9	3m ³	250kg		Absence /1.5gMB	–
Andain n°10	3m ³	250kg		Absence /1.5gMB	–
Andain n°11 Témoin	3m ³			Absence /1.5gMB	–
Andain n°12	3m ³	1m ³	360 Litres	Absence /1.5gMB	Oui
Andain n°13	3m ³	1 m ³	360 Litres	Absence /1.5gMB	Oui
Andain n°14	3m ³	1 m ³		Absence /1.5gMB	Oui
Andain n°15	4m ³	2 m ³	360 Litres	Absence /1.5gMB	–
Andain n°16	4m ³	2 m ³		Absence /1.5gMB	–
Andain n°17 Témoin	6m ³			Absence /1.5gMB	–
Digestat AMPITATAIFKA				Absence /1.5gMB	–
Digestat Ambatomaro				Absence /1.5gMB	Oui

Les résultats d'analyses sont très satisfaisants car parmi 17 andains formés seulement 2 andains ont encore des œufs viables identifiés sur 1,5gr de matière brute. Ce sont les andains n°7 et 8 dont le ratio de mélange de digestat solide est inférieur à 20% du volume d'andain. Leur couple temps /température a déjà montré une très courte durée de haute température au cours du compostage n'assurant donc pas un maximum de dessiccation des œufs d'helminthes. On peut aussi déduire du résultat d'analyse que l'absence d'œuf d'helminthes viable dans les co-composts de ratio 2 :1 et 3 :1 sont bien vérifiés, confirmant donc que la température d'hygienisation a été bien atteinte au cours du compostage pour ces deux types de ratios.

Les résultats d'analyse parasitologique précisent aussi la présence de larves vivantes pour le digestat d'Ambatomaro, trois co-composts de ratio 3:1 (andain n°12,13 et 14) composés avec ce même digestat comme point commun, et deux autres petits andains (n°3 et 4) premièrement formés avec un mélange inadéquat de digestat solide (teneur < 25% de volume d'andain) et déchet organique.

La nature de ces larves n'a pas été informée par le laboratoire. Cependant pour les co-composts de ratio 3 :1, aucun risque ne peut se poser sur la présence de ces larves car la température d'hygienisation a été bien atteinte lors du compostage. En effet, vu le laps de temps où le compost a été stocké dans le hangar de la décharge et le temps d'analyse, une colonisation naturelle par des macroorganismes est tout à fait possible surtout dans les conditions de stockage du compost dans un hangar de décharge.

VIII.1. QUALITE AGRONOMIQUE DU COMPOST

Visuellement, aucune différence significative n'est observée sur la texture physique du co-compost et compost classique sans digestat solide. Il a été remarqué que le digestat solide dans le co-compost est désodorisé. Néanmoins, les résultats d'analyse physico-chimique des co-composts seront étudiés dans le rapport d'essai agronomique pour bien confirmer la valeur fertilisante de chaque type de compost.

IX. CONCLUSIONS GENERALES DES ESSAIS ET PERSPECTIVES DE L'ETUDE

La réalisation de ces essais témoigne déjà la faisabilité du co-compostage des boues de vidange et déchets organiques bien que des contraintes plus ou moins inévitables aient été rencontrées au cours de la pratique de l'expérimentation sur la décharge d'Andralanitra, à savoir :

- Difficulté d'approvisionnement en eau d'arrosage, restreint d'utilisation du lixiviat par les agents à cause de la mauvaise odeur
- Inaccessibilité des camions transporteurs des déchets sur la plateforme entraînant un éloignement de la zone de tri et zone de mise en andain

Néanmoins, cette étude a procuré plusieurs conclusions et recommandations sur la conduite de co-compostage testé à base de différent ratio volumique de digestat solide et déchet organique urbain.

Par rapport au compostage classique, l'ajout de digestat solide proportionnel au volume d'andain a permis d'atteindre le couple temps/température minimal d'hygiénisation exigé pour un co-compostage de boues de vidange ainsi qu'une chaleur plus élevée que dans l'andain sans ajout de digestat solide. Cela est en relation avec le taux d'azote très élevé contenu dans le digestat solide qui crée un rapport C/N favorable aux microorganismes décomposeurs dans l'andain. A cet effet, la quantité maximum de digestat ajouté dans un andain ne doit pas dépasser le ratio 2 :1 correspondant respectivement au volume de déchet organique et digestat solide.

Lors de la mise en andain il faut respecter une succession de couche de 20 cm de déchet organique et digestat solide. Recouvrir en couche finale de déchet organique pour éviter tout éparpillement de digestat solide vers l'extérieur et garantir sa cuisson dans l'andain.

La période la plus chaude du compostage se passe durant les 15 premiers jours du compostage, la température au coeur de l'andain peut atteindre jusqu'à 80° C à ce stade. L'utilisation du digestat liquide en tant qu'eau d'arrosage doit donc être faite lors de la formation des andains si le tas est très sec ou en cas de baisse de température au cours de 15 premiers jours pour profiter de cette chaleur. Il ne faut plus apporter d'eau contaminée comme le digestat liquide à partir de la moitié du processus de compostage car les œufs d'helminthes risquent de ne pas être dégénérés à temps.

L'observation quotidienne de la température est cruciale afin de réaliser au moment propice le retournement qui est le premier facteur pouvant rétablir la montée de température d'andain et à cette occasion réintégrer dans le coeur d'andain les parties périphériques exposés au froid.

Le maintien de la chaleur peut être aussi amélioré en recouvrant de bâche plastique l'andain au cours du compostage pour éviter l'excès d'eau de pluie et le refroidissement rapide des zones périphériques.

Le résultat d'analyse parasitologique a confirmé l'atteinte de dessiccation des œufs d'helminthes pour les co-composts de ratio 2 :1 et 3 :1. Toutefois, la présence de larves dans les co-composts soulève une recommandation sur l'amélioration de l'entreposage des composts dans le hangar de la décharge d'Andralanitra.

Au cours de nos essais, il a été remarqué que la manipulation de digestat solide n'a pas créé de gêne. Cependant, à part le lavage des mains déjà appliqué, des équipements de protection individuelle doivent être portés par les ouvriers lors de la manipulation des déchets pendant le compostage des boues de vidange pour protéger à maximum leur santé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Anne-Marie Pourcher et Céline Druimhe, 2020.** "Impact du compostage et la méthanisation sur les pathogènes et l'antibiorésistance"
- **Capizzi-Banas., 2004.** « Liming as an advanced treatment for sludge sanitization: Helminth eggs elimination –*Ascaris* eggs as model », Water Research, no 38, p. 3251-3258.
- **Jean-Louis Stien , 1989.** " Oeufs d' helminthes et environnement: le modèle d' oeufs d'ascarsi"

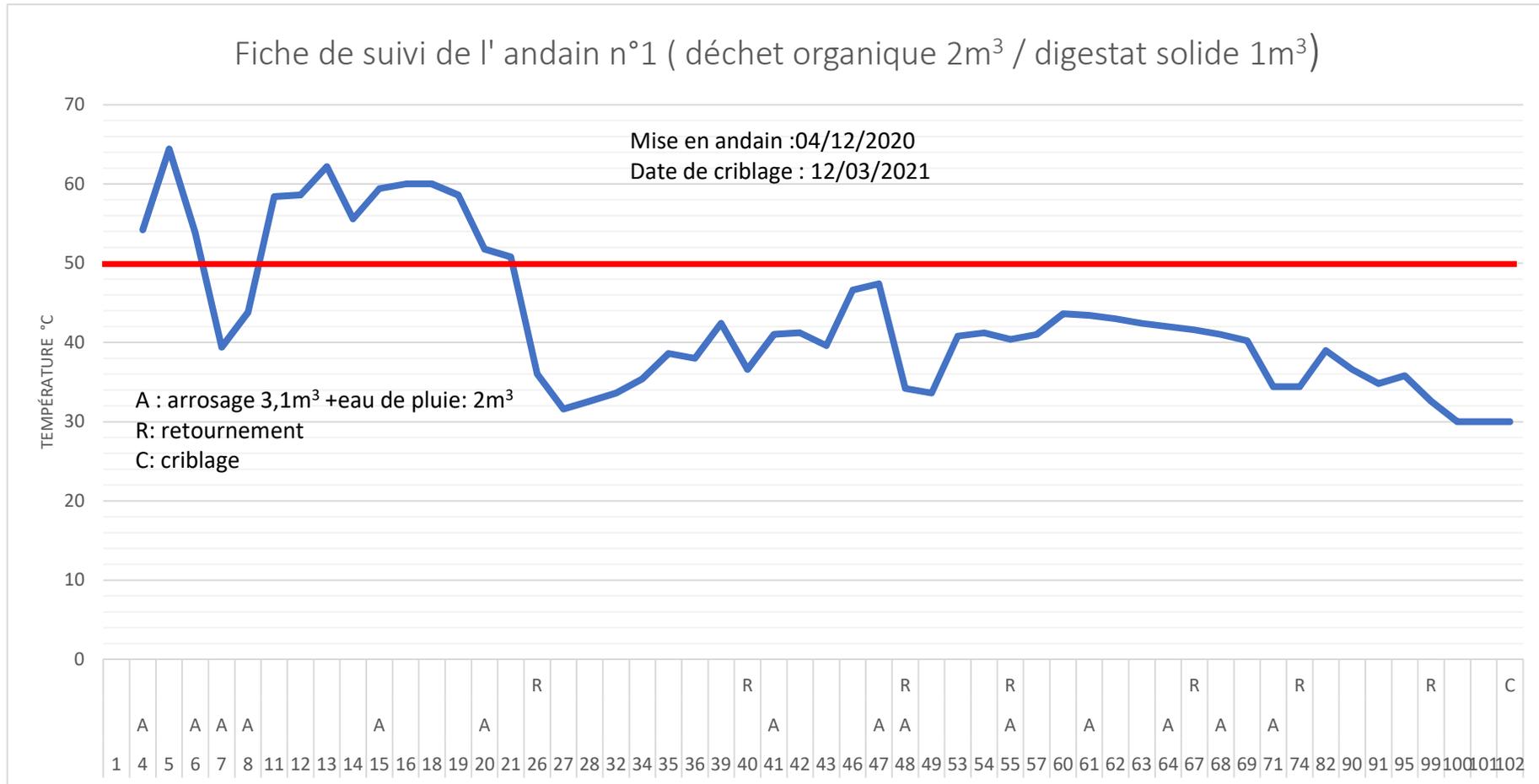
ANNEXES

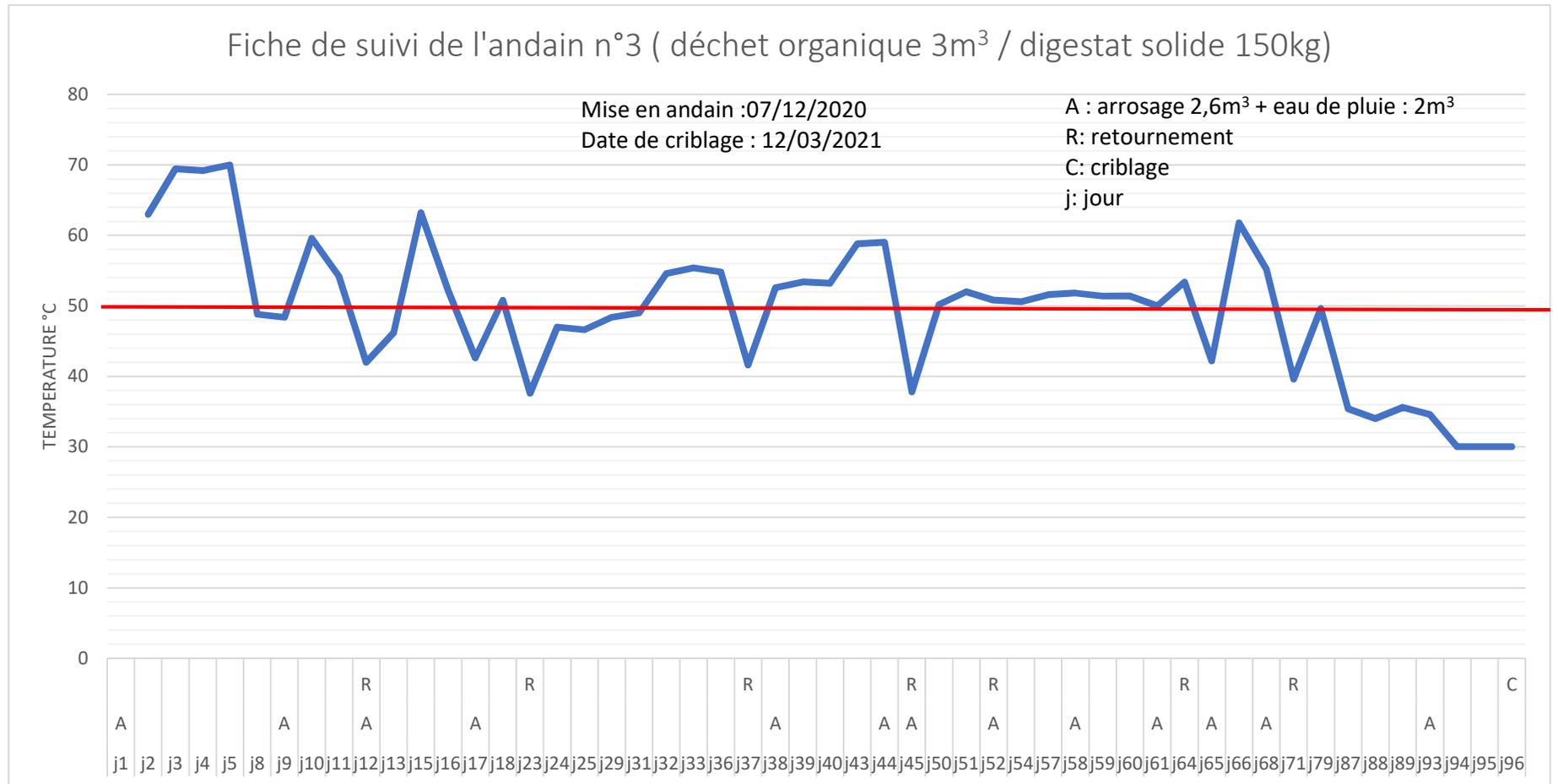
ANNEXE 1 : LES HELMINTHES PATHOGENES EXCRETES AVEC LES MATIERES FECALES

Tableau.1. Helminthes excrétés dans les matières fécales (d' après FAECHAM et al, 1983 in Jean-louis Siten 1989)

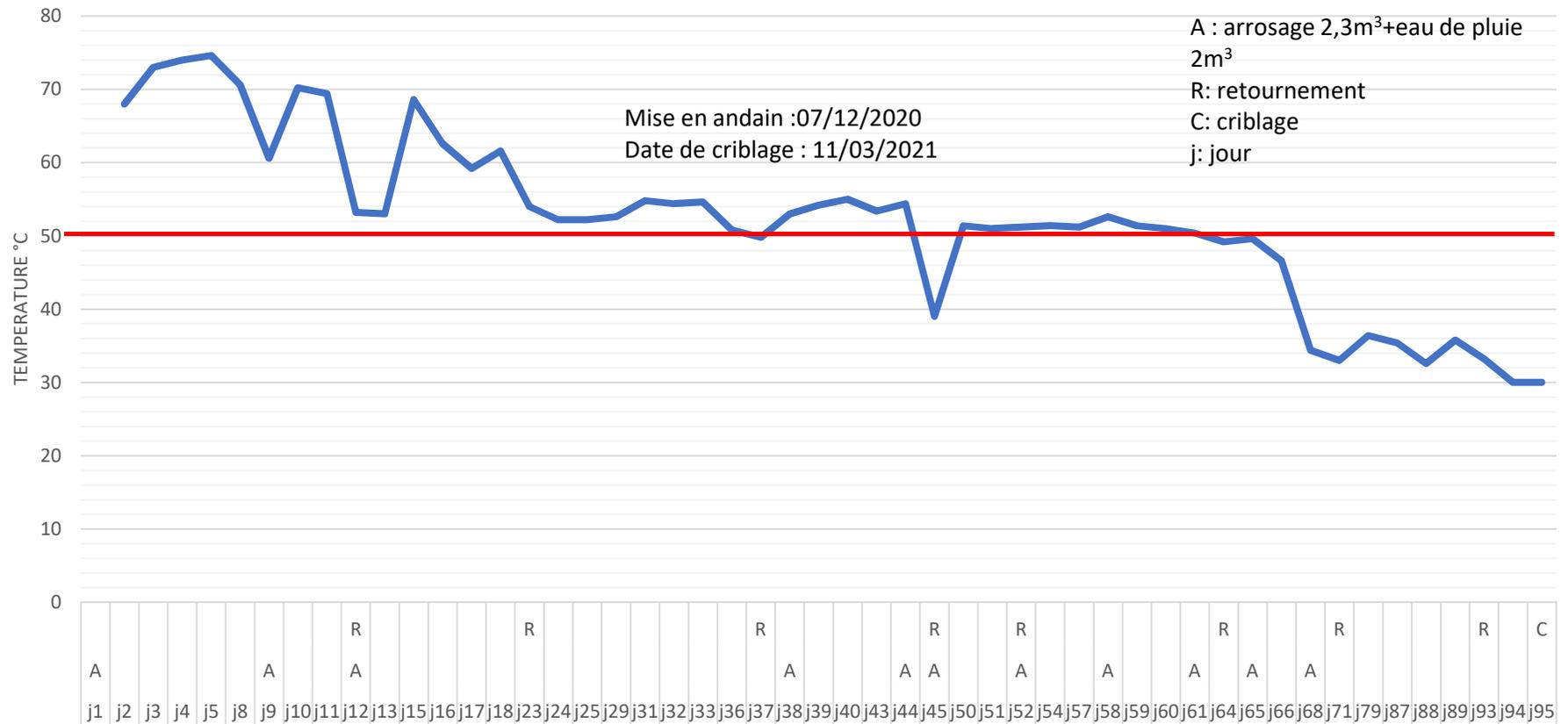
HELMINTHES	MALADIES
Ancylostoma duodenale	ankylostomose
Ascaris Lumbricoides	Ascariodiose
Clonorchis Sinensis	Opistorchiase
Diphyllobothrium Latus	Taeniasis
Enterobus Vermicularis	Oxyurose
Fasciola Hepatica	Fasciolose
Fasciolopsis Buski	Distomatose Intestinale
Heterophyes Heterophyes	Dismatose
Hymenolepis Nana	Taeniasis
Strongyloides Stercoralis	Anguillulose
Taenia Saginata	Taeniasis
Taenia Solium	Taeniasis
Trichuris Trichuria	Trichocephalose

ANNEXE 2 : FICHE DE SUIVI DE CHAQUE ANDAIN

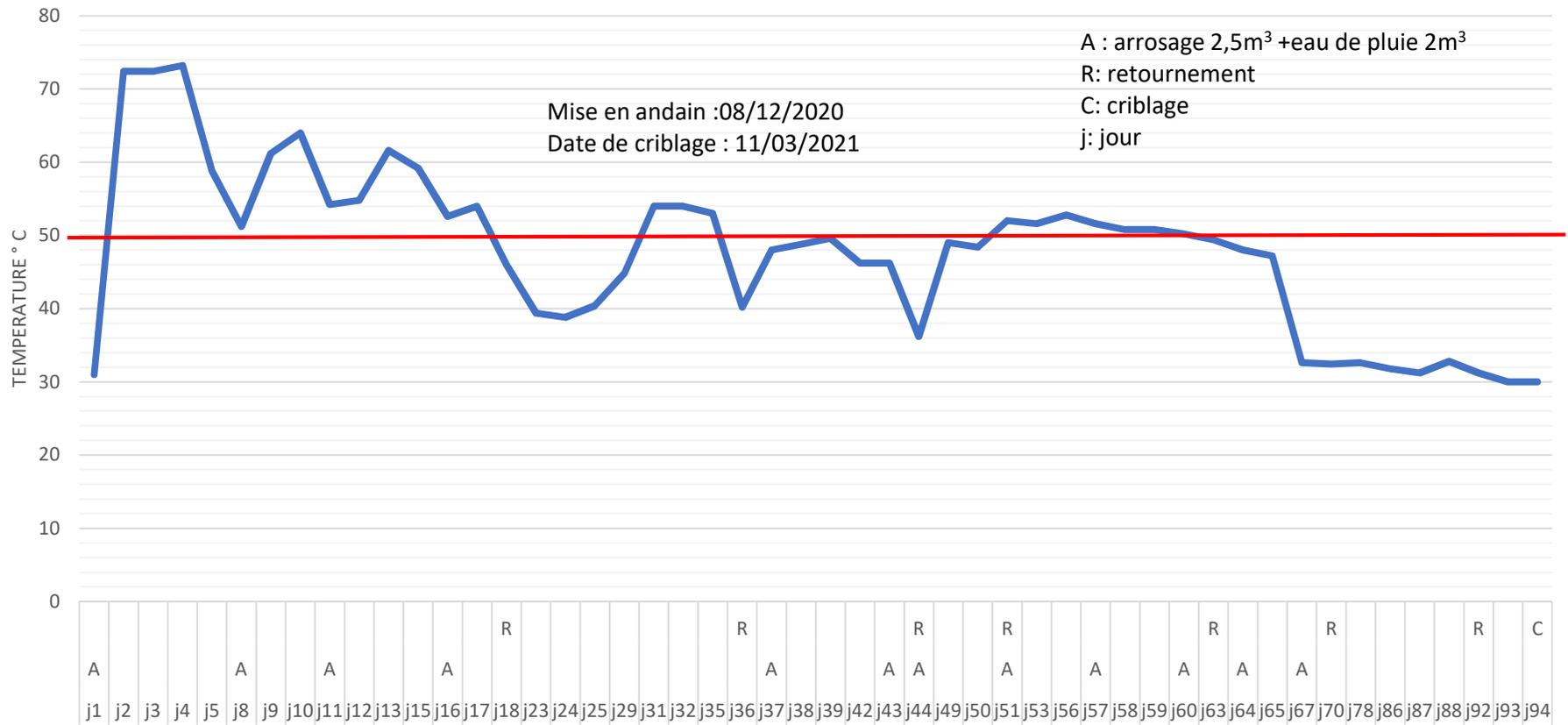


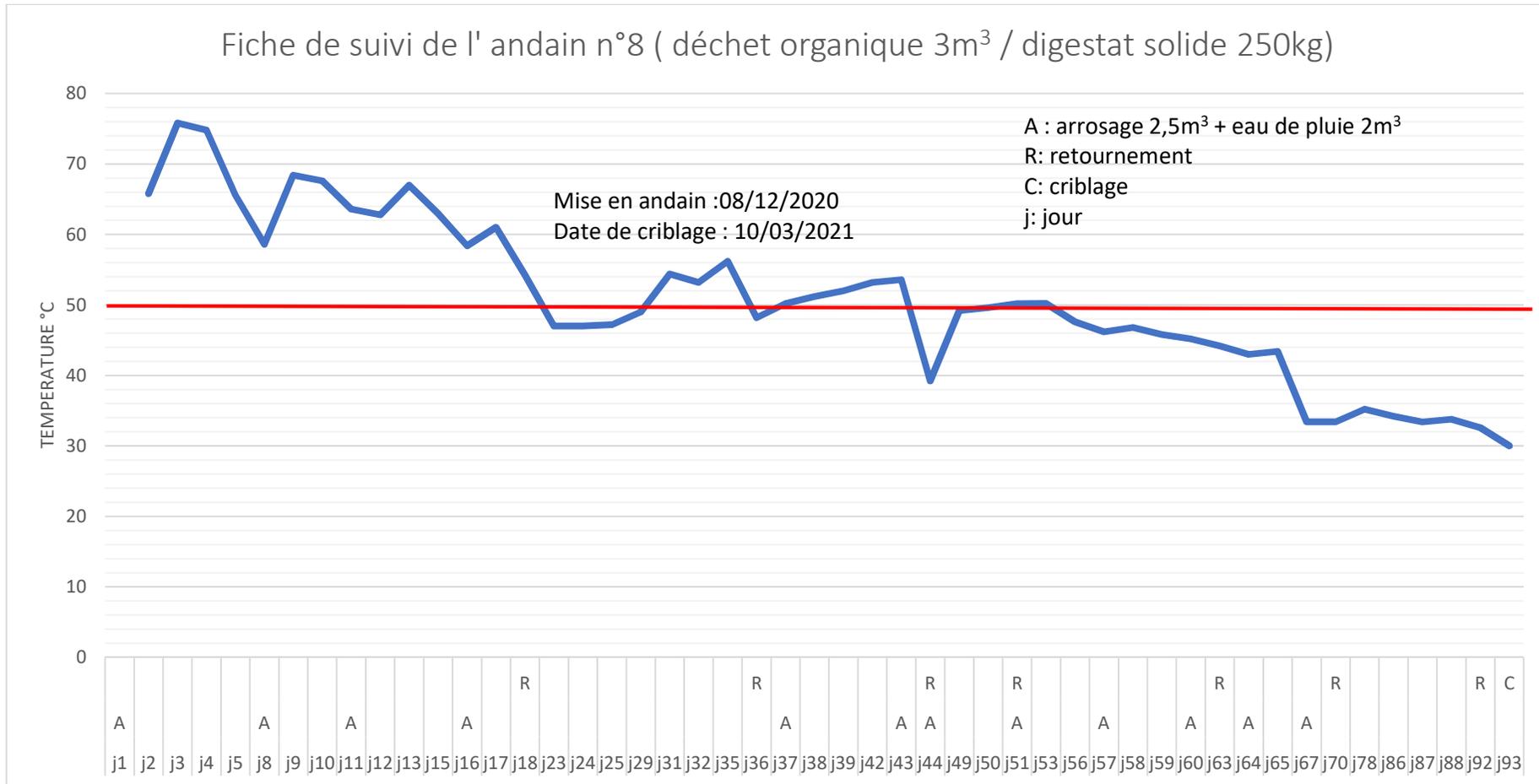


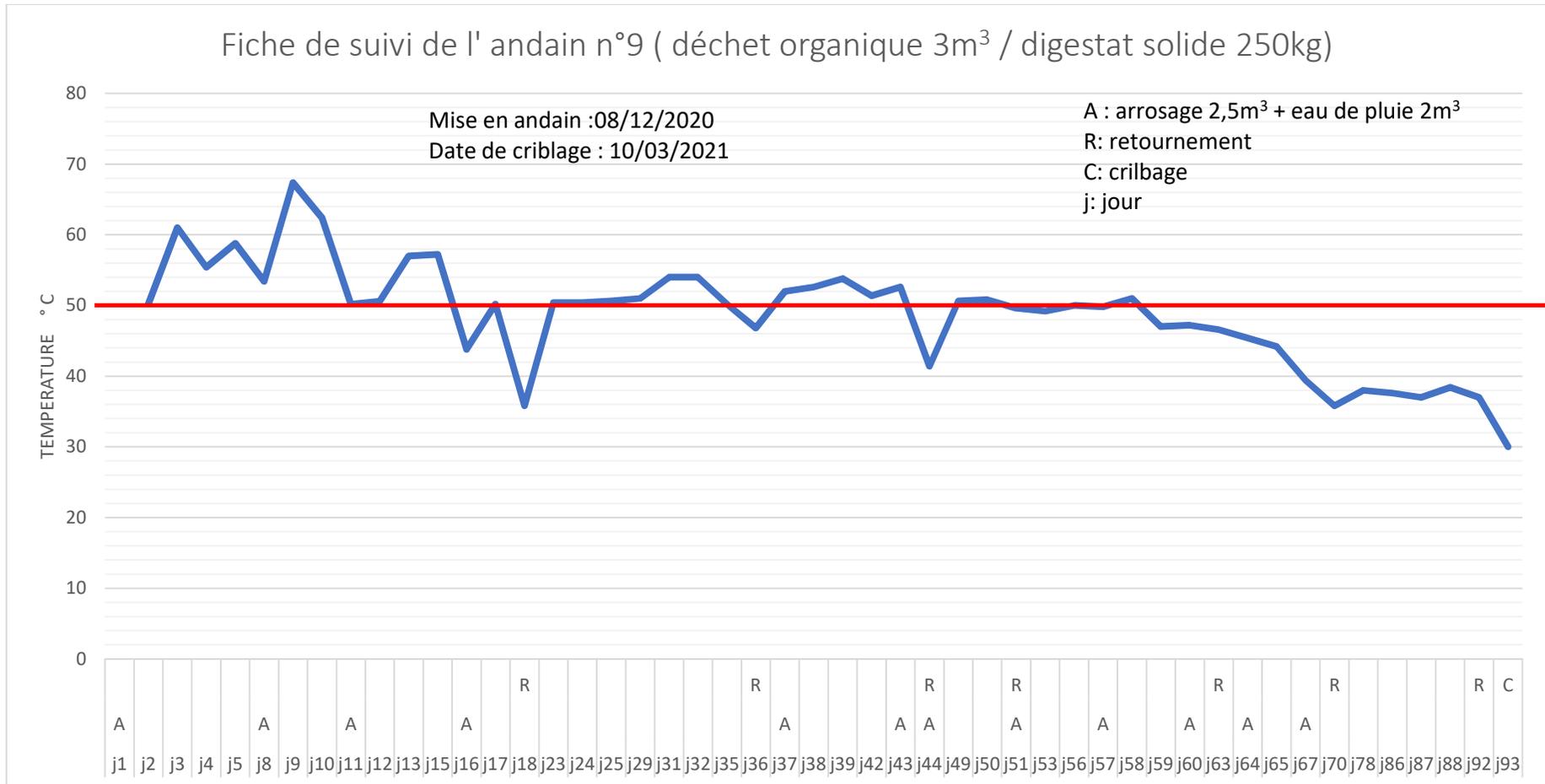
Fiche de suivi de l' andain n°4 (déchet organique 3m³ / digestat solide 150kg)



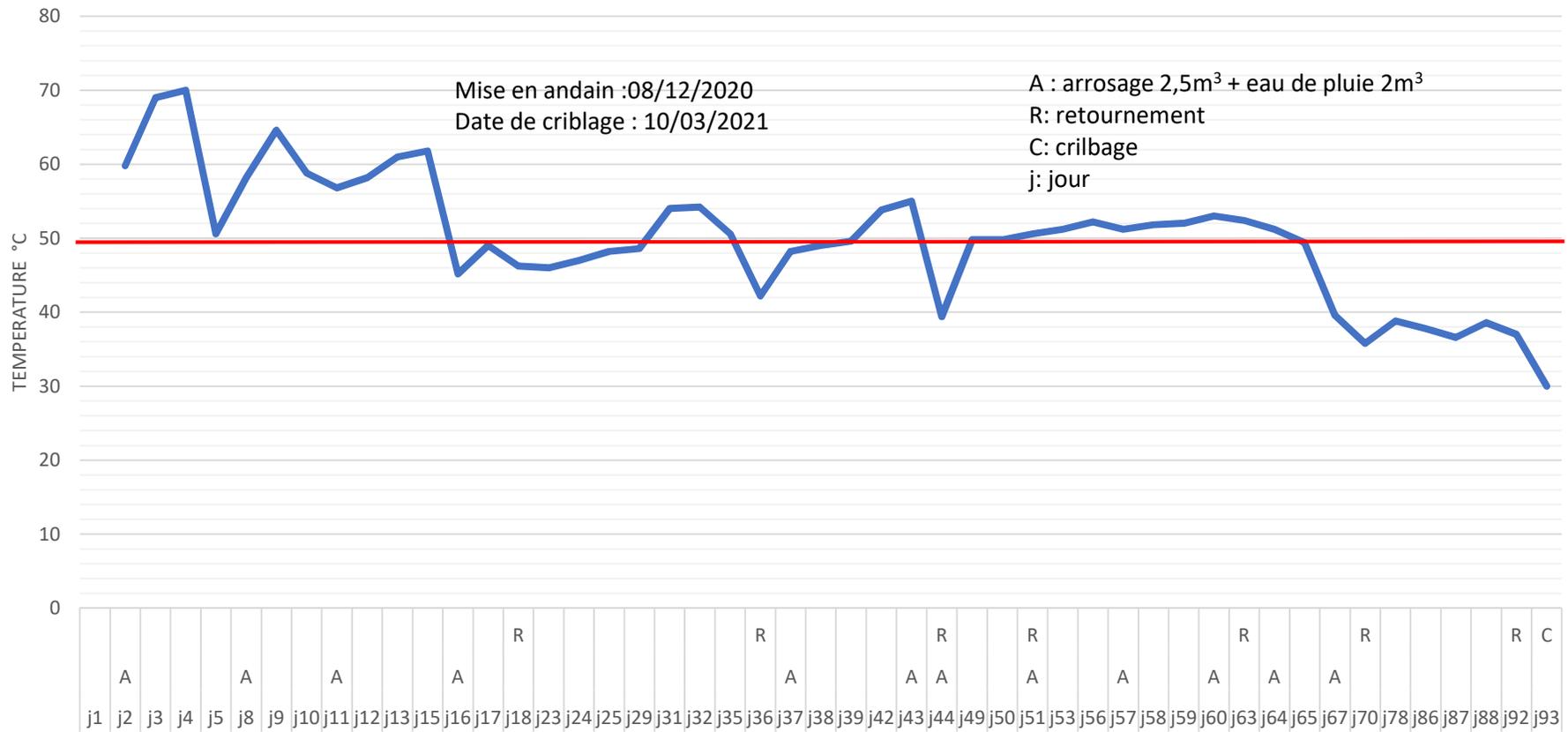
Fiche de suivi de l' andain n°7 (déchet organique 3m³ / digestat solide 100kg)



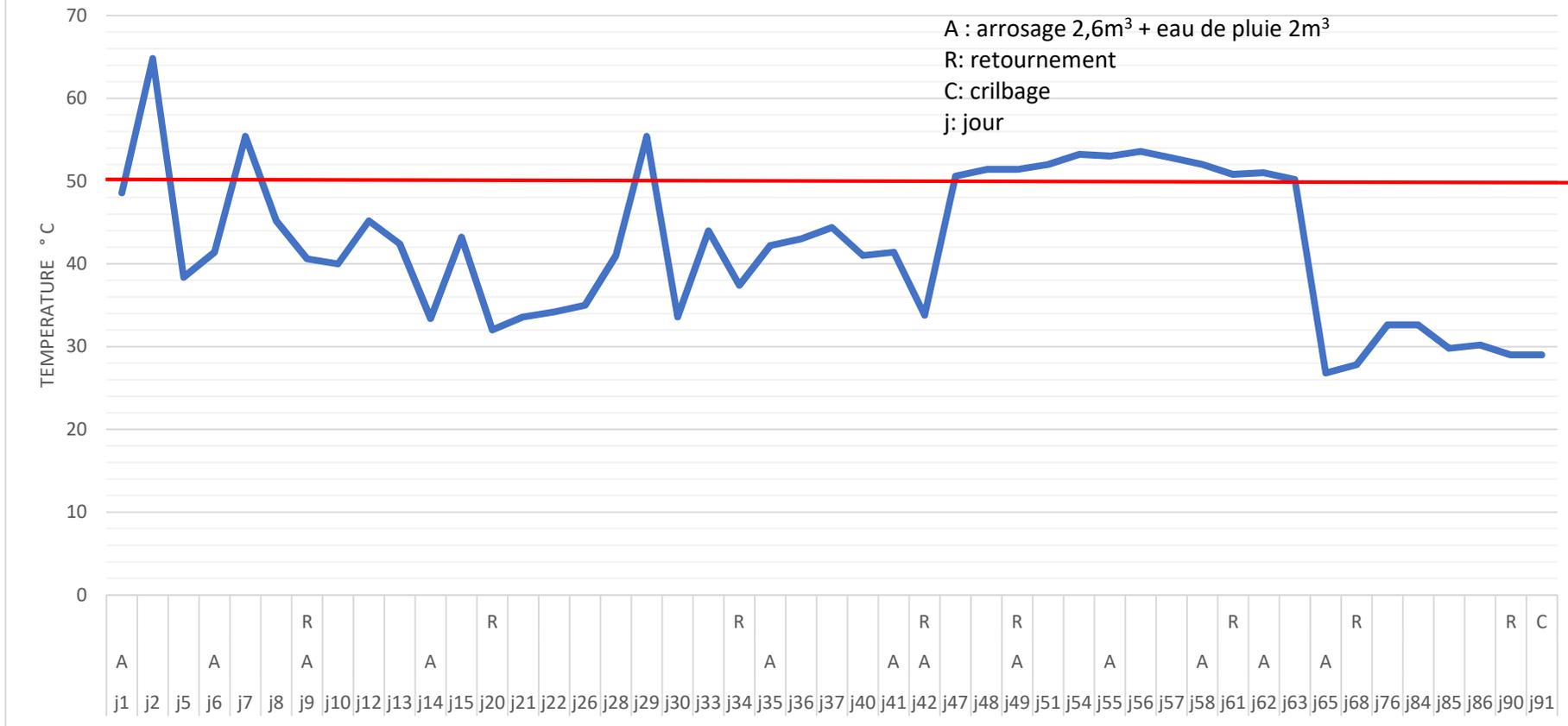


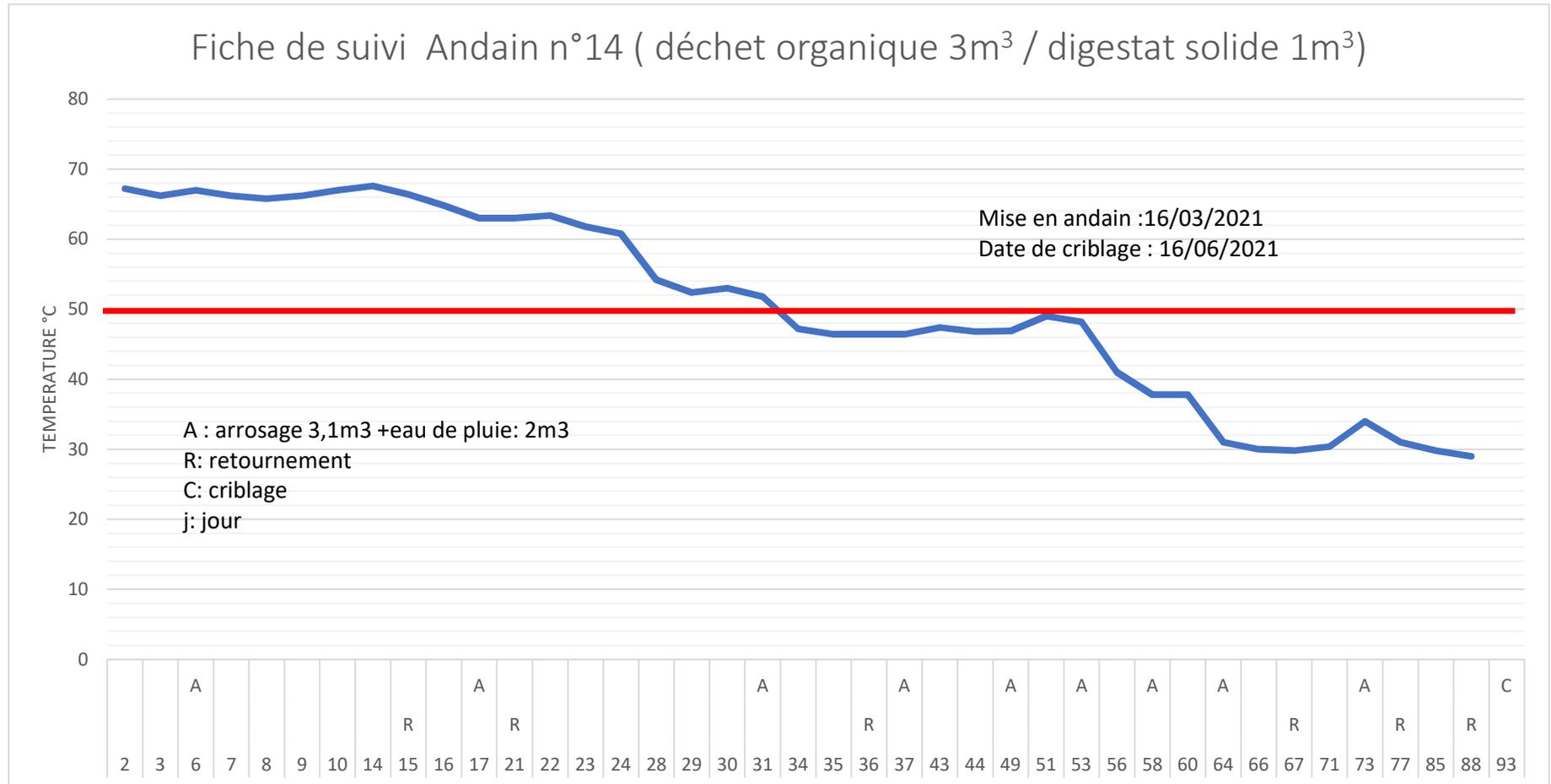


Fiche de suivi Andain n°10 (déchet organique 3m³ / digestat solide 250kg)

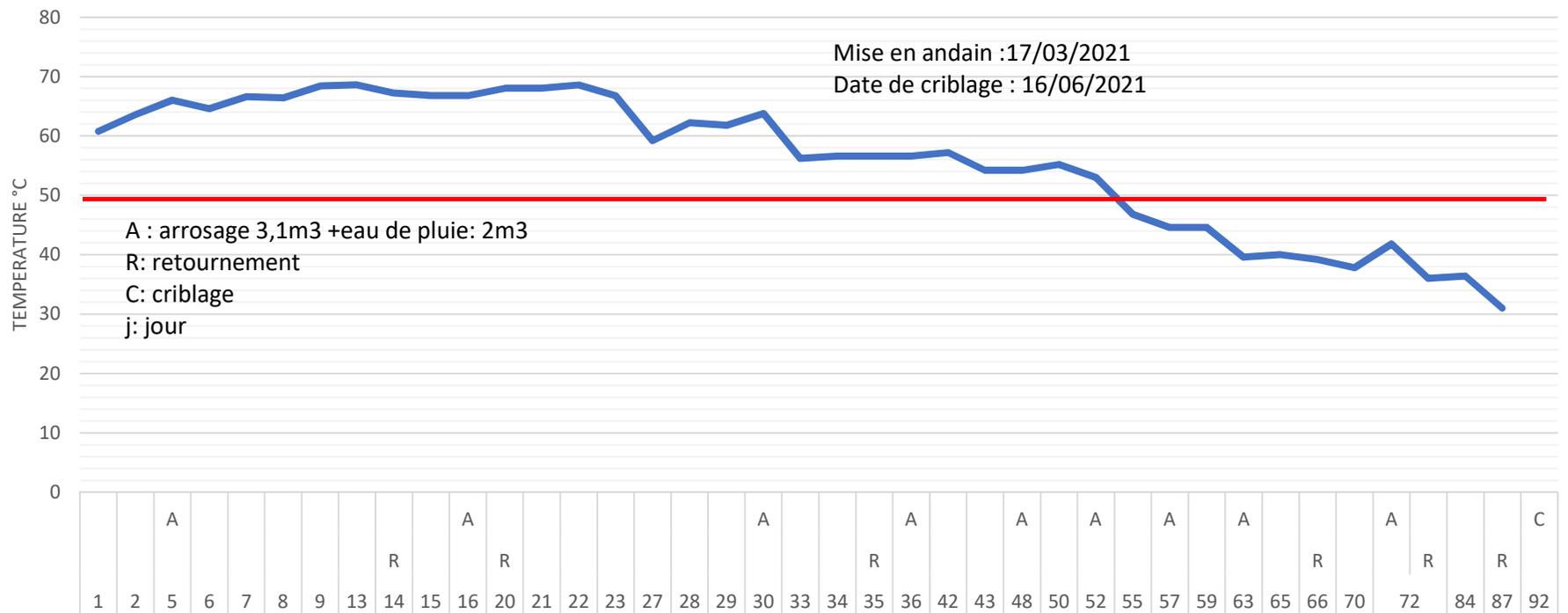


Fiche de suivi Andain n°11 (déchet organique 3m³)





Fiche de suivi Andain n°15 (déchet organique 4m³ / digestat solide 2m³)/Digestat liquide 360 litres



Fiche de suivi Andain n°16 (déchet organique 4m³ / digestat solide 2m³)

