

EVALUATION DES DIFFERENTS SYSTEMES DE TRAITEMENT DE PROXIMITE DES BIODECHETS

SYSPROX

RAPPORT FINAL

EXPERTISES 

Jun
2023

REMERCIEMENTS

Cette étude n'aurait pas pu être réalisée sans le matériel mis à disposition par les fournisseurs des digesteurs et du déshydrateur :

- DANAN Albert, Directeur Général Eco-digesteur
- TARDIF Jean-Pierre, Président Directeur Général Eco-green
- GUY Olivier, Directeur de IDS environnement

Merci également aux membres du comité de pilotage ayant permis de définir et de valider les modalités des essais réalisés :

- BOUDET Christophe, Gérant de Formacompost,
- ZARD Guy, Directeur commercial et co-fondateur de Biotech environnement,
- ASSOUD Jean-Baptiste, Recup' Occitanie
- MEREAU Alexandra, Recup' Bokashi Aquitaine
- HERDUIN Franck, Directeur associé Get-Innovation

Ainsi qu'aux ingénieurs de l'ADEME pour leur soutien tout au long du projet :

- TURATI Guillaume, Ingénieur Économie Circulaire, ADEME SVD,
- DEPORTES Isabelle, Ingénieure impacts sanitaires et environnementaux de la gestion des déchets ADEME SCEV,
- BRUSCHET Muriel, Ingénieure Tri à la source des biodéchets, ADEME SVD,
- MULLER Fabienne, Ingénieure, Service Valorisation des Déchets.

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, THEVENIN Nicolas, MORTAS Nicolas, RUIDAVETS Lionel, DEPARIS Denise, EHRHARDT Fiona, MINKOSSE Christiane, MULLER Audrey. 2023. **SYSPROX - Evaluation des différents systèmes de traitement de proximité des biodéchets**. 54 p.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2021MA000285

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : THEVENIN Nicolas - RITTMO, MORTAS Nicolas - OrgaNeo, RUIDAVETS Lionel - RITTMO, DEPARIS Denise - RITTMO, EHRHARDT Fiona - RITTMO, MINKOSSE Christiane - RITTMO, MULLER Audrey - RITTMO.

Coordination technique - ADEME : Guillaume TURATI, Muriel BRUSCHET
Direction Économie Circulaire / Service Valorisation des Déchets

Dans le cadre de la généralisation réglementaire du tri à la source des biodéchets au 31 décembre 2023, différents systèmes de traitement in situ des déchets de cuisine et de table sont proposés sur le marché.

Si certains systèmes tels que le compostage de proximité sont bien documentés, d'autres solutions sont plus récentes et restent mal connues.

Pour mieux comprendre les typologies de procédés disponibles et la valeur agronomique des matières qui en sont issues, l'ADEME a souhaité comparer différents systèmes de gestion de proximité des biodéchets : un composteur en bac (procédé de référence), un composteur rotatif, un lombricomposteur, deux « digesteurs », un déshydrateur et un seau bokashi. Les résultats d'une précédente étude de l'ADEME consacrée aux composteurs électromécaniques ont aussi été pris en compte dans cette étude comparative.

Les procédés étudiés ont été démarrés en mode batch avec des déchets de cuisine et de table issus d'une collecte en porte à porte des ménages et assimilés. Des cosubstrats ont été apportés ou non, conformément aux préconisations des fournisseurs relatives aux différents procédés : broyat de déchets d'espaces verts pour le compostage en bac, granulés de bois pour le compostage rotatif et le lombricompostage, son de céréales inoculées de microorganismes pour les digesteurs et le bokashi, aucun cosubstrat pour le déshydrateur. Les procédés requérant des cosubstrats inoculés en microorganismes ont été répétés sans ajout de microorganismes (cosubstrats stérilisés) pour évaluer l'impact de ces microorganismes sur les résultats.

Différents paramètres physico-chimiques ont été suivis pour l'ensemble des essais, en cours de traitement et en maturation avant épandage au sol des produits. Des temps d'arrêt ont ainsi été observés à 1 jour, 14 jours et 45 jours pour tous les procédés, jusqu'à 120 jours pour le lombricompostage et jusqu'à 270 jours pour le compostage en bac.


Les résultats montrent que l'ensemble des procédés génère très peu de nuisances lorsque les règles d'utilisation des procédés et d'épandage des produits sont respectées. Ces nuisances sont limitées à des coulures, quelques odeurs ou la présence éventuelles de moucherons.

Les qualités agronomiques des produits finaux diffèrent selon les procédés. Elles sont liées à la température et la durée de chaque procédé, à la nature et à la quantité des cosubstrats apportés. Pour les digesteurs et le bokashi, les résultats respectifs de chaque procédé restent comparables lors des répétitions des essais, que le cosubstrat soit inoculé ou non avec des microorganismes.

Tous les produits obtenus respectent les critères relatifs aux amendements organiques spécifiés dans la catégorie fonctionnelle de produit N° 3 du règlement UE 2019/1009, même si le taux de matière sèche est parfois limite pour le bokashi et le lombricompost.

Les produits les plus stables sont le compost et le lombricompost, pour lesquels la stabilité et la maturité de la matière organique sont très élevées. Pour tous les autres procédés, une phase de maturation des substrats ou un post-traitement par compostage est nécessaire pour atteindre ces niveaux de stabilité.

Seul le compostage en bac permet d'obtenir des produits conformes à la réglementation française relative à la gestion de proximité des biodéchets.



In the context of the regulatory generalization of source separation of bio-waste by December 31, 2023, different systems of *in situ* treatment of kitchen and table waste are proposed on the market.

If some systems such as proximity composting are well documented, other solutions are more recent and remain poorly known.

To better understand the processes available and the agronomic value of the resulting materials, ADEME has tested different systems of proximity management of biowaste: A composter (reference process), a rotary composter, a vermicomposter, two digesters, a dehydrator and a bokashi bucket. The results of a previous ADEME study on electromechanical composters were also taken into account.

The processes studied were started in batch mode with bio waste from a door-to-door collection of households and similar. Co-substrates were provided or not, according to the recommendations of the suppliers for the different processes: green waste shred for composting, wood pellets for the rotary composter and vermicomposting, cereal bran inoculated with microorganisms for the digesters and the bokashi, no co-substrate for the dehydrator. The processes requiring co-substrates inoculated with microorganisms were repeated without microorganisms (sterilized co-substrates) to evaluate the impact of these microorganisms on the results.

Different physico-chemical parameters were monitored for all the trials, during the treatment and during the maturation process before spreading the products on the soil. Stopping times were observed at 1 day, 14 days and 45 days for all processes and up to 120 days and 270 days for vermicomposting and composting respectively.

The results have shown that all the tests generated very few nuisances (runoff, odors or possible presence of insects) when the rules of use of the processes and addition to soil of the products were respected.

The agronomic qualities of the final products differed according to the processes. They were linked to the temperature and duration of each process, to the nature and quantity of the co-substrate brought. For the digesters and the bokashi, the respective results of each process remained comparable during the repetitions of the tests, whether the cosubstrate was inoculated or not with microorganisms.

Organic matter properties differed from a process to another.

All products obtained met the criteria for organic amendments specified in functional product category No. 3 of EU Regulation 2019/1009, although the dry matter content is sometimes borderline for bokashi and vermicompost.

The most stable products were compost and vermicompost, which had very high stability and maturity of the organic matter. For all other processes, a maturation phase of the substrates or a post-treatment by composting is necessary to reach these stability levels.

From a regulatory point of view, only composting can be used to obtain products that comply with the regulations on the local management of biowaste.

SOMMAIRE

1. CONTEXTE DU PROJET	7
1.1. Introduction.....	7
1.2. Choix des systèmes de traitement.....	8
2. METHODE.....	9
2.1. Préparation des biodéchets.....	9
2.1.1. Déchets de cuisine et de table (DCT).....	9
2.1.2. Broyats de branches.....	12
2.1.3. Autres cosubstrats.....	13
2.2. Analyse des biodéchets.....	13
2.3. Description des procédés.....	13
2.3.1. Compostage en bac.....	14
2.3.2. Lombricompostage.....	15
2.3.3. Compostage rotatif.....	15
2.3.4. Bokashi.....	16
2.3.5. Digesteurs.....	17
2.3.6. Déshydrateur.....	19
2.3.7. Compostage électromécanique.....	19
2.4. Vue d'ensemble des procédés étudiés.....	20
2.5. Calendrier des essais.....	21
2.6. Suivi des procédés.....	21
2.7. Analyses réalisées sur les matières initiales, en cours de transformation et en fin de traitement.....	25
2.7.1. Méthodes de caractérisation agronomique des produits organiques testés.....	25
2.7.2. Retour au sol.....	29
3. ÉTUDE COMPARATIVE DES PROCÉDES TESTÉS.....	29
3.1. Comparaison visuelle.....	29
3.2. Paramètres de traitement.....	31
3.3. Caractérisation des produits finaux.....	34
3.3.1. Microbiologie des produits après maturation.....	34
3.3.2. Paramètres agronomiques des produits après traitement.....	35
4. ASPECTS RÉGLEMENTAIRES	42
4.1. Utilisation des DCT en gestion de proximité.....	42
4.2. Définition du compostage de proximité.....	43
4.3. Retour au sol des produits obtenus.....	44
5. CONCLUSIONS.....	44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	49

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES	50
SIGLES ET ACRONYMES	52

1. Contexte du projet

1.1. Introduction

Adoptée en 2015, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) prévoyait une généralisation du tri à la source des biodéchets pour tous les producteurs à l'horizon 2025.

En 2018, le Parlement Européen a adopté le Paquet Économie Circulaire, qui s'est traduit par la publication de quatre Directives Européennes, dont la Directive (UE) 2018/851, fixant un objectif de généralisation du tri à la source des biodéchets à tous les pays membres au 31 décembre 2023.

Plus récemment, la loi adoptée en février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire vient entre autres mettre en cohérence la réglementation française avec les objectifs Européens. L'article 88 indique qu'« *au plus tard le 31 décembre 2023, cette obligation [de tri à la source des biodéchets] s'applique à tous les producteurs ou détenteurs de biodéchets, y compris aux collectivités territoriales dans le cadre du service public de gestion des déchets, et aux établissements privés et publics qui génèrent des biodéchets.* »

Dès lors, il revient aux collectivités locales de proposer à leurs habitants, dans le cadre de leur service public de prévention et de gestion des déchets, une ou plusieurs solutions de gestion du tri à la source des biodéchets. Deux catégories principales de solutions permettent de répondre à l'objectif réglementaire :

- La mise en place d'une collecte séparée des biodéchets (en porte à porte ou en points d'apport volontaire) pour un traitement centralisé ;
- Le développement des pratiques de traitement de proximité.

La gestion des déchets issus du tri à la source des biodéchets est loin d'être généralisée en France : l'ADEME dénombre un peu plus de 100 collectivités ayant mis en place ou expérimentant la collecte séparée des déchets alimentaires, permettant un accès à ce service à plus de 4,2 millions de Français en 2019. Le compostage de proximité, pratique ancestrale, est déclaré pratiqué par 34% des foyers (étude ADEME – Enquête nationale sur la gestion domestique des déchets organiques datant de 2020). Par conséquent, à l'aune des informations disponibles, l'ADEME estime qu'entre 30 et 40% de la population française a accès à un dispositif de gestion des biodéchets triés à la source.

Par ailleurs, l'Arrêté du 12 juillet 2011 fixe les seuils de production au-delà desquels les émetteurs considérés comme gros producteurs – tous secteurs confondus (restauration, industrie agroalimentaire, etc.) – sont tenus de trier et de traiter les biodéchets. Un nouveau seuil est fixé par la loi du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire : A compter du 1^{er} janvier 2023, les producteurs de plus de 5 t/an de biodéchets seront également concernés par cette réglementation, en amont de la généralisation du tri à la source des biodéchets à tous, fixée au 31 décembre 2023. Chaque gros producteur de biodéchets se doit de trouver une solution de tri à la source des biodéchets pour répondre à cette obligation réglementaire. Deux catégories principales de solutions permettent de répondre à cette exigence :

- La gestion *in situ* (ex : compostage autonome en établissement) ;
- L'utilisation d'un service de collecte séparée.

Par ailleurs, étant donné que les déchets de cuisine et de table, ainsi que les denrées alimentaires, sont concernés par la réglementation sanitaire sur les sous-produits animaux, le producteur de ces déchets est tenu de respecter un certain nombre de règles sanitaires pouvant avoir des impacts financiers, techniques et organisationnels sur les modalités de gestion des biodéchets. La conséquence de ces modifications réglementaires est le développement de « nouveaux » procédés de gestion des biodéchets proposant des solutions alternatives au compostage, mais pour lesquels il n'existe que peu d'évaluations scientifiques permettant de connaître la qualité agronomique et sanitaire des produits issus de ces procédés.

L'objectif de cette étude est d'éclairer les organismes privés et publics sur les différents systèmes de traitement *in situ* des biodéchets qui leurs sont proposés. Cette étude ne traite pas des capacités de traitement des procédés en termes de quantité de biodéchets (masse ou volume), mais s'intéresse au fonctionnement de ces procédés et à la valorisation possible pour un rendu au sol des déchets traités.

Afin d'approfondir les connaissances de ces procédés, et particulièrement la qualité des produits qui en sont issus, les travaux ont consisté à réaliser une étude comparative de ces procédés avec les traitements par compostage et lombricompostage. Cette comparaison s'appuie sur des critères relatifs au procédé en lui-même, tels que la facilité d'utilisation ou l'encombrement et s'attache à la description des propriétés agronomiques des produits finis. Les résultats ont pour finalité :

- La description et la caractérisation de ces différentes solutions de traitements afin de déterminer des typologies de procédés.

- La formulation de préconisations sur la dénomination et la valeur agronomique des différents matières obtenues selon cette typologie.
- L'évaluation de l'utilisation et débouchés possibles des matières sortant de ces systèmes.

1.2. Choix des systèmes de traitement

L'ADEME est régulièrement interrogée sur les moyens et les systèmes de traitement et de pré-traitement des biodéchets, en particulier des déchets alimentaires des collectivités et des gros producteurs de biodéchets. Si le compostage est bien connu et documenté comme système de traitement des déchets alimentaires, l'ADEME, ne dispose pas d'assez de recul pour évaluer l'efficacité des procédés émergents sur le marché. En particulier, la qualité et les propriétés agronomiques des produits issus de ces procédés est aujourd'hui méconnue.

Afin de compléter les connaissances sur les systèmes de gestion de proximité proposés aux producteurs de biodéchets, les procédés de traitements retenus pour cette étude sont :

- Le compostage en bac (procédé de référence) ;
- Le lombricompostage (procédé de référence) ;
- Le compostage rotatif (modèle CULBUTO 50L, prêté par OrgaNeo) ;
- Le bokashi (achat de matériel disponible dans le commerce) ;
- Un déshydrateur (prêté par la société Eco-green) ;
- Deux digesteurs (un modèle prêté par la société Eco-digesteur et un modèle prêté par la société IDS Environnement) ;
- Les composteurs électromécaniques. Pour ces derniers les résultats sont basés sur des travaux réalisés dans l'étude technico-économique des composteurs électromécaniques produite par l'ADEME¹.

Afin de pouvoir comparer les divers procédés, la source des déchets alimentaires, le temps de lancement et les méthodes de suivi ont été identiques pour chaque système de traitement des biodéchets. Les méthodes d'utilisation ont cependant été adaptées en fonction des préconisations des fournisseurs.

Tableau 1: Liste des procédés étudiés dans cette étude.

PROCEDES	TYPE DE DECHETS TRAITES	LIEU DE REALISATION
Compostage en bac	DCT + DV (50/50 vol./vol.)	Extérieur non abrité avec couvercle
Lombricompostage	DCT + granules bois (88/12 vol./vol.)	Intérieur
Compostage en tambour rotatif	DCT + granules bois (67/33 vol./vol.)	Intérieur + maturation en extérieur abrité
Digesteur	DCT + cosubstrat fourni (ratio variable en fonction des fournisseurs)	Intérieur
Déshydrateur	DCT seuls	Intérieur
Seau Bokashi	DCT + cosubstrat fourni (<1% de la masse globale)	Intérieur
Compostage électromécanique	DCT + DV	9 sites en fonctionnement (ADEME, 2020)

DCT : Déchets de Cuisine et de Table ; DV : Broyats de branches issues d'une collecte de Déchets Verts

¹ ADEME. 2020. Étude technico-économique des composteurs électromécaniques. Rapport d'étude.

2. Méthode

2.1. Préparation des biodéchets

2.1.1. Déchets de cuisine et de table (DCT)

Les déchets de cuisine et de table utilisés dans le cadre de cette étude sont issus de la collecte sélective en porte à porte opérée par la société Agrivalor auprès des ménages et des établissements de restauration collective et commerciale de la Communauté d'Agglomération de Colmar (Haut-Rhin). Ces biodéchets incluent des déchets alimentaires de viande et de poisson². Ils contiennent aussi une fraction de textiles sanitaires cellulosiques (essuie-tout par exemple).

Les déchets de cuisine et de table ont fait l'objet d'une opération de désachage manuel (Photo 1) afin de retirer les sacs plastiques compostables utilisés pour la collecte et d'éliminer d'éventuels indésirables, dont les erreurs de tri. Ce désempilage manuel des déchets de cuisine et de table a été réalisé du 12 au 17 janvier 2022 (lot 1, pour une partie des essais) et du 14 au 15 mars 2022 (lot 2, pour les essais restants), par des opérateurs équipés de matériel de protection adapté : bottes de sécurité, cote, gants en latex ou vinyle non poudrés, lunettes de protection, masque de protection FFP2. L'échantillon obtenu lors de chaque opération de désempilage a ensuite été homogénéisé par une méthode de quartage simplifiée (Photo 2) :

- Séparation de l'échantillon en 4 parts égales ;
- Mélange homogène de 2 quarts opposés ;
- Mélange homogène des 2 quarts restants ;
- Regroupement et mélange homogène des deux moitiés ainsi obtenues ;
- Répétition des étapes ci-dessus 3 fois de suite afin de s'assurer de l'homogénéité complète de l'échantillon.

Le volume total de déchets de cuisine et de table désempilés et homogénéisés pour la réalisation de l'intégralité des essais est d'environ 1800 L.

A l'issue de l'étape d'homogénéisation, la masse volumique des déchets de cuisine et de table a été mesurée par pesée, afin de faciliter les apports dans les procédés de traitement (Photo 3). Pour cela, 15 prélèvements ont été réalisés aléatoirement à différents endroits du tas de déchets de cuisine et de table homogénéisés, à l'aide d'un bécot en plastique d'une capacité de 5 L. Chacun de ces prélèvements a été pesé afin de mesurer sa masse volumique. La moyenne des masses volumiques individuelles est calculée afin d'en déduire la masse volumique globale du tas de déchets de cuisine et de table. Ce calcul de la masse volumique a été réalisé sur les DCT obtenus en janvier (lot 1, Photo 4) puis sur les DCT obtenus en mars (lot 2, Photo 5-6).



Photo 1 : Déconditionnement des DCT pour le compostage en bac, le compostage rotatif, les bokashis et le déshydrateur (lot 1, du 12 au 17/11/2022)

² Tous les DCT (déchets de cuisine et de table) sont classés SPAN3, quelle que soit leur composition.



Photo 2 : Homogénéisation par quartage des DCT pour le compostage en bac, le compostage rotatif, les bokashis et le déshydrateur (lot 1, du 12 au 17/11/2022)

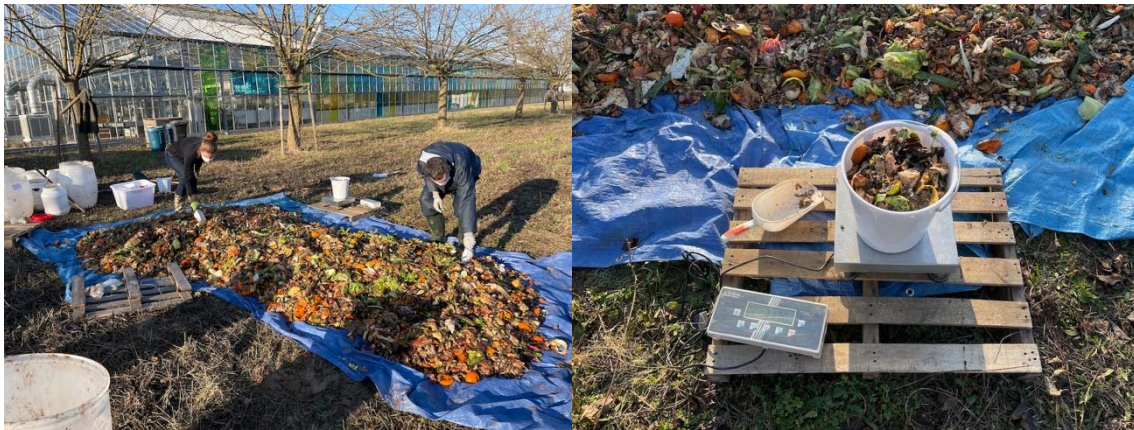


Photo 3 : Échantillonnage des DCT (lot 1, du 12 au 17/11/2022)



Photo 4 Déconditionnement et livraison des DCT pour les digesteurs, les répétitions bokashi et le lombricomposteur (lot 2, du 14 au 15/03/2022)



Photo 5 : Homogénéisation par quartage des DCT pour les digesteurs et les répétitions bokashi (lot 2, du 14 au 15/03/2022)



Photo 6 : Homogénéisation par quartage des DCT pour le lombricompostage (lot 2, 15/03/2022)

Le lombricompostage et le bokashi nécessitent des DCT de fraction granulométrique plus fine que les autres procédés étudiés. En conséquence, une partie des DCT homogénéisés a été fractionnée à l'aide d'un racloir : les DCT, épandus au sol sur une bâche ont été hachés de telle sorte que les morceaux n'excèdent pas une épaisseur de 3 cm (Photo 7). L'échantillon de DCT ainsi obtenu présente une masse volumique de 680,8 g/L contre 519,6 g/L avant réduction granulométrique, soit une augmentation de 31% de la masse volumique (Photo 8).



Photo 7 : DCT avant et après réduction granulométrique



Photo 8 : Mesure de la masse volumique

2.1.2. Broyats de branches

Le broyat de branches est employé en tant que matière sèche carbonée et structurante dans le cadre du procédé de compostage en bac. Il est issu de la collecte des déchets verts en déchèteries, opérée par la société Agrivalor sur le territoire haut-rhinois (Photo 9).

Le broyat a été livré sur le site de RITMO la veille du lancement du procédé de compostage en bac. Comme pour les déchets de cuisine et de table et selon les mêmes protocoles, le broyat a fait l'objet d'une homogénéisation par quartage simplifié, ainsi que d'une mesure de la masse volumique (Photo 10).

Le volume de broyat de branches collecté pour la réalisation de l'intégralité des essais est d'environ 500 L.



Photo 9 : Prélèvement des broyats de déchets verts sur plateforme de compostage industrielle



Photo 10 : Echantillonnage des broyats de déchets verts pour la mesure de la masse volumique et les analyses agronomiques.

2.1.3. Autres cosubstrats

Certains des systèmes de traitement des biodéchets étudiés nécessitent, selon les préconisations de leurs fournisseurs, des cosubstrats spécifiques à leurs procédés :

- Des pellets ou granulés de bois (traditionnellement employés en tant que bois énergie), sont préconisés par le fabricant du composteur rotatif en tant que cosubstrat. Les pellets utilisés dans le cadre de l'étude sont issus d'un lot acheté en grande surface.
- Du son de blé ensemencé avec des microorganismes est fourni avec les seaux bokashi. Le son de blé a été livré avec le matériel qui a été acheté sur un site de commerce en ligne spécialisé dans le jardinage.
- Les cosubstrats à base d'écorces de riz, ensemencés avec des microorganismes, ont été livrés par les fournisseurs des deux modèles de digesteurs étudiés.

2.2. Analyse des biodéchets

Chaque catégorie de biodéchets (déchets de cuisine et de table, broyat de branches) et de cosubstrat a fait l'objet des analyses suivantes :

- Teneur en matière sèche (MS),
- Teneur en carbone (C) total,
- Teneur en azote (N) total,
- Rapport C/N,
- Minéralisation de l'azote (selon la norme FD U 44-163),
- Détermination des teneurs en microorganisme *E.coli* et en microorganismes mésophiles totaux.

2.3. Description des procédés

Les procédés et leur protocole de mise en œuvre ont été discutés puis validés lors de la réunion de lancement de l'étude par les membres du comité de pilotage (incluant les fournisseurs des équipements testés), afin de se rapprocher au maximum des conditions normales d'utilisation. Or, l'étude a pour objectif de comparer la qualité des produits sur des temps d'arrêt de traitement identiques et en fin de procédé. Ainsi, l'ensemble des traitements a dû être réalisé avec un apport initial de biodéchets permettant d'une part, la réalisation du procédé et, d'autre part, la fourniture de matière en quantités suffisantes pour la réalisation des analyses prévues à chaque temps d'arrêt. Cela constitue une différence entre les conditions normales d'utilisation et les conditions de l'essai, concernant les procédés de compostage (en bac et rotatif), de lombricompostage et de bokashi (apport des DCT en continu au cours du procédé et en petite quantité). La mise en œuvre de ce protocole en batch est une limite dans la représentativité des protocoles. L'ADEME a toutefois estimé que cette mise en œuvre restait pertinente au regard des objectifs poursuivis.

Les paragraphes suivants présentent la synthèse des procédés testés. Le détail de leur mise en œuvre est fourni en annexes.

2.3.1. Compostage en bac

Le compostage en bac est un procédé de traitement des biodéchets rustique et largement décrit par la littérature. Il permet de traiter conjointement les déchets de cuisine et de table et les déchets issus de l'entretien des espaces verts. Le respect des préconisations d'usage permet généralement une montée en température résultant en une hygiénisation des biodéchets traités. Ce procédé fait l'objet d'une promotion de la part des pouvoirs publics en tant que système de prévention des biodéchets alternatif à la collecte et au traitement sur plateformes industrielles, tant auprès des particuliers que des gros producteurs de biodéchets. La réglementation autorise le compostage en bac sur site dans la limite d'une tonne de biodéchets par semaine. Le compost ainsi obtenu peut être employé par le producteur de biodéchets pour son propre usage³.

Le procédé de compostage en bac (Photo 11) a été réalisé selon les préconisations du guide ADEME sur le compostage de proximité⁴.



Photo 11 : Mise en place du procédé de compostage en bac

Synthèse du procédé

- Matériel** : Bac bois Mchet 800 L
- Remplissage** : en une seule fois avec 1/2 DCT 1/2 DV (v/v)
- Température** : essai réalisé en extérieur de janvier à septembre (pas de régulation de température)
- Durée du traitement** : 270 jours (9 mois)
- Temps de prélèvements** : 1, 14, 45, 120, 240 jours, 270 jours (9 mois)
- Paramètres suivis** :
 - Température (°C),
 - Humidité (test de la poignée),
 - Hauteur du tas,
 - Présence d'odeur à proximité et à l'ouverture du bac,
 - Type d'odeur à proximité et à l'ouverture (soufre, ammoniac etc.),
 - Présence d'odeur en cas de brassage superficiel sur une profondeur de 30 cm à l'aide d'une griffe,
 - Type d'odeur au brassage superficiel (soufre, ammoniac etc.),
 - Présence de nuisances de type « moucheron » ou autres animaux
 - Remarques de l'opérateur sur la facilité, la propreté et la praticité du système
- Apport au sol** : au 270^e jour en surface sans couvert (selon préconisations du guide ADEME sur le compostage)

³ Circulaire du 13 décembre 2012 relative aux règles de fonctionnement des installations de compostage de proximité et Arrêté du 9 avril 2018 fixant les dispositions techniques nationales relatives à l'utilisation de sous-produits animaux et de produits qui en sont dérivés

⁴ ADEME 2019, Le compostage et le paillage, jardiner au naturel - Clé pour Agir.

2.3.2. Lombricompostage

Le lombricompostage est un procédé de traitement des biodéchets généralement utilisé par des particuliers ne disposant pas d'espaces verts permettant la pratique du compostage en bac ou en tas. Il s'agit d'un procédé (Photo 12) communément promu par les collectivités à compétence déchets (communautés de communes, agglomérations, métropoles, syndicats de prévention et de traitement des déchets etc.) auprès des usagers habitant en immeuble. Les produits en sortie de traitement sont un lombricompost dont l'utilisation est identique à celle d'un compost et un lixiviat nommé "jus", "thé de lombricompost" ou encore "lombrithé", dont les préconisations d'usage sont généralement identiques à celle d'un engrais liquide dilué (dilution à l'eau au 1/10^e). Sans agrément sanitaire, Les gros producteurs de biodéchets ne sont pas autorisés à pratiquer le lombricompostage sur site, dans l'état actuel de la réglementation.



Photo 12 : Mise en place du procédé de lombricompostage avec insertion d'une pile-bouton

Synthèse du procédé

- Matériel** : Can -O-Worms
- Remplissage** : en une seule fois, 88% de DCT et 12% de granulés de bois (v/v), avec conservation d'un étage inférieur de litière contenant des vers de compost
- Température** : en intérieur tempéré à 15-20°C
- Durée de traitement** : 120 jours (4 mois)
- Maturation post traitement** : Non concerné
- Temps de prélèvements** : 1 jour, 14 jours, 45 jours, 120 jours
- Paramètres suivis** :
 - Température (°C),
 - Présence et type d'odeur à proximité et à l'ouverture,
 - Présence et type d'odeur en cas de brassage superficiel à l'aide d'une griffe,
 - Présence de nuisances de type « moucheron » ou autres animaux
 - Remarques de l'opérateur sur la facilité, la propreté et la praticité du système
 - Vidanges régulières des lixiviats (à chaque date de suivi)
- Apport au sol** : au 120^e jour, en surface sans couvert

2.3.3. Compostage rotatif

Le compostage rotatif est une déclinaison du compostage en bac. Les principes de fonctionnement sont les mêmes. La différence réside principalement dans le fait que les biodéchets traités sont chargés dans un tambour rotatif (Photo 13) ayant pour objectif de faciliter les opérations de brassage et l'homogénéisation des matières par l'utilisateur.



Photo 13 : Mise en place du composteur rotatif (gauche) et DCT en mélange avec les granulés bois (droite)

Synthèse du procédé

- ☑ **Matériel** : Culbuto 50
- ☑ **Remplissage** : en une seule fois, 33% DCT et 66% DV (v/v)
- ☑ **Température** : en intérieur tempéré à 15-20°C
- ☑ **Durée de traitement** : 45 jours (1 mois ½) pour correspondre aux autres procédés de traitement
- ☑ **Maturation post traitement** : 4 mois à même le sol, bâché pour protéger des intempéries
- ☑ **Temps de prélèvements** : 1 jour, 14 jours, 45 jours (fin de procédé, début maturation) 165 jours (fin de maturation)
- ☑ **Paramètres suivis** :
 - Température (°C),
 - Présence et type d'odeur à proximité et à l'ouverture,
 - Présence et type d'odeur lors des retournements,
 - Présence de nuisances de type « moucheron » ou autres animaux
 - Remarques de l'opérateur sur la facilité, la propreté et la praticité du système
- ☑ **Apport au sol** : à 165 jours, en surface sans couvert

2.3.4. Bokashi

Le système bokashi est un procédé de fermentation lactique qui permet la stabilisation des matières organiques. Ce procédé (Photo 14 & Photo 15), dont la diffusion en France est émergente, vise principalement à abaisser le pH des déchets alimentaires en les plaçant en milieu anaérobie, souvent avec adjonction de microorganismes inoculés dans du son de céréales, en vue d'une stabilisation et d'un stockage de moyen terme. Il s'agit d'un procédé proche de l'ensilage ou de la conservation des aliments par lacto-fermentation (ex : choucroute, pickles etc.). Les matières en sortie du procédé sont :

- un lixiviat,
- des matières organiques stabilisées, ayant vocation à subir un post-traitement par compostage aérobie ou un épandage direct au sol selon les préconisations des fournisseurs de seaux bokashi.

L'usage des seaux bokashi est normalement quotidien, avec un remplissage par jour. La durée de remplissage d'un seau de 16 L constaté pour un foyer moyen est généralement d'un mois. La durée indicative du procédé est de 15 jours, suivi d'une étape de maturation ou de compostage avant utilisation par retour au sol.



Photo 14 : Mise en place du bokashi : alternance des apports DCT/son de blé puis tassement



Photo 15 : Insertion d'une pile-bouton au cœur du seau Bokashi pour le suivi de la température

Synthèse du procédé

- ☑ **Matériel** : Seau Bokashi fournis par Jardins Animés (modèle Agriton)
- ☑ **Remplissage** : En une seule fois avec ajout de substrat préconisé par le fournisseur. Bien couper les déchets au premier remplissage (pour faciliter le tassement). 1 seul tassement initial.
- ☑ **Température** : en intérieur tempéré à 15-20°C
- ☑ **Durée de traitement** : 45 jours (1.5 mois)
- ☑ **Maturation post traitement** : non concerné
- ☑ **Temps de prélèvements (1 seau sacrifié à chaque prélèvement)** : 1 jour, 14 jours, 45 jours
- ☑ **Paramètres suivis** :
 - Température (°C),
 - Présence et type d'odeur à proximité et à l'ouverture,
 - Présence de nuisances de type « moucheron » ou autres animaux
 - Remarques de l'opérateur sur la facilité, la propreté et la praticité du système
 - Vidange régulière des lixiviats (1/jour)
- ☑ **Apport au sol** : Au 45e jour, enfouissement sur 5 à 10 cm
- ☑ **2 répétitions du procédé**

2.3.5. Digesteurs

Les digesteurs sont des systèmes de traitement mécanisés et automatiques au sein desquels les DCT sont introduits en présence d'un cosubstrat ensemencés de microorganismes. Le mélange est alors chauffé (température variable entre 40°C et 70°C) et brassé durant un cycle bien défini. Les produits en sortie sont (i) le substrat organique traité et (ii) l'air chargé d'humidité. Ces systèmes s'adressent principalement aux gros producteurs de biodéchets. Ce procédé ayant émergé sur le marché français, parallèlement au renforcement de la réglementation sur le tri à la source des biodéchets. Il s'adresse principalement aux gros producteurs de biodéchets. Les digesteurs sont présentés par les metteurs en marché comme un procédé de compostage accéléré. Mais leur diffusion étant récente, la question quant à leur conformité à la réglementation sur le

compostage de proximité reste posée. Les deux machines testées dans le cadre de l'étude sont l'Eco Digesteur et le Clean Digest (Photo 16).



Photo 16 : Eco Digesteur (gauche) et Clean Digest (droite)

Synthèse du procédé

Avec microorganismes

- ☑ **Matériel** : Eco Digesteur et Clean Digest
- ☑ **Remplissage** : En une seule fois avec le substrat préconisé par le fournisseur (51% à 64% de DCT v/v)
- ☑ **Température (protocole mis à jour suite aux retours des participants concernant la première version du compte rendu)** :
 - *Clean Digest* : préchauffe de la machine 6h (selon notice) puis introduction des déchets alimentaires pour un cycle de 24h selon la température fixée automatiquement par la machine.
 - *Eco Digesteur* :
 - Répétition 1 : 22,5 h à 60°C + 1,5 h à 70 °C.
 - Répétition 2 : 70 °C constant pendant 24h.
- ☑ **Durée de traitement** : 1 jour
- ☑ **Maturation post traitement** : 45 jours (cohérence avec les autres procédés)
- ☑ **Temps de prélèvements** :
 - Après procédé (1 jour),
 - Pendant la maturation (14 jours),
 - Après la maturation (45 jours)
- ☑ **Paramètres suivis** :
 - Température (°C),
 - Présence et type d'odeur à proximité et à l'ouverture,
 - Présence de nuisances de type « moucheron » ou autres animaux
 - Remarques de l'opérateur sur la facilité, la propreté et la praticité du système
 - Récupération des condensats
 - Suivi de la consommation électrique
- ☑ **Apport au sol** : Après procédé (1 jour) et après maturation (45 jours), enfouissement sur 5 à 10 cm
- ☑ **Répétition du procédé pour l'Eco digesteur**

Sans microorganismes

- ☑ **Matériel** : Eco Digesteur et Clean Digest
- ☑ **Remplissage** : En une seule fois avec substrat préconisé par le fournisseur et stérilisé par 3 cycles d'autoclavage (121°C/20 min) afin d'avoir exactement le même mélange que dans les modalités avec microorganismes.
- ☑ **Température** :

- o *Clean Digest* : préchauffe de la machine 6h (selon la notice) puis introduction des déchets alimentaires pour un cycle de 24h selon la température fixée automatiquement par l'automate.
- o *Eco Digesteur* :
 - Répétition 1 : 22,5 h à 60°C + 1,5 h à 70 °C.
 - Répétition 2 : 70 °C constant pendant 24h.
- ☑ **Durée de traitement** : 1 jour
- ☑ **Maturation post traitement** : 45 jours (cohérence avec les autres procédés)
- ☑ **Temps de prélèvements** :
 - Après procédé (1 jour),
 - Pendant la maturation (14 jours),
 - Après la maturation (45 jours)
- ☑ **Paramètres suivis** :
 - Température (°C),
 - Présence et type d'odeur à proximité et à l'ouverture,
 - Présence de nuisances de type « mouchérons » ou autres animaux
 - Remarques de l'opérateur sur la facilité, la propreté et la praticité du système
 - Récupération des condensats
 - Suivi de la consommation électrique
- ☑ **Apport au sol** : Après procédé (1 jour) et après maturation (45 jours), enfouissement sur 5 à 10 cm
- ☑ **Répétition du process sur l'Eco digesteur**

2.3.6. Déshydrateur

Les déshydrateurs proposés sur le marché sont de conception proche de celle des digesteurs, mais la température requise pour la déshydratation des biodéchets est plus élevée (85°C environ). Selon les modèles et leurs capacités de traitement, la durée du procédé varie de 6h à 24h. Les déchets de cuisine et de table sont uniquement chauffés pour être déshydratés, sans adjonction de cosubstrats.

Synthèse du procédé

- ☑ **Matériel** : Deshydrateur Eco-green
- ☑ **Remplissage** : En seule une fois, 100% DCT
- ☑ **Température** : 85°C constant
- ☑ **Durée de traitement** : 1 jour
- ☑ **Maturation post traitement** : 45 jours (pour faire correspondre aux autres process)
- ☑ **Temps de prélèvements** :
 - Après process (1 jour),
 - Pendant la maturation (14 jours),
 - Après la maturation (45 jours)
- ☑ **Paramètres suivis** :
 - T°C,
 - Présence et type d'odeur à proximité et à l'ouverture,
 - Présence de nuisances de type « mouchérons » ou autres animaux
 - Remarques de l'opérateur sur la facilité, la propreté et la praticité du système
 - Récupération des condensats
 - Suivi de la consommation électrique
- ☑ **Apport au sol** : Après process (1 jour) et après stockage (45 jours), enfouissement sur 5 à 10 cm
- ☑ **Pas de répétition du procédé**

2.3.7. Compostage électromécanique

Un composteur électromécanique est un appareil de dégradation aérobie basé sur un brassage automatisé (et pour certaines machines, un système de chauffage pour garantir l'hygiénisation), l'apport de structurant et une phase de maturation post traitement. La durée du traitement en intégrant une phase de maturation

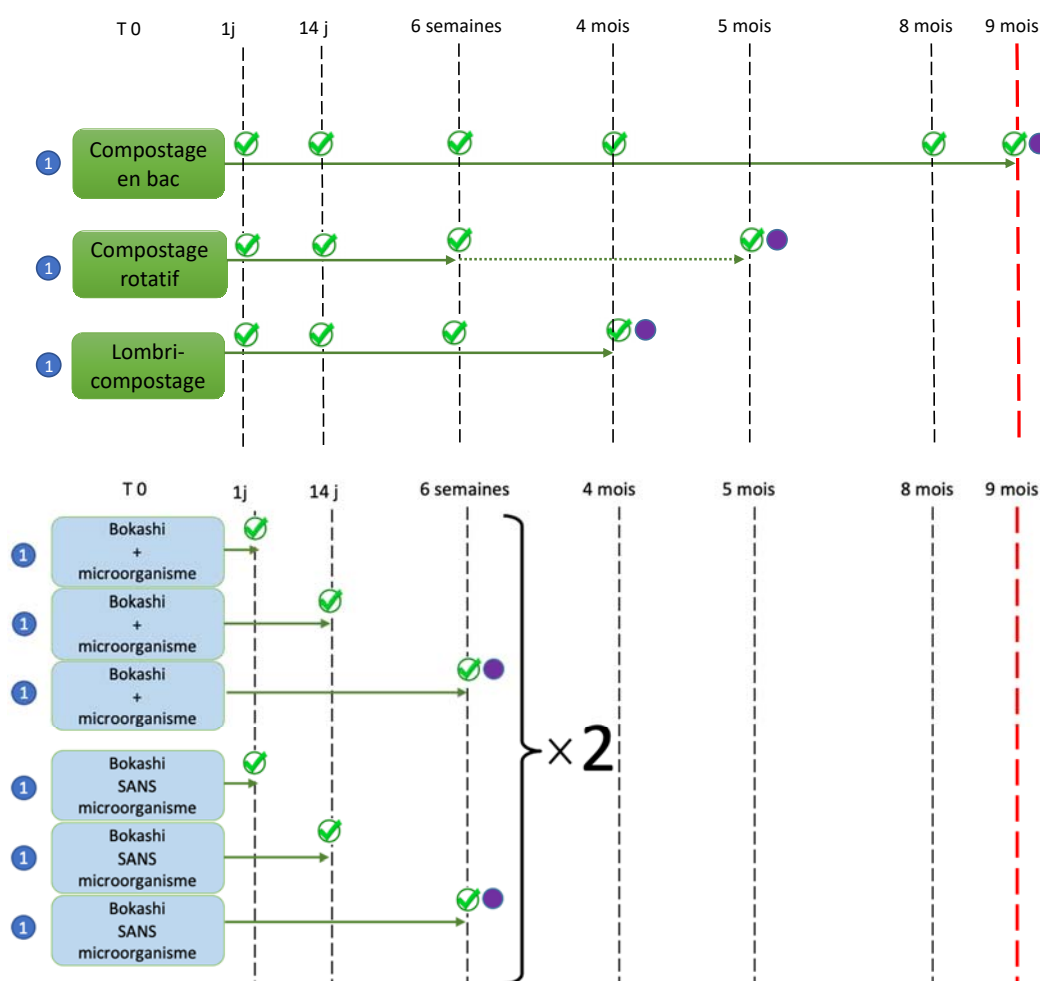
significative, permet dans certains cas la production d'un compost avec des caractéristiques demandées par la norme NFU 44-051 sur les amendements organiques.

Il s'agit d'un procédé principalement à destination des gros producteurs de biodéchets.

Aucun test de composteur électromécanique n'a été réalisé dans le cadre de la présente étude. Les résultats moyens des 9 sites suivis dans le cadre de "l'étude technico-économique des composteurs électromécaniques" (ADEME 2020) ont néanmoins été pris en compte afin de comparer ce procédé aux autres solutions de traitement.

2.4. Vue d'ensemble des procédés étudiés

La durée de traitement et les temps de prélèvements sont résumés dans la Figure 1



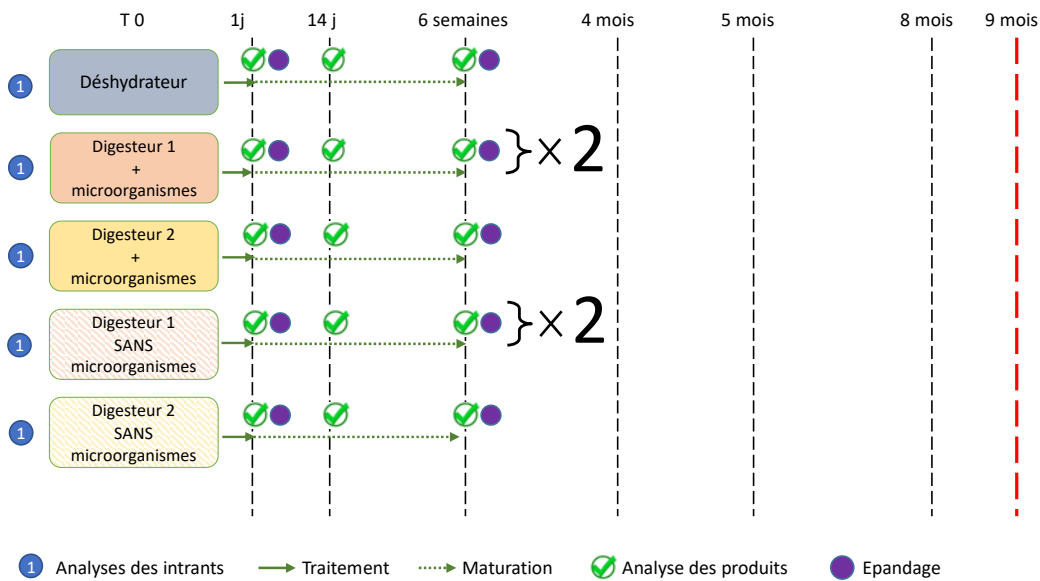


Figure 1 : Synthèse des opérations pour les procédés étudiés

2.5. Calendrier des essais

La Figure 2 représente les dates de lancement et de fin des différents procédés de traitement réalisés dans le cadre de cette étude.

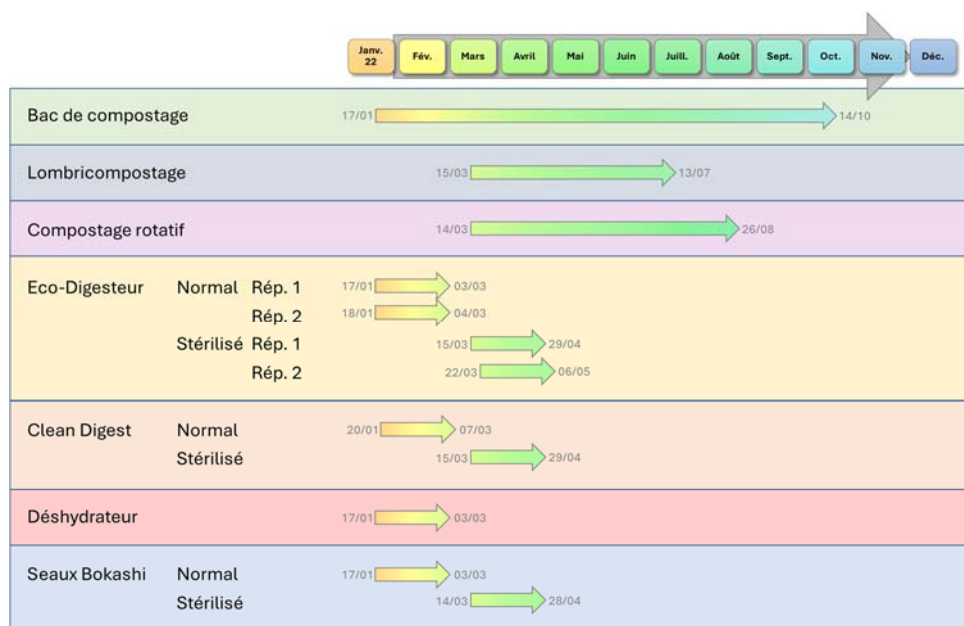


Figure 2 : Lancement et durée des procédés de traitement

2.6. Suivi des procédés

Afin de suivre l'état de dégradation des matières dans chacun des procédés étudiés, plusieurs temps d'observation ont été réalisés plus ou moins fréquemment en fonction du type de procédé. Les fréquences de suivi par procédé sont les suivantes :

- **Compostage** : tous les jours la première semaine, 2 fois par semaine jusqu'à l'arrêt 45 jours, puis 1 fois toutes les 2 semaines jusqu'à la fin (9 mois)

- **Lombricompostage** : 3 fois par semaine la première semaine, puis 2 fois par semaine jusqu'à l'arrêt 45 jours, puis 1 fois par semaine jusqu'à la fin (4 mois)
- **Compostage rotatif** : 3 fois par semaine la première semaine, puis 2 fois par semaine jusqu'à l'arrêt 45 jours, puis 1 fois par semaine jusqu'à la fin (5 mois)
- **Bokashi** : tous les jours la première semaine, 3 fois la deuxième semaine, puis 2 fois par semaine jusqu'à la fin (45 jours)
- **Procédés thermiques (Digesteurs mécaniques et déshydrateur)** : tous les jours la première semaine, 3 fois la deuxième semaine, puis 2 fois par semaine jusqu'à la fin (45 jours)

Les paramètres suivis sont adaptés en fonction des procédés. Des paramètres globaux comme l'état visuel ou les nuisances perçue sont communs à tous, alors que d'autres paramètres comme les lixiviats, la hauteur du tas ou la masse sont spécifiques à certains procédés (car non ou difficilement mesurables pour certains procédés). C'est par exemple le cas de l'état de dégradation des biodéchets dans les seaux Bokashi sans pouvoir les ouvrir. Certains paramètres ne sont par ailleurs pas applicables pour certains procédés : exemple de la consommation électrique qui ne s'applique qu'aux procédés mécanisés. La liste des paramètres suivis est détaillée par type de procédé dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Paramètres suivis par type de procédé

PARAMETRE	COMPOST BAC	LOMBRI-COMPOST	COMPOST. ROTATIF		DIG. MECA/ ET DESHYDRATEUR		BOKASHI
			Process	Maturation	Process	Stockage	
Durée totale des observations	9 mois	4 mois	45 jours	5 mois	1 jour	45 jours	45 jours
Etat général extérieur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Consommation électrique	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗
Température extérieure	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Nuisances extérieures	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Etat général intérieur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Uniquement aux arrêts
Température à cœur	✓	✓	✓	✓	Temp. de l'enceinte	✓	Uniquement aux arrêts
Nuisance à cœur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Uniquement aux arrêts
Taux de dégradation	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Uniquement aux arrêts
Masse globale	Hauteur tas uniquement	✗	✗	Uniquement aux arrêts	✓	✓	Uniquement aux arrêts
Humidité	✓	✓	✓	✓	✗	✗	Uniquement aux arrêts

Lixiviats	X	✓	✓	X	✓	X	✓
------------------	---	---	---	---	---	---	---

Pour chaque procédé, des fiches de suivi ont permis d'enregistrer toutes les observations. Ainsi pour chaque type de procédé et à chaque temps de mesure, une fiche de suivi a été complétée afin de garantir une traçabilité écrite concernant tous les paramètres observés. Un exemple de fiche de suivi (pour le composteur rotatif) est présenté en Figure 3.

21-217R - ADEME SYSPROX :

EVALUATION DES DIFFERENTS SYSTEMES DE TRAITEMENT DE PROXIMITE DES BIODECHETS

SUIVI DU CULTUTO

Généralités

Date :

Opérateur(s) :

Matériel nécessaire :

- Feuille de suivi
- Appareil photo
- Balance 60 kg
- Thermomètre sonde

Eprouvette graduée/Bûcher

Gants

Grande bassine

Sachets ZIP en cas de prélèvement

Avant ouverture

Photo vue extérieure

Temp. ext. (°C) :

Vol. jus (mL) :

pH :

Etat de propreté général :

Conductivité :

Intensité	A plus de 10 m					Entre 5 et 10 m					à moins de 5 m				
	Nullé	Faible	Moyenne	Forte		Nullé	Faible	Moyenne	Forte		Nullé	Faible	Moyenne	Forte	
Agréable															
Desagréable															

Gène globale :

Fréquence des odeurs :

NUISANCES	Nullé	Faible	Moyenne	Forte
Couleurs / Lixiviats				
Moucheronis				
Poussières				
Insectes type cafards				
Mouches				

Notes libres sur l'utilisation du procédé (propreté, praticité...) :

21-217R - ADEME SYSPROX :

EVALUATION DES DIFFERENTS SYSTEMES DE TRAITEMENT DE PROXIMITE DES BIODECHETS

Ouverture Couvercle

Photo vue intérieure

Réaliser quelques tours de roue

Intensité	En surface					A cœur				
	Nullé	Faible	Moyenne	Forte		Nullé	Faible	Moyenne	Forte	
Agréable										
Desagréable										

Gène globale :

Fréquence des odeurs :

NUISANCES	Nullé	Faible	Moyenne	Forte
Couleurs / Lixiviats				
Moucheronis				
Poussières				
Insectes type cafards				
Mouches				

Etat de dégradation :

Temp. cœur (°C) :

Test poignée :

Vol d'eau ajouté (L) :

Notes libres sur l'utilisation du procédé (propreté, praticité...) :

Retournement/Prélèvements

Vider le cultuto dans la grande bassine et peser le contenu

Photographier le matériel

Faire les prélèvements si prévu :

- 1500 g pour analyses au LDAR
- 50 g pour KSPHO
- 100 g pour ICC-N
- 100 g pour Respiremétrie
- 500 g pour Cresson
- Si possible : 3000 g pour Rottegrad
- Si besoin : 1000 g pour retour au sol

Remettre l'ensamble de la matière dans le cultuto

Refermer et redonner quelques tours de roue

Masse restante (g) :

N° échantillon :

Masse prélevée (g) :

Figure 3 : Exemple de fiche de suivi vierge

2.7. Analyses réalisées sur les matières initiales, en cours de transformation et en fin de traitement

2.7.1. Méthodes de caractérisation agronomique des produits organiques testés

Les DCT ainsi que les composts et produits organiques issus des différents procédés ont été analysés dans un laboratoire sous-traitant habilité COFRAC afin de caractériser et de comparer leurs propriétés agronomiques. Les résultats complets des analyses sont présentés en annexe.

Tableau 3 : Caractérisations des matières et méthodes

CARACTERISATION	METHODE	ANALYSE DES INTRANTS	ANALYSES DES PRODUITS TRAITES
Taux de matière sèche (%MS)	Norme NF U44-171	OUI	OUI
Teneur en matière organique (%MO) et carbone organique	Calcination NF U 44-160	OUI	OUI
pH	Méthode interne	/	OUI
Profil biochimique et Indice de la stabilité de la matière organique (ISMO)	Norme FD U 44-162	/	OUI
Azote total (N) et Azote organique (Norg)	Méthode interne VAL-216 et ANA 153-06	OUI /	OUI OUI
Phosphore total (P)	Méthode interne VAL-408 – NF EN ISO 11885	/	OUI
Potentiel de minéralisation de l'azote organique (ICC-N)	FD U 44-163	/	OUI
Microorganismes totaux à 30°C	Norme NF EN ISO 4833-1	OUI	OUI
Teneur en <i>Escherichia coli</i>	Norme NF EN ISO 16649-2	OUI	OUI
Test de germination du cresson	Norme FD U 44-165	/	OUI
Détermination de l'activité biologique aérobie	Basé sur la Norme autrichienne OE-NORM S 2027-4	/	OUI
Test Rottegrad pour le compostage, le lombricompostage, le compostage rotatif et la 1ere répétition des bokashi	Norme NF EN 16087-2	/	OUI

2.7.1.1. Taux de matière sèche

Le pourcentage de matière sèche est le ratio entre la masse d'un produit après dessiccation en étuve et la masse du produit brut avant séchage.

2.7.1.2. Teneur en carbone organique et en matière organique

La teneur en carbone organique représente le pourcentage de carbone contenu dans la matière sèche d'un produit. La matière organique étant composée à 60 % de carbone, sa teneur est obtenue par calcul à partir de la teneur en carbone organique.

2.7.1.3. pH

Le potentiel hydrogène (pH) représente l'acidité ou la basicité d'un produit. Un pH = 7 est un pH neutre. Au-dessus de cette valeur, le produit est basique. En dessous, le produit est acide. La majorité des plantes sont adaptées à un pH du sol proche de la neutralité.

2.7.1.4. Teneurs en azote et phosphore

L'azote et le phosphore sont les macro-éléments minéraux les plus importants dans la croissance des végétaux (avec le potassium). La mesure de leur teneur dans un amendement organique permet d'appréhender sa capacité fertilisante.

2.7.1.5. Profil biochimique

Le profil biochimique de la matière organique correspond à la répartition des quatre principales fractions qui la composent : la fraction soluble (SOL), les hémicelluloses (HEM), la cellulose (CEL) et des lignines et cutines (LIC). Chaque fraction est exprimée en pourcentage de la matière organique. Les fractions solubles sont très facilement et rapidement biodégradables, les hémicelluloses et la cellulose sont biodégradables sur un laps de temps plus long et les fractions lignines et cutines sont relativement récalcitrantes à la biodégradation.

2.7.1.6. Indice de la stabilité de la matière organique (ISMO)

L'indice de stabilité de la matière organique (ISMO), représente le pourcentage de matière organique résiduelle d'un produit environ un an après son apport au sol. Théoriquement, il permet d'évaluer la proportion de matière organique stable (ou résistante à la dégradation) des produits organiques. Il est calculé à partir des fractions du profil biochimique. Plus l'ISMO est élevé, plus la matière organique est potentiellement résistante à la minéralisation et plus le produit apportera d'humus stable. Les éléments minéraux tels que l'azote ou le phosphore seront alors plus lentement disponibles pour les plantes.

Il est généralement admis qu'un compost mûr atteint un ISMO supérieur ou égal à 80% de MO.

2.7.1.7. Minéralisation du carbone à 3 jours

La minéralisation du carbone à 3 jours correspond au pourcentage de carbone organique qui est minéralisé, 3 jours après un apport du produit au sol. Cet indicateur est une autre manière d'appréhender la stabilité de la matière organique. Plus le pourcentage est faible, plus le produit sera source d'humus stable pour le sol.

2.7.1.8. Teneur en microorganismes et en *Escherichia coli*

La teneur en microorganismes mésophiles totaux renseigne sur le nombre de bactéries, champignons et protozoaires actifs en milieu aérobie et à température ambiante (20 à 40°C environ). Plus cet indicateur est élevé plus la charge microbienne va contribuer à la décomposition et l'humification du produit.

Escherichia coli est une bactérie intestinale mésophile présente naturellement dans notre organisme. Certaines souches sont pathogènes. Le dénombrement des *Escherichia coli* dans un amendement organique permet de renseigner en partie sur son innocuité. Une diminution du nombre d'*Escherichia coli* au cours d'un procédé renseigne sur le caractère hygiénisant de ce procédé sur le produit considéré.

2.7.1.9. Minéralisation de l'azote

L'objectif de l'essai est de déterminer le **potentiel de minéralisation de l'azote organique des matières organiques étudiées**. La méthode employée est basée sur la norme française *FD U 44-163 (Caractérisation de la matière organique par la minéralisation potentielle du carbone et de l'azote*, Février 2018). Le principe

de la méthode se base sur l'incubation d'un mélange sol/produit en conditions contrôlées de laboratoire (ICC-N) et optimales pour le développement d'une bonne activité biologique du sol.

Pour le suivi de l'azote, les sols amendés (Figure 4) sont incubés dans des contenants non étanches à l'air mais limitant l'évaporation à $28^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Les formes d'azote minérales (formes ammoniacale N-NH_4^+ et nitrrique N-NO_3^-) produites lors de l'incubation par la minéralisation de l'azote organique du sol (avec et sans produit) sont extraites avec une solution de chlorure de potassium (KCl), à différents temps d'arrêt (selon la norme : 7 jours, 14 jours, 28 jours, 70 jours et 91 jours). Le dosage des formes azotées dans l'extrait permet de déduire l'activité de minéralisation de l'azote du sol à chaque temps de l'incubation.

Les résultats analytiques des teneurs en formes azotées minérales de l'extrait de KCl sont consignés dans un tableur. A partir de ces teneurs, des équations tirées de la norme permettent de calculer :

- La quantité d'azote minéral produit dans le sol (QNtk), qui résulte de la minéralisation intrinsèque du sol et de celle de l'azote organique apporté par les produits.
- La quantité d'azote minéralisé issu des produits (qNtk), en retranchant l'azote issu de la minéralisation intrinsèque du sol seul, ainsi que la proportion de N minéralisé exprimée en pourcentage de N organique apporté par le produit (ntk). Les valeurs positives mettent en avant une fourniture d'azote par le produit, tandis que les valeurs négatives soulignent une immobilisation de l'azote du sol qui ne sera ainsi pas disponible pour les plantes (phénomène potentiel de « faim d'azote »). Afin de jouer pleinement son rôle, un amendement organique devra plus favorablement présenter des valeurs positives.



Photo 17 : Coupelles contenant les sols amendés avant incubation en conditions contrôlées

2.7.1.10. Test de germination du cresson

L'objectif principal de cet essai est d'évaluer la maturité d'un compost. Ce test peut être appliqué sur les composts, les amendements organiques et les matières premières entrants dans la constitution de supports de culture.

Certaines matières organiques brutes peuvent contenir des composés phytotoxiques d'origine naturelle ou non (phénols, acide acétique, résidus d'herbicide etc.), c'est le cas par exemple des broyats de végétaux. Les procédés de traitement tel que le compostage permettent de dégrader ces molécules.

Apporter ces matières organiques à une culture de cresson permet de mettre en évidence rapidement (7 jours) la présence résiduelle de ces molécules, et par conséquent le degré de maturation de l'amendement organique. Plus le nombre de graines de cresson germées et plus la biomasse mesurée des plantules sont importants, plus l'amendement organique peut être considéré comme mature.



Cet essai est réalisé selon la norme *FD U44-165 (Amendements organiques et supports de culture – Test rapide d'évaluation de la maturité d'un compost et caractérisation des matières premières vis-à-vis de la germination du cresson)*

Photo 18 : Culture de cresson sur support de culture dans le cadre d'un essai de germination du cresson FD U44-165

2.7.1.11. Détermination de l'activité biologique aérobie

Le test de détermination de l'activité biologique aérobie consiste à suivre la cinétique de consommation de l'oxygène par les microorganismes présents dans un produit organique brut.

Ce test est basé sur la norme autrichienne *OE-NORM S 2027-4 (Beurteilung von Abfällen aus der mechanisch-biologisch behandlung. Teil 4: Stabilitätsparameter-Atmungsaktivität (AT₄))*.



La dégradation de la matière organique par les microorganismes aérobies génère une consommation d'O₂ et un dégagement de CO₂. Incorporés dans des enceintes hermétiques avec un piège de soude captant le CO₂, une dépression se crée au fur et à mesure de la dégradation. Cette dépression est mesurée en temps réel par des têtes de lecture. Par calcul, cette dépression permet d'obtenir la quantité d'oxygène consommé tout au long de l'essai. Plus le dégagement de CO₂ est important, plus l'activité microbologique est élevée, signe d'une immaturité du produit étudié.

Cet indicateur est très utile pour observer l'état de stabilité de la matière organique d'un échantillon (dégradation plus ou moins facile par les

microorganismes).

Photo 19 : Chambres d'incubations hermétiques montées des têtes de lecture dans le cadre d'une détermination de l'activité biologique aérobie.

2.7.1.12. Test Rottegrad

L'objectif principal de cet essai est d'évaluer la maturité d'un compost. Ce test peut être appliqué sur les composts, les amendements organiques et les matières premières entrants dans la constitution de supports de culture. Lors d'un compostage classique, les mélanges montent en température sous l'action des microorganismes. A la fin de cette phase de minéralisation thermophile débute la phase de maturation. Une des façons d'étudier le degré de maturité des composts est de vérifier si la phase de minéralisation thermophile est réellement terminée en mesurant le taux d'auto-élévation de la température du produit étudié.

Le test est réalisé sur le produit frais. L'échantillon étudié est aéré et porté au niveau optimal d'humidité, puis placé dans une enceinte calorimétrique. On mesure la température au cœur de l'échantillon à raison de deux relevés par jour pendant 5 jours au minimum. Les résultats sont exprimés sous la forme d'une courbe de cinétique d'évolution de la température de l'échantillon.

Trois niveaux de maturité peuvent être définis à partir de cette courbe :

- Produit mature : on observe une faible activité respiratoire et un faible auto-échauffement (40°C max)
- Produit en cours de maturation : on observe une activité respiratoire moyenne et un auto-échauffement moyen (60°C max)
- Produit immature : on observe une forte activité respiratoire et un fort auto-échauffement (supérieur à 60°C)

Photo 20 : Simulation d'andain et suivi de température de l'échantillon organique dans le cadre d'un test Rottegrad



Les produits obtenus après compostage, lombricompostage et compostage rotatif ont fait l'objet du test d'auto-échauffement (test Rottegrad). Par manque de matière, il n'a pas été possible de réaliser cet essai sur les produits issus des autres procédés.

2.7.2. Retour au sol

Après prélèvements et réalisation des analyses et essais de minéralisation, les produits organiques obtenus en fin de procédés et après maturation ont été apportés au sol sous forme d'amendement. Ces derniers ont été soit enfouis à 10 cm de profondeur dans des bacs de sols ou épandus à la surface (cas du lombricompost). Un suivi olfactif des épandages a été réalisé pendant 15 jours, le but étant d'évaluer le niveau de gêne olfactive et les nuisances (insectes par exemple) provoquée par ces apports. L'humidité des sols a été maintenue à 70% de la capacité de rétention et les produits organiques ont été apportés à une dose de 0,2 %MB de carbone organique. En général, l'épandage ou l'enfouissement des produits organiques n'a généré aucune mauvaise odeur, seuls la pousse de mauvaises herbes dans les bacs et la présence de quelques insectes (espèces non identifiées) ont été observés.

Compte tenu de l'absence de gêne olfactive observée, les résultats des suivis ne seront pas présentés dans les paragraphes suivants. Néanmoins, le tableau récapitulatif des données collectées lors de ces suivis est présenté en annexes.

Attention : l'épandage ou l'enfouissement de DCT bruts ou de produits issus des procédés du lombricompostage, du bokashi ou des traitements thermiques (digesteur et déshydrateur) ne sont actuellement pas autorisés (cf. paragraphe 4 du présent document).

3. Étude comparative des procédés testés

3.1. Comparaison visuelle

La Figure 4 représente l'état visuel des différents produits une fois le procédé de traitement terminé (9 mois pour le compost en bac, 45 jours + 3 mois de maturation pour le compost rotatif, 3 mois pour le lombricompost, 1 jour + 45 jours de maturation pour les digesteurs et déshydrateur, 45 jours pour les contenus des seaux Bokashi).

Compostage en bac : les biodéchets ne sont plus du tout visibles. Seuls restent les déchets verts grossiers incorporés initialement, et divers éléments tels que les os ou plastiques ayant échappé à la vigilance des opérateurs lors du déconditionnement des DCT. Un criblage/broyage est nécessaire pour enlever les gros éléments de déchets verts. La partie organique est assez fine et homogène.

Compostage rotatif : Assez similaire au compost en bac, hormis les gros éléments de déchets verts qui n'ont pas été intégrés initialement. Le produit final est fin et homogène, à part quelques éléments non dégradés (noyaux, éléments ligneux).

Digesteurs : Le produit final présente une granulométrie très fine et ressemble fortement au cosubstrat initial (hormis quelques éléments non dégradés, éléments ligneux, dosettes de café). Il y a clairement davantage d'éléments grossiers lors des essais réalisés avec le lot 2 de DCT (mars) (répétitions sans microorganismes) qu'avec le lot 1 (janvier) (répétitions avec microorganismes). Étant donné que les essais sur deux machines différentes ont fourni les mêmes résultats, deux hypothèses peuvent être émises : 1/ il y avait une différence claire entre les lots de DCT (et dans ce cas seules plusieurs répétitions d'essais sur des gisements pris tout au long de l'année nous permettrait de trancher), et 2/ les microorganismes ont optimisé la dégradation des matières de granulométrie plus élevée. La comparaison des caractérisations (teneurs en MO, C, etc.) permettra de fournir davantage d'éléments pour discuter de ces différences.

Déshydrateur : l'essai a été réalisé avec le même gisement de DCT que les digesteurs mécaniques avec microorganismes, et pourtant il y a beaucoup plus d'éléments grossiers. Le produit déshydraté est néanmoins très stable et ne sent pas. Il est possible donc que les cosubstrats des digesteurs mécaniques aient une fonction abrasive (dont ne profite pas le déshydrateur, ce dernier n'ayant pas besoin de cosubstrat pour

stabiliser la matière), et les résultats semblent indiquer que ce n'est pas une différence de gisement qui est à l'origine de la différence de qualité finale des produits obtenus dans les digesteurs mécaniques mais bien la présence ou non de microorganismes.

Seaux Bokashi : les DCT ont très peu évolué dans les seaux, on peut toujours reconnaître les éléments dont ils sont constitués (épluchures, ...). Aucune moisissure, aucun brunissement. La seule différence notable est au niveau du cosubstrat : lors de l'autoclavage le cosubstrat passe du brun clair au noir. Ce dernier est, à l'instar des DCT, inchangé à la fin du procédé.

Compostage électromécanique : au regard du procédé, et notamment de l'élévation de la température, les produits issus de compostage électromécanique s'apparentent visuellement au compost en bac avec la présence de résidus ligneux et une dégradation complète des DCT.



Figure 4 : Etat des produits à la fin des traitements

3.2. Paramètres de traitement

Les valeurs des paramètres permettant de comparer les traitements réalisés sont présentés dans le Tableau 4 .

Tableau 4 : Paramètres de traitement en fonction des procédés étudiés.

Procédés	Intrants	Cosubstrat	Durée de traitement	Emplacement recommandé	Capacité de traitement (DCT + cosubstrat) des équipements testés	Encombrement	Consommation électrique mesurée	Réduction de masse	Température maximale mesurée	Nuisances olfactives et insectes	Salissures	Gestion des effluents gazeux	Volume de lixiviats récoltés / calculés
	/	% masse totale traitée	Jours (procédé / muration)	/	kg/j	m ²	kwh/an	% masse initiale	°C	/	/	/	L
Compostage en bac	DCT + DV	39	270 (270/0)	Extérieur	1,3	1	0	65	70,4	faible	non	non	nd
Compostage rotatif	DCT + granulés bois	25	165 (45 / 120)	Extérieur / intérieur	0,72	0,3	0	58	27,4	faible	oui	non	> 0,7
Lombricompostage	DCT + granulés bois	8	120 (120/0)	Intérieur	0,27	0,3	0	43	42,5	faible	oui	non	1,4
Bokashi avec μ -org	DCT + son	1	45 (45/0)	Intérieur	0,2	0,05	0	15	29,5	faible	non	non	1,4
Bokashi sans μ -org	DCT + son	1	45 (45/0)	Intérieur	0,2	0,05	0	17	31,3	faible	non	non	1,5
Déshydrateur	DCT	/	45 (1/44)	Intérieur	15,1	2 à 3	8 161,4	75	89,9	faible	non	évacuation	11,3
Clean Digest avec μ -org	DCT + substrat C	36	45 (1/44)	Intérieur	16,8	2 à 3	8 897,25	58	64,0	faible	non	évacuation	11,3
Clean Digest sans μ -org	DCT + substrat C	40	45 (1/44)	Intérieur	16,8	2 à 3	8 897,25	72	59,0	faible	non	évacuation	10,4
Eco digesteur avec μ -org	DCT + substrat C	44	45 (1/44)	Intérieur	10,8	2 à 3	4 142,8	45	50,8	faible	non	évacuation	3,7
Eco digesteur sans μ -org	DCT + substrat C	36	45 (1/44)	Intérieur	10,8	2 à 3	4 142,8	55	39,3	faible	non	évacuation	4,9
Compostage électromécanique	DCT + DV	24	72 (25 / 47)	Intérieur	< 82	50-100	2 133,5 (5 618,9)	60	40 - 70°C	faible	non	évacuation vers biofiltre	nd

Afin de comparer les procédés entre eux, la méthode suivante a été mis en œuvre :

- Chaque paramètre suivi et chiffré a permis d'établir une note comprise entre 1 et 4 (1 étant la moins bonne note et 4 la meilleure note).
- Pour cette notation, les quartiles ont été calculés pour chacun des paramètres sur la base des résultats obtenus pour tous les procédés. Si le résultat pour un procédé est dans le 1er quartile, la note est de 1, s'il est dans le deuxième, la note est de 2, et ainsi de suite jusqu'au 4^{ème} quartile.

Le tableau suivant est le référentiel pour la notation des paramètres de traitement

Tableau 5 Note des procédés selon leurs paramètres de traitement

	1 ^{er} quartile	2 ^{ème} quartile	3 ^{ème} quartile	4 ^{ème} quartile	Critères
% Cosubstrat introduit	4	3	2	1	Plus on introduit de cosubstrat, moins bonne est la note car cela implique une dépendance à une autre matière que celle qui doit être traitée (DCT) et génère des actions supplémentaires
Durée de traitement	4	3	2	1	Plus le procédé est long, moins bonne est la note.
Encombrement	4	3	2	1	Plus la surface nécessaire est élevée, moins bonne est la note
Consommation électrique mesurée	4	3	2	1	Plus la consommation est élevée, moins bonne est la note
Réduction de masse	1	2	3	4	Plus la réduction de masse est élevée, meilleure est la note
Température maximale mesurée	1	2	3	4	Plus la température est élevée, meilleure est la note car cela permet de mieux gérer le risque pathogène
Nuisances olfactives et insectes	4	3	2	1	Moins il y a de nuisances, meilleure est la note
Salissures	4	3	2	1	Moins il y a de salissures, meilleure est la note
Gestion des effluents gazeux	4	3	2	1	Moins il y a de gestion des gaz, meilleure est la note
Volume de lixiviats récoltés	4	3	2	1	Moins il y a de gestion des lixiviats, meilleure est la note

A l'aide de cette méthode, les résultats obtenus sont repris dans la Figure 5 : Comparaison des paramètres de traitements des procédés. Cette comparaison permet d'avoir une vision d'ensemble des procédés sur la base des paramètres liés au traitement.

On s'aperçoit que les procédés les mieux notés (total des notes procédés) sur l'ensemble des critères sont le compostage en bac et les seaux bokashi, suivis de près par le compostage rotatif, le lombricompostage et le déshydrateur.

Un troisième groupe se distingue ensuite avec le compostage électromécanique et les digesteurs.

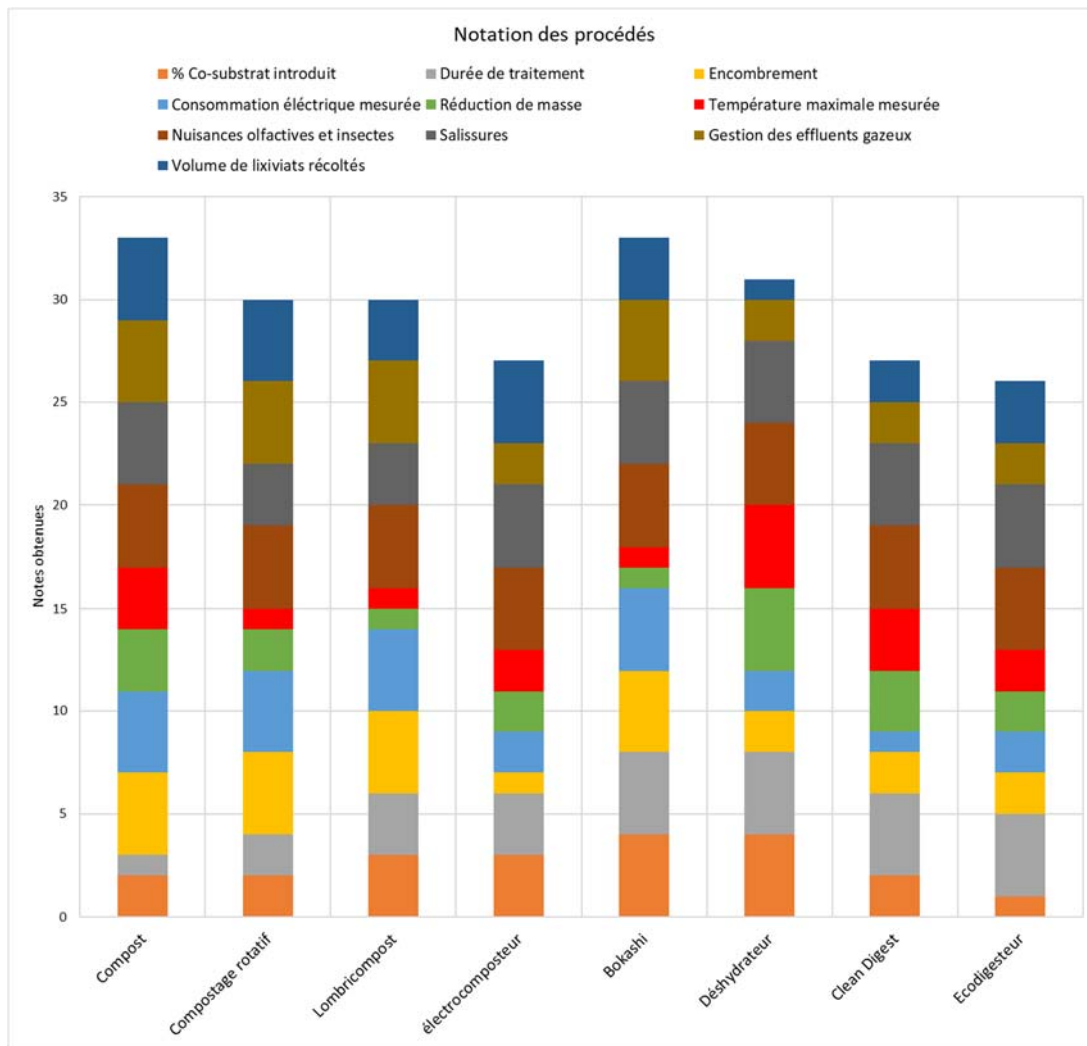


Figure 5 : Comparaison des paramètres de traitements des procédés.

3.3. Caractérisation des produits finaux

3.3.1. Microbiologie des produits après maturation

Un dénombrement des microorganismes à 30°C a été réalisé sur les intrants et les produits. Il concerne la flore aérobie mésophile qui regroupe l'ensemble des bactéries, levures et moisissures capables de se développer en aérobiose sur les milieux étudiés. Ce dénombrement inclut les microorganismes naturellement présents dans les biodéchets. En conséquent, cet indicateur nous renseigne sur l'abondance en microorganismes totaux des produits organiques mais pas sur la présence de germes pathogènes.

Un comptage des colonies d'*E.coli* exprimé en « unité formant colonie » (UFC) a quant à lui été réalisé en tant qu'indicateur pathogène. Ce dénombrement permet de s'assurer que les procédés assainissent les produits organiques afin qu'ils respectent le seuil de 10^2 UFC/g MB fixé par la norme NF U 44-051 comme limite permettant d'évaluer l'efficacité d'hygiénisation du procédé de compostage.

D'après les résultats obtenus (Tableau 6) on constate qu'à l'exception des équipements de déshydratation et des digesteurs, la concentration en microorganismes totaux varie très peu, avant et après traitement pour tous les procédés. Cela signifie que les produits obtenus contiennent encore beaucoup de microorganismes et que les procédés n'ont pas réduits la concentration de population microbienne mésophile. En revanche, bien que cela n'ait pas été étudié, la typologie des populations microbienne a pu être modifiée.

A l'inverse, les procédés de déshydratation et de digestion à haute température (Clean Digest) induisent un abattement de 3 à 4 Log_{10} comparativement aux intrants. Pour l'Eco Digesteur, sans apport de microorganismes, il est mesuré un abattement de seulement 1 à 2 Log_{10} alors qu'avec microorganismes, aucun abattement n'est mesuré. La température n'est pas suffisamment élevée dans ce procédé pour réduire significativement les populations microbiennes totales. Concernant les teneurs en *E.coli*, toutes sont

inférieures au seuil de 10^2 UFC / g (Tableau 6) à l'exception des produits de l'Eco Digesteur avec apport de microorganisme pour lesquels il est mesuré une présence significative de *E.coli* en fin de phase de maturation avec une moyenne de 2.10^4 UFC/g de produit. Comme les intrants ne présentent pas de contamination en *E.coli*, il est possible qu'une contamination ait eu lieu durant ou après le procédé (hypothèse : le digesteur ayant été livré avec le cosubstrat déjà présent dans la cuve, celle-ci n'a pas été nettoyée avant le premiers essai. Il est donc possible que les parois aient été souillées avant l'introduction du cosubstrat). Sur la base de cet indicateur *E.coli*, cela signifie que le traitement avec un équipement "digesteur" et réalisé à basse température (40°C) n'est pas suffisant pour abattre les populations de pathogènes potentiellement présentes en entrée.

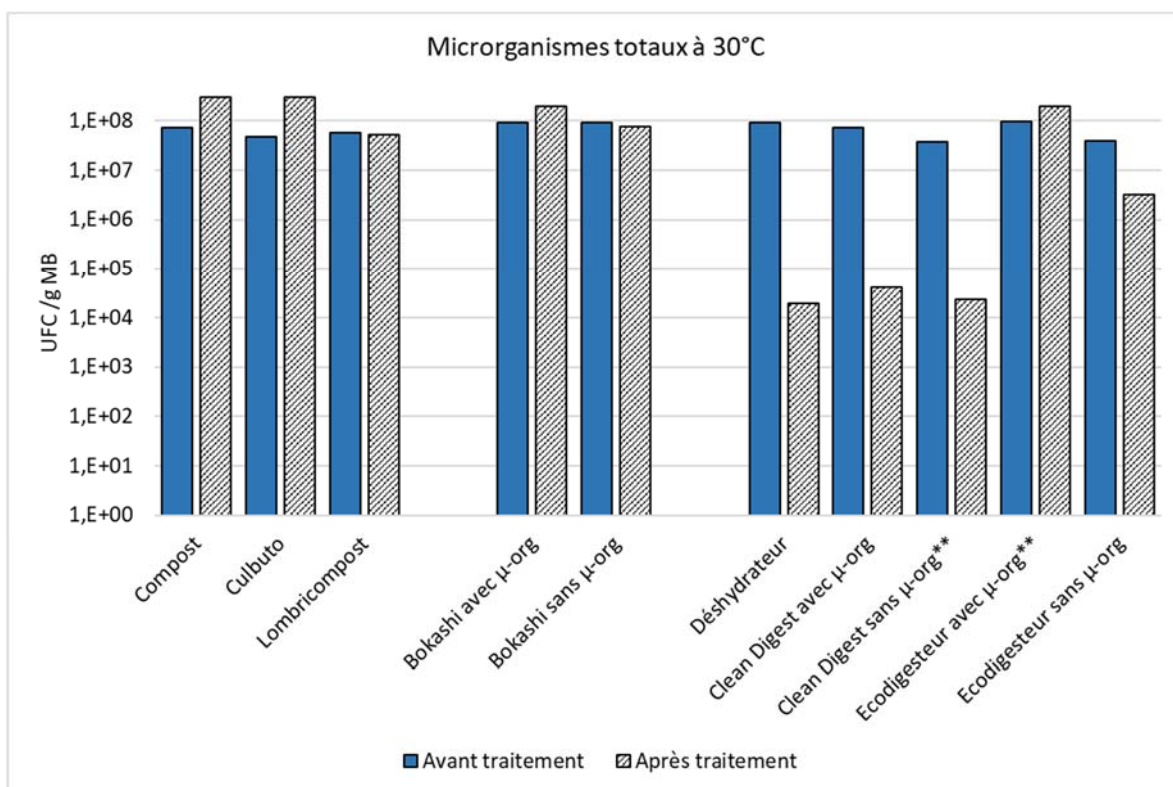


Figure 6 : Teneurs en microorganismes totaux avant et après traitement pour chacun des procédés

3.3.2. Paramètres agronomiques des produits après traitement

Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 6 et la Figure 7.

Tableau 6 : Composition des substrats obtenus après traitement en fonction des procédés étudiés.

Procédés	MS	pH	MO	Carbone organique	Carbone total	C/N	Azote total	Azote organique	Phosphore total	ISMO après maturation	Microorganismes totaux à 30°C	E coli à 44°C	ICC-N	Respiration à 14 jours
	%	-	%MS	%MS	%MS	-	%MS	%MS	%MS	% MO	UFC /g	UFC /g	mg N / kg de sol sec	g O ₂ / kg MS
Compostage	50,9	7,9	54,0	27,1	31,2	10,6	2,4	2,4	1,2	80,8	3,0.10 ⁸	<100	5,2	g O ₂ / kg MS
Compostage rotatif	72,8	8,8	83,9	42,0	43,1	34,1	1,2	1,2	0,4	54,8	3,0.10 ⁸	<100	-7,2	10,34
Lombricompostage	18,3	9,4	79,1	42,0	42,9	13,4	29	2,9	1,3	73,1	5,2.10 ⁷	<100	10,6	18,15
Bokashi rep 1 avec μ-org	22,2	4,4	91,0	45,5	52,0	16,2	2,8	2,2	0,9	1,1	3,0.10 ⁸	<100	12,1	24,22
Bokashi rep 1 sans μ-org	21,3	4,9	46,1	23,0	26,9	15,1	1,5	1,3	0,5	4,7	6,9.10 ⁷	<100	-16,6	33,48
Bokashi rep 2 avec μ-org	18,2	4,4	85,2	42,9	45,7	17,8	2,4	2,0	0,8	4,7	1,0.10 ⁸	<100	-5,6	17,07
Bokashi rep 2 sans μ-org	16	4,8	84,4	42,5	46,1	15,9	2,7	2,3	0,9	4,3	6,3.10 ⁷	<100	13,7	7,77
Déshydrateur	94	5,8	90,3	45,1	46,9	19,9	2,2	2,2	0,6	3,8	1,9.10 ⁴	<100	10,6	10,76
Clean Digest avec μ-org	95	5,6	94,4	47,2	47,8	35,2	1,4	1,3	0,4	25,7	4,2.10 ⁴	<100	-45,4	20,17
Clean Digest sans μ-org	90,2	5,9	85,2	42,6	42,4	40,4	1,1	1,0	0,3	32,9	2,3.10 ⁴	<100	-8,2	19,46
Eco Digesteur rep 1 avec μ-org	94,7	6,7	82,3	41,2	41,6	31,2	1,3	1,2	0,5	43,3	3,0.10 ⁴	8,10 ³	-2,6	16,93
Eco Digesteur rep 1 sans μ-org	91,5	6	83,8	41,8	42,0	38,7	1,1	1,0	0,3	37,3	3,7.10 ⁶	<100	2,2	13,01
Eco Digesteur rep 2 avec μ-org	94,4	6,5	83,1	41,6	42,3	29,2	1,4	1,4	0,8	39,6	8,4.10 ⁷	2,0.10 ⁴	2,6	16,79
Eco Digesteur rep 2 sans μ-org	89,5	5,7	85,5	42,7	42,8	29,2	1,5	1,4	0,5	25,6	2,6.10 ⁶	<100	-14,4	18,49
Compostage électromécanique	40 à 90	Nd	86 à 100	43 à 51	nd	11 à 36	1,3 à 2, 6	nd	nd	58 à 80	nd	<100	nd	16,93

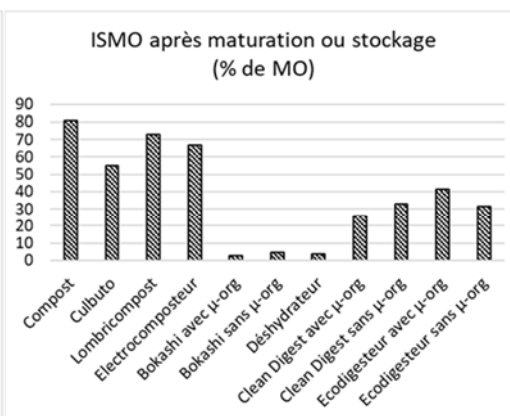
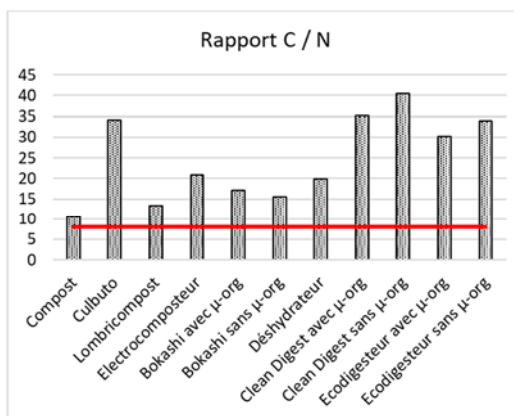
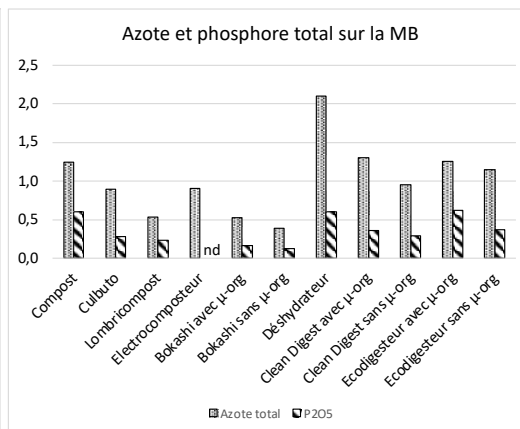
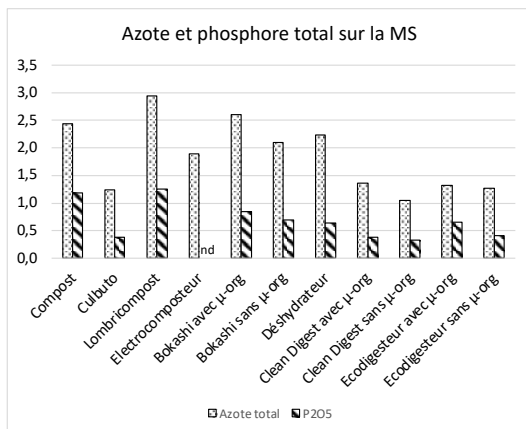
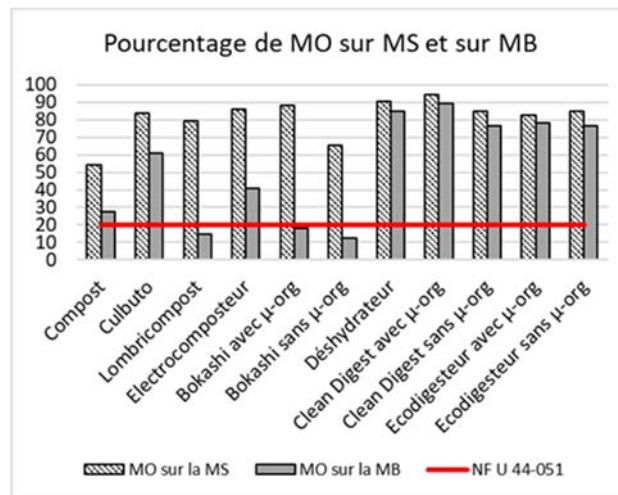
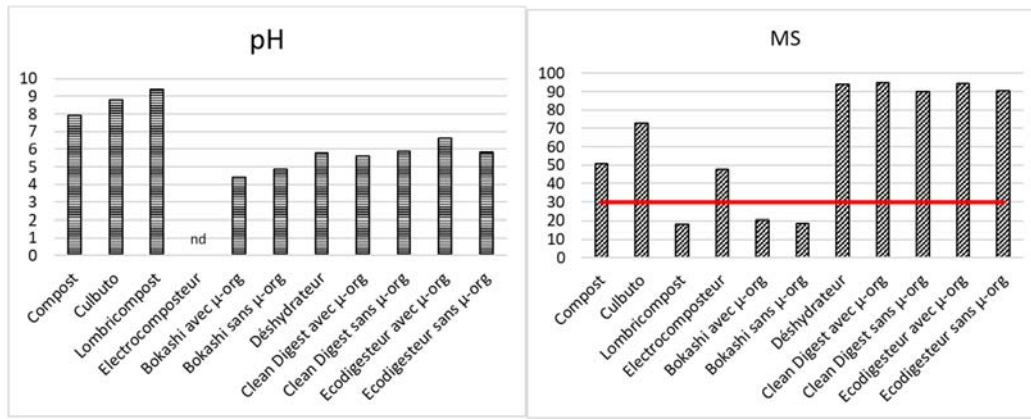


Figure 7 : Comparaison des paramètres agronomiques des produits finaux pour les différents procédés.

Les résultats sont exprimés en % de MS. La ligne rouge indique les valeurs minimales demandées par la norme NFU 44-051 relatives aux amendements organiques pour les paramètres MO, MS et C/N.

Attention, il s'agit de comparaisons à titre indicatif car, à l'exception des composts, aucun autre produit n'appartient à une dénomination de cette norme et par conséquent ne peut pas se revendiquer comme y étant conforme.

Les résultats obtenus sont comparés afin d'évaluer les propriétés d'amendement organique des produits.

Un amendement organique se définit comme une matière fertilisante ayant pour fonction de "nourrir le sol" avec un apport de matière organique et peu d'éléments nutritifs (azote, phosphore,...) en comparaison avec les engrais dont l'usage est destiné à "nourrir les cultures" avec un apport significatif d'éléments nutritifs indispensables à la croissance des plantes. Un amendement organique est destiné à maintenir ou augmenter la teneur en carbone organique des sols afin d'améliorer leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques. Il est également possible de différencier les typologies d'amendement en fonction de la stabilité / maturité de leur matière organique. Un amendement stable et mature apporte au sol des matières organiques difficilement minéralisables et constituées majoritairement de ce qu'on nomme couramment l'humus. À l'inverse, une matière organique non mature sera facilement minéralisable, ce qui constitue la première étape vers l'humification. Ainsi, pour définir les typologies des produits étudiés, ces derniers sont comparés sur les paramètres présentés ci-dessous :

Concernant le pH, on distingue 2 groupes :

- Le premier est constitué des traitements de compostage et de lombricompostage avec des valeurs basiques comprises entre 7,9 (compost) et 9,4 (lombricompost).
- Le second est représenté par les traitements de déshydratation, de digestion et de bokashi avec des valeurs de pH légèrement acides (<6,7 pour l'Eco Digesteur) à acides (4,8 pour les bokashi). Les substrats issus des traitements Bokashi sont ceux qui ont les valeurs de pH les plus basses (<5). Cela s'explique par le processus fermentaire qui se déroule dans le seau bokashi en absence d'oxygène et qui produit des acides organiques qui diminuent fortement le pH du substrat.

Concernant la teneur en MS, on distingue 3 groupes :

- Les produits issus des appareils ayant pour effet de sécher les substrats : Eco Digesteur, Clean Digest et déshydrateur. Pour ces traitements, la teneur en MS atteint les 90%. Il s'agit de produits très secs.
- Les procédés de compostage : compostage, compostage rotatif et compostage électromécanique avec des teneurs en MS comprises entre 50 % et 70% MB. Il s'agit de produits que l'on peut qualifier d'humides à secs.
- Les bokashi et le lombricompost qui ont des teneurs inférieures à 20%. Il s'agit de produits très humides. Pour ces 2 procédés, il n'y a pas de montée en température. Ils se déroulent à température ambiante et les pertes en eau sont uniquement dues à la lixiviation. De plus, pour le lombricompostage, l'humidité est indispensable pour la survie et une bonne vitalité des vers de compost.

Concernant la teneur en MO, exprimée sur la matière sèche, on distingue 2 groupes :

- Le compost qui présente une teneur en MO plus basse que les autres traitements avec une valeur de 55% de la MS. Cette valeur est relativement classique d'un compostage. Le fait qu'elle soit inférieure aux autres procédés peut s'expliquer par une dégradation plus importante de la MO, notamment en lien avec la durée du procédé qui est de 5 à 7,5 mois supérieure aux autres systèmes de traitement.
- Tous les autres traitements ont des teneurs en MO plus élevées (entre 80 et 95% de la MS). Pour la modalité bokashi sans microorganismes, une des valeurs sur les 2 répétitions est anormalement basse (46 %) comparativement à la seconde valeur qui est de 84%. Nous pouvons considérer que la première valeur ne reflète pas la teneur en MO du produit, mais qu'il s'agit d'un biais d'analyse. En effet, les autres valeurs mesurées, avec ou sans microorganismes, sont en lien avec les intrants introduits qui sont des déchets de cuisine et de table et par conséquent composés très majoritairement de matière organique. De plus, nous avons également déjà conclu que la dégradation dans les seaux bokashi est très faible. Cette valeur de 46 % n'est pas en adéquation avec toutes les observations précédentes.

A titre d'information, la teneur en MO exprimée sur la matière brute de tous les produits respecte les spécifications de la norme NFU 44-051 à l'exception du lombricompost et des bokashi, dont la teneur en humidité ne permet pas d'atteindre le niveau requis de 20%MB.

Concernant les teneurs en éléments nutritifs Azote et Phosphore (N et P), on distingue 2 groupes

- Le compostage rotatif et les digesteurs qui ont des teneurs en azote et phosphore deux fois inférieures aux autres procédés. Concernant l'azote pour les digesteurs, cela s'explique par 2 raisons. D'une part, la « dilution » des déchets de cuisine et de table avec l'apport de cosubstrat pauvre en azote et d'autre part, par la perte d'azote dans les vapeurs durant le procédé. Pour le compostage rotatif, il y a également un apport de substrat carboné (granulés) qui a un effet de dilution sur la teneur en azote du mélange.
- Le compost, compost électromécanique, le lombricompost, les bokashi et le déshydrateur qui ont les teneurs en azote le plus élevées. Pour le déshydrateur et les bokashi, l'absence (ou la très faible proportion) de cosubstrat en entrée induit une teneur initiale en azote élevée. Même avec une perte de l'ordre de 50 % de l'azote total des DCT au cours du traitement, la teneur élevée de départ (4,7% MS) permet de conserver une teneur relativement élevée en fin de procédé (de l'ordre de 2% MS). Pour les procédés de compostage et de lombricompostage, la perte de MO et une perte réduite par lixiviation ont un effet de concentration des éléments, qu'il s'agisse du N ou du P.

Concernant le potentiel de minéralisation de l'azote organique (ICC-N), qui permet d'estimer la fourniture ou l'immobilisation d'azote par un produit s'il est apporté au sol :

- Le compost, le lombricompost et le produit du déshydrateur ont des valeurs d'ICC-N positives. Cela indique que ces produits libéreront de l'azote lors de leur apport au sol.
- Les produits issus des digesteurs et du composteur rotatif présentent quant à eux des valeurs négatives à faiblement positives, signe que ceux-ci auront plutôt tendance à immobiliser l'azote du sol et risquent de générer un phénomène de « faim d'azote » pour les plantes. Les valeurs observées pour ces procédés sont à mettre en relation avec le rapport C/N très élevé des produits obtenus, lié à la forte teneur en cosubstrats carbonés en entrée.
- Pour les bokashi, les ICC-N obtenus varient fortement selon les essais, signe de l'instabilité du produit une fois apporté au sol.

Concernant le rapport Carbone sur Azote (C/N), les digesteurs et le compostage rotatif présentent les valeurs les plus élevées, qui peuvent s'expliquer par l'apport de substrat très riches en carbone et par la perte de N lors du procédé.

Le compost a le rapport C/N le plus bas car le procédé a induit une minéralisation importante de la matière organique et par conséquent une baisse de la teneur en C sans engendrer de pertes élevées en N.

Pour l'indice de stabilité de la matière organique (ISMO), qui représente le pourcentage de matière organique résiduelle d'un produit environ 1 an après son apport au sol, on distingue 3 groupes,

- Les compost et lombricompost (ISMO entre 54 et 80% MO) avec par ordre décroissant de la valeur d'ISMO : compost > lombricompost > compost électromécanique > compostage rotatif. Pour le compost, le procédé ainsi que la durée de traitement permettent la transformation du C organique des intrants en molécules organiques très stables. Il s'agit du processus d'humification. Ce processus est également visible dans le lombricompostage avec une action significative des vers de compost sur la transformation de la matière organique. Les composts issus du compostage électromécanique sont moins stabilisés, mais la phase de maturation permet au produit d'avoir bien entamé la phase d'humification.
- Les digesteurs (ISMO entre 26 et 43% MO) : la matière organique des DCT est peu transformée. L'indice ISMO est moyen car il reflète la présence de substrat carboné en proportion importante (40%).
- Les bokashi et le déshydrateur (ISMO entre 1 et 4% MO). La matière organique n'est pas ou très peu transformée. L'activité biologique est stoppée dans un cas par la déshydratation et dans l'autre par une forte acidification du milieu. En revanche, la stabilité de la MO est très faible dans le cas d'un apport au sol de ces produits.

3.3.3. Résultats du tests cresson

Le test cresson permet d'évaluer la maturité d'un amendement et d'aborder une potentielle phytotoxicité sur la base du taux de germination et de la biomasse produite par le cresson semé sur le produit en mélange avec un support de culture.

Les résultats (Figure 8) montrent une évolution de la stabilité de la matière organique au cours du temps, en particulier pour le compost et le lombricompost.

En fin de traitement (incluant la maturation ou le stockage), seuls le compost et le lombricompost ont une matière organique stable qu'on peut qualifier de "mature" et sans effets phytotoxiques.

Pour tous les autres produits, la matière est caractérisée comme non mature et pour certains tels que les produits obtenus à partir du déshydrateur et des seaux bokashi, présentent également des propriétés qui limitent la germination et la croissance des plants de cresson. Pour le produit déshydraté, cela peut provenir de la forte proportion d'azote (2 fois supérieure aux autres produits) ou encore au pH acide. Pour les seaux bokashis, l'acidité du produit (pH de 4,8) semble être le facteur principal de cet effet.

	J1	J14	J45	J120	J165	J240	J270
Compost conventionnel	Immature (réduc croissance)	Immature (réduc croissance)	Immature (réduc croissance)	Mature		Mature	Mature
	Non phytotoxique	Non phytotoxique	Non phytotoxique	Non phytotoxique		Non phytotoxique	Non phytotoxique
Compost rotatif	Immature (réduc croissance)	Immature (réduc croissance)	Immature (réduc croissance)		Immature (réduc croissance)		
	Non phytotoxique	Non phytotoxique	Non phytotoxique		Non phytotoxique		
Lombricompost	Immature (réduc croissance)	Immature (réduc croissance)	Immature (réduc croissance)	Mature			
	Non phytotoxique	Non phytotoxique	Non phytotoxique	Non phytotoxique			
Déshydraté	Immature (aucune croissance)	Immature (aucune croissance)	Immature (aucune croissance)				
	Phytotoxique	Phytotoxique	Phytotoxique				
Séchat (avec µbio)	Immature (réduc croissance)	Immature (réduc croissance)	Immature (réduc croissance)				
	Non phytotoxique	Non phytotoxique	Non phytotoxique				
Séchat (sans µbio)	Immature (réduc croissance)	Immature (réduc croissance)	Immature (réduc croissance)				
	Non phytotoxique	Non phytotoxique	Non phytotoxique				
Bokashi (avec µbio)	Immature (réduc croissance)	Immature (aucune croissance)	Immature (aucune croissance)				
	Non phytotoxique	Phytotoxique	Phytotoxique				
Bokashi (avec µbio)	Immature (réduc croissance)	Immature (aucune croissance)	Immature (aucune croissance)				
	Non phytotoxique	Phytotoxique	Phytotoxique				

Figure 8 : Résultats obtenus sur le test cresson pour chacun des produits en cours et en fin de traitement

3.3.4. Test d'activité biologique aérobie

Cet essai permet de comparer l'impact d'un produit sur la respiration microbienne induite dans un sol suite à son apport. Plus la respiration microbienne sera élevée, plus le produit apporté induit une activité microbienne forte liée à la dégradation rapide de la matière organique. Par conséquent, cela signifie que le carbone apporté est facilement biodégradable et donc présent dans le sol sous une forme peu stabilisée.

Les résultats montrent que le compost est le produit qui est le plus stabilisé, le plus mature, avec une valeur de 10,3 mg O₂ / g MS mesurée (Figure 9). On observe bien la stabilisation au cours du temps avec une réduction progressive de cette respiration au fur et à mesure de l'augmentation de la durée de maturation.

On observe, à une échelle moindre, la même tendance avec les produits du compostage rotatif, lombricompostage et des bokashi. Concernant les bokashis, le taux relativement réduit de respiration du sol au 45ème jour de traitement peut provenir des effets similaires à ceux observés avec le test cresson, c'est à dire un impact négatif sur l'activité biologique en lien avec leurs propriétés physico-chimiques tels que le pH acide.

Pour les digesteurs et le déshydrateur, on n'observe pas cette diminution de l'activité au cours du temps, qui reste identique pour toutes les modalités, pour chacun des temps de mesure et à des valeurs de respiration peu élevées. Cela signifie que les produits n'évoluent pas en fonction du temps de maturation. Les produits sont finalisés dès la fin du traitement dans les machines.

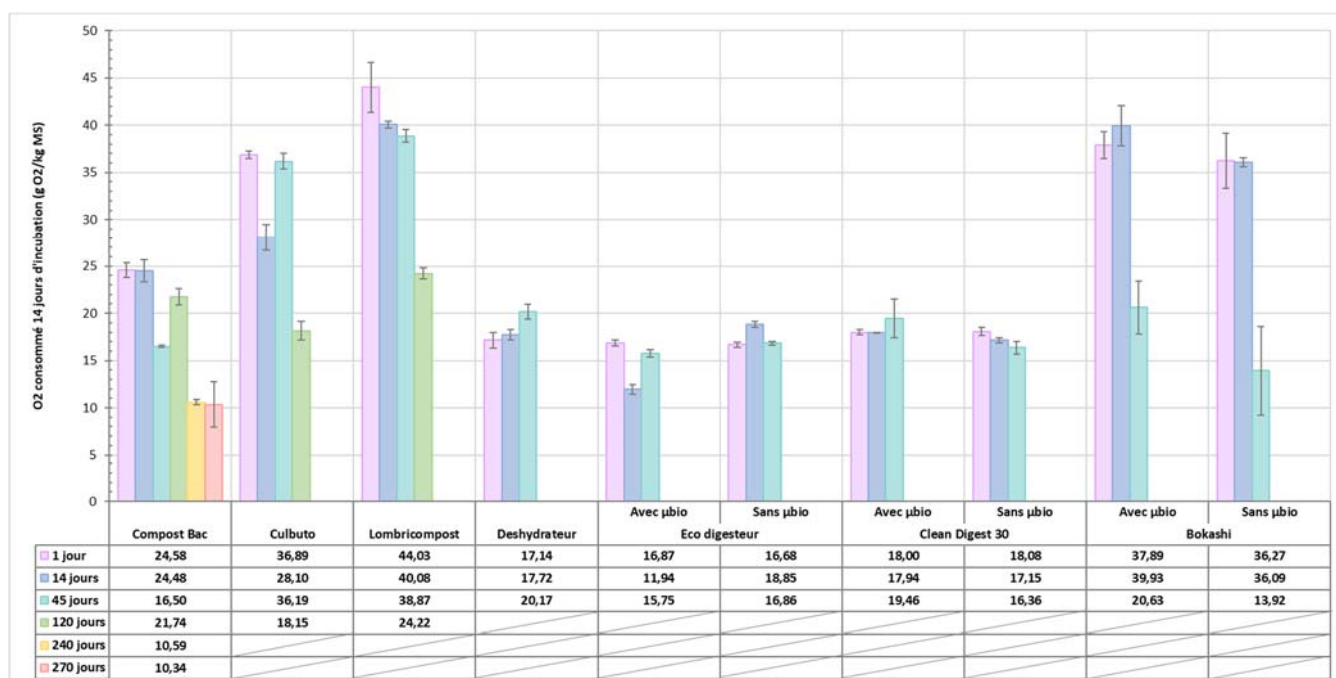


Figure 9 : Evolution des résultats des tests de respiration pour chacun des produits issus des différents temps de suivi des procédés.

3.3.5. Retour au sol des produits

Chacun des produits, en fin de traitement avec maturation, a été retourné au sol, c'est à dire apporté, puis enfouis à 10 cm de profondeur pour ceux issus des digesteurs, déshydrateur et bokashi et épandus en surface pour les autres. Les suivis réalisés n'ont pas montré de différences entre les différents produits en termes de nuisances olfactives ou de présence d'indésirables (insectes). Tous les produits étudiés peuvent être épandus selon les préconisations réalisées dans cette étude, sans générer de nuisances. Notons toutefois qu'en l'état actuel de la réglementation, seuls les procédés de compostage incluant une phase d'hygiénisation et de maturation permettent l'utilisation sur place des produits obtenus. Le retour au sol de sous-produits animaux de catégorie 3 nécessite au préalable de passer par un traitement autorisé.

3.3.6. Notation de la qualité des produits organiques

Sur le même principe que la méthode utilisée pour noter les procédés de traitements (notation par appartenance à 1 des 4 quartiles par paramètre étudié) la qualité agronomique (amendement) des produits est comparée dans la figure 51.

Note : Concernant l'électrocompostage, certaines valeurs sont manquantes et ne permettent pas de définir précisément la notation pour le produit issu de ce procédé. Les informations disponibles sont cependant reprises dans ce graphique pour fournir une vision d'ensemble des différents procédés.

Le compost et le lombricompost sont les produits qui présentent les meilleures caractéristiques amendantes en lien avec une stabilité élevée de leur matière organique, validée par les tests de maturité (cresson et activité biologique).

Un second groupe rassemble les produits issus du compostage rotatif et des équipements de déshydratation et de digestion.

Pour finir les produits des bokashi sont ceux pour lesquels la matière organique est la moins transformée et la moins stabilisée.

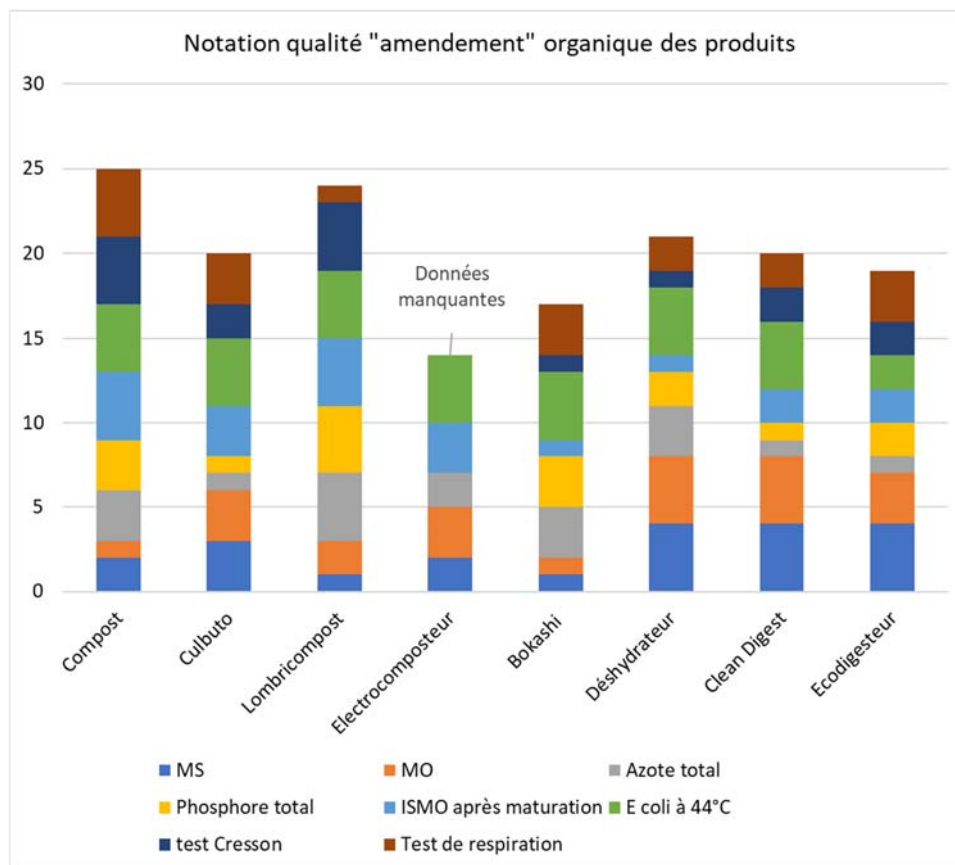


Figure 10 : Comparaison des qualités amendantes des produits en fin de traitement et après maturation

4. Aspects réglementaires

Les différents systèmes de gestion de proximité étudiés permettent d'obtenir des produits ayant des propriétés amendantes pour les sols. Néanmoins, ces produits organiques sont soumis à la réglementation française et européenne pour leur gestion et leur valorisation en tant que matières fertilisantes.

4.1. Utilisation des DCT en gestion de proximité

L'Arrêté du 9 avril 2018 fixant les dispositions techniques nationales relatives à l'utilisation de sous-produits animaux et de produits qui en sont dérivés, restreint les possibilités de traitement de proximité. En effet, les DCT étant considérés comme des sous-produits animaux de catégorie 3 au titre du règlement européen CE 1069/2009 (SPAN3), ils ne peuvent être valorisés pour un rendu au sol que par un site disposant d'un agrément sanitaire et transformés avec une méthode normalisée inscrite dans le règlement européen 142-2011 et par voie de méthanisation ou de compostage. L'arrêté du 9 avril 2018 autorise le traitement des DCT avec **exemption d'agrément sanitaire dans le cadre du compostage de proximité**, mais uniquement dans ce cas (aucun autre procédé que le compostage n'est explicitement cité). Le texte précise en outre que « *La quantité hebdomadaire maximale de DCT produite et traitée sur place [ne doit pas dépasser] 1 tonne* ».

L'annexe technique de cet arrêté précise également que :

1. Les équipements mis en place dans les cuisines ou dans leur secteur « déchet » (sécheur, composteur mécanique, déshydrateur, broyeur, dispositif de Bokashi, à bain d'huile et.) ne sont pas des installations de « compostage de proximité » car elles ne procèdent pas ou ne sont pas associées à une phase de « conversion biologique aérobie » comme décrite dans les guides [de l'ADEME et du Ministère de l'Agriculture].

N'étant pas agréées, et quels que soient les procédés appliqués, le produit sortant est un SPAN3, non éligible à une application directe dans les sols, quelle que soit la norme ou l'homologation auquel il peut être fait référence. Un tel usage est donc réprimé au titre du Code rural et de la Pêche Maritime (art L228-5). Seule, une installation qui pratique une « conversion biologique aérobie » sur des DCT

peut être définie comme un « compostage de proximité » et ce sous réserve qu'elle se réfère ou applique les règles indiquées dans les guides publiés par l'ADEME sur ce sujet et les autres règles précisées par l'annexe technique de l'arrêté du 9 avril 2018 et par voie d'arrêté.

2. Les dispositions du titre IV de l'arrêté ne concernent pas le lombricompostage. Le lombricompostage n'est pas un procédé reconnu comme étant un procédé de traitement des DCT bruts ou d'autres SPAn3. Le « lombricompost » est le produit des déjections des lombrics détenus et élevés pour cette production. Le lombricompost produit par un professionnel est de fait un lisier. Ce dernier, comme tout lisier, peut être soumis à compostage, méthanisation ou si rien ne s'y oppose sanitaire à l'application directe dans les sols, sans préjudice du mode d'alimentation des lombrics détenus.

4.2. Définition du compostage de proximité

Pour mieux comprendre ce qu'est le compostage de proximité, au-delà d'une « conversion biologique aérobie », il est nécessaire de se référer à la Circulaire du 13 décembre 2012 relative aux règles de fonctionnement des installations de compostage de proximité. Cette circulaire se réfère elle-même aux guides sur le sujet publiés par l'ADEME. Elle fixe les conditions nécessaires au fonctionnement de ce type d'installation :

- nécessité que la structure responsable de l'installation soit clairement identifiée : collectivité, bailleur, copropriété, association etc.
- déclaration préalable de l'installation au service urbanisme de la collectivité,
- nécessité que le site soit supervisé par une organisation compétente ou par un maître composteur dûment formé à cet effet, susceptible d'intervenir en cas de dysfonctionnement,
- identification d'un ou plusieurs référents locaux nommément désignés ayant suivi une formation adéquate, chargés du suivi et de la surveillance du site,
- implantation du composteur à une distance suffisante des habitations et des portes et fenêtres d'établissements recevant du public pour limiter les troubles de voisinage,
- tenue d'un registre comportant la date et les conditions de réalisation des principales opérations : retournements, vidage, récupération du compost etc.
- réalisation et archivage d'un bilan annuel synthétique comportant des informations sur les estimations relatives aux quantités traitées et au nombre de ménages participants, sur les principales opérations effectuées, sur les problèmes rencontrés et les solutions apportées,
- présence obligatoire d'une signalétique indiquant les références des responsables, les consignes concernant les conditions de dépôt et de brassage des biodéchets, la liste des déchets acceptés et des déchets refusés etc.
- nécessité que le site soit tenu dans un bon état de propreté et d'entretien,
- présence obligatoire sur le site d'une réserve de matière carbonée structurante à ajouter aux apports de biodéchets (broyat de bois par exemple),
- mise en place d'une organisation assurant un approvisionnement régulier et pérenne de matière carbonée structurante en quantité suffisante,

La référence de ce texte aux opérations de retournement, à une réserve de matière carbonée structurante telle que le broyat de bois et à une supervision par un maître composteur, montre que **les conditions de fonctionnement de la Circulaire du 13 décembre 2012 sont adaptées au processus de compostage en bac**, compostage rotatif et éventuellement compostage mécanique (électrocomposteur), mais pas aux autres procédés étudiés.

Une lecture souple de ces règles de fonctionnement pourrait faire considérer les digesteurs comme un type de compostage, du fait de l'adjonction d'une matière carbonée sous la forme des cosubstrats apportés. Cependant, une définition du compostage est précisément apportée par la norme NF U 44-051 :

Processus de décomposition et de transformation contrôlées de produits organiques sous l'action de populations microbiennes évoluant en milieu aérobie. Il est caractérisé par :

- *une augmentation initiale, nécessaire et transitoire de la température de l'ensemble des produits organiques qui permet son hygiénisation ;*
- *une perte de masse et de volume ;*
- *une homogénéisation du produit ;*
- *la transformation des matières premières organiques selon des processus naturels dans les sols (humification des résidus végétaux par exemple) ;*
- *un degré de maturité en relation avec l'usage du produit.*

Au regard de cette norme, les résultats de notre étude montrent que **l'humification des DCT**, compte tenu des profils biochimiques des produits obtenus, de leur ISMO et des tests de maturité, n'est effective que **dans le cadre du compostage et du lombricompostage**. Il n'y a pas d'humification de la matière observée dans les digesteurs, car le procédé est trop court.

De plus, l'Arrêté du 9 avril 2018, précise que le compostage de proximité n'est autorisé qu'à condition qu'il soit observé « *une bonne montée en température du tas en cours de compostage, notamment en relevant régulièrement sa température* » (ce qui assure l'hygiénisation du produit). **Seul le compostage en bac atteint par auto-échauffement une température du tas suffisamment élevée** pour répondre à ce critère (augmentation de température endogène observée sur plusieurs jours). Dans le cadre de ces travaux, le compostage rotatif ne permet pas d'atteindre ce critère. Remarque : le compostage mécanique (électrocompostage), non testé lors des essais de notre étude, permet généralement de répondre aussi à ce critère. En effet, le brassage des matières est mécanisé pour bien contrôler l'activité biologique. Cette activité provoque une montée en température possible sur plusieurs jours, sans chauffage exogène. Dans le cas des procédés thermiques, l'augmentation de la température n'est pas endogène et reste limitée dans le temps (cycle de 24 heures).

Ainsi, **parmi les procédés testés dans le cadre de l'étude, le compostage en bac** (et éventuellement l'électrocompostage suivi d'une phase de maturation du produit obtenu) est **le seul procédé qui répond aujourd'hui sans ambiguïté aux règles du compostage de proximité** dispensant les gros producteurs de biodéchets d'un agrément sanitaire pour traiter leurs DCT sur place.

4.3. Retour au sol des produits obtenus

Il est d'autre part important de préciser que l'usage du compost produit sur un site de compostage de proximité pour un retour au sol, est limité au seul producteur de DCT. En cas de cession à des tiers, l'Arrêté du 9 avril 2018 renvoie aux articles L. 255-2 à L. 255-5 du code rural et de la pêche maritime. Ces articles imposent une **mise sur le marché du compost, même s'il est distribué à titre gratuit**. Pour être mis sur le marché, le produit doit être conforme à un texte réglementaire (Autorisation de mise sur le marché : AMM ; norme NF U 44-051 ou depuis 2022 : règlement européen 2019/1009). Attention, dans ces cas également il faut rappeler que les sites de traitement doivent disposer d'un agrément sanitaire pour le traitement des sous-produits animaux de catégorie 3, ce qui semble peu réalisable dans le cadre d'un traitement de proximité.

Notons toutefois que, selon le règlement UE2019/1009, **tous les produits obtenus dans le cadre de notre étude pourraient être conformes à la catégorie fonctionnelle de produits (PFC) « PFC 3 amendement organique »**, à condition :

- que les intrants (DCT et cosubstrats respectent les critères d'une « catégorie de matières constitutives » (CMC),
- que 95% des matières soient d'origine biologique, que le produit contienne au moins 20 % de matière sèche,
- que la teneur en carbone organique (Corg) soit d'au moins 7,5 % en masse.

La méthode d'hygiénisation pour l'obtention du produit doit cependant être autorisée par le règlement UE 142/2011 (Chapitre III, méthodes de transformation normalisées) et le site doit là encore disposer d'un agrément sanitaire.

Hors de ces cas, les produits obtenus conservent leur statut de déchets contenant des sous-produits animaux de catégorie 3. Ils doivent ainsi faire l'objet d'un compostage ou d'une méthanisation sur site agréé.

5. Conclusions

Tous les produits obtenus peuvent être considérés comme des amendements organiques, mais avec des caractéristiques différentes.

Le **compostage** réalisé dans ces travaux est un procédé qui permet une montée en température de la masse des DCT permettant de réduire les risques pathogènes ou encore la destruction des graines d'adventices (Grundy et al. 1998 ; Eghball et Lesoing, 2000). Le compost obtenu est un produit organique présentant une grande stabilité de la matière organique et peut être appliqué sur les sols sans préconisations particulières (en surface ou enfoui). Il s'agit cependant d'un procédé long (9 mois). Réalisé sur le sol, il ne nécessite pas de

gestion particulière des lixiviats. Il doit cependant être réalisé dans "les règles de l'art" avec retournements pour permettre l'obtention d'un compost de qualité :

- Avantages : matière organique très stable, peu couteux. Retour au sol du produit autorisé par la réglementation française (usage limité au seul producteur).
- Inconvénients : nécessite une source de déchets verts ligneux broyés comme cosubstrat ainsi qu'une manutention régulière - longue durée.

Le lombricompostage permet de traiter en intérieur (sous abri et à l'abri des fortes chaleurs et du froid) les DCT. Ce procédé ne permet pas une élévation de la température et par conséquent ne permet pas la destruction des graines adventices. Néanmoins l'action combinée de la microflore et des vers de compost limite la présence des populations pathogènes (pas de *E.coli* détecté dans le produit final). Du lixiviat est produit et doit être collecté régulièrement. Ce jus peut être utilisé pour arroser les cultures. Le lombricompost est également une matière organique très stabilisée qui ne nécessite pas de préconisations particulières d'emploi. Il peut être épandu en surface ou enfoui.

- Avantage : obtention de matière organique très stable, peu couteux et peu encombrant.
- Inconvénient : durée de traitement de 4 mois et la gestion du procédé doit être réalisée avec attention, précaution et à l'intérieur (hors gel et hors chaud). De plus ce procédé ne permet pas de traiter l'ensemble des DCT. Les agrumes doivent être introduites en faibles quantités dans ce procédé car elles ne sont pas dégradées et peuvent impacter très négativement le procédé (jusqu'à la mortalité des vers de compost). Le lombricompost conserve son statut de SPAn3.

Les composteurs électromécaniques sont des équipements qui permettent une montée en température maîtrisée.

Au regard de la maturité et de la stabilité de la matière organique sortante, le compostage électromécanique ne constitue qu'un prétraitement. La matière produite s'apparente à un compost non mûr qui nécessite des précautions quant au retour au sol envisagé. Une phase de maturation est indispensable.

- Avantage : permet d'accélérer la phase thermophile du compostage et d'assurer un couple temps - température pour le traitement. En fonction de sa capacité, ce procédé permet de traiter rapidement une quantité importante de DCT.
- Inconvénient : nécessite une source de cosubstrat (DV ligneux). C'est un procédé avec un fort encombrement spatial et ne semble pas adapté aux particuliers. Ce procédé est également consommateur d'énergie. Le produit en sortie du procédé, sans phase de maturation, conserve son statut de SPAn3.

Le compostage rotatif permet de traiter les DCT avec l'ajout d'un cosubstrat facilement disponible (granulés de bois). La matière organique des DCT n'est pas suffisamment transformée pour que le produit soit considéré comme un produit stabilisé et humifié. Il n'y a pas de montée en température. Une phase de maturation de plusieurs mois s'avère nécessaire. Sans phase de maturation, le produit doit être enfoui dans le sol et 1 à 2 mois avant l'implantation des cultures afin d'éviter un phénomène de faim d'azote. Après une durée de maturation similaire à celle du compost, le produit peut être considéré comme un compost et valorisé de façon similaire.

- Avantage : procédé facile à réaliser, nécessitant peu de manutention et peu encombrant. Peut être réalisé en extérieur ou en intérieur (cave, garage, ...). Cosubstrat facile à trouver et accessible à tous.
- Inconvénient : production de lixiviat qu'il faut collecter afin d'éviter les fuites (si réalisé en intérieur). L'espace pour la phase de maturation doit être disponible. Le produit en sortie du procédé, sans phase de maturation, conserve son statut de SPAn3.

Déshydrateur. Ce procédé permet un traitement rapide des DCT bruts et fournit un produit sec qui évolue très peu s'il est conservé à l'abri de l'humidité. La température de consigne permet de limiter la présence de pathogènes. L'équipement est facile d'utilisation et occupe peu de place. Le substrat final correspond à un séchat ou déshydratant de DCT qui est une matière organique non transformée. Pour un retour au sol, il est conseillé de l'apporter 1 à 3 mois avant l'implantation des cultures et de l'enfouir. Cet apport permet de fournir de la matière organique au sol qui sera rapidement minéralisée et participe ainsi à stimuler l'activité biologique dans le sol récepteur.

- Avantage : rapidité de traitement et gestion simplifiée du séchat/déshydratant de DCT qui se conserve très bien dans le temps.
- Inconvénient : consommation énergétique importante et pertes d'azote avec les effluents gazeux qui doivent être correctement gérées. Ces effluents contiennent l'eau évaporé des DCT. Un dispositif d'évacuation vers l'extérieur doit être installé vers un

endroit non passant car il peut contenir des molécules volatiles source de nuisances olfactives ainsi que de l'azote sous forme ammoniacal (NH₃). Le produit en sortie du procédé, conserve son statut de SPAn3.

Les digesteurs :

NB : La dénomination de l'équipement ne paraît pas appropriée au mode de fonctionnement ni aux paramètres de traitement aérobies des procédés étudiés et peut être confondue avec le procédé de méthanisation.

En premier lieu, il faut signaler que l'ajout de microorganismes n'a pas montré d'impact, que ce soit sur le déroulement du procédé ou sur la qualité de la matière organique des produits obtenus en fin de traitement. Ces procédés, en fonction des paramètres programmés peuvent permettre d'atteindre une température de traitement pouvant abattre les teneurs en microorganismes pathogènes et détruire les graines d'adventices. Ces procédés sont réalisés dans des équipements occupant peu de place et facile d'utilisation. Durant le procédé, la MO des DCT ne semble pas être transformée, mais juste déshydratée. Cependant, l'apport de cosubstrat très riche en carbone (C/N entre 55 et 179 dans cette étude), permet d'obtenir un produit en fin de traitement qui présente les caractéristiques d'un compost non mature et qui doit subir une phase de maturation. Il est conseillé de l'apporter 1 à 3 mois avant l'implantation des cultures et de l'enfouir. Cet apport permet de fournir de la matière organique au sol qui sera rapidement minéralisée pour la part de la matière provenant des DCT déshydratés et ainsi stimuler l'activité biologique dans le sol récepteur. La partie riche en carbone fournie par le cosubstrat permet de fournir une fraction de matière organique qui participe à maintenir ou enrichir le pool de carbone organique stable dans le sol.

- **Avantage :** facile à utiliser et production d'un produit sec qui se conserve très bien dans le temps s'il est stocké à l'abri de l'humidité.
- **Inconvénient :** consommation énergétique importante et pertes d'azote avec les effluents gazeux qui doivent être correctement gérés. Ces effluents contiennent l'eau évaporé des DCT. Un dispositif d'évacuation vers l'extérieur doit être installé vers un endroit non passant car il peut contenir des molécules volatiles source de nuisances olfactives ainsi que de l'azote sous forme ammoniacal (NH₃). Par ailleurs, le cosubstrat doit être renouvelé à une fréquence non connue et sa proportion en entrée de procédé conditionne les qualités du produit en sortie. Le produit en sortie du procédé, conserve son statut de SPAn3.

Les bokashis :

Ce procédé, réalisé en absence d'oxygène permet de stocker sur une longue durée les DCT (45 jours dans cette étude). Il s'agit probablement d'une fermentation lactique ou acétique qui génère une baisse importante du pH à des valeurs acides de 4,8. Il n'y a pas d'élévation de la température durant le procédé. La conservation en conditions anaérobies permet de ne pas générer de nuisances olfactives. Le produit organique obtenu en fin de traitement est une matière organique acide, peu transformée.

- **Avantages :** procédé très peu encombrant et facilement utilisable en intérieur. Il permet de conserver sur une longue durée les DCT avant leur collecte ou leur valorisation. Il y a production de lixiviat très acide (pH<5). Il est conseillé de ne pas l'utiliser pour arroser des plantes, sauf s'il est dilué au moins dans des proportions de 1/10 avec de l'eau.
- **Inconvénient :** émissions d'odeur à l'ouverture du seau bokashi. Le produit final doit être considéré comme des DCT non transformés. Il peut être retourné au sol à condition de l'apporter plusieurs mois avant l'implantation des cultures et de l'enfouir. Cet apport permet de fournir de la matière organique au sol qui sera rapidement minéralisée. Il participe ainsi à stimuler l'activité biologique dans le sol récepteur. Le produit en sortie du procédé, conserve son statut de SPAn3.

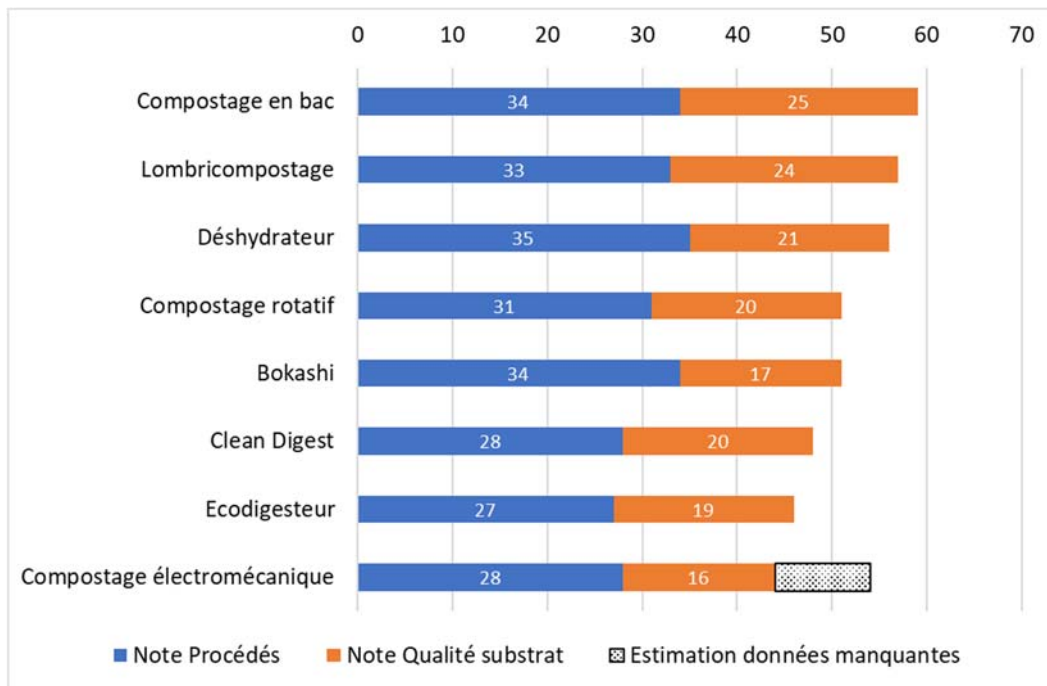


Figure 11 : Comparaison des procédés étudiés et classement selon la somme des notes « procédé » et « qualité du produit » obtenues.

Tableau 7 : Propositions de dénominations des produits obtenus pour chacun des procédés.

PROCEDES	DENOMINATIONS	REMARQUES	DOSE D'APPORT « DIRECTIVE NITRATE » EN KG MB/ M ²	DOSE D'APPORT « AMENDEMENT ORGANIQUE » EN KG MB/M ²
Compostage	Compost	Matière organique stabilisée	2	6
Compostage rotatif	Compost immature	Phase de maturation nécessaire Matière organique en cours de stabilisation	2	6
Lombricompostage	Lombricompost	Matière organique stabilisée. Incorporation au sol recommandée	3	10
Electrocompostage	Compost immature à compost mature	Phase de maturation nécessaire Stabilité de la matière organique variable en fonction de la durée de maturation	2	6
Bokashi	biodéchets lactofermentés	Matière organique rapidement minéralisable. Incorporation au sol indispensable	2*	6*
Déshydrateur	Biodéchets déshydratés	Matière organique rapidement minéralisable. Stockage à l'abri de l'humidité. Incorporation au sol recommandée	1	2,5
Digesteurs	Matière organique déshydratée	Stockage à l'abri de l'humidité. Incorporation au sol recommandée	1	4

* Pour les produits issus des bokashis, les doses d'apport ont été divisées par deux afin de limiter un effet négatif potentiel en lien avec le pH très acides des produits.

Dose « directive nitrate ». Cette valeur est basée sur la teneur en azote afin de respecter la limite de 170kg de N / Ha, sans appliquer de coefficient équivalent azote utile.

La seconde valeur « dose amendement » intègre un coefficient azote utile de 0,33, ce qui correspond à un coefficient classique des composts et correspond également à une dose régulièrement utilisée par les agriculteurs pour leur apport au champ, soit 30 T MB/Ha.

Ce tableau, hors compostage, s'applique uniquement pour un usage domestique, c'est-à-dire une gestion des biodéchets des particuliers au sein même du foyer qui les a produits.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME. 2009. Projet pilote de lombricompostage individuel et semi-collectif (convention ADEME N° 0820C0124) - rapport final. Déc 2009.
- ADEME. 2020. Etude technico-économique des composteurs électromécaniques. Rapport d'étude.
- ADEME 2019, Le compostage et le paillage, jardiner au naturel - Clé pour Agir.
- ADEME 2019, Biodégradabilité en compostage domestique et industriel des sacs plastiques biodégradables et des sacs en papier.
- ADEME 2023. Evaluation des différents systèmes de traitement de proximité des biodéchets-Rapport final.
- Eghball Bahman & Lesoing Gary W. (2000) Viability of Weed Seeds Following Manure Windrow Composting, *Compost Science & Utilization*, 8:1, 46-53, DOI:10.1080/1065657X.2000.10701749
- Grundy A. C., Green J.M. & Lennartsson M. (1998) The Effect of Temperature on the Viability Of Weed Seeds in Compost, *Compost Science & Utilization*, 6:3, 26-33, DOI:10.1080/1065657X.1998.10701928

Textes réglementaires

- Arrêté du 12 juillet 2011 fixant les seuils définis à l'article R. 543-225 du code de l'environnement
- Arrêté du 9 avril 2018 fixant les dispositions techniques nationales relatives à l'utilisation de sous-produits animaux et de produits qui en sont dérivés
- Articles L. 255-2 à L. 255-5 du code rural et de la pêche maritime
- Fiche technique de l'Arrêté du 9 avril 2018, fixant les dispositions techniques nationales relatives à l'utilisation de sous-produits animaux et de produits qui en sont dérivés
- Norme AFNOR. NF U44-051 Amendements organiques. 2006.
- RÈGLEMENT (UE) 2019/1009 du 5 juin 2019 établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants UE.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1: Liste des procédés étudiés dans cette étude.....	8
Tableau 2 : Paramètres suivis par type de procédé.....	22
Tableau 3 : Caractérisations des matières et méthodes.....	25
Tableau 4 : Paramètres de traitement en fonction des procédés étudiés.....	32
Tableau 5 Note des procédés selon leurs paramètres de traitement.....	33
Tableau 6 : Composition des substrats obtenus après traitement en fonction des procédés étudiés.....	36
Tableau 7 : Propositions de dénominations des produits obtenus pour chacun des procédés.....	47

FIGURES

Figure 1 : Synthèse des opérations pour les procédés étudiés.....	21
Figure 2 : Lancement et durée des procédés de traitement.....	21
Figure 3 : Exemple de fiche de suivi vierge.....	24
Figure 4 : Etat des produits à la fin des traitements.....	31
Figure 5 : Comparaison des paramètres de traitements des procédés.....	34
Figure 6 : Teneurs en microorganismes totaux avant et après traitement pour chacun des procédés.....	35
Figure 7 : Comparaison des paramètres agronomiques des produits finaux pour les différents procédés.....	37
Figure 8 : Résultats obtenus sur le test cresson pour chacun des produits en cours et en fin de traitement.....	40
Figure 9 : Evolution des résultats des test de respiration pour chacun des produits issus des différents temps de suivi des procédés.....	41
Figure 10 : Comparaison des qualités amendantes des produits en fin de traitement et après maturation.....	42
Figure 11 : Comparaison des procédés étudiés et classement selon la somme des notes « procédé » et « qualité du produit » obtenues.....	47

PHOTOS

Photo 1 : Déconditionnement des DCT pour le compostage en bac, le compostage rotatif, les bokashis et le déshydrateur (lot 1, du 12 au 17/11/2022).....	9
Photo 2 : Homogénéisation par quartage des DCT pour le compostage en bac, le compostage rotatif, les bokashis et le déshydrateur (lot 1, du 12 au 17/11/2022).....	10
Photo 3 : Echantillonnage des DCT (lot 1, du 12 au 17/11/2022).....	10
Photo 4 Déconditionnement et livraison des DCT pour les digesteurs, les répétitions bokashi et le lombricomposteur (lot 2, du 14 au 15/03/2022).....	10
Photo 5 : Homogénéisation par quartage des DCT pour les digesteurs et les répétitions bokashi (lot 2, du 14 au 15/03/2022).....	11
Photo 6 : Homogénéisation par quartage des DCT pour le lombricompostage (lot 2, 15/03/2022).....	11
Photo 7 : DCT avant et après réduction granulométrique.....	12
Photo 8 : Mesure de la masse volumique.....	12
Photo 9 : Prélèvement des broyats de déchets verts sur plateforme de compostage industrielle.....	12
Photo 10 : Echantillonnage des broyats de déchets verts pour la mesure de la masse volumique et les analyses agronomiques.....	13
Photo 11 : Mise en place du procédé de compostage en bac.....	14
Photo 12 : Mise en place du procédé de lombricompostage avec insertion d'une pile-bouton.....	15
Photo 13 : Mise en place du composteur rotatif (gauche) et DCT en mélange avec les granulés bois (droite).....	16
Photo 14 : Mise en place du bokashi : alternance des apports DCT/son de blé puis tassement.....	17
Photo 15 : Insertion d'une pile-bouton au cœur du seau Bokashi pour le suivi de la température.....	17
Photo 16 : Eco Digesteur (gauche) et Clean Digest (droite).....	18
Photo 17 : Coupelles contenant les sols amendés avant incubation en conditions contrôlées.....	27
Photo 18 : Culture de cresson sur support de culture dans le cadre d'un essai de germination du cresson FD U44-165.....	28

Photo 19 : Chambres d'incubations hermétiques montées des têtes de lecture dans le cadre d'une détermination de l'activité biologique aérobie. 28

Photo 20 : Simulation d'andain et suivi de température de l'échantillon organique dans le cadre d'un test Rottegrad 28

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de la transition écologique
C	Carbone
DCT	Déchets de cuisine et de table
DV	Déchets verts (déchets biodégradables d'entretien de jardin ou de parc)
ISMO	Indice de stabilité de la matière organique
MB	Matière brute
MO	Matière Organique
MS	Matière sèche
N	Azote
P	Phosphore
SPAn3	Sous-produit animal de catégorie 3
UFC	Unité formant colonie

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

SYSPROX – Evaluation des différents systèmes de traitement de proximité des biodéchets

Les procédés de traitement de proximité facilitent la gestion des biodéchets avec très peu de nuisances.

Les traitements de type compostage, compostage rotatif et lombricompostage permettent la production de produits avec une matière organique mature utilisable comme du compost.

Les procédés de traitements thermiques produisent une matière organique peu mature mais stabilisée par la déshydratation.

Le traitement Bokashi permet de conserver les DCT sans nuisances olfactives.

Seul le compostage en bac (et l'électrocompostage avec maturation) répond aujourd'hui aux règles du compostage de proximité (Arrêté du 9 avril 2018).

