



Compostage de  
Basse énergie  
Bioinspiré

Bilan technique du Projet COMPOSTOU

et Mémoire de Formation de Maître Composteur  
Module MC 5

Conduire et évaluer un projet de gestion des  
biodéchets sur un territoire

## Remerciements

Le projet COMPOSTOU fait partie d'un programme de recherche-action mené sous l'égide de l'Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte (IRBI, UMR 7261 CNRS/ Université de Tours) pour sa partie scientifique et avec le concours de l'association Zéro Déchet Touraine (ZDT) pour son développement technique et commercial.

Le projet a bénéficié du mécénat financier des structures suivantes : Région Centre-Val de Loire et ADEME (projet lauréat de l'appel à projets Economie circulaire 2017), Syndicat Mixte pour la valorisation et la réduction des déchets Touraine Propre (projet lauréat de l'appel à projets innovants 2017), IUT de Tours, IRBI, Association étudiante APNE.

Il a aussi bénéficié du mécénat technique des structures suivantes : Tours Métropole Val de Loire (TMVL), Communauté de Communes Gâtine et Choisilles - Pays de Racan (CC GCPR), Communauté de Communes Touraine Est-Vallées (CC TEV), communes de Joué-Lès-Tours, Reugny et Saint-Cyr-sur-Loire, Université de Tours, collège André Bauchant (Château-Renault), Touraine Logement, Val Touraine Habitat et Ressourcerie La Charpentière.

Le prototype du Compostou a été réalisé par Paul Huguen (Coopérative d'Activités et d'Emploi culturelle Artefacts). La première génération de Compostou a été fabriquée par l'association E&S, association luttant contre les exclusions, et déployée grâce aux bénévoles et salariés de l'association ZDT.

Qu'ils en soient tous chaleureusement remerciés.

### **Pour citer ce rapport :**

Moreau S., 2019. Compostou. Compostage de basse énergie. Mémoire de fin de Formation de Maître Composteur.

## Résumé

Mené par l'association Zéro Déchet Touraine, le projet COMPOSTOU a permis de déployer en Indre-et-Loire 10 composteurs expérimentaux innovants et de suivre leur fonctionnement pendant 2 ans (2017-2019). Les Compostous sont les premiers composteurs partagés spécifiquement conçus pour fonctionner à basse énergie (= à froid »). Leur développement a bénéficié d'une démarche bioinspirée, pour laquelle le fonctionnement d'une litière de hêtre a été étudié. Un suivi précis de l'ergonomie des premiers appareils installés a permis de faire évoluer techniquement le Compostou au cours du projet et de solutionner une à une toutes les difficultés rencontrées.

La solution testée a prouvé son innocuité et son efficacité : au moins 4,5 m<sup>3</sup> de compost ont été produits en 2 ans, à partir d'un gisement de biodéchets traités d'environ 6,33 m<sup>3</sup> par an (près de 2,7 tonnes de biodéchets/an). Du compost sain répondant parfaitement à la norme française NF U 44-051 a été produit sur 3 sites différents.

Utilisé à sa pleine capacité (15 utilisateurs adultes), le Compostou est une solution plus économique que la collecte et le traitement des biodéchets en mélange avec les Ordures Ménagères Résiduelles. Cette nouvelle méthode de compostage partagé est aussi plus vertueuse sur les plans environnementaux et sociaux, car elle respecte totalement la faune utile et permet de créer de nombreux liens entre les accompagnateurs bénévoles de l'association et les utilisateurs. Le Compostou est très apprécié de ses utilisateurs.

Le projet COMPOSTOU a été cofinancé par la Région Centre Val de Loire et l'ADEME (AAP Economie circulaire 2017), Touraine propre (AAP 2017), l'IUT de Tours, l'IRBI, l'association étudiante APNE et Zéro Déchet Touraine.

# Table des matières

<i>Remerciements</i> .....	2
<i>Résumé</i> .....	3
<i>Glossaire</i> .....	8
<i>Introduction</i> .....	9
<b>1. Le compostage partagé, une question d'énergie</b> .....	<b>13</b>
1.1. Situation du compostage partagé en France et en Région Centre Val de Loire ..	13
1.1.1. Définition.....	13
1.1.2. Mise en perspective historique.....	14
1.2. Bases scientifiques du compostage de haute énergie.....	21
1.2.1. Les micro-organismes, sources de chaleur .....	25
1.2.2. L'oxygène, le comburant.....	26
1.2.3. La matière organique, le combustible.....	27
1.3. Avantages du compostage de haute énergie .....	29
1.4. Analyse critique du compostage partagé de haute énergie.....	31
1.4.1. De la difficulté de créer et de contrôler le désordre .....	31
1.4.2. Compostage de haute énergie et biodiversité .....	32
1.4.3. Difficultés socio-techniques identifiées dans la mise en œuvre du compostage de haute énergie.....	36
<b>2. Compostou : un nouveau paradigme pour le compostage partagé</b> .....	<b>44</b>
2.1. Simplifier les pratiques.....	44
2.1.1. Innover en compostage partagé, est-ce encore possible ? .....	44
2.1.2. Problématisation .....	49
2.1.3. Indicateurs de performance, hypothèses et prédictions .....	51
2.2. Limiter les nuisances en s'inspirant de la nature .....	57
2.2.1. Formation de l'humus forestier .....	58
2.2.2. Influence de la biodiversité sur l'humification .....	71
2.2.3. Le compostage, un état dégradé du processus d'humification.....	81
2.2.4. Des solutions naturelles pour un composteur bioinspiré à basse énergie ..	82
2.3. Valoriser le compost sur place.....	88
2.3.1. Spécificités techniques du Compostou, composteur de basse énergie .....	88
2.3.2. Intérêts de la valorisation sur place du compost.....	92
2.4. Compenser le manque de disponibilité des sources carbonées .....	95
2.5. Faciliter la maintenance .....	96
2.6. Améliorer la formation et l'accompagnement des utilisateurs.....	97
2.6.1. Initiation, accompagnement et formation des utilisateurs.....	97

2.7.	Eviter la mise en concurrence avec d'autres modes de valorisation des biodéchets.....	102
2.7.1.	Positionnement stratégique du Compostou .....	102
2.7.2.	Intérêt du brevet et du dépôt d'une marque commerciale .....	104
2.8.	Etre économiquement compétitif avec les méthodes actuelles de traitement des OMR	106
3.	<i>Bilan du projet Compostou (2017-2019)</i> .....	113
3.1.	Objectifs .....	113
3.2.	Equipe projet .....	113
3.3.	Partenaires du projet COMPOSTOU.....	115
3.4.	Mise en œuvre du projet .....	116
3.4.1.	Choix des sites .....	116
3.4.2.	Modèles testés .....	117
3.4.3.	Choix du fabricant et des matériaux du Compostou.....	119
3.4.4.	Plans .....	124
3.4.5.	Signalétique .....	128
3.5.	Résultats .....	131
3.5.1.	Chantiers participatifs d'installation .....	131
3.5.2.	Maintenance .....	135
3.5.3.	Ergonomie.....	139
3.5.4.	Approvisionnement en broyat de branches .....	142
3.5.5.	Mésusages .....	146
3.5.6.	Incivilités .....	149
3.5.7.	Convivialité et bénévolat.....	150
3.5.8.	Retours des utilisatrices et utilisateurs .....	152
3.5.9.	Formations de personnes ressources .....	161
3.6.	Etudes scientifiques .....	170
3.6.1.	Relevé des températures des composts en formation.....	170
3.6.2.	Quantités de biodéchets valorisées.....	173
3.6.3.	Volume de compost produit.....	176
3.6.4.	Coûts de traitement.....	179
3.6.5.	Biodiversité.....	180
3.6.6.	Test du cresson interne .....	188
3.6.7.	Analyses indépendantes de la conformité de composts issus de Compostous à la norme NF U 44-051.....	201
3.7.	Divulgarion d'informations scientifiques et techniques .....	226
3.7.1.	Brevet.....	226

3.7.2.	Articles de recherche .....	226
3.7.3.	Conférences et interventions publiques.....	226
3.7.4.	Retombées médiatiques du projet.....	227
3.7.5.	Communication.....	228
3.7.6.	Retombées politiques .....	230
3.8.	Utilisation du budget .....	230
3.8.1.	Budget prévisionnel initial .....	230
3.8.2.	Budget prévisionnel au lancement du projet .....	232
3.8.3.	Budget réel.....	234
4.	<i>Synthèse et perspectives</i> .....	240
4.1.	Synthèse.....	240
4.2.	Perspectives .....	241
4.2.1.	Vers une science du compostage ?.....	241
4.2.2.	Pour une massification intelligente de la gestion de proximité des biodéchets.....	242
	<i>Bibliographie</i> .....	245
	<i>Annexes</i> .....	254
	AI1.....	254
	AI2.....	256
	AI3.....	258
	AI4.....	260
	RT1 .....	262
	RT2 .....	264
	RT3 .....	265
	RT4 .....	266
	TC1.....	267
	TC2.....	268
	TC3.....	269
	TC4.....	269
	TC5.....	270
	TC6.....	270
	TC7.....	271
	TC8.....	271
	TC9.....	272
	TC10.....	273
	TC11.....	273
	TC12.....	274

TC13.....	274
TC14.....	275
TC15.....	275
TC16.....	276
TC17.....	276
TC18.....	277
VC1.....	277
VC2.....	278

## Glossaire

**ADEME** : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.

**Aérobie** : adjectif qualifiant un organisme ayant besoin d'oxygène pour vivre.

**Altriciel** : qualifie un mode de développement animal où le jeune naît très immature et dépend fortement de ses parents pour sa survie.

**Anaérobie** : adjectif qualifiant un organisme n'ayant pas ou peu besoin d'oxygène pour vivre.

**Entropie** : degré de désorganisation d'un système.

**GProx** : Gestion de proximité des biodéchets.

**Mésophile** : adjectif caractérisant un organisme qui prospère mieux dans des conditions de température modérée.

**OMR** : Ordures ménagères résiduelles.

**Organique** : Qui provient de tissus vivants ou de transformations subies par les produits extraits d'organismes vivants.

**PCAET** : Plan Climat Air Energie Territorial.

**Psychrophile** : adjectif caractérisant un organisme qui prospère mieux dans des conditions de température basse.

**TGAP** : Taxe générale sur les activités polluantes.

**Thermophile** : adjectif caractérisant un organisme qui prospère mieux dans des conditions de température élevée.

**Thigmotactisme** : tendance à garder un contact physique avec un élément solide, comme une paroi ou des congénères.

**Xérophile** : adjectif caractérisant un organisme qui prospère mieux dans des milieux pauvres en eau.

**Zoocénose** : ensemble des espèces animales vivant dans espace écologique donné.

## Introduction

Le compostage correspond à un « *procédé de transformation aérobie de matières fermentescibles dans des conditions contrôlées* » (ADEME, 2015a). La présence d'oxygène est donc requise pendant l'ensemble de la transformation de la matière organique en compost, « *matière fertilisante stabilisée riche en composés humiques* » (ADEME, 2015a). Cette caractéristique distingue le compostage de la méthanisation, qui est une réaction anaérobie contrôlée visant à transformer la matière organique en méthane. Le compostage se différencie aussi de certains processus de décomposition anaérobie des matières organiques non ou peu méthanogènes tels que la méthode japonaise Bokashi, la méthode indienne Bangalore ou le processus passif de décomposition qui se déroule au cœur d'un tas de fumier par exemple. La figure suivante illustre une partie de la diversité des méthodes traditionnelles de compostage actuellement mises en œuvre dans le monde, principalement à des fins agricoles.

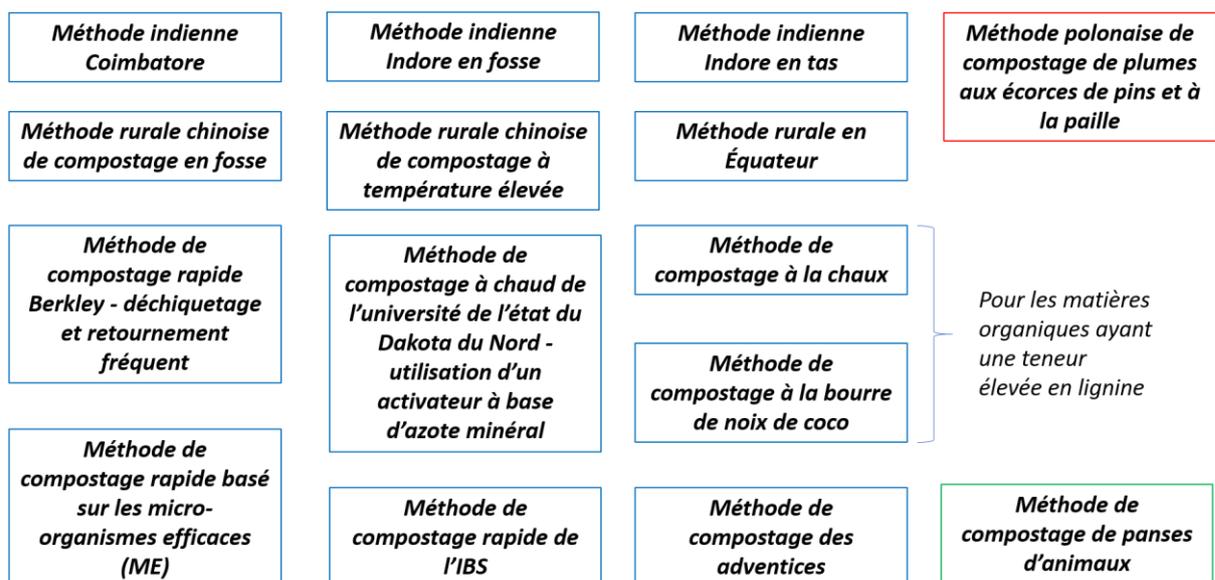


Figure 1: Quelques techniques de compostage aérobie à petite échelle (Misra *et al.*, 2005 ; Bohacz et Kornikowicz-Kowalska, 2009 ; Bromblet et Somaroo, 2015).

### ***Les atouts du compostage partagé sont multiples***

Le compostage de proximité est mis en œuvre au plus près des lieux de production de la matière organique à composter. Il peut être individuel (compostage domestique) ou collectif (compostage partagé ou en établissement). Même en habitat urbain dense, le compostage de proximité permet de

réduire d'environ 25% le volume des ordures ménagères, en détournant les biodéchets<sup>1</sup> du flux d'ordures ménagères résiduelles des habitants et des établissements (ADEME, 2009). Si on y ajoute les papiers, les cartons et les textiles sanitaires, le potentiel de valorisation organique de nos ordures ménagères résiduelles se situerait entre 40% (ADEME, 2014) et 63% (ADEME, 2009). Le compostage de proximité constitue désormais une mesure incontournable d'un nombre croissant de plans locaux de réduction des déchets et l'un des principaux piliers de la doctrine de gestion de proximité des biodéchets (GProx) promue par l'ADEME<sup>2</sup>. Cette pratique constitue une solution d'atténuation du changement climatique, en permettant le retour au sol d'une partie du carbone contenu dans les biodéchets. Ainsi, entre 2 et 9% du carbone épandu sous forme de compost sur un sol pourrait persister dans la matière organique du sol pendant un siècle (Favoino et Hogg, 2008). On retrouve donc cette mesure au programme des PCAET (Plan Climat Air Energie Territorial) de certaines collectivités. Le compost constitue aussi un amendement naturel capable d'améliorer la structure du sol et utile à la levée des semis. Il améliore l'absorption des nutriments par les plantes (Pépin, 2013). L'utilisation de compost évite aussi la consommation d'énergie et la libération d'oxyde nitreux respectivement associés à la production et à l'utilisation d'engrais chimiques (Favoino et Hogg, 2008).

Le compostage de proximité constitue un mode de traitement *in situ* des biodéchets non dangereux. C'est également une importante mesure de prévention des déchets car les biodéchets ainsi compostés ne sont pas collectés et gérés par une collectivité ou un prestataire externe. Le compostage domestique individuel est rendu possible grâce à la distribution de composteurs aux foyers vivant en habitat individuel. Il devrait idéalement s'appuyer sur un dispositif d'accompagnement pérenne, ce qui est rarement le cas. Il est particulièrement pertinent en zone rurale et/ou en habitat pavillonnaire. Le compostage autonome en établissement s'adresse aux établissements scolaires, aux structures touristiques, aux entreprises privées, aux administrations avec

---

<sup>1</sup> La Directive-cadre européenne 2008/98/CE du 19/11/2008 définit ainsi les biodéchets : « Déchets biodégradables de jardin ou de parc, déchets alimentaires ou de cuisine issus des ménages, des restaurants, des traiteurs ou des magasins de vente au détail, déchets comparables provenant des usines de transformation de denrées alimentaires ». Cette catégorie n'englobe donc pas toutes les matières fermentescibles et biodégradables susceptibles d'être également compostées (déjections, papiers et cartons...).

<sup>2</sup> L'ADEME a soutenu financièrement et techniquement plus de 1400 collectivités différentes depuis le début des années 1990, dans leurs mises en œuvre d'opérations de promotion de la GProx auprès des usagers.

cantine et à toute structure de restauration collective. Il peut permettre aux gros producteurs de biodéchets, dont le tri à la source est obligatoire au-delà d'un seuil de 10 tonnes/an<sup>3</sup>, de valoriser sur place les biodéchets produits. Le Compostage partagé en pied d'immeubles ou à l'échelle d'un quartier s'effectue généralement sur l'espace public ou sur domaine privé (bailleurs sociaux par exemple). De par sa dimension collective, le compostage partagé a des vertus sociales particulièrement intéressantes.

L'arrivée d'un composteur en bas d'immeuble est une occasion d'élaborer et de porter collectivement un projet avec l'assistance d'accompagnateurs expérimentés (référents de site, Guides-Composteurs, maître composteurs). Le compostage aide au rapprochement entre les personnes, à la production de lien social, à l'intensification des échanges et à la production d'idées positives (ADEME, 2012). Il est donc un bon vecteur de socialisation. Il encourage les citoyens à s'investir dans les lieux partagés.

Malgré ses indéniables vertus, le compostage partagé se heurte parfois à des obstacles lors de son déploiement ou de sa mise en œuvre. A y regarder de près, la majeure partie des problèmes identifiés est liée au compostage de haute énergie, ou compostage « chaud », modalité actuellement dominante en compostage partagé. Bien qu'efficace et très diffusé, le compostage de haute énergie présente quelques inconvénients notoires que l'ADEME appelle à anticiper ou à gérer par le biais de ses recommandations sur les « bonnes pratiques ». L'ensemble de ces observations nous a convaincu qu'il serait probablement utile de mener une recherche visant à innover en matière de compostage de proximité.

***Car une difficulté qui n'apparaît plus n'a plus besoin d'être gérée.***

En leur proposant un autre cadre conceptuel, dans lequel différentes catégories de

difficultés seraient résolues à la racine, les utilisateurs pourraient se contenter d'agir, sans se préoccuper de toujours « bien agir ». Evidemment, toute innovation est susceptible d'engendrer elle-même de nouveaux problèmes. Une analyse coûts-bénéfices pourrait alors permettre de déterminer si la nouvelle solution développée est plus ou moins intéressante que les modalités de compostage préexistantes. Il peut apparaître aussi à l'issue d'une telle comparaison que la nouvelle modalité de

---

<sup>3</sup> Les seuils définis à l'article R. 543-225 du code de l'environnement sont fixés par l'Arrêté du 12 juillet 2011.

compostage peut être complémentaire ou particulièrement adaptée à une niche fonctionnelle particulière.

Dans la mesure où les difficultés rencontrées actuellement en compostage partagé relèvent des champs techniques, sociaux et économiques, nous avons souhaité développer un nouveau paradigme. Ceci a nécessité de travailler à la fois sur l'invention d'un nouveau modèle de composteur, sur une méthode de compostage partagé particulière et sur un nouveau modèle économique. Pour cette triple innovation, nous avons choisi d'adopter une démarche bioinspirée (ou biomimétique), qui vise à s'inspirer de la nature pour créer des inventions durables dans l'ensemble de leur cycle de vie.

Nous aborderons, pas à pas, dans une première partie la démarche intellectuelle qui a abouti à la création du Compostou.

Dans une seconde partie nous verrons comment cette nouvelle solution de compostage partagé permet de :

- Simplifier les pratiques,
- Limiter les nuisances en s'inspirant de la nature,
- Valoriser le compost sur place,
- Compenser le manque de disponibilité des sources carbonées,
- Faciliter la maintenance,
- Améliorer la formation et l'accompagnement des utilisateurs,
- Eviter la mise en concurrence avec d'autres modes de valorisation des biodéchets,
- Etre économiquement compétitif avec les méthodes actuelles de traitement des OMR (ordures ménagères résiduelles).

Dans une troisième partie, nous présenterons les résultats des analyses techniques, ergonomique et scientifiques réalisées à partir du suivi de 10 Compostous expérimentaux.

Enfin, nous tracerons dans une quatrième partie les perspectives du développement futur de cette innovation, en fonction des potentialités et limites identifiées au cours de la phase de pré-industrialisation du projet Compostou (2017-2020).

# 1. Le compostage partagé, une question d'énergie

## 1.1. Situation du compostage partagé en France et en Région Centre Val de Loire

### 1.1.1. Définition

Le compostage partagé fait partie des dispositifs de gestion de proximité des biodéchets. Il correspond à toutes les opérations de compostage de proximité (pied d'immeuble, quartier, village) dans lesquelles les habitants prennent en charge tout ou partie de l'installation et de la gestion de leur site (ADEME, 2012). Cette pratique fait appel à un fort engagement de bénévoles qui peuvent agir seuls ou en lien avec des professionnels (gardiens d'immeubles, employés municipaux, salariés d'associations...).

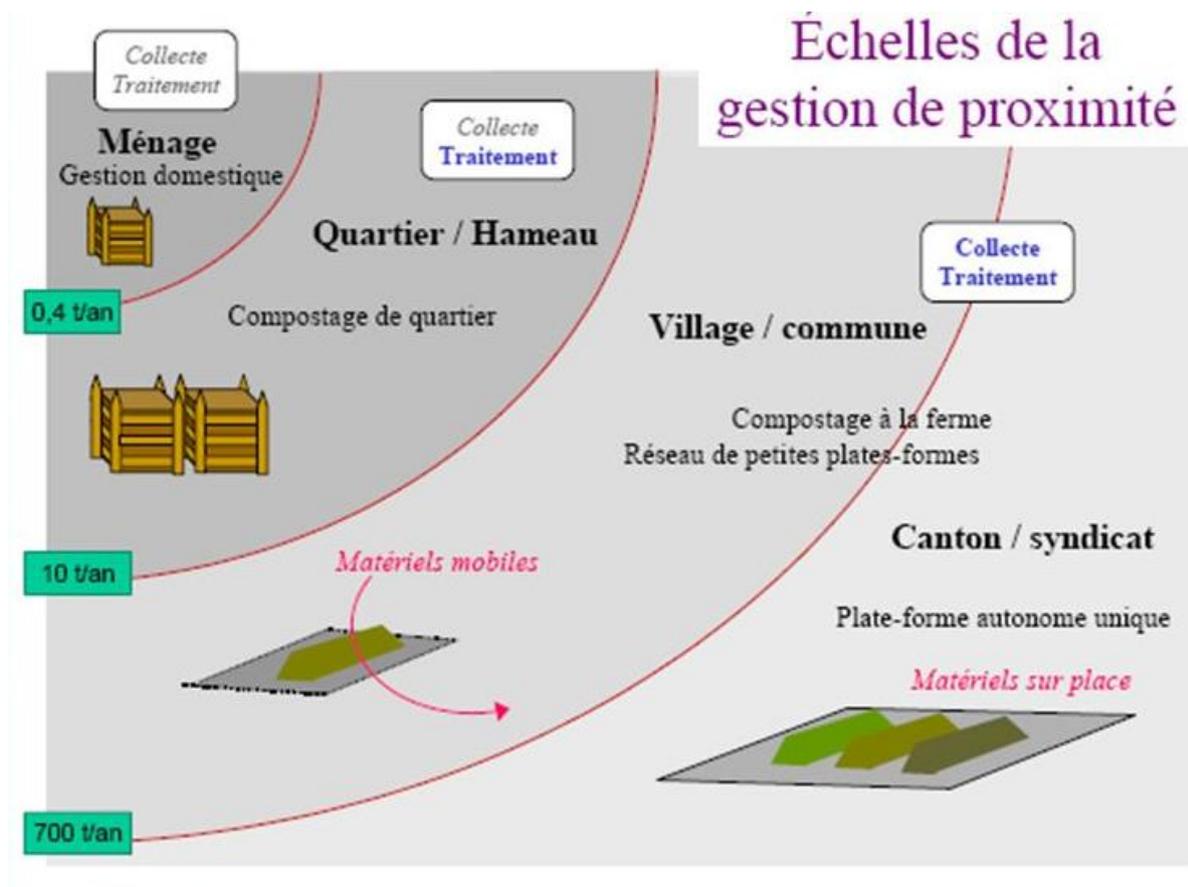


Figure 2: Le compostage à différentes échelles en France (source : ©Pascal Blain/Grand Dole, 2008)

### 1.1.2. Mise en perspective historique

Historiquement, le compostage de proximité a été largement pratiqué dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. A partir de 1876<sup>4</sup>, on crée en France les premières plateformes de compostage collectives officielles, appelées alors « usines de broyage de gadoues » où les habitants, ou du personnel communal, venaient y déposer et y faire broyer des ordures ménagères en mélange. Celles-ci étaient surtout composées de biodéchets et de déchets inertes (tessons de céramique, gravats, verre métal), ce qui rendait possible l'épandage direct des déchets compostés au champs après un criblage minimal et une période de décomposition de quelques mois. Dans la plupart des communes françaises on trouvait aussi des décharges sauvages, souvent en périphérie des habitations, où les déchets organiques pourrissaient au milieu des autres déchets, sans plus de préoccupations. On doit au Dr Beccari la première tentative de rationalisation scientifique du procédé de compostage qui, jusqu'alors, s'effectuait en tas et à l'air libre. Le Dr Beccari invente au début du 20<sup>ème</sup> siècle un procédé de compostage en silos, dits zymothermiques, permettant de transformer les ordures ménagères en amendements agricoles en 2 mois et de collecter les lixiviats en vue de valorisation sous formes d'engrais (Bousquet, 1920). Ce procédé relevant d'une décomposition micro-aérobie, les nuisances occasionnées semblaient importantes, ce qui a conduit à la fermeture de ce type de structure quelques années à peine après leur mise en service<sup>5</sup>. Certaines de ces installations pouvaient néanmoins traiter de 60 à 100 tonnes de déchets par jour.

---

<sup>4</sup> Année de la création de la première usine de broyage de gadoues parisiennes à St Ouen

<sup>5</sup> L'usine zymothermique de la Grange-David, à La Riche (37) a ainsi été construite en 1965 et a été fermée en 1981 en raison des nuisances.

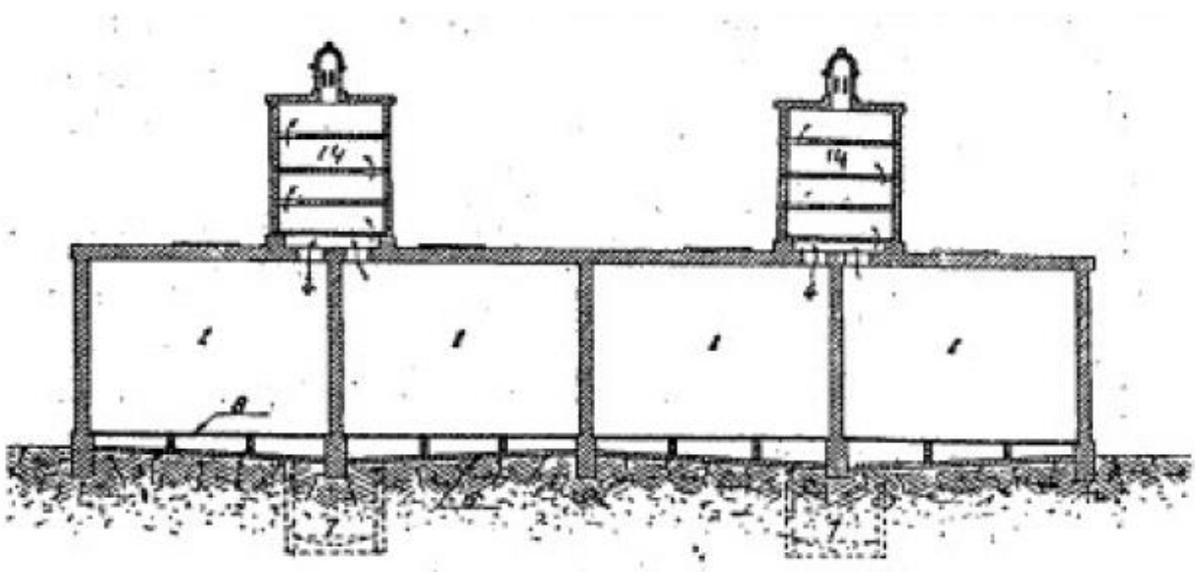


Figure 3 : Plan en coupe de silos zymothermiques du Dr Beccari (illustration originale tirée de Bousquet, 1920).

La situation s'est détériorée progressivement pour le compostage partagé avec :

- L'augmentation des populations urbaines conduisant à une extension des décharges sauvages ;
- La régression de la gestion artisanale et locale des déchets par des chiffonniers, biffins et autres conducteurs de tombereaux d'ordures ;
- La prise d'arrêtés municipaux hygiénistes interdisant les décharges sauvages ;
- La mise sur le marché de plus en plus d'objets en plastique, sans solution proposée pour gérer la fin de vie de ces objets ;
- L'augmentation de la consommation des ménages et donc de leur production de déchets jusqu'en 2000 ;
- La création de centres d'enfouissements officiels et d'incinérateurs gérés au profit d'entreprises industrielles multinationales.

Il faudra attendre l'effondrement de l'agriculture intensive productiviste, le déclin de la société de consommation et l'essor de l'agriculture biologique au début du 21<sup>ème</sup> siècle pour que le compostage partagé regagne du terrain en France. Les techniques les plus utilisées actuellement en compostage partagé proviennent en effet majoritairement du répertoire technique de l'agriculture biologique et/ou traditionnelle.

Alors qu'apparaissent les premiers silos zymothermiques, l'agronome Sir Albert Howard étudie le procédé de compostage Indore dans les colonies britanniques et jette les bases de l'agriculture organique anglo-saxonne (Besson, 2011) :

- Miser sur la résistance naturelle des plantes et des animaux aux maladies ;
- Observer la nature en tant que *fermier et jardinier suprême* ;
- Rejeter les engrais et les pesticides de synthèse, autonomie des exploitations ;
- Rendre les déchets biologiques à la nature pour entretenir la vie des sols ;
- Optimiser l'agriculture sur une base de polyculture-élevage (*Mixed farm*) ;
- Promouvoir une agriculture saine comme facteur de progrès social ;
- Généraliser un modèle de *paysan-chercheur*.

Ses travaux vont durablement ancrer l'idée, chez les tenants d'une agriculture naturelle, qu'il est préférable de se focaliser sur la fertilité de la terre et non sur celle des plantes.

Peu après, en Suisse et en Allemagne, les époux Maria et Hans Müller et le Dr Hans Peter Rusch, popularisent la pratique du mulching auprès des communautés agricoles de culture germanique. Ils créent ainsi un autre courant de l'agriculture biologique, le courant organo-biologique germanique, à qui nous devons la mise au point du compostage de surface (Besson, 2011).

Le japonais Masanabu Fukuoka, considéré comme le précurseur de la permaculture fait lui du paillage la pierre angulaire d'une agriculture sans labour, qualifiée d'agriculture sauvage (Besson, 2011).

En Haute-Provence, à Villecroze, Jean Pain met au point entre 1969 et 1972, une technique de compostage de haute énergie, basée sur l'utilisation de tailles de broussailles. En 1975, Frederik Vanden Brande, qui a rencontré Jean Pain, met en place à Londerzeel en Belgique un chantier expérimental de compostage de rémanents ligneux. En 1978, le Comité Jean Pain International est créé en Belgique, qui œuvre depuis à l'enseignement de différentes méthodes de compostage<sup>6</sup>.

---

6

<http://www.comitejeanpain.be/home/cjp%20fr/presentation/qui%20%C3%A9tait%20jean%20pain1.html>

Perfectionné par le monde agricole, c'est bien par l'agriculture que le compostage partagé revient en France au tournant du 21<sup>ème</sup> siècle<sup>7</sup>. Autour de l'agriculteur Daniel Roux et de la CUMA DEFIS se structure, à partir de 1998, un réseau qui va assurer la collecte et le compostage en andains des biodéchets de la Communauté de Communes du Pays Yonnais, en Vendée. Economiquement très compétitive, cette solution permet alors de collecter et de traiter des déchets organiques des ménages à un coût de seulement 29 euros/tonne. Avec des brassages mécanisés toutes les 3 semaines, le compostage en andain à la ferme permet d'obtenir du compost mûr en 4 à 6 mois, qui est alors utilisé comme amendement par l'exploitant agricole.

Daniel Roux découvre le compostage citoyen, qui mobilise plus directement les habitants, au cours d'une formation auprès du Comité Jean Pain International et fonde avec d'autres personnes l'association vendéenne « Compost Citoyen ». C'est le début d'une avancée décisive qui verra se créer en 2002 une première plateforme de compostage partagé à Saint-Philbert de Bouaine, en réaction à un projet d'ouverture de centre d'enfouissement technique. La plateforme permet de traiter en andains<sup>8</sup> 146 tonnes de biodéchets par an, amenées par 180 utilisateurs (nommés « apporteurs »), encadrés par 30 bénévoles « relais de quartiers ». La création de cette plateforme sera suivie de celles de Dompierre sur Yon (2003), de Grosbreuil et de Les Clouzeaux (2005). Malheureusement, selon des acteurs de cette période, cet élan aurait été stoppé net par les manœuvres des sociétés Onyx, Véolia et du Cabinet Merlin qui auraient convaincu les élus vendéens de construire 2 centres de tri mécano-biologiques<sup>9</sup> sur ce territoire plutôt que de créer 25 plateformes communales de compostage. Entre temps, Daniel Roux fonde en 2003 VALDEFIS, une entreprise spécialisée dans le compostage à la ferme de déchets organiques ménagers, qui emploie aujourd'hui 10 personnes.

En 2007, il entreprend avec ses amis vendéens un voyage d'étude à Gand et à Ostende où il découvre, grâce au Comité Jean Pain, le compostage de quartier, tel qu'il est pratiqué en Belgique. Au retour de ce voyage, les français décident d'expérimenter à Nantes et à la Roche-sur-Yon une nouvelle forme de compostage de proximité : le

---

<sup>7</sup> Les informations qui suivent ont été collectées lors du séminaire des 10 ans du Réseau Compost Citoyen, en octobre 2019.

<sup>8</sup> Bande continue de déchets organiques et de broyat mis à composter.

<sup>9</sup> Installation industrielle broyant les OMR en mélange et séparant la fraction fermentescible en vue de produire soit du compost, soit du méthane. La qualité du compost produit par ces installations très coûteuses est généralement médiocre et leur construction est désormais considérée comme non pertinente.

compostage en pavillon. L'association nantaise Compostri, a développé sur ce principe de nombreux sites de compostage partagé. Avec l'aide de Nantes Métropole, elle gère désormais 210 sites de compostage partagé, en pavillon ou en silos, pour 630 000 habitants et prévoit d'en installer 20 à 40 supplémentaires par an pendant les 3 prochaines années.

Avec Marine Linglard et Michel Mouillé, Daniel Roux fonde le Réseau Compost Citoyen (RCC) en novembre 2008, dont il devient administrateur. Le RCC va rapidement recenser les « bonnes » pratiques de compostage et fixe celles-ci en 2011 à l'occasion de la définition d'un dispositif de formation à la gestion de proximité des biodéchets (GPROX), conjointement avec l'ADEME. Ce dispositif de formation est mis en application à partir de septembre 2014. Nous lui devons la hiérarchisation des rôles en matière d'accompagnement au compostage : Référents de site de compostage, Guides-Composteurs (qu'il est désormais proposé d'appeler guides composteurs pailleurs) et Maître Composteur. En 2015, le RCC organise la première édition de sa semaine nationale du compostage (« Tous au compost ») et embauche en 2016 son premier salarié. Aujourd'hui le RCC compte 240 adhérents, dont plusieurs collectivités, des associations, des entreprises et des particuliers. Ce réseau est le principal interlocuteur des pouvoirs publics sur la question du compostage. Il collabore étroitement avec d'autres ONG : Zero Waste France (ZWF), France Nature Environnement (FNE) et le Réseau de l'Assainissement Ecologique (RAE) qui promeut l'utilisation des toilettes sèches. Ensemble, ces associations tentent de peser sur la réglementation et défendent le compostage de proximité. La prévention et la gestion de proximité des biodéchets fait désormais l'objet d'une certification inscrite au Répertoire National des Certifications Professionnelles<sup>10</sup>. Entre 2013 et 2018, 269 personnes ont été certifiées.

En 2013, le RCC Auvergne-Rhône Alpes (AURA) est créé grâce au soutien financier de l'ADEME et constitue le premier échelon régional du RCC national. Il regroupe à ce jour 89 adhérents dont 19 collectivités. Par la suite vont être créés le RCC Grand Est (2016), le RCC Grande Aquitaine (2017), le RCC PACA (2018), le RCC Occitanie (2018). D'autres échelons régionaux sont à l'étude : RCC Grand Ouest, Hauts de France, Corse. En 2016, le RCC adopte une présidence collégiale. Le RCC évoluera probablement dans les années futures vers une fédération de réseaux régionaux regroupant des acteurs du compostage et du paillage. En cela il se distingue de mouvements comme celui organisé autour de

---

<sup>10</sup> <https://inventaire.ncpc.gouv.fr/fiches/4238/>

ZWF, qui attire davantage les particuliers (plus de 2600 adhérents et 52 groupes locaux pour ZWF, en mars 2019).

En 2014, Daniel Roux créé avec Pascal Retière Compost in Situ, sur l'agglomération nantaise, qui reprend et perfectionne le principe de compostage à la ferme de biodéchets ménagers. Nantes Métropole et Compostri, partenaires de Compost In Situ, annoncent aujourd'hui vouloir mettre en place une collecte de biodéchets en porte-à-porte en vue de valorisation agricole auprès de 1700 habitants. Depuis 2016 une autre structure nantaise s'est spécialisée dans la collecte en porte-à-porte des biodéchets des professionnels : la Tricyclerie. Désormais, la Tricyclerie essaime son modèle et des projets de création de Tricycleries sont en cours à Tours, St Nazaire, Poitiers, Cannes et Bayonne.

Le RCC demandait depuis plusieurs années la rédaction d'un arrêté règlementant le compostage de proximité. C'est chose faite avec l'Arrêté du 9 avril 2018 qui encadre la pratique du compostage partagé et du compostage en établissement. Il prévoit une dispense d'agrément et d'enregistrement de cette activité à condition qu'elle soit réalisée sur place (au point de départ des biodéchets) et pour un usage local (dans l'intercommunalité ou la communauté de communes, et les communes limitrophes). Les matières compostées ont le statut de sous-produits animaux de catégorie 3 au sens du Règlement CE n°1069/2009. La quantité hebdomadaire maximale de déchets de cuisine et de table produite et traitée sur place ne doit pas dépasser 1 tonne. Le compost mûr est destiné à être employé pour un usage local soit par les producteurs des biodéchets soit par l'exploitant du site de compostage<sup>11</sup>, soit par des tiers. L'utilisation de ce compost est interdite sur des pâturages ou des terres destinées à la production de plantes fourragères et l'usage en cultures maraîchères est limité aux cultures de légumes-racines. Ces mesures sont censées prévenir d'éventuelles zoonoses (maladie de la vache folle, tremblante du mouton, ...) et protéger les consommateurs d'organismes pathogènes éventuellement présents dans le compost.

Grâce à la mobilisation de tous ces acteurs, le compostage de proximité est désormais plébiscité par les français. Selon l'enquête nationale sur la gestion domestique des déchets organiques de l'ADEME réalisée en 2008, 25% des foyers

---

<sup>11</sup> L'exploitant désigne une structure ou une personne désignée par elle, formée aux règles de bonnes pratiques du « compostage de proximité » et veillant à leur respect par les utilisateurs. Il peut s'agir d'une collectivité, d'une association accompagnatrice au compostage, d'entreprises indépendantes ou d'établissements disposant de référents de sites de compostage, de guides ou de maîtres composteurs.

français géraient principalement à domicile leurs déchets de cuisine et de table. En 2015, 50% des français interrogés déclaraient pratiquer le compostage de manière individuelle ou collective (ADEME, 2015c). Ils étaient également 46% à avoir entendu parler du compostage partagé.

Toutefois, et paradoxalement, le compostage partagé peine encore à se développer en France : seuls 12% des français interrogés par l'IFOP en 2015 affirmaient avoir accès à un composteur partagé près de chez eux (ADEME, 2015). Il y aurait en France plus de 3000 sites de compostage partagé (Pierre-Jean Glasson, communication personnelle), dont une partie est référencée sur les cartes interactives du Réseau Compost Citoyen<sup>12</sup> et de Zero Waste France<sup>13</sup>. En Région Centre Val-de-Loire, le compostage partagé est une pratique qui reste marginale (environ 230 composteurs partagés recensés en 2017 par l'ADEME (ADEME-SINOE, 2019). Pourtant le gisement régional de biodéchets est très conséquent. Il s'élèverait à 477 832 t/an dont 174 590 t/an pour les seuls biodéchets en mélange dans les OMR (ADEME-SINOE, 2019).

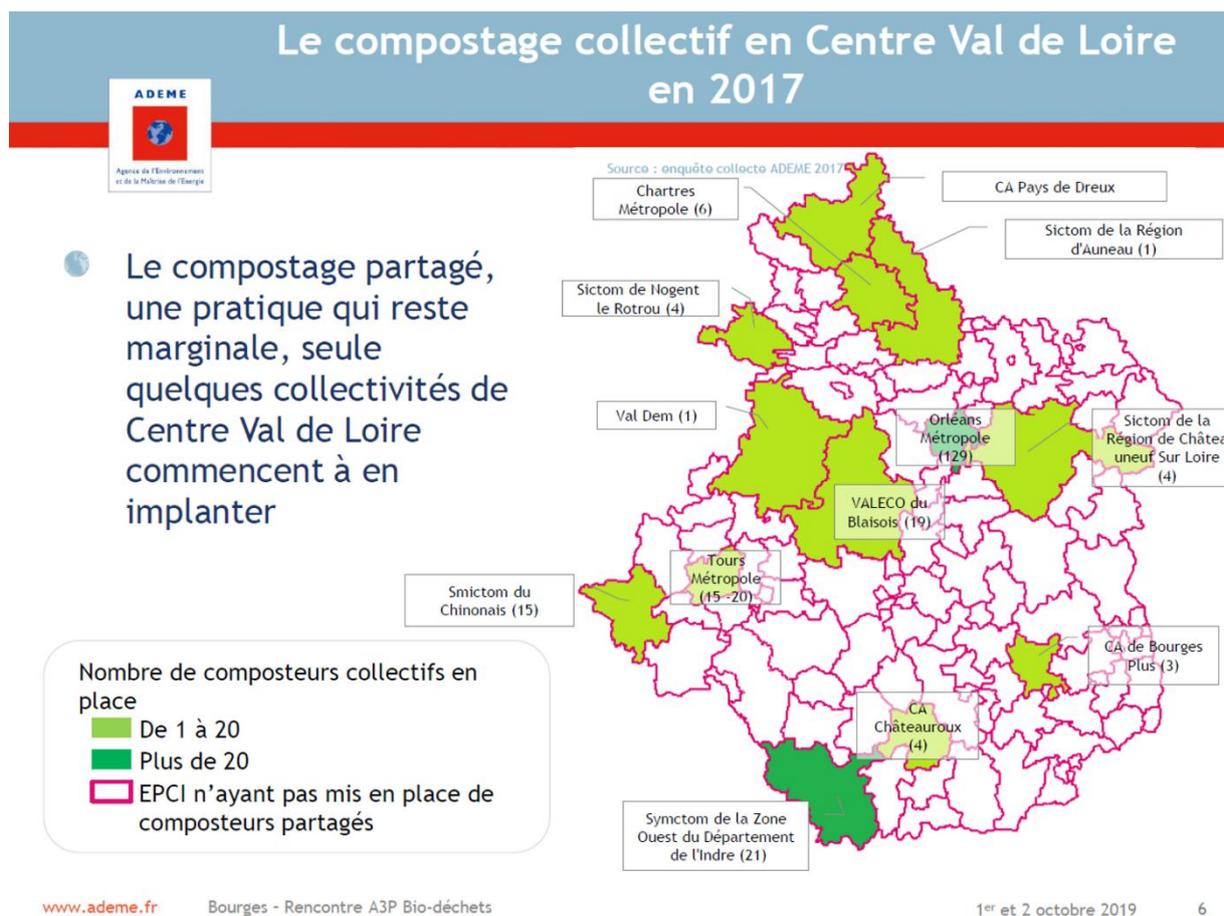


Figure 4: Le compostage partagé en Indre-et-Loire en 2017 (tiré de ADEME-SINOE, 2017)

<sup>12</sup> <https://lesactivateurs.org/geo-compost/>

<sup>13</sup> <http://jeuxmonbacbio.org/agir/>

Les faits que deux multinationales françaises (Véolia et Suez) soient les leaders mondiaux du traitement de l'eau et des déchets et que l'industrie agro-alimentaire soit le premier employeur industriel de notre pays ne sont probablement pas étrangers au retard politique pris par la France en matière de compostage de proximité. Partout ou presque, les acteurs de terrain gaspillent une énergie considérable à convaincre les élus de favoriser la gestion de proximité des biodéchets et de ne pas succomber à une technophilie dispendieuse pour le traitement des ordures ménagères. L'Indre-et-Loire est exemplaire en la matière car depuis 120 ans, elle n'a connu qu'une succession de solutions industrielles coûteuses dont la durée d'utilisation n'a quasiment jamais dépassé la période d'amortissement. Les accompagnateurs au compostage doivent également composer avec une puissante industrie agro-alimentaire qui inonde le marché de produits transformés, traités, emballés, étiquetés, et avec des distributeurs adeptes du « prêt à jeter », autant de processus de masse qui ne sont pas sans conséquence sur le fonctionnement des sites de compostage collectifs et sur la qualité des gisements de biodéchets des ménages. Néanmoins, l'adoption récente de la Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte et la transcription récente de ses objectifs dans les Plans Régionaux de Prévention et de Gestion des Déchets ouvrent un nouveau chapitre encourageant de notre longue et chaotique relation aux déchets. L'âge du compost serait-il enfin revenu ?

## 1.2. Bases scientifiques du compostage de haute énergie

Nous proposons de désigner par l'expression de « compostage de haute énergie », la méthode de compostage de proximité la plus répandue en France et dont la mise en œuvre est notamment recommandée par l'ADEME et le RCC. Cette désignation nous semble scientifiquement plus précise que l'appellation habituelle de compostage « chaud », qui ne rend qu'imparfaitement compte des processus thermodynamiques à l'œuvre dans ce type de compostage.

En effet, l'adjectif « chaud » renvoie uniquement à la phase de la décomposition de la matière organique pendant laquelle a lieu un dégagement de chaleur important. La température peut alors monter à plus de 50°C, voire 60°C en raison d'une activité bactérienne aérobie, intense et confinée, qui transforme les matières fermentescibles rapidement métabolisables (sucres, lipides et acides aminés) en divers acides

organiques. De l'eau métabolique et du CO<sub>2</sub> résultent des complexes réactions biochimiques qui sont alors à l'œuvre au sein du compost. L'expression « compostage chaud » suggère aussi qu'un composteur chaud pourrait l'être en permanence. Or, sans apports réguliers ni brassages supplémentaires, cette phase ne dure pas plus de 2 à 3 semaines, de sorte qu'un composteur fonctionnant « à chaud » peut très vite refroidir et ne plus connaître de montée en température jusqu'à la fin de la maturation du compost. De plus, même lorsqu'une forte montée en température se produit et se prolonge, toute la masse de compost d'un composteur « chaud » n'est pas forcément partout à la même température. Les biodéchets situés près des parois ou en surface sont souvent plus secs, tandis que ceux en profondeur sont souvent plus humides, ce qui induit des écarts de température qui peuvent être significatifs entre les différentes strates du compost. Cette hétérogénéité thermique jette d'ailleurs un sérieux doute sur la capacité d'un composteur « chaud » domestique ou partagé à éliminer les organismes microbiens pathogènes et les graines d'adventices grâce à la chaleur qu'il produit (nous y reviendrons).

L'expression « compostage de haute énergie » renvoie quant à elle à l'ensemble du bilan énergétique nécessaire à l'évolution du système biodéchets/broyat/organismes vers l'état plus stable que représente le compost mature. Le compostage de haute énergie consomme et produit en effet beaucoup d'énergie pour la production de compost.

L'énergie consommée inclut :

- De l'énergie consommée pour produire le broyat de branches, qui est un cofacteur non indispensable à la réaction de compostage<sup>14</sup> ;
- De l'énergie initialement stockée dans la biomasse primaire (biodéchets et broyat) ;
- De l'énergie consommée par les organismes pour la décomposition des biodéchets ;
- De l'énergie consommée par les organismes pour la décomposition du broyat ;
- De l'énergie consommée par les utilisateurs et leurs accompagnateurs pour contrôler les conditions d'oxygénation, d'humidité et de température du compost en formation et pour faire évoluer ce système dans la direction recherchée ;
- De l'énergie consommée pour cribler le compost après maturation et vider le bac de maturation.

---

<sup>14</sup> Il est très utile pour optimiser la réaction et limiter les nuisances mais n'est pas indispensable à « la décomposition de matières organiques en présence d'air et d'eau ».

Cette méthode de compostage produit également :

- De l'énergie dispersée sous la forme d'une émission de chaleur importante due à l'activité biologique microbienne. Cette émission de chaleur peut être redéfinie comme un transfert d'agitation thermique sous la forme de l'émission d'une certaine quantité d'énergie entre les organismes et leur milieu à partir de la décomposition des biodéchets et du broyat ;
- De l'énergie stockée sous forme de biomasse secondaire, qui est perdue par le système lorsque les animaux quittent le composteur ;
- De l'énergie résiduelle stockée sous forme d'oligomères et de monomères issus de la décomposition de la nécromasse, qui sert de source d'énergie pour les micro-organismes.

Selon l'échelle de compostage considérée, l'énergie consommée par le compostage de haute énergie provient essentiellement de la vie microbienne (micro-organismes décomposeurs), de végétaux (biodéchets, broyat), d'animaux (animaux décomposeurs, êtres humains), de l'industrie nucléaire (composteurs électro-rotatifs à alimentation électrique<sup>15</sup>) et/ou de sources d'énergie fossiles (compostage mécanisé sur plateformes collectives).

A notre connaissance, il n'existe pas encore d'image thermique d'un composteur partagé de haute énergie et peu d'informations sont disponibles sur la façon dont se met en place sa zone thermogène<sup>16</sup>. Les relevés de température que nous avons effectués à différentes profondeurs à l'aplomb de la trappe d'ouverture d'un composteur chaud partagé suggèrent néanmoins au moins deux conformations de la zone thermogène : au pic de l'émission de chaleur, celle-ci peut prendre l'apparence d'un « cœur chaud » plus ou moins sphérique, pouvant varier de 15 à 40 cm de diamètre environ pour un composteur de 620 L. Après ce pic de température, la zone thermogène semble plus aplatie, formant une sorte de « nappe chaude » qui peut se trouver de 3 à 20 cm sous la surface du compost en formation. Pour ces raisons, nous prenons toujours la température à deux hauteurs différentes (10 et 20 cm depuis la surface) et à l'aplomb du centre de l'ouverture du composteur (là où les utilisateurs laissent souvent leurs biodéchets), afin d'être sûrs de sonder la zone thermogène quelle que soit sa configuration. Le confinement de la matière organique et des micro-organismes joue un rôle important en compostage de haute énergie. Afin que la chaleur ne se dissipe pas et

---

<sup>15</sup> En 2019 en France, la production d'électricité est à 73% d'origine nucléaire selon RTE-France (<https://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-mix-energetique>)

<sup>16</sup> Voir à ce sujet les sources citées dans le mémoire de Faessler (2001) et de Finstein et al. (1986).

que la vapeur d'eau puisse se condenser sur les parois du composteur, celui-ci doit rester fermé en permanence. Ceci permet également d'éviter que la pluie pénètre à l'intérieur. Sur la plupart des modèles commerciaux, les parois présentent quelques perforations, afin de garantir un minimum de renouvellement d'air et réguler la chaleur.

Il est classiquement rappelé que le compostage de haute énergie repose sur trois règles d'or qu'il convient de respecter, afin de favoriser l'activité des micro-organismes aérobies décomposeurs (Pépin, 2013):

- Oxygéner le compost ;
- Contrôler le taux d'humidité du compost ;
- Équilibrer le ratio carbone-azote dans les apports.

Par analogie avec le triangle du feu, il est possible de concevoir aussi le compostage de haute énergie comme résultant d'un équilibre entre 3 composantes :

- Les micro-organismes (la source de chaleur) ;
- L'oxygène (le comburant) ;
- La matière organique (le combustible).

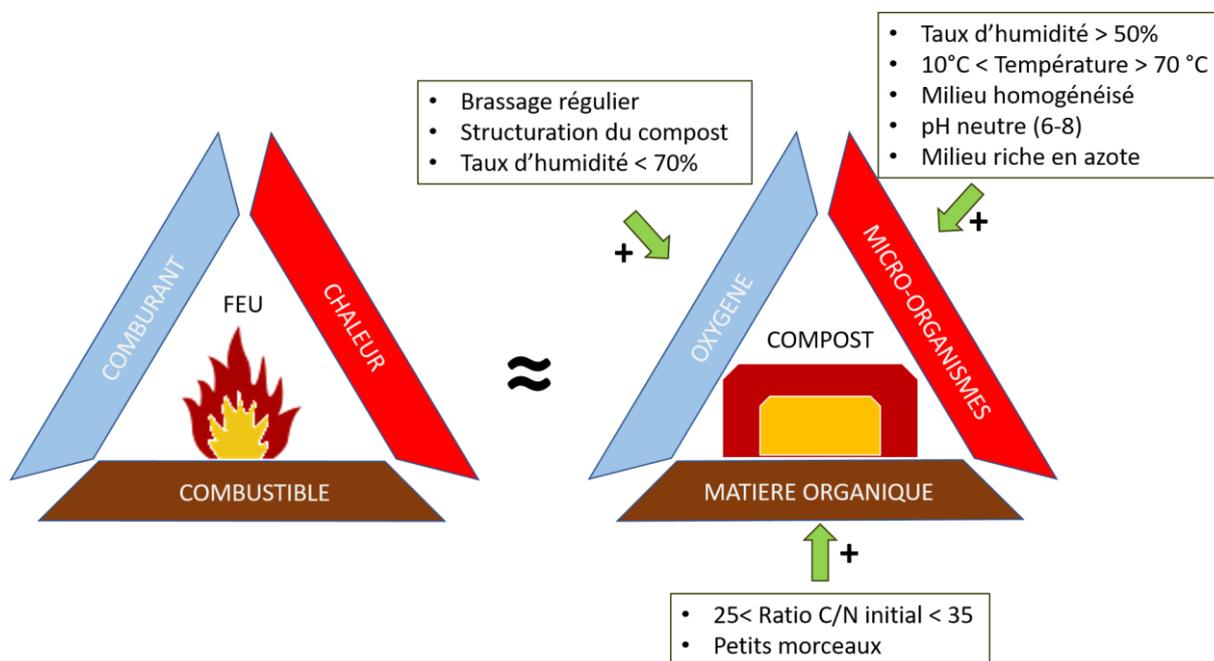


Figure 5: Triangle du compostage de haute énergie, par analogie avec le triangle du feu

### 1.2.1. Les micro-organismes, sources de chaleur

Les bactéries aérobies qui décomposent les biodéchets, premier maillon du réseau trophique du composteur, proviennent du sol ou sont apportées avec les biodéchets et le broyat. Elles ont besoin d'oxygène et d'eau en quantité raisonnable pour se développer. Dans un compost trop sec (<35% de taux d'humidité), les bactéries aérobies ne peuvent quasiment pas se développer seules. Dans un compost trop humide (plus de 75% de taux d'humidité par exemple), l'eau remplit les espaces lacunaires et favorise le développement des bactéries anaérobies méthanogènes acétoclastes ou sulfato-réductrices, respectivement responsables de la production de méthane ou de sulfure d'hydrogène. Notons qu'en théorie, ces deux types de bactéries anaérobies sont en compétition pour l'acide acétique, de sorte qu'en conditions aérobies dégradées (plus faible teneur en oxygène à certains endroits), leurs productions de méthane et de sulfure d'hydrogène devraient être mutuellement exclusives (Boivin, 2010). Produire un peu de méthane pourrait donc prévenir l'apparition d'une éventuelle source de nuisance et de dommages<sup>17</sup>. Produire un peu de sulfure d'hydrogène réduirait à l'inverse la production d'un important gaz à effet de serre. Composter en conditions aérobies évite la production de ces deux gaz, mais génère du CO<sub>2</sub> et de la vapeur d'eau.

Pour se développer de manière optimale, les micro-organismes ont donc besoin que le taux d'humidité soit supérieur à 50% mais inférieur à 70%. D'autres conditions favorables sont requises : une température supérieure à 10°C et inférieure à 70°C, un pH neutre compris entre 6 et 8 unités pH et un milieu homogène riche en azote qui fournira aux bactéries une indispensable source de substances protéiques.

Lorsque ces conditions sont réunies, les micro-organismes transforment profondément leur milieu de vie. Ainsi les bactéries assurent les principales réactions biochimiques suivantes dans le compost :

- Nitrification: oxydation de NH<sub>4</sub> en NO<sub>2</sub> ;
- Dénitrification: réduction des nitrates (NO<sub>3</sub>) en azote gazeux (N<sub>2</sub>) ;
- Fixation d'azote atmosphérique ;
- Réduction des sulfates en sulfures ;
- Oxydation des sulfures en sulfates ;

---

<sup>17</sup> Le sulfure d'hydrogène est un gaz irritant et potentiellement mortel à haute concentration.

- Réduction du fer ferrique en fer ferreux ;
- Oxydation du fer ferreux en fer ferrique.

Trois étapes peuvent être distinguées et suivies en mesurant l'évolution du pH (Faessler, 2001) :

- Acidogénèse : formation d'acides organiques éventuellement responsables de mauvaises odeurs. Le pH chute jusqu'à 5,5 ou 6 ;
- Ammonification : les bactéries produisent de l'ammoniac qui fait remonter le pH à 8 voire 9 ;
- Stabilisation : l'ammoniac se volatilise et l'azote est utilisé par les micro-organismes pour synthétiser des substances humiques. Le pH se stabilise à une valeur proche de la neutralité (pH 7).

A la fin de ces trois étapes, les actinomycètes décomposent la lignine et forment des substances humiques<sup>18</sup>. Les champignons agissent eux dans les premières phases de la décomposition de la biomasse primaire et de la nécromasse.

Au cours du processus de compostage, l'activité métabolique des bactéries agit donc sur des matières organiques fraîches et, en présence d'oxygène, produit des molécules organiques stabilisées, du CO<sub>2</sub>, de l'eau et de l'énergie qui est dissipée à 90% par la formation de chaleur latente de vaporisation (Finstein *et al.*, 1986). A des températures supérieures à 55-60°C, la production de chaleur est progressivement stoppée car ces températures deviennent défavorables à la survie bactérienne.

### 1.2.2. L'oxygène, le comburant

En compostage partagé et de haute énergie, l'oxygénation du compost est assurée activement par les utilisateurs. Ils sont invités à effectuer des brassages profonds (sur 20 à 25 cm) et réguliers à chaque apport de biodéchets. En complément, il est préconisé d'effectuer des retournements complets de tas, tous les 3 mois environ et avant chaque mise en maturation du compost. En compostage de haute énergie et sur plateformes collectives, l'oxygénation peut être assurée par brassage mécanique à l'aide d'un retourneur d'andains (comme par exemple à la plateforme de compostage collectif de

---

<sup>18</sup> Ceci n'est qu'une des quatre voies supposées aboutissant à la formation des substances humiques (Mouloubou, 2015).

Saint-Philbert de Bouaine) et/ou par un réseau de tuyaux aérateurs, utilisés pour injecter de l'oxygène dans le compost et parfois pour en aspirer le méthane (comme par exemple sur la plateforme de compostage de Recology, à San Francisco).

Une aération passive du compost peut être obtenue en utilisant un broyat très structurant, idéalement constitué d'éclats de bois de 2 à 7 cm de longueur sur 1 à 3 cm de largeur. Les autres matières sèches et carbonées utilisables en compostage (feuilles mortes, paille, carton non imprimé, aiguille de pin...) sont moins susceptibles de jouer ce rôle structurant et ne devraient être utilisées qu'en complément d'un broyat de qualité.

En compostage de haute énergie, l'intervalle de taux d'humidité garantissant un bon développement des micro-organismes et une oxygénation suffisante du compost se situe généralement entre 50 et 70% d'humidité dans la masse du compost brut. Afin de contrôler ce taux d'humidité, il est recommandé de procéder régulièrement au « test de la poignée ». Selon cette méthode simple, l'utilisateur doit serrer fortement une poignée de compost en formation. S'il constate :

- Que du liquide coule en abondance, le compost est trop humide. Il faudra alors rajouter de la matière sèche dans le composteur ;
- Que la poignée de compost s'effrite, le compost est trop sec. Il faudra rajouter de l'eau dans le composteur ;
- Que la poignée de compost forme une boule malléable, semblable à de la pâte à modeler et qu'un peu d'humidité perle entre les doigts, le compost a un taux d'humidité correct.

L'air introduit dans le compost ne sert pas qu'à assurer la survie des organismes aérobies. Sa principale fonction est en fait de réguler la chaleur du compost, dont une montée en température excessive conduirait à un effondrement des populations de bactéries thermophiles. On estime que la régulation aérienne de la chaleur nécessite un volume d'air 3 à 9 fois supérieur au volume permettant une oxygénation correcte du compost (Finstein et al., 1986 ; Faessler, 2001). L'évacuation de l'énergie reposant pour beaucoup sur la vaporisation de l'eau et son transport par l'air, l'humidité du compost est aussi un paramètre clé de la régulation thermique du compostage de haute énergie.

### 1.2.3. La matière organique, le combustible

La matière organique issue des biodéchets et du broyat fournit les éléments nutritifs nécessaires à la croissance microbienne. En particulier, elle contient de l'azote,

source de protéines et du carbone, source d'énergie, dont les micro-organismes ont besoin pour leur croissance et leur développement. Afin d'aboutir à la production d'un compost de qualité agronomique suffisante, la matière organique doit contenir une quantité minimale de carbone et une quantité maximale d'azote. Une fraction du carbone provient de la matière organique soluble (sève, liquides vacuolaires, jus et autres liquides biologiques) et une autre fraction vient de la matière organique insoluble (lignine, cutine, cellulose, hémicellulose, coquilles calcaires, os, carapaces...). Ce carbone organique est lui-même issu de la fixation de CO<sub>2</sub> atmosphérique par les plantes, au cours du processus de photosynthèse. L'azote provient de l'azote organique, constitué de biomolécules azotées et de l'azote minéral (sous formes d'azote uréique, d'azote ammoniacal et d'azote nitrique), lui-même issu de la décomposition de biomolécules azotées (protéines notamment). La norme NF U 44-051 fixe une valeur seuil d'au moins 20 % de matière organique et une teneur limite en azote total de 3% dans le compost brut mature pour un compost de biodéchets fermentescibles alimentaires et/ou ménagers.

Elle impose aussi un ratio carbone/azote (appelé aussi rapport C/N) supérieur à 8. Pour que ce ratio soit respecté, il faut par exemple que le pourcentage en azote total n'excède pas 2,5%, si le pourcentage en carbone total n'est que de 20% ( $20/2,5 = 8$ ). Afin d'obtenir, en fin de processus de compostage, un rapport C/N proche de celui d'un humus forestier (rapport C/N de 10 environ), il est nécessaire d'avoir en début de processus, un pourcentage nettement plus élevé en carbone dans les apports en matière organique, ou une teneur beaucoup plus faible en azote. Un ratio C/N compris entre 25 et 35 par exemple, permet ainsi d'obtenir un rapport C/N de 10 après compostage. La perte de carbone au cours du processus de compostage s'explique par une émission de carbone sous forme gazeuse (phénomènes de respiration hétérotrophe produisant du dioxyde de carbone et fermentation anaérobie conduisant à la production de méthane) et par le lessivage due aux intempéries (phénomène de lixiviation). Seule une partie du carbone restera dans le compost sous forme de carbone organique résiduel ou sera minéralisée sous forme de substances humiques (phénomène d'humification permettant de restituer du carbone au sol). Une partie de cette dernière fraction, de faible masse moléculaire (acides fulviques) est directement assimilable par les plantes.

Pour obtenir en début de compostage un rapport C/N compris entre 25 et 35, il est nécessaire d'équilibrer les apports de biodéchets, riches en matières azotées, par du

broyat de branches, riche en matières carbonées. Par exemple, pour 2 volumes de restes de cuisine qui auraient un ratio C/N égal à 12, il conviendrait d'apporter en compostage de haute énergie 1 volume de broyat de branches ayant un C/N égal à 70 car :

$$2 \text{ volume de restes de légumes (C/N = 12)} + 1 \text{ volume de branches broyées (C/N = 70)}$$

$$\text{C/N du mélange} = \frac{2 \times 12 + 1 \times 70}{2 + 1} = \frac{94}{3} = 31$$

Figure 6: Formule conduisant à équilibrer le compost issu de biodéchets riches en azote par du broyat de branches riche en carbone (adapté du support de la formation Référent de site de compostage, IUT de Tours, 2019).

Ajouter du broyat de branches aux biodéchets permet donc d'équilibrer le rapport C/N du compost.

### 1.3. Avantages du compostage de haute énergie

Lorsque toutes les conditions sont réunies, le compostage de haute énergie permet aux bactéries aérobies de décomposer la matière organique tout en émettant une quantité importante de chaleur.

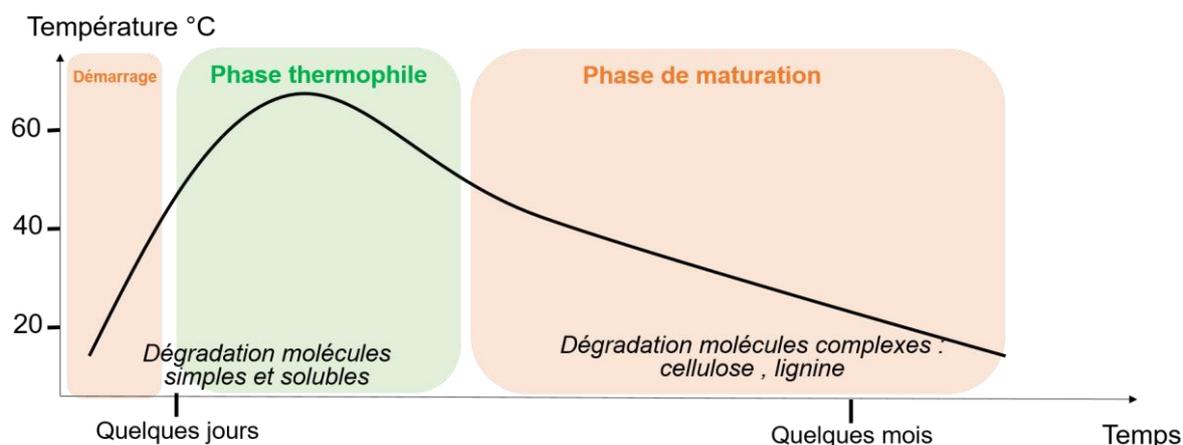


Figure 7: Courbe de température théorique attendue en compostage de haute énergie

La dégradation des molécules simples et solubles démarre dès les premiers apports de matière organique et s'intensifie lorsque le pic de chaleur est atteint. Les molécules plus complexes sont décomposées secondairement, par les champignons et les animaux du composteur notamment, lorsque la température diminue. S'il est bien maîtrisé, le compostage de haute énergie permet donc une décomposition relativement rapide de la matière organique, y compris des matières les plus dures, par une sorte d'effet cuisson (Pépin, 2013). Le broyat étant presque complètement décomposé lors du procédé, la quantité de compost produite peut être importante. Une étude menée sur des sites de compostage parisiens entre 2010 et 2015 a montré que la dernière année du suivi, la production de compost atteignait jusqu'à 75% des tonnages de biodéchets entrants (593 tonnes de compost produit pour près de 800 tonnes de biodéchets apportés) (Bouin *et al.*, 2017). Huit à douze mois sont généralement nécessaires pour produire un compost mûr.

La chaleur émise permettrait d'accélérer la décomposition de la matière organique, d'hygiéniser le compost et de réduire la viabilité des graines d'adventices présentes dans le compost. Les œufs d'invertébrés peuvent être facilement détruits, limitant la prévalence d'organismes indésirables (parasites de plantes, ravageurs) et/ou phytopathogènes dans le compost.

Reposant avant tout sur l'action de micro-organismes, le compostage de haute énergie peut se pratiquer sur surfaces artificialisées, voire en bioréacteurs (composteurs rotatifs, thermocomposteurs) dans lesquels les conditions d'humidité et d'oxygénation sont maîtrisées. A l'aide de circuits d'eau installés dans un composteur de haute énergie, il est possible de récupérer une partie de la chaleur émise en vue de préchauffer l'eau d'un ballon d'eau chaude, par exemple. La chaleur dégagée par un composteur placé sous serre peut aussi servir à la levée précoce de semis de tomates en plaques, qui pourront être disposées directement dessus<sup>19</sup>.

Le compostage de haute énergie bénéficie d'un fort soutien institutionnel. Il est enseigné systématiquement comme méthode de compostage de référence dans les formations du référentiel GPROX de l'ADEME (Réfèrent de site, Guide-Composteur, Maître-composteur). Sa pratique s'est beaucoup démocratisée et s'adresse désormais à un large public.

---

<sup>19</sup> A voir par exemple dans certaines vidéos de Pascal Poot, sur la sélection de plants de tomate résistants à la sécheresse.

## 1.4. Analyse critique du compostage partagé de haute énergie

### 1.4.1. De la difficulté de créer et de contrôler le désordre

Le contrôle des paramètres d'oxygénation, d'humidité et de qualité des apports donne à première vue l'impression qu'un état d'équilibre stable doit être recherché pour la production d'un compost homogène et de bonne qualité sanitaire et agronomique. En réalité c'est tout l'inverse : ce contrôle a pour objectif de faciliter la décomposition de la matière organique, donc d'augmenter son état de désordre, également appelé entropie. En compostage de haute énergie, l'entropie du compost en formation augmente d'autant plus que la décomposition s'accompagne d'un important transfert d'agitation thermique, sous la forme d'une émission de chaleur prolongée. Si on la laisse évoluer spontanément, l'entropie de ce système s'effondre, comme un feu qui s'éteindrait faute de comburant, de combustible ou de source de chaleur suffisante pour entretenir les flammes.

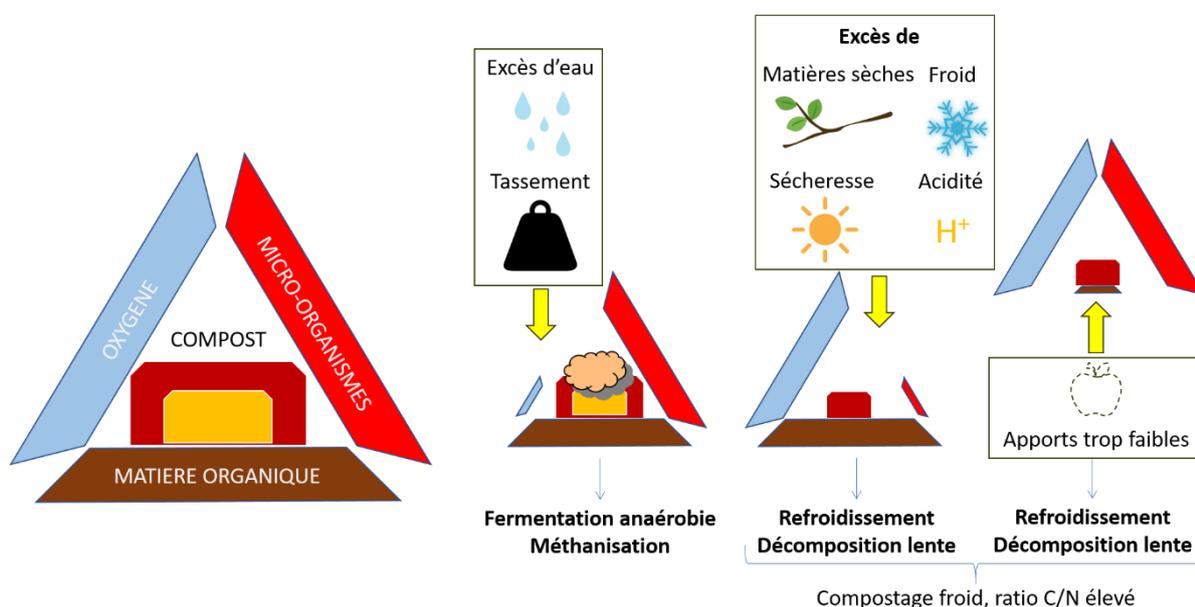


Figure 8: Dysfonctionnements possibles du triangle du compostage de haute énergie

Certains facteurs s'opposent en effet systématiquement à l'augmentation de l'entropie du compost en formation en impactant l'une des 3 composantes clés du triangle du compostage de haute énergie :

- Un excès d'eau ou un tassement excessif<sup>20</sup> réduisent la porosité et entraînent la formation de poches anaérobies au sein du compost, propices à une fermentation méthanogène ou à la production de sulfure d'hydrogène ;
- Un excès de matières sèches, une gelée, une évaporation excessive due à un épisode de sécheresse (ou à un composteur trop ajouré, comme le sont souvent les composteurs fabriqués en palettes) ou une acidification du compost peuvent nuire au développement microbien. Une chute de la température du compost et un ralentissement de la décomposition (mesurable soit par une remontée du ratio C/N due à un déficit dans la décomposition et l'assimilation des déchets azotés, soit par une baisse du ratio C/N, causée par une diminution de la décomposition des déchets carbonés) peuvent alors être observés ;
- Des apports en quantités trop faibles ou trop irrégulières privent les micro-organismes des nutriments nécessaires à leur survie. La perte de masse au cours du compostage réduit la capacité du compost à stocker la chaleur (Oudart, D., 2013). Le compost refroidit et la décomposition ralentit également.

Tout l'art de pratiquer le compostage de haute énergie est donc d'entretenir activement un état d'équilibre instable, de créer et de contrôler le désordre au sein de son composteur. Cette nécessité de contrôler et d'intervenir régulièrement dans le composteur est relativement énergivore. Pour utiliser une autre analogie, le compostage de haute énergie présente des similitudes avec les méthodes maraîchères, arboricoles, aquacoles ou apicoles intensives, qui nécessitent une forte consommation d'énergie et différentes catégories d'intrants pour atteindre des niveaux de productivité primaires ou secondaires élevés.

#### 1.4.2. Compostage de haute énergie et biodiversité

---

<sup>20</sup> En compostage de haute énergie, le volume du compost subit une réduction de volume importante qui peut atteindre sans problème 30 à 50% du volume et 40 à 60% de la masse des biodéchets et du broyat initialement mélangés. Dans le cas des déchets verts, la réduction de volume va de 85 à 90 % et la diminution de leur poids est de 65 à 70 % après compostage (AMORCE, 2006). La réduction de volume résulte d'une perte de masse et de structure de la matière organique en décomposition. L'émission de CO<sub>2</sub>, l'évaporation de l'eau et la percolation des lixiviats constituent les autres sources de réduction du volume du compost.

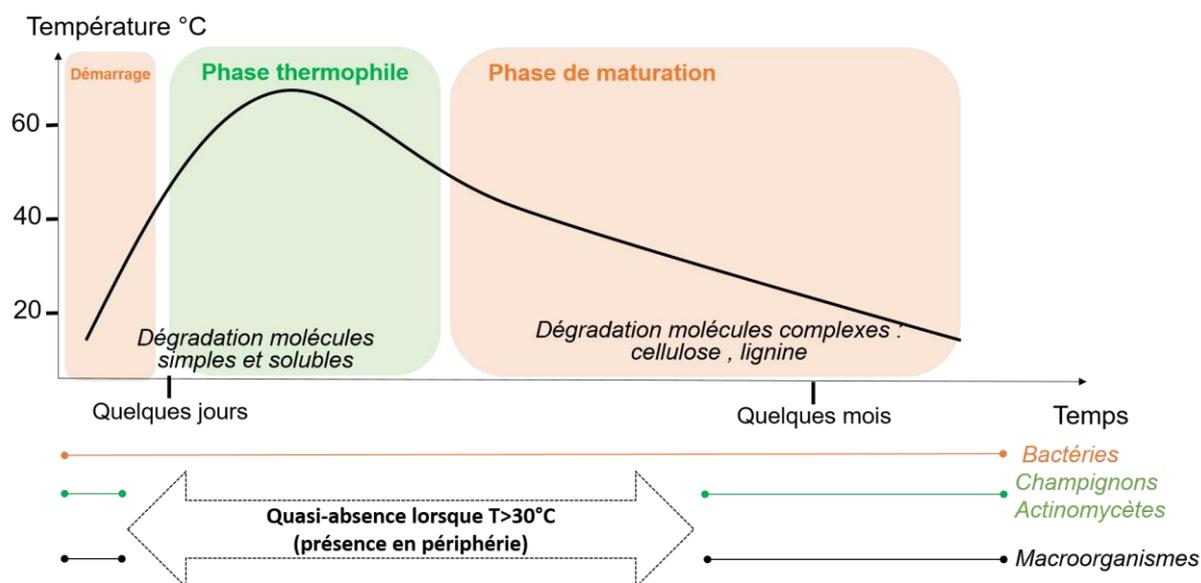


Figure 9: Schéma représentant l'influence supposée de la température du compost sur la présence de diverses catégories d'organismes.

Auprès du grand public, les accompagnateurs au compostage partagé et les éducateurs à l'environnement mettent souvent l'accent sur la présence d'animaux du sol dans le compost. Leur rôle écologique dans le compostage de haute énergie est présenté comme important pour la décomposition des biodéchets. Cette communication vise à présenter le compostage comme un processus naturel, une pratique écologique respectueuse de la biodiversité. Il s'agit pourtant d'une véritable construction socio-technique qui évacue dans les faits, bien des considérations éthiques quant au bien-être animal.

En compostage de haute énergie, le respect des animaux est en effet secondaire car leur rôle est secondaire : lorsqu'il s'agit d'aérer un tas de compost compact et trop humide par exemple, la fourche ne se détourne pas de la masse grouillante de vers. Elle brasse dans le tas. Elle coupe, tranche et écrase. Dans les pratiques de compostage hors-sol les plus mécanisées (plateformes collectives, composteurs électro-rotatifs), l'animal est tout simplement exclu du processus de compostage au profit des seules bactéries. Cette vision utilitariste de la faune des composteurs est particulièrement frappante lorsqu'est évoquée avec des techniciens la question de la faune, qui est scindée en faune dite « utile » (acariens, nématodes, annélides, cloportes, cétoine dorée, ...) et en faune dite « nuisible » (mouches et moucheron, rongeurs, ...). Le cas de la mouche-soldat ne semble pas encore tout à fait tranché au sein de la communauté des accompagnateurs : excellent décomposeur de biodéchets, elle présenterait en effet l'inconvénient d'être

trop prolifique et est accusée d'acidifier le milieu au détriment des vers de terre. Un animal difficile à contrôler, donc sous surveillance.

Un autre inconvénient important du compostage de haute énergie est qu'il ne mobilise à tout moment qu'une petite fraction de la biodiversité exploitable pour la dégradation des biodéchets. La montée en température et l'humidité relativement élevée excluent en effet les espèces psychrophiles ou mésophiles, qui n'apprécient pas les températures élevées, et les espèces xérophiles, qui n'apprécient pas l'humidité. Seules survivent les bactéries thermophiles pendant le pic de température. Ainsi, les bactéries, champignons et actinomycètes mésophiles sont détruits dans la zone thermogène et ne peuvent persister qu'en périphérie de celle-ci. Les macroorganismes fuient également le compost lorsque les températures dépassent les 40°C. En particulier, le retour des vers épigés, tels que les vers de terre, peut être très long après un pic de température (Pépin, 2013). Les brassages profonds et réguliers nécessaires au compostage de haute énergie perturbent les arthropodes sociaux (fourmis) ou grégaires (cloportes, forficules), dont les jeunes sont hautement altriciels. Ils compromettent la survie des larves de coléoptères fouisseuses dont le temps de développement dans le compost peut être très long. Dans le cas du coléoptère saproxylophage *Oryctes nasicornis* (« rhynocéros »), 2 à 3 ans sont généralement nécessaires aux larves pour compléter leur développement dans du compost, ainsi qu'une période de diapause de 2 à 3 mois à une température de 5 à 15°C. Les composteurs de haute énergie favorisent la survie des espèces solitaires à cycles de vie courts appréciant les substrats humides, comme des mollusques (limaces, escargots), ou chauds et humides comme certains insectes (drosophiles, mouches-soldats, cafards, ...). Le compostage de haute énergie favorise aussi les espèces solitaires exerçant une pression de sélection importante sur le reste de la zoocénose par prédation opportuniste ou parasitisme (myriapodes, acariens). La chaleur et l'humidité peuvent aussi favoriser la présence de champignons et de bactéries entomopathogènes. Le tamisage et le transfert du compost mature hors du site de compostage perturbent l'équilibre de cet écosystème en affaiblissant la diversité génétique et la diversité spécifique. Ces pratiques imposent des goulets d'étranglement génétique aux espèces survivant dans la petite quantité de compost restée sur place, qui débouchent généralement sur des phénomènes de dérive génétique et d'effondrement brutal de populations d'espèces. Elles empêchent ainsi l'établissement d'interactions durables au sein de la communauté d'organismes qui occupe le composteur. Si la

biodiversité peut évidemment recoloniser un composteur après chaque transfert de compost, elle sera probablement moins riche, diversifiée et résiliente qu'au sein d'une communauté qui n'aurait pas été perturbée pendant plusieurs années.

Le compostage de haute énergie est difficilement compatible avec les mélanges de micro-organismes « efficaces » (EM) utilisés en fermentation Bokashi. En effet ces micro-organismes mésophiles<sup>21</sup> et anaérobies qui décomposent les biodéchets par lactofermentation sont inactivés par la chaleur dégagée en compostage de haute énergie. Ainsi il est peu intéressant de déverser le digestat fermenté d'un seau bokashi dans un composteur classique dans la mesure où les EM qu'il contient ont peu de chance de survivre aux pics de température et aux conditions aérobies d'un compost produit en compostage de haute énergie.

Les conditions de température, d'humidité et d'oxygénation qui règnent dans un composteur de haute énergie à certains moments de son fonctionnement sont donc très rudes pour la biodiversité et en particulier pour la faune du sol. Micro-organismes thermophiles mis à part, la vie s'y maintient à la marge et probablement dans des conditions de compétition et de stress intenses. En phase de maturation, la biodiversité peut temporairement s'y développer avant que les phases de tamisage et de transfert viennent rompre à nouveau la dynamique des populations installées. Les animaux pionniers, qui recolonisent le composteur après l'évacuation du compost mature, n'accèdent aux nutriments issus des nouveaux biodéchets que jusqu'au début d'une nouvelle phase de production de chaleur. Ceux qui colonisent le compost en cours de maturation sont privés de l'essentiel des nutriments facilement assimilables, déjà métabolisés par les bactéries thermophiles et le quitteront sitôt les dernières ressources alimentaires exploitables utilisées. L'absence de mésofaune (animaux dont la taille va de 200 µm à 2 mm) et de macrofaune (> 2 mm) visibles est d'ailleurs un des signes d'obtention d'un compost mature<sup>22</sup>. Ceci indique que les pratiquants du compostage de haute énergie considèrent le défaunage des composteurs comme une étape normale, car programmée, du cycle de production du compost. Ce faisant, ils agissent à la manière d'éleveurs pratiquant un vide sanitaire entre le départ d'un troupeau et l'arrivée d'un

---

<sup>21</sup> bactéries photosynthétiques, bactéries acido-lactiques, bactéries fixatrices d'azote, actinomycètes, levures, champignons filamenteux : <https://angelidelsuolo.files.wordpress.com/2016/10/em-cuba.pdf>

<sup>22</sup> Avec une couleur sombre et une odeur de géosmine, caractéristiques de l'humification.

autre ou comme des cultivateurs dont les parcelles en monoculture conventionnelle se transforment en quasi désert biologique après la moisson.

#### 1.4.3. Difficultés socio-techniques identifiées dans la mise en œuvre du compostage de haute énergie

A l'occasion d'une table-ronde qui s'est tenue à l'IUT de Tours, le 12 janvier 2017, un ensemble d'acteurs (citoyens, élus et techniciens de collectivités, représentants de l'administration, Maîtres-composteurs, scientifiques) nous ont fait part des principales difficultés qu'ils rencontraient avec les méthodes actuelles de compostage partagé. Nous avons complété cet état des lieux par une collecte de représentations sur le compostage, en 2017 et 2018 et nous avons compilé les solutions possibles à partir de différentes sources (recommandations de l'ADEME, contenu pédagogique de la formation de Maître-Composteur, avis d'accompagnateurs expérimentés...). Le tableau suivant fait ainsi apparaître huit catégories de problèmes liés au compostage partagé tel qu'il est pratiqué actuellement en France.

Tableau 1 : Principaux obstacles s'opposant au développement du compostage partagé en Indre-et-Loire

Numéro	Exposé des problèmes	Solutions préconisées
1	<p><b>Des retournements jugés fastidieux voire dangereux :</b> la bonne gestion d'un composteur nécessite des brassages profonds et des retournements de tas réguliers, qui peuvent présenter une certaine pénibilité pour les personnes fragiles. Certains techniciens se sont inquiétés de l'exposition des personnes sensibles à des organismes pathogènes potentiellement présents dans le compost ou les biodéchets frais.</p>	<p>Lorsque les brassages sont réguliers, ils deviennent plus faciles à effectuer, car le compost n'est pas compact. Le port d'équipements de protection individuelle (masques à poussières, gants, lunettes) est préconisé pour éviter l'exposition à d'éventuels pathogènes, en complément de mesures de protection collective (arrosage préalable du compost avant un retournement pour diminuer la dissémination des spores par exemple, éloignement des personnes sensibles lors du tamisage du compost, nettoyage régulier des bioseaux...). Une montée en température du compost à plus de 50°C pendant quelques jours est supposée détruire les micro-organismes pathogènes, les parasites humains et les graines d'adventices potentiellement présents dans les biodéchets. L'oxygénation active du tas de compost est nécessaire à la bonne montée en température.</p>
2	<p><b>Des nuisances occasionnelles :</b> Les sites de compostage partagé connaissent parfois des dysfonctionnements qui peuvent se traduire par des nuisances temporaires (odeurs,</p>	<p>En intervenant préventivement (instructions appropriées, dialogue constant avec les utilisateurs, bon état du matériel...) et avec réactivité après la survenue d'un problème, il est</p>

	animaux « nuisibles ») dont peuvent se plaindre des riverains.	possible de réduire ces nuisances sous un seuil acceptable, voire de les supprimer totalement.
3	<b>Du compost produit en excès :</b> en habitat urbain dense les exutoires pour le compost produit sont peu nombreux. Lorsque le compost s'accumule, il doit être évacué. Ce transport de matière amenuise en partie l'intérêt du compostage de proximité car il augmente son empreinte énergétique. Le transfert de compost peut être considéré comme une servitude supplémentaire par les services techniques des collectivités.	Une bonne planification du fonctionnement du site doit permettre, préalablement à son lancement, de résoudre la question des exutoires et de prévoir des recours possibles en cas d'excès de production de compost, ainsi que le partage des tâches entre acteurs.
4	<b>Une source de carbone rare ou manquante :</b> L'approvisionnement en matière carbonée (broyat de branches par exemple), nécessaire à l'équilibre physico-chimique du compost et au bon déroulement du compostage lui-même, est parfois fluctuant en qualité et en quantité. Il est fortement dépendant de la saisonnalité. Ce point est particulièrement surveillé par les accompagnateurs.	En parallèle du déploiement de sites de compostage de proximité, il est important de sécuriser les sources d'approvisionnement en matière carbonée, par exemple en créant un réseau de dépôts de broyat de branches alimentés par des professionnels de l'entretien des espaces verts (dons ou rachat à petit prix). Certaines collectivités acceptent d'approvisionner gracieusement les sites en broyat de branches.
5	<b>La crainte de négligences ou de dégradations :</b> certains utilisateurs ne respectent pas les recommandations des référents de site (morceaux trop gros, dépôt de déchets non	Apprendre à utiliser un composteur est en fait plus simple que d'apprendre à trier correctement ses déchets, car en compostage, les gestes sont invariants et ne demandent

	biodégradables...). Les attitudes irrespectueuses sont particulièrement craintes par certains élus, qui évoquent des difficultés « à déjà faire respecter le tri ».	presqu'aucun processus décisionnel de la part de l'utilisateur. De plus, les composteurs ne constituent pas une cible très fréquente de vandalisme.
6	<b>Un manque de formation et d'accompagnement des utilisateurs, associé à un turn-over élevé :</b> Les utilisateurs sont demandeurs d'informations mais sont rarement prêts à investir du temps pour suivre une formation au compostage reconnue par l'ADEME. Certaines structures accompagnatrices ne sont pas suffisamment présentes ou réactives. D'autres cessent leur accompagnement effectif de manière trop prématurée (parfois au bout de 6 mois, le plus souvent 12 à 24 mois après le lancement du site), ce qui ne permet pas de soutenir durablement les référents de site ou d'initier correctement de nouveaux utilisateurs. Lorsque des référents partent, il peut être difficile de trouver des personnes suffisamment motivées et bien formées pour les remplacer.	Il est possible de varier les canaux de communication afin que les bonnes pratiques diffusent même auprès de personnes qui refusent de se former : invitation des utilisateurs à des « apéros-composts », rencontres occasionnelles lors des opérations de retournement de tas ou de récolte du compost, communication régulière par le biais de courriels, listes de diffusion, newsletter, réseaux sociaux, distribution de documentation gratuite, expositions itinérantes, diffusion de reportages...
7	<b>Une mise en concurrence avec la méthanisation ou le compostage sur plateformes industrielles :</b> certaines collectivités ont mis en place le tri à la source des	Le compostage de proximité peut être promu pour ses valeurs éducatives (compostage pédagogique en établissements scolaires par exemple), récréative (compostage en centre de

	<p>biodéchets en vue de méthanisation ou de compostage sur plateforme. Le compostage de proximité peut alors être confronté à un manque d'apports, voire à un manque d'intérêt, de la part des citoyens ou des élus.</p>	<p>loisir) ou d'entretien du corps et de l'esprit (compostage associé à des jardins thérapeutiques en maisons de repos, hôpitaux, maisons de retraite). Les volumes détournés par le biais du compostage partagé étant modestes au regard des gisements existants, ce mode de traitement est en fait complémentaire des modes de traitements industrialisés.</p>
8	<p><b>Des coûts de création et d'accompagnement de sites souvent élevés, rapportés à la quantité de déchets traités :</b> le modèle économique de certaines structures accompagnatrices est basé sur un forfait qui peut atteindre 700 à 1000 euros/an pour la création et l'accompagnement d'un seul site de compostage partagé<sup>23</sup>. Celui-ci ne traitant que quelques centaines de kilos de biodéchets par an, certains gestionnaires considèrent le compostage partagé comme une solution plus onéreuse que d'autres solutions de collecte et de traitement (226 euros en moyenne pour le coût complet de collecte et de traitement d'1 tonne d'ordures ménagères résiduelles) (ADEME 2015b). Ce sentiment est renforcé par l'absence d'obligation légale de</p>	<p>Le coût de l'accompagnement dépasse la simple collecte et le traitement des biodéchets. Il s'agit aussi d'une mission de service public d'animation de territoire, avec comme plus-value la création de lien social, de l'éducation populaire, une mise en œuvre de politiques climatiques plus favorables à l'environnement... autant de services que n'offre pas le passage d'un camion-benne. Le financement d'un site de compostage peut offrir une rémunération à certains accompagnateurs, et contribuer ainsi à soutenir l'économie locale, sociale et/ou solidaire. Ces emplois ne sont pas délocalisables. Ce coût peut aussi être apparenté à un paiement pour services environnementaux (PSE), qui permet de préserver plusieurs services écosystémiques importants : traitement des déchets</p>

<sup>23</sup> Le CPIE Touraine Val de Loire a par exemple perçu, entre 2014 et 2019, 71780 euros pour la création et l'accompagnement de 20 sites de compostage partagé de la part du SMICTOM du Chinonais et de la Région Centre-Val de Loire. Une nouvelle subvention de 37850 euros HT vient de lui être accordée par le SMICTOM pour la création et l'accompagnement de 10 sites supplémentaires.

	<p>tri à la source des biodéchets pour les particuliers à l'heure actuelle.</p>	<p>organiques, entretien de la biodiversité du sol, contribution locale au rétablissement du cycle du carbone, à l'autonomie alimentaire des territoires, à la réduction de l'usage d'intrants... Le tri à la source des biodéchets sera obligatoire en 2025. Les collectivités pionnières en matière de compostage partagé peuvent expérimenter des solutions à petite échelle qui seront pleinement opérationnelles en 2025.</p>
--	---	--

Le compostage partagé soulève donc objectivement plusieurs problèmes<sup>24</sup>. Pour y remédier, les structures accompagnatrices et l'ADEME, ont développé diverses solutions techniques, résumées dans le Tableau 1, et des éléments de langage, dont le célèbre mantra « *un composteur bien géré ne sent pas mauvais et n'attire pas les rats* »<sup>25</sup>. Malgré ces dispositions, bien des problèmes restent irrésolus et le compostage de proximité est souvent mal pratiqué par les utilisateurs. Une étude portant sur l'évaluation des aides de l'ADEME à la promotion de la gestion de proximité des biodéchets (ADEME, 2014) a révélé que 83% des utilisateurs n'équilibraient pas leurs apports de biodéchets par des coproduits carbonés structurants. Le brassage ou l'aération était inexistant ou insuffisant pour les 2/3 de la centaine de sites de compostage domestique ou partagé visités. Dans 75% des cas, les utilisateurs ne procédaient pas de manière suffisante au contrôle de l'humidité et au contrôle de l'évolution des matières. Dans une étude de 2017 sur la qualité de composts produits dans des composteurs de quartier ou en pied d'immeubles parisiens (Bouin *et al.*, 2017), les principales causes de non-conformité des composts analysés concernaient le non-respect des valeurs seuils en matière organique et en matière sèche, signe d'un rapport C/N mal équilibré par les utilisateurs.

Nous avons souhaité rechercher d'autres solutions aux problèmes identifiés, afin d'élargir l'éventail des options techniques disponibles pour le compostage partagé. Il est rapidement apparu que ces solutions alternatives étaient difficilement compatibles avec certains principes fondateurs du compostage de haute énergie tel qu'il est actuellement pratiqué. Peu à peu, ces solutions alternatives ont donc dessiné les contours d'un autre

---

<sup>24</sup> Nous avons pu constater que certains accompagnateurs minimisent parfois l'existence de tels problèmes. Par exemple, à l'occasion d'un article sur le Compostou, paru dans le journal Libération le 25/06/2017, sous le titre « *Le composteur, ça eut pué* » (une trouvaille du rédacteur en chef), certains Maîtres-Composteurs nous ont adressé de vives protestations. La maladresse du titre y est probablement pour beaucoup. Mais une forme de déni transparaisait également dans certains commentaires, proclamant en substance qu'il n'existerait pas en France de composteurs partagés mal gérés et qu'écrire le contraire reviendrait à « *décrédibiliser le réseau des composteurs [...] en sous-entendant que notre compost est fréquemment mal géré* ». Ce n'est bien évidemment pas le cas.

<sup>25</sup> Cette formule relève bien de la croyance et non du fait scientifique : un composteur en phase de décomposition émet toujours quelques odeurs, plus ou moins aigrelettes ou sulfurées. Même dans un composteur bien géré des nuisances peuvent apparaître à tout moment, comme par exemple, à la suite du déversement de biodéchets très fermentés, par léger manque de brassage ou de broyat, lors de fortes chaleurs ou en cas d'excès de déchets azotés. Quant aux rats, ils font partie de la faune urbaine. Leur absence aux abords d'un composteur tient moins de la bonne gestion du composteur que de la disponibilité d'autres ressources alimentaires plus attractives et plus accessibles, de gîtes plus accueillants, ou de la présence, à proximité du site de compostage, de prédateurs naturels ou d'appâts empoisonnés. Pour être plus rigoureuse la formule devrait être « un composteur bien géré sent moins mauvais qu'un composteur mal géré et les rats vont et viennent à leur guise », mais cela est probablement moins rassurant !

paradigme, qu'il importait d'explorer et de conceptualiser d'un point de vue scientifique. Le premier point sur lequel nous avons travaillé avait pour objectif de simplifier les pratiques de compostage. Pour cela nous avons dû déconstruire intellectuellement le mode de compostage partagé actuellement dominant, le compostage de haute énergie, afin de mieux en comprendre le fonctionnement, en identifier les faiblesses et proposer une méthode alternative.

## **2. Compostou : un nouveau paradigme pour le compostage partagé**

### 2.1. Simplifier les pratiques

#### 2.1.1. Innover en compostage partagé, est-ce encore possible ?

Une interrogation, en septembre 2019, de la base brevets de l'INPI, qui recense les brevets français, européens ou internationaux, renvoyait 139 résultats pour le mot clé « composteur ». L'innovation est donc constante en matière de compostage et notamment dans le domaine du compostage partagé.

La totalité des composteurs récemment brevetés est dédiée au compostage de haute énergie ou, dans une moindre mesure, au vermicompostage. Nous ne commenterons ici que quelques cas de composteurs modulaires utilisables en compostage partagé, catégorie dont relève le Compostou et dont il sera question dans la suite de ce mémoire.

Le brevet international WO2016/010795 A1 porte sur un vermicomposteur cylindrique et modulaire (appelé « tour à compost ») entouré d'un ensemble de jardinières empilables verticalement. Ce composteur est muni d'un tiroir placé sous un filtre amovible, permettant le recueil des lixiviats et leur stockage avant extraction.

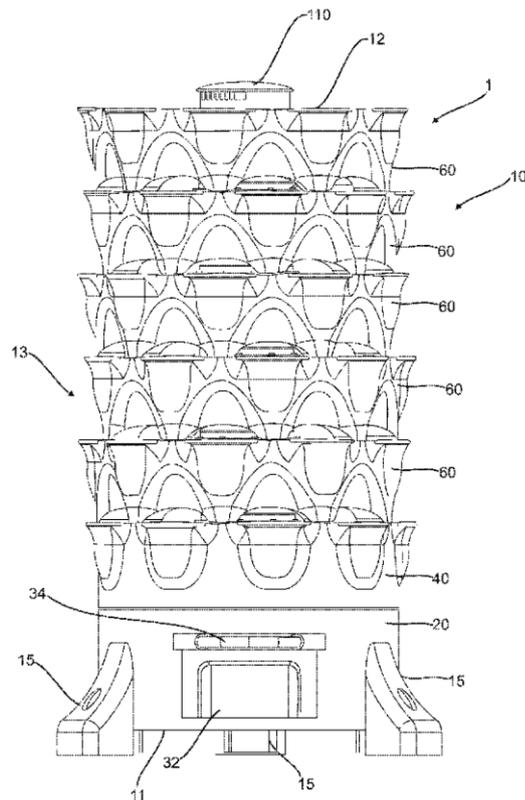


Figure 10: La tour à compost (illustration extraite du brevet international WO2016/010795 A1)

Le brevet britannique GB 2 443 686 A divulgue un composteur modulaire constitué d'au moins deux récipients empilables verticalement et pourvus de poignées. Le fond de chaque récipient est ajouré, ce qui permet le passage d'air et de liquides.

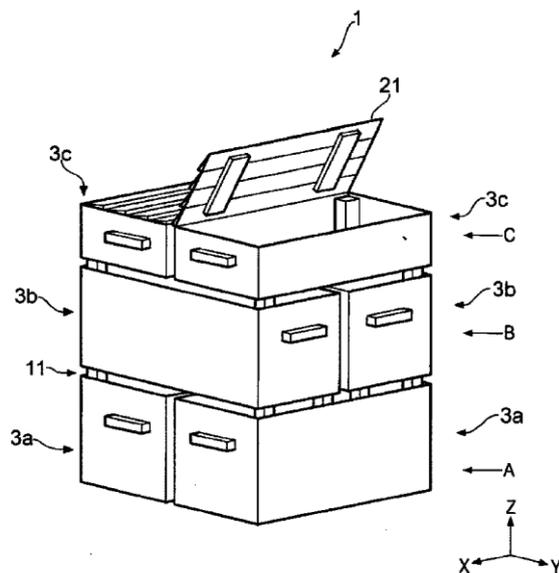
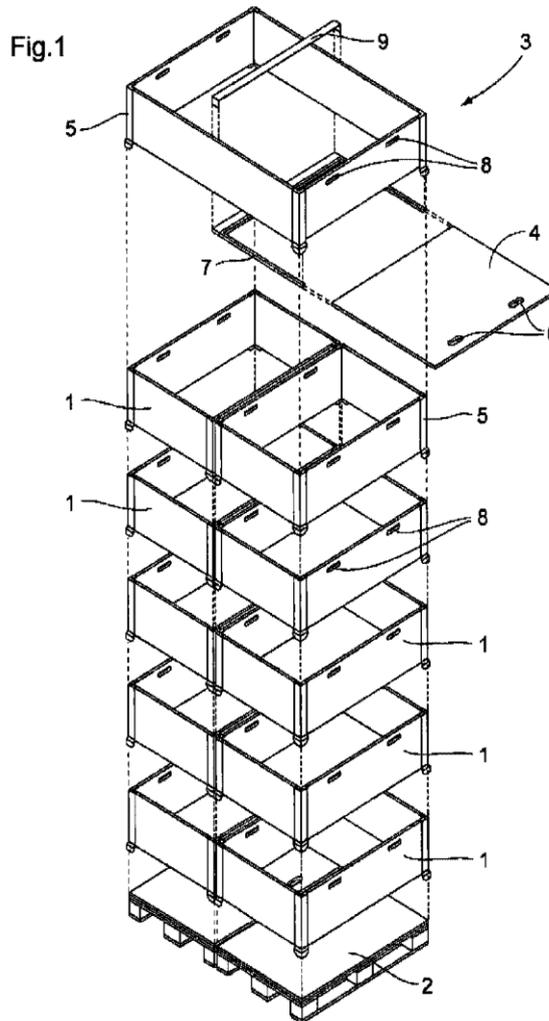


Figure 11: Composteur modulaire divulgué par le brevet britannique brevet britannique GB 2 443 686 A (illustration tirée du brevet)

Le brevet européen EP 1 894 892 A2 divulgue une installation de vermicompostage que l'on pourrait qualifier d'industrielle. Le dispositif est constitué d'un empilement de cadres formant un « module » (donc différent du module de notre invention) et pouvant reposer sur un support de type palette. Un dispositif de transfert (cadre comportant un demi-fond amovible) permet de faire passer les vers dans un second module adjacent lorsque le premier module est plein.



**Figure 12: Composteur modulaire sur palettes présenté dans le brevet européen EP 1 894 892 A2 (illustration tirée du brevet)**

Le brevet allemand DE 100 30 301 A1 divulgue un composteur modulaire du même type que celui présenté dans le brevet GB 2 443 686. Il est constitué d'au moins deux récipients empilables verticalement et éventuellement pourvus de poignées. Le fond de chaque récipient est ajouré, ce qui permet le passage d'air, de liquides et d'organismes. Ce fond peut aussi servir de tamis pour retenir les éléments grossiers non

décomposés en fin de processus de compostage. La principale différence entre les inventions proposées par les brevets GB 2 443 686 et DE 100 30 301 A1 réside dans l'existence de moyens qui, dans le cas du second brevet, permettent d'ajuster la distance entre deux récipients empilés l'un sur l'autre, compensant ainsi la diminution du volume du compost au cours du processus de décomposition. Ces moyens permettent de maintenir le contact entre les portions de compost contenues dans chaque récipient, à travers le fond ajouré du récipient supérieur. Grâce à cette séparation, les différentes portions de compost peuvent être brassées séparément et plus facilement afin d'y introduire de l'oxygène et éviter une fermentation anaérobie : « *De plus, il y a une meilleure accessibilité aux portions de compost, ce qui permet à tout moment et de manière confortable de mélanger les déchets, par exemple pour l'introduction d'oxygène. Ceci, à son tour, présente l'avantage de favoriser le processus de décomposition et d'obtenir une maturation plus rapide, et de ne pas provoquer de processus de décomposition anaérobie indésirable pour le compostage* » (brevet DE 100 30 301 A1, page 3, lignes 28-30). La revendication 9 de ce document (page 7, ligne 5) indique par ailleurs la possibilité d'équiper chaque récipient de déflecteurs pour l'eau de pluie. L'objectif de l'invention que décrit le brevet DE 100 30 301 A1 est donc clairement d'augmenter le confinement de la matière organique en décomposition afin d'élever sa température tout en ayant la possibilité d'introduire de l'oxygène au cœur de chaque portion de compost et de réguler sa teneur en eau. Ces éléments indiquent que le composteur proposé par le brevet DE 100 30 301 A1 est conçu pour fonctionner comme un composteur chaud classique, dans lequel l'activité microbienne est favorisée pour obtenir une dégradation rapide de la matière organique.

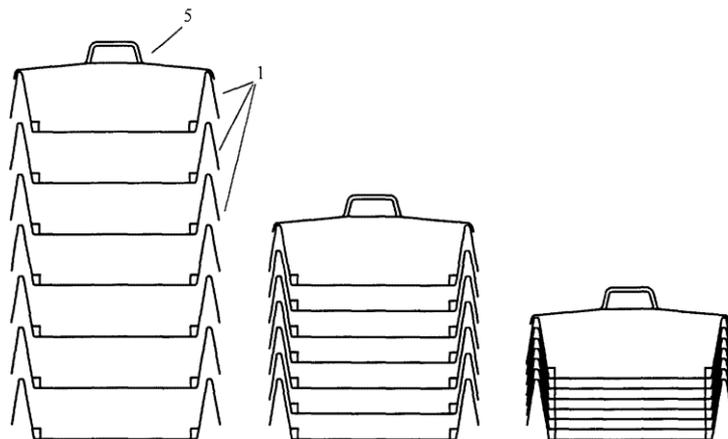


Figure 13: Composteur modulaire divulgué dans le brevet allemand DE 100 30 301 A1 (illustration tirée du brevet)

Enfin, le brevet allemand DE 296 09 734 U1 porte sur un composteur modulaire constitué de récipients empilables à fonds et à parois perforés. Cette invention est plutôt destinée aux plateformes de compostage industrielles, les récipients étant conçus pour être manipulés à l'aide d'un chariot élévateur. Le récipient est éventuellement pourvu d'un couvercle perforé (brevet DE 296 09 734 U1, revendications 2 et 3) et d'un puits d'aération (revendication 8) et peut reposer sur un bac de rétention du lixiviat (revendication 4). Conçu dans le même esprit que le brevet GB 2 443 686 A et le brevet DE 100 30 301 A1, ce composteur propose de séparer verticalement et de confiner des portions de compost afin de mieux contrôler leurs taux d'humidité et d'oxygénation tout en limitant l'emprise du dispositif au sol. Le brevet DE 296 09 734 U1 mentionne que l'invention divulguée porte sur « un récipient de compostage qui répond aux exigences particulières du compostage industriel » (page 2, paragraphe 4), c'est-à-dire un composteur pour compostage de haute énergie, censé garantir une phase d'hygiénisation du compost, imposée par les principales normes actuellement en vigueur.

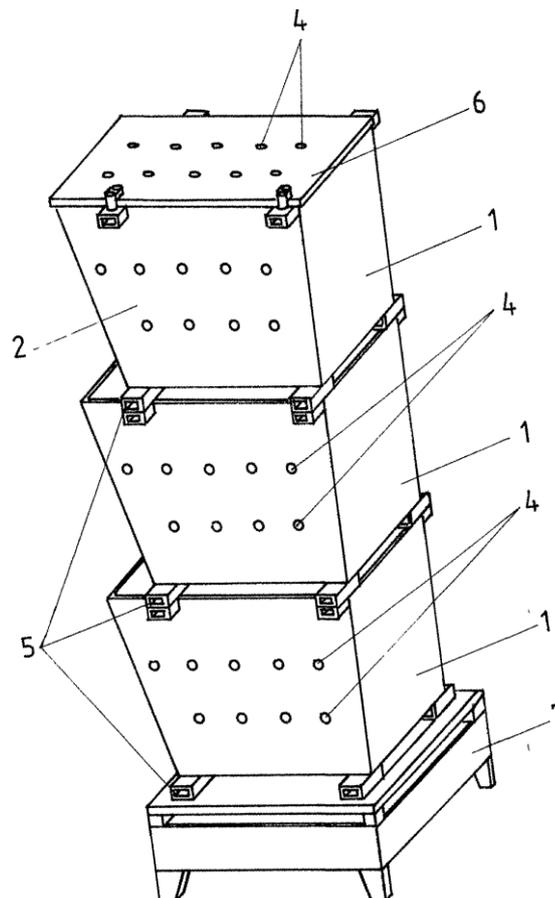


Figure 14: Composteur modulaire divulgué dans le brevet allemand DE 296 09 734 U1 (illustration tirée du brevet)

Nous constatons que ces innovations proposent essentiellement des améliorations ergonomiques, sans constituer de ruptures conceptuelles radicales susceptibles de solutionner les problèmes posés en particulier par le compostage de haute énergie.

### 2.1.2. Problématisation

Lorsque nous avons décidé, en 2017, de concevoir un nouveau modèle de composteur partagé, nous avons immédiatement opté pour le compostage de basse énergie (ou « froid »), dans une optique de simplification des pratiques et de réduction de la consommation d'énergie par ce système. Proposer un composteur partagé spécialement conçu pour le compostage de basse énergie revenait à répondre techniquement aux questions suivantes ; comment et pourquoi :

1. Garantir une aération passive et efficace?
2. Eviter le tassement du compost?
3. Limiter la montée en température?
4. Compenser la décomposition supposée plus lente des biodéchets?
5. Rendre la matière organique inaccessible aux animaux indésirables?
6. Tendre vers un ratio C/N de 10 en fin de maturation?

Se poser ces questions nous a amené à problématiser notre approche et à définir les axes de travail suivants :

1. Le premier axe de travail a été de réfléchir à une méthode de compostage ne demandant aux utilisateurs qu'un effort minimum. Nous avons décidé que ces derniers :
  - a. Pourraient mettre dans le composteur tout déchet biodégradable de cuisine ou de table afin de détourner des OMR une plus large gamme de biodéchets,
  - b. Ne devraient plus avoir à brasser en profondeur les biodéchets et le broyat à chaque apport,
  - c. Devraient manipuler le moins souvent possible le compost,
  - d. Ne devraient plus retourner le tas de compost à intervalles réguliers,
  - e. Ne devraient plus tamiser le compost mûr sauf exception (par manque de broyat par exemple),
  - f. Ne devraient plus transférer le compost produit,

- g. Devraient produire la plus faible quantité de compost possible par une unité de biodéchets déposés, ce qui reviendrait à composter davantage les biodéchets que le broyat.

Ces orientations, qui vont dans le sens d'une simplification des pratiques, s'opposent pour la plupart aux pratiques qui caractérisent le compostage de haute énergie et qui sont recommandées par le RCC et l'ADEME. **Le compostage de basse énergie introduit donc une rupture conceptuelle et technique assez prononcée avec les pratiques courantes.** Miser sur l'aération passive était un bon moyen de réduire la consommation énergétique nécessaire à la production de compost. De plus, cela permettait de proposer une méthode de compostage de proximité plus inclusive car s'adressant aussi aux personnes ayant une force physique faible à modérée (enfants, personnes âgées, personnes en situation de handicap). La réduction des brassages et des manipulations de compost pouvait aussi profiter à la faune du sol, mieux respectée. Dans ces conditions, garantir une aération passive efficace était absolument nécessaire afin que les biodéchets se décomposent en conditions aérobies et qu'ils évitent de subir une fermentation productrice de méthane ou de sulfure d'hydrogène.

2. Afin d'éviter le tassement du compost et ne pas perdre trop d'énergie dans l'alimentation du site de compostage en broyat, il fallait opter pour un substrat carboné propice à une bonne structuration du compost et qui ne se décompose pas trop vite. Le broyat de branches s'est d'emblée imposé comme une solution intéressante. Nous avons réfléchi à une solution qui permette de ne pas composter tout le broyat mélangé aux biodéchets, afin que ce broyat puisse être réutilisé en fin de cycle de production de compost. Différents types de broyats ont été testés qui variaient selon la taille de leurs éclats et la nature des essences d'arbres employées.
3. Afin de limiter la montée en température, il est apparu crucial de placer les bactéries thermophiles en conditions sub-optimales de développement. Il fallait également déterminer la hauteur limite de compost en formation au-delà de laquelle l'essentiel de la masse de biodéchets subissait un phénomène de confinement, propice à une montée en température. Enfin, il nous a semblé important que le composteur soit suffisamment ajouré pour que l'air y entre et en sorte aisément, afin de dissiper la chaleur éventuellement produite.
4. Un composteur de haute énergie privé de son activité microbienne génératrice de chaleur connaît généralement un ralentissement de la vitesse de décomposition des biodéchets. Il fallait donc imaginer une solution afin que ce ralentissement de l'activité microbienne puisse être compensé par une ou plusieurs autres activités biologiques, capables de décomposer

tout aussi efficacement la matière organique. Le rôle compensateur des champignons et de la faune du sol a été particulièrement étudié.

5. Dans l'intervalle de temps nécessaire à la décomposition des biodéchets, ceux-ci ne devaient pas être accessibles à des animaux dits « indésirables » (chats, rats et moucheron notamment). Par sa conception et son mode d'utilisation, le composteur devait donc permettre d'éviter d'exposer des biodéchets à l'air libre, qui sont autant de ressources alimentaires et/ou de support de ponte attractifs pour ces animaux.
6. Enfin, la méthode de compostage devait permettre de tendre vers un ratio C/N proche de 10 en fin de processus de maturation du compost, afin de se rapprocher du ratio moyen C/N de l'humus, présenté dans la littérature spécialisée comme un amendement idéalement équilibré entre carbone et en azote.

### 2.1.3. Indicateurs de performance, hypothèses et prédictions

Déoulant de la problématisation précédente, plusieurs hypothèses et prédictions quant à l'évolution attendue de certains indicateurs ont été formulées, ce qui nous a guidé dans l'élaboration et l'optimisation du composteur et de sa méthode d'utilisation. Si l'appareil tenait ses promesses, nous devons constater la réalisation des prédictions suivantes (Tableau 2) :

Tableau 2: Prédications, hypothèses et indicateurs suivis au cours du suivi scientifique et technique du Compostou.

#	Prédications	Hypothèses	Indicateurs à suivre
1	Une aération passive efficace ne générera pas de mauvaises odeurs.	L'apparition de mauvaises odeurs est un signe de dysfonctionnement du processus de compostage, dû notamment à une oxygénation insuffisante du compost.	Odeurs du compost.
2	Un compost bien structuré aura une masse volumique qui diminuera au cours du processus de décomposition car sa masse diminuera proportionnellement plus que son volume. Compte-tenu de la perte de masse, les volumes de compost brut <sup>26</sup> avant et après maturation seront proches. Un volume important de broyat non décomposé pourrait être recyclé après tamisage.	Le compost se tasse au cours du processus de décomposition parce que sa masse diminue proportionnellement moins que son volume, ce qui augmente sa masse volumique.	Volumes, avant et après maturation, de compost brut, de broyat et de biodéchets non décomposés, de compost mûr et d'humus.
3	En compostage de basse énergie, la	Un compost en formation peut dépasser	Température à 10 cm et à 20 cm sous la

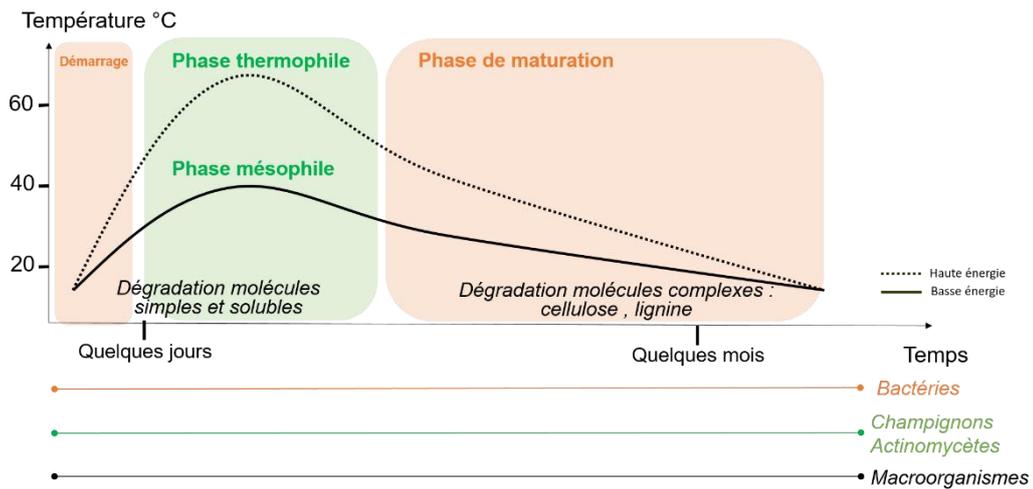
<sup>26</sup> Nous appellerons par la suite « compost brut », le résultat du processus de compostage avant affinage ou tamisage. Cette matière contient du broyat de branches et des biodéchets non décomposés, du compost mûr, de l'humus et des organismes.

	température du compost en formation ne dépassera pas 40°C.	les 40°C en raison de causes intrinsèques (émission de chaleur lors de la décomposition bactérienne des biodéchets) ou extrinsèques (température extérieure supérieure à 40°C en été <sup>27</sup> ). Le compostage de basse énergie permet de réduire la cause intrinsèque d'élévation de température. L'utilisation de matériaux présentant une certaine inertie thermique permet de réduire la sensibilité du composteur aux températures extérieures élevées.	surface du compost, prise à l'aplomb de la trappe d'accès du composteur.
4	La durée du temps nécessaire à l'obtention d'un compost mûr sera similaire à celle observée en compostage de haute énergie.	La vitesse de décomposition des biodéchets dépend de l'activité biologique du compost. Un déficit en activité microbienne thermophile peut être compensé par d'autres types d'activités biologiques si celles-ci peuvent s'établir durablement dans le composteur.	Temps requis jusqu'à l'obtention de compost mûr

<sup>27</sup> Le record de température maximale relevée sous abri en France métropolitaine est actuellement de 46°C (le 28 juin 2019).

5	Peu d'animaux nuisibles fréquenteront le composteur de basse énergie.	Lorsque des animaux « nuisibles » ne peuvent pas accéder à la matière organique en décomposition pour s'en nourrir ou pour s'y reproduire, leur occurrence dans le composteur est très faible.	Indices de présence dans le composteur (galeries de rongeurs, pupes de mouches...), observations directes d'individus (nuée de mouches et de moucherons à l'ouverture, asticots, fuite de rongeurs,...)
6	Le ratio C/N du compost mûr sera aux alentours de 10 et sera associé à une teneur correcte en matière organique (>20%), sans excès d'azote (<3%), conformément à la norme française NF U 44-051	Au cours du processus de compostage, le ratio C/N diminue en raison d'une perte de carbone, transformé en gaz ou lessivé. Le facteur limitant de la réaction de compostage est l'azote, nécessaire à l'élaboration des protéines des organismes.	Teneurs en matière organique, en azote total et en carbone total, ratio C/N.

En ce qui concerne la biodiversité, la principale différence recherchée avec le compostage de haute énergie était la constitution d'une communauté d'espèces occupant durablement le composteur grâce à la création de conditions environnementales stables, notamment thermiques, que l'on pourrait résumer par la figure théorique suivante :



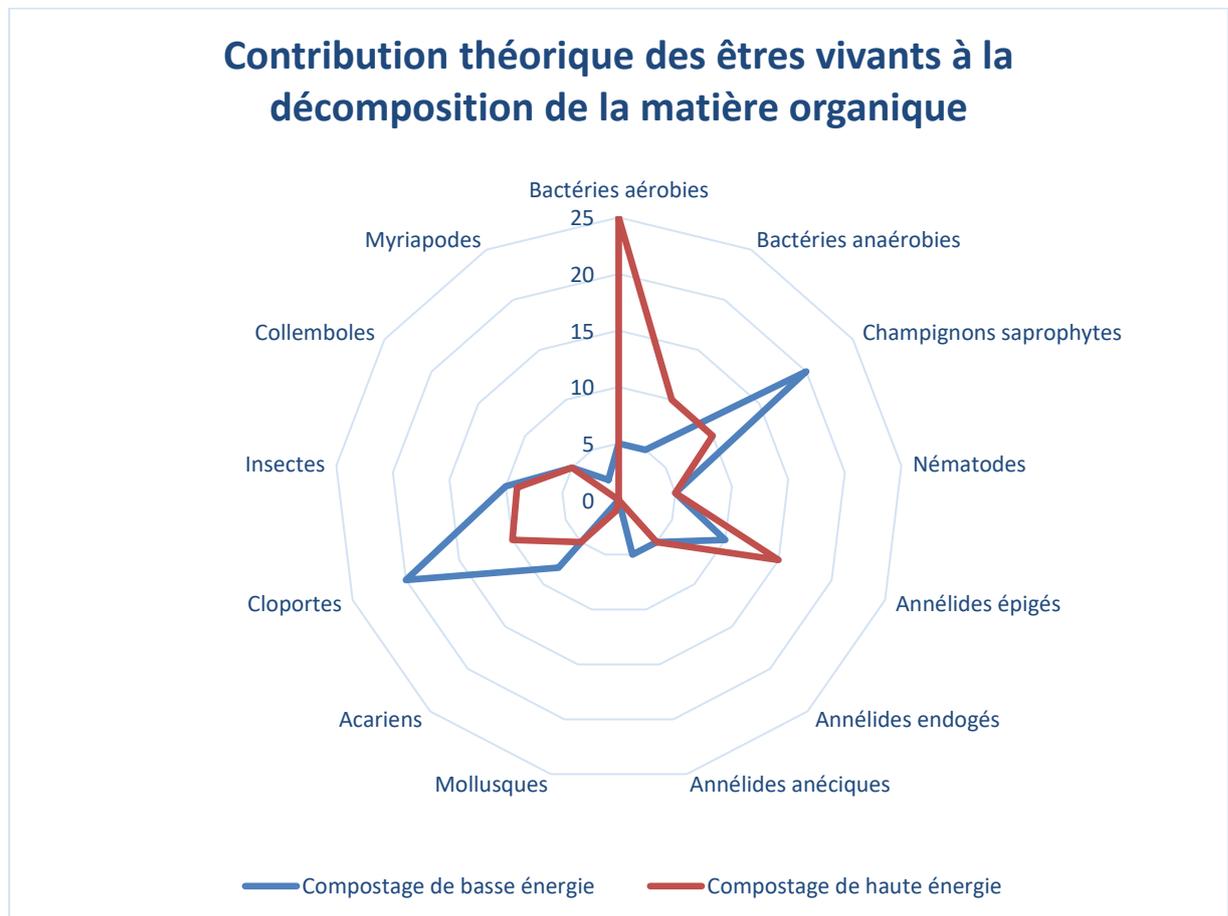
**Figure 15: En compostage de basse énergie, la biodiversité mésophile peut exploiter les ressources nutritionnelles du compost en formation pendant toute la durée du processus**

Pour caractériser une occupation durable, il est nécessaire d'évaluer les effectifs des populations de différentes catégories d'organismes occupant des composteurs de basse énergie et de comparer ceux-ci aux effectifs observés en composteur de haute énergie. L'expérimentateur pourrait s'appuyer sur une évaluation du nombre d'individus ou de la biomasse spécifiquement produite par une catégorie d'organismes par masse de compost brut. Il est également nécessaire d'évaluer la dynamique de reproduction de ces populations afin de déterminer si les effectifs sont en mesure de croître correctement au cours du temps. Pour cela, une approche démographique, incluant l'établissement de pyramides des âges et de sex-ratio, devrait être mise en œuvre pour différentes espèces.

Il est beaucoup plus complexe d'évaluer la part respective de chaque catégorie d'organismes dans la décomposition de la matière organique apportée par les biodéchets et le broyat de branches.

Si on projette sur un axe allant de 0 (absence d'effet supposé) à 100 (effet exclusif) la contribution théorique des différentes catégories d'organismes dans la décomposition de la matière organique, il est attendu que le compostage de haute énergie repose

essentiellement sur la contribution de microorganismes libres (bactéries aérobies et anaérobies, champignons), tandis que le compostage de basse énergie repose essentiellement sur l'activité des champignons, de la microfaune (acariens, collemboles) et de la mésofaune (cloportes, insectes, annélides épigés) (Figure 16).



**Figure 16: Contribution théorique des êtres vivants à la décomposition de la matière organique, en compostage de haute (en rouge) ou de basse (en bleu) énergie**

Toutefois, les données manquent actuellement pour modéliser le fonctionnement écologique d'un composteur et réaliser ce même graphique avec des données expérimentales.

La contribution de chaque catégorie d'organismes évolue aussi au cours du temps, de sorte qu'il serait préférable de décrire de manière dynamique la biodiversité des composteurs, en caractérisant par exemple les cortèges d'espèces agissant précocement ou pendant toute la durée du processus de compostage. Ceci pourrait être réalisé soit en supprimant sélectivement certaines catégories d'organismes, soit en les associant en cortèges expérimentaux. Des recherches fondamentales sont nécessaires afin

d'approfondir la conceptualisation scientifique du compostage de basse énergie et dépassent le cadre du présent projet, financé dans le cadre d'un appel à projet Economie circulaire et par le biais d'un appel à projet prévention et réduction des déchets. Compte-tenu de la complexité des questions abordées, nous avons décidé de concentrer nos efforts sur l'atteinte des objectifs socio-techniques du projet et de remettre à plus tard le suivi écologique des Compostous<sup>28</sup>.

## 2.2. Limiter les nuisances en s'inspirant de la nature

Pour atteindre les objectifs cités précédemment, nous avons étudié le fonctionnement d'un milieu écologique particulièrement performant en matière de décomposition de la nécromasse, sans élévation notable de température. L'étude du fonctionnement de la litière d'une forêt tempérée nous a permis d'en déduire des grands principes fonctionnels pour notre composteur de basse énergie. Cette approche bioinspirée visait à intégrer davantage le rôle du vivant dans les pratiques de compostage partagé.

Nous avons aussi souhaité transposer les principes de la permaculture au compostage partagé. La permaculture<sup>29</sup> est une méthode systémique et globale qui vise à concevoir des systèmes en s'inspirant de principes écologiques et de techniques traditionnelles. Ce mode de gestion des milieux anthropisés prend en considération la biodiversité de chaque écosystème. Il ambitionne notamment une production agricole durable, économe en énergie et respectueuse des êtres vivants et de leurs relations réciproques. La permaculture réhabilite aussi la place de la nature dans nos pratiques quotidiennes (habitat, économie...) et nous invite à adopter des comportements à la fois plus instinctifs et davantage basés sur l'observation et la compréhension du monde vivant. Elle contribue à « réenchanter la nature » et à redévelopper notre « ensauvagement », concepts chers au psychologue social Serge Moscovici (2002),

---

<sup>28</sup> Notons qu'un projet de recherche a été déposé sur ce thème en 2018 et a été rejeté par la Région Centre Val de Loire, ce qui ne nous a pas encouragé à poursuivre dans cette voie dans l'immédiat.

<sup>29</sup> L'expression « permaculture » est ici employée en tant que référence à une théorie intellectuelle et non en référence à la marque « Permaculture » déposée en France en 2013 par Olivier Barbié ([https://bases-marques.inpi.fr/Typo3\\_INPI\\_Marques/getPdf?idObjet=3974045\\_201734\\_fmark](https://bases-marques.inpi.fr/Typo3_INPI_Marques/getPdf?idObjet=3974045_201734_fmark))

principal théoricien de l'écologie politique et autre source d'inspiration marquante pour ce travail de recherche-action<sup>30</sup>.

### 2.2.1. Formation de l'humus forestier

Comment fonctionne une litière forestière ? Comment sont structurées ses différentes couches qui produisent l'humus ? En quoi peut-elle servir de modèle inspirant pour un nouveau composteur ?

#### 2.2.1.1. *Structure de l'épisolum humifère forestier*

L'humification correspond à un procédé de transformation aérobie de matières fermentescibles en conditions naturelles. Elle conduit à la formation d'humus, défini comme la « *fraction des matières organiques du sol transformées par voie biologique et chimique, sans organisation biologique identifiable à l'œil nu.* » (Jabiol *et al.*, 2009).

La classification des humus forestiers est affaire de spécialistes et a longtemps été chaotique, une multitude de termes ayant été proposés, depuis les travaux pionniers du danois Peter E. Müller dans les années 1880 (Feller *et al.*, 2005), pour désigner des horizons semblables ou regroupant sous un même terme des horizons voire des matériaux différents (Jabiol *et al.*, 2005). Les notions de litière et d'humus issues du langage courant sont accessibles au sens commun. Néanmoins, elles ne sont pas assez précises pour les pédologues, qui les remplacent par les termes scientifiques d'« episolum humifère » et de « formes d'humus ».

L'épisolum humifère correspondant à « *l'ensemble des horizons supérieurs d'un solum contenant des matières organiques, et dont l'organisation est sous la dépendance essentielle de l'activité biologique* » (Jabiol *et al.*, 2009). Il s'agit de « couches », appelées horizons O et A par les spécialistes, qui peuvent mesurer de 2 à 80 cm d'épaisseur (Toutain, 1981). Les horizons O se forment en conditions aérobies et sont caractérisés par la présence presque systématique de résidus de matière organique macroscopiques (= directement observables à l'œil nu) qui leur vaut la qualification d'horizons holorganiques (= « entièrement organiques ») (Jabiol *et al.*, 2009). Les horizons A

---

<sup>30</sup> Le volet économique et social du projet Compostou est directement inspiré du discours de S. Moscovici sur la psychologie des minorités actives (Moscovici, 2015).

contiennent un mélange de matières organiques et de matières minérales. Ils sont dits « hémiorganiques ». (« à demi organique » ou organo-minéral). Ils sont situés à la base des horizons holorganiques O lorsqu'ils existent, sinon à la partie supérieure du solum ou sous un autre horizon A. Dans un horizon A, l'incorporation des matières organiques aux matières minérales est toujours due à l'action d'êtres vivants. Il n'existe pas obligatoirement de liaisons entre ces deux types de matières, les matières organiques pouvant parfois être déposées par la faune entre les particules minérales (= phénomène de juxtaposition) (Jabiol *et al.*, 2009).

L'expression scientifique « formes d'humus » correspond quant à elle à « l'ensemble des caractères morphologiques macroscopiques de l'épisolum humifère (caractères des horizons O et A et de leur succession) dépendant de son mode de fonctionnement » (Jabiol *et al.*, 2009). Une forme d'humus désigne donc une succession caractéristique d'horizons dont l'activité biologique est productrice d'humus. En milieu forestiers, ces formes d'humus dépendent de 3 types de fonctionnement (eux-mêmes subdivisés en sous-types) : le mull, le moder et le mor (Toutain, 1981). Ce sont l'organisation et la structure des horizons O et A qui permettent de distinguer les trois types de fonctionnement des humus forestiers.

#### 2.2.1.2. Les horizons O

Les horizons O peuvent être classés en 3 types d'horizons aux caractéristiques morphologiques et fonctionnelles bien distinctes (Toutain, 1981 ; Jabiol *et al.*, 2009):

- Horizon OL: débris végétaux frais peu ou pas fragmentés constituant la litière *sensu stricto* ;
- Horizon OF: débris végétaux fragmentés et fermentés, en mélange avec 10 à 70% de matières organiques fines (boulettes fécales de vers et d'arthropodes principalement) ;
- Horizon OH: matière fine humique constituée à plus de 70% de matières organiques fines (boulettes fécales de collemboles et d'enchytréides essentiellement).

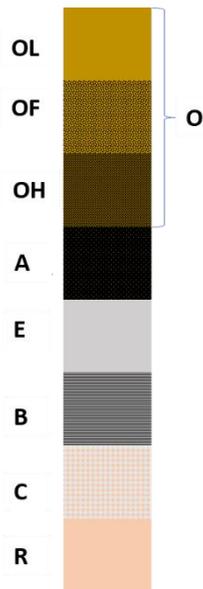


Figure 17: Schéma des différents horizons constitutifs d'un épisolum humifère forestier et ses horizons sous-jacents (d'après Toutain, 1981)

Dans ces horizons, l'activité biologique est le principal processus pédogénétique en action. L'horizon OL contient surtout des débris foliaires et des débris ligneux aisément identifiables et moins de 10% de matières organiques fines. Ces dernières sont présentes sous la forme de petits amas de matières organiques (boulettes fécales, débris végétaux et mycéliens), sans débris reconnaissables à l'œil nu, de taille inférieure ou égale à 1 mm. L'horizon OL peut reposer directement sur un horizon A ou être superposé à un horizon OF (Jabiol *et al.*, 2009). L'horizon OF est formé de résidus végétaux, surtout d'origine foliaire, plus ou moins fragmentés, reconnaissables à l'œil nu, en mélange avec des proportions plus ou moins grandes de matières organiques fines (plus de 10 % et moins de 70 % en volume). L'horizon OH contient plus de 70% de matières organiques fines. Ce pourcentage est évalué hors racines fines (mortes ou vivantes) qui sont souvent très abondantes dans cet horizon. La teneur en carbone organique dans l'horizon OH peut atteindre 15 à 50 % de la masse du sol fin, ce qui représente, en volume, plus de 70% de matière organique fraîche (Jabiol *et al.*, 2009). La présence de grains minéraux visibles à l'oeil nu est possible. L'horizon OH peut dans ce cas se distinguer de l'horizon A sous-jacent par une structure granulaire plus nette, tandis que la structure est plutôt massive, particulaire ou grumeleuse pour l'horizon A. Quand il existe, l'horizon OH se situe sous un horizon OF, sauf en cas d'érosion de ce

dernier ou de suppression des apports de litière, par exemple en cas de coupe rase du peuplement (Jabiol *et al.*, 2009).

Le référentiel pédologique de 2008 décrit plusieurs sous-types pour chacun de ces horizons O, que nous ne détaillerons pas ici. L'horizon OLv par exemple, est caractérisé par la présence de débris végétaux peu fragmentés, mais visiblement modifiés sous l'action de champignons (la lettre v vient du mot allemand *verändern* qui signifie modifié) et collés en paquets plus ou moins lâches (Jabiol *et al.*, 2009). L'horizon OF zoogène (noté OFzo), est lui caractéristique des formes d'humus de types moder : les matières organiques fines y correspondent à des boulettes fécales plus ou moins transformées, de forme variable (sphéroïde, ovoïde, etc.), dont la taille va de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  à 1 mm, voire 2 mm de diamètre. Cet horizon est le siège d'une intense activité animale (OF dit « actif »), mais sans présence de vers anéciques.

#### 2.2.1.3. *Horizon A et horizons sous-jacents*

Sous les horizons O, se trouvent généralement :

- L'horizon A: horizon hémiorganique, mesurant généralement de 2 à 10 cm d'épaisseur ;
- L'horizon éluvial E: une zone ayant tendance à perdre des matières (argile, fer, matière organique, carbonate de calcium, etc...);
- L'horizon illuvial B: zone d'accumulation des matières ;
- L'horizon C: la roche-mère non consolidée ;
- L'horizon R: la roche-mère consolidée, siliceuse ou calcaire.

Dans l'horizon A, l'incorporation de matières organiques aux matières minérales est toujours d'origine biologique et résulte principalement de l'activité de bioturbation des vers anéciques et endogés. L'horizon A est donc repérable aux traces de présence laissées par les vers (galeries, turricules), qui lui confèrent une structure grumeleuse. D'autres processus pédogénétiques peuvent toutefois y être observés (éluviation des argiles, décarbonatation, etc.) (Jabiol *et al.*, 2009). Le plus souvent, les horizons A contiennent moins de 17 g de carbone organique pour 100 g de terre fine, mais cette limite n'est qu'indicative (Jabiol *et al.*, 2009). Lorsque les agrégats de l'horizon A ont majoritairement une taille supérieure à 3 mm et représentent plus de 25% du volume de l'horizon, on parle d'un horizon A biomacrostructuré. Lorsque ces agrégats ont une taille comprise entre 1 et 3 mm (et représentent toujours plus de 25% du volume de

l'horizon), on parle d'un horizon A biomésosstructuré. Ce sous-type d'horizon A serait formé sous l'action de petits vers endogés, voire de vers épigés, en milieux moins favorables. Dans les épisolums humifères à faible activité faunique, un horizon A non grumeleux peut se mettre en place. Ce sous-type d'horizon ne présente pas d'activité de vers et les agrégats représentent moins de 25% du volume de l'horizon. L'incorporation de matière organique provenant des horizons O est alors le fruit de l'activité de bioturbation de la mésofaune (arthropodes et enchytréides). Les agrégats y ont alors une taille généralement inférieure à 1 mm et se juxtaposent aux particules minérales pour donner une texture particulièrement fine, voire sableuse. Dans ces horizons, l'humine microbienne est peu abondante et les complexes argilo-humiques sont donc rares ou absents.

***A retenir : L'épisolum humifère est organisé en horizons morphologiquement et fonctionnellement distincts qui en assurent le bon fonctionnement. En compostage de basse énergie, il faudra veiller à respecter une stratification (pas d'homogénéisation des couches d'apport entre elles, uniquement un brassage léger et superficiel des biodéchets), ce qui ira aussi dans le sens de la simplification des pratiques. L'horizon OL, en surface du compost en cours de formation, devra être le plus sec (matière sèche et carbonée en excès). L'horizon A, au contact direct avec le sol, sera le plus humide.***

#### *2.2.1.4. Influence des essences forestières sur la formation d'humus*

L'humus contient des matières organiques humifiées qui proviennent des matières organiques fraîches constitutives de la litière. Pour une hêtraie de productivité moyenne (6-8 m<sup>3</sup> de bois de Hêtre *Fagus sylvatica* L./ha/an, Figure 18), environ 5 tonnes de débris végétaux tombent au sol/ha/an (Toutain, 1981) et rechargent l'épisolum humifère. Dans ces 5 tonnes, on trouve :

- 4 tonnes de feuilles qui rechargent la litière début novembre,
- 1 tonne de débris divers : branches, brindilles, fleurs, faines, cupules, écailles de bourgeons etc.



Figure 18: Une hêtraie en climat tempéré (source : [jardinpermaculture.com](http://jardinpermaculture.com))

A cela s'ajoute 300 à 400 kg (en poids sec) de matière organique soluble sous forme de pluvio-lessivats foliaires qui tombent sur le sol surtout pendant la période feuillée. Ramenée au mètre-carré, la quantité de « biodéchets » générée sur place par l'activité biologique des hêtres n'est que de 500 g/m<sup>2</sup>/an en moyenne. En apparence faible, cette quantité de débris végétaux a néanmoins des conséquences écologiques importantes. Elle régénère en effet l'ensemble des horizons holorganiques O et impacte sérieusement la diversité végétale de la strate herbacée. Elle permet la fermeture du milieu et la mise en place d'un milieu forestier en favorisant les espèces arbustives et arborescentes : une étude menée en Allemagne a ainsi montré que le dépôt sur le sol d'une quantité annuelle de feuilles supérieure à 200 g/m<sup>2</sup> provenant de hêtres, de chênes et de charmes communs suffit à réduire significativement la richesse spécifique végétale et la couverture végétale du sol, ainsi que la production de biomasse de la strate herbacée (Loydi *et al.*, 2014).

Cette densité moyenne de feuilles marque donc le passage d'un sol de milieu prairial à un sol forestier. En Bretagne, dans la hêtraie de Fougères, les flux de restitutions annuelles de matières organiques sont faibles (386 ± 15 à 392 ± 9 g/m<sup>2</sup>/an) (Karroum *et al.*, 2005) mais suffisent à maintenir le milieu forestier et à recharger l'épisolum humifère. Une litière plus dense (600 g/m<sup>2</sup>) influence les micro-conditions climatiques, en réduisant les températures journalières maximales de 2,9°C et en

augmentant les minimales de 1,6°C comparativement à un sol sans litière. Une litière forestière épaisse permet donc de réduire l'amplitude thermique et de protéger le sol et les organismes qu'il contient du gel (3 jours de gel en cas de litière épaisse contre 16 jours sans litière, dans l'expérience menée par Loydi *et al.*, publiée en 2014).

Il a également été montré que la présence d'une litière de feuilles affecte la disponibilité des nutriments et l'acidité du sol dans les 10 premiers centimètres de l'horizon A, tandis que le contenu en argile va influencer ces paramètres dans les horizons plus profonds (10 à 20 cm sous la surface) (Langenbruch *et al.*, 2012). La nature des arbres dont proviennent les feuilles mortes qui composent la litière influence ces paramètres à la hausse ou à la baisse. Par exemple, une litière de Frêne commun (*Fraxinus excelsior*) augmente le taux de saturation<sup>31</sup> d'un sol, le pH et le stock de Mg<sup>2+</sup> échangeable dans les 10 premiers centimètres de l'horizon organo-minéral A (Langenbruch *et al.*, 2012). Le Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et l'Epicéa commun sont en revanche des essences acidifiantes, comme cela a pu être observé en climat atlantique sur roche-mère siliceuse filtrante (Duchaufour, 1953) ou dans les Ardennes, sur des schistes du Revinien (Nys, 1981). Le Hêtre, donne un humus à décomposition plus lente et à ratio C/N plus élevé que le chêne ou le charme (Duchaufour, 1950). L'origine de ces différences réside dans la composition des litières qui varie d'une essence à l'autre : teneurs différentes en azote, phosphore, potassium, calcium, en cendres, en substances solubles, en cellulose, lignine et protéines. Dans le cas d'une feuille de hêtre, la composition en poids sec est la suivante (Figure 19) :

#### Pourcentage du poids sec de la feuille

- Tannins = 30%
- Lignine = 10%
- Cellulose et hémi-cellulose = 35-40%
- Autres composés = 20-25%

#### Ratio Carbone/azote

36,8% carbone } C/N = 19,47  
1,89% azote }



© tree-guide.com

Figure 19: Composition et ratio C/N d'une feuille de hêtre (d'après Toutain, 1981 et Gloaguen et Touffet, 1982)

<sup>31</sup> Le Taux de Saturation d'un sol est le pourcentage de cations basiques (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup>) parmi l'ensemble des cations échangeables. Sa formule de calcul est la suivante : TS = (somme des cations basiques) / Capacité d'Echange Cationique.)

Les litières issues de différentes essences se distinguent aussi par la présence de divers éléments minéraux, de composés toxiques et par la structure anatomique des tissus végétaux déposés (Gloaguen et Touffet, 1982). Plus la litière d'origine contient de matières riches en lignine, plus la quantité d'humus stable formée est importante (Toutain, 1981). Ainsi les litières de chêne et de charme donnent des humus abondants (Duchaufour, 1950), à la structure relativement fine.

***A retenir : La matière organique à l'origine des humus est donc déposée en une couche mince, légère et aérée de matériaux hétérogènes secs (branches, fâines) ou mous (feuilles, fleurs). La litière forestière n'est rechargée qu'une fois par an, en automne. Au cours de sa décomposition, la litière monte peu en température car elle n'est pas confinée. En compostage de basse énergie, il faudra veiller à limiter la densité de déchets par mètre-carré afin d'éviter les élévations de température et faciliter l'action des animaux. Si on ne fait pas varier la surface de compostage (ce que permet en pratique le paillage), c'est la hauteur de compost en formation qu'il faudra surveiller, en introduisant auprès des utilisateurs une notion nouvelle de « hauteur limite » dans les pratiques de compostage. Le composteur de basse énergie pourra fonctionner même avec des apports réduits, si la faune qui l'occupe est bien active et abondante (toute la matière organique sera alors décomposée). Du broyat de chêne ou de charme permettrait probablement d'obtenir un compost et un humus fins, riches en carbone.***

#### 2.2.1.5. *Fonctionnements de types mull, moder et mor*

Hormis l'influence des essences d'arbres, la formation d'un humus est fonction de plusieurs facteurs. L'humification dépend de la nature des précurseurs minéraux (roche-mère), de la nature et de l'activité des agents biologiques (végétation et organismes de la litière et du sol), des caractéristiques du biotope et de facteurs environnementaux (température, humidité, pH...) (Duchaufour, 1950 ; Prévost, 1970). La combinaison de ces différents facteurs agit sur la vitesse de décomposition de la matière organique (Duchaufour, 1950) et sur le fonctionnement des horizons O et A, ce qui aboutit à différentes formes d'humus forestiers. On classe habituellement celles-ci en trois types selon leur fonctionnement, mull, moder et mor, détaillés ainsi par Poirier (2005) :

*« Les humus de type mull sont des humus dits actifs (Duchaufour, 1995) et sont caractérisés par une décomposition rapide des matières organiques de la litière. Les tannins n'y persistent pas longtemps.*

*Les humus de type mor sont dits peu actifs et peu évolués (Baize, 2004 ; Ponge, 2003 ; Lozet et Mathieu, 2002 ; Duchaufour, 1995). La transformation des matières organiques est très faible et très lente (Baize, 2004 ; Lozet et Mathieu, 2002), si bien qu'elles s'accumulent en des couches distinctes superposées au sol minéral (Caillier, 1999). Le passage est brutal entre les horizons organiques et minéraux (Ponge, 2003 ; Caillier, 1999) contrairement au moder où la transition est plutôt modérée (Ponge, 2003). Les échanges entre horizons holorganiques et organo-minéraux sont quasiment nuls (Baize, 2004). L'horizon minéral sous-jacent est appauvri en microagrégats (Ponge, 2003).*

*(...) L'humus de type moder est souvent défini comme un intermédiaire entre le mull et le mor (Sims et Baldwin, 1996 ; Klinka et coll. 1981 ; Prévost, 1970). Cet humus forestier aéré est caractérisé par la juxtaposition des fractions organiques et minérales et l'incorporation incomplète des matières organiques peu transformées au sol minéral (Baize, 2004 ; Lozet et Mathieu, 2002 ; Caillier, 1999). Les moders ressemblent aux mors au sens où ils sont constitués d'une accumulation de matière organique partiellement décomposée, mais ressemblent aux mulls puisqu'ils présentent une certaine activité faunique responsable de la fragmentation et de l'incorporation de la matière organique (Sims et Baldwin, 1996 ; Klinka et coll. 1981). La structure caractéristique de ce type d'humus est non grumeleuse et les complexes argilo-humiques sont absents (Caillier, 1999) ».*

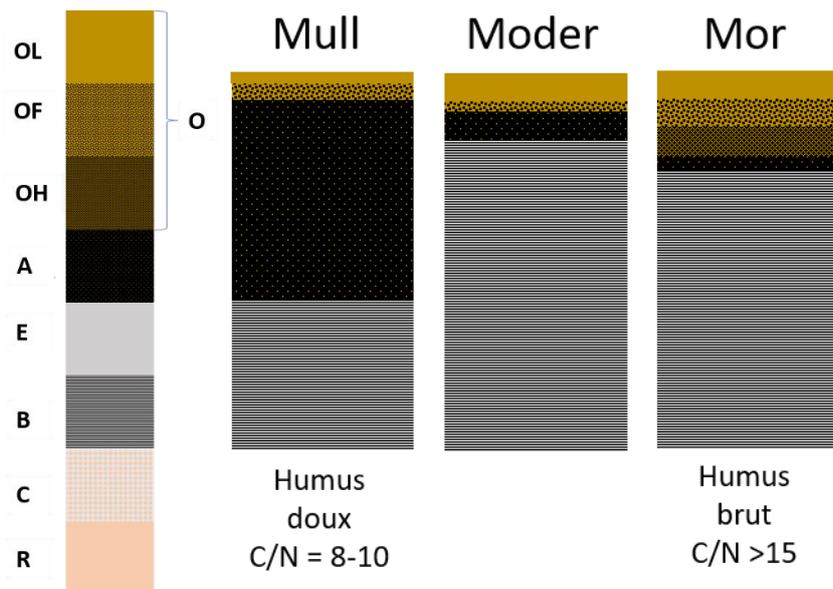


Figure 20: Schéma des différents types d'humus forestiers, d'après Toutain (1981) et Duchaufour (1950)

En résumé, les mulls sont marqués par une disparition rapide des litières, liés à une activité importante de vers de terre fouisseurs (généralement anéciques ou endogés, plus rarement épigés), responsable d'horizons A macro ou mésostructurés bien distincts des horizons O. Dans les moders, l'activité biologique de la faune est maximale dans les horizons O (vers épigés et enchytréides, arthropodes) ; les horizons A sont alors non ou peu bioturbés ce qui rend progressive la transition avec les horizons O. Enfin les mors se distinguent par une absence apparente d'activité animale notable, qui aboutit à une accumulation de matière organique peu décomposée et un processus d'humification très lent. Des horizons OL mesurant jusqu'à 80 cm d'épaisseur ont été observés dans des litières peu actives (Duchaufour, 1950). Le passage entre horizons O et A est très brutal, l'horizon A n'accumulant les matières organiques que par diffusion. Aux trois types de fonctionnement humifères classiques, Jabiol *et al.* (2009) ajoutent l'amphimus, une forme d'humus issue d'une activité faunique à la fois épigée et endogée. Les horizons O sont alors épais et les horizons A nettement mésostructurés.

Sous un peuplement forestier, il n'est pas rare que l'humus passe d'un type de fonctionnement à un autre. Sur sol acide, l'humus d'un peuplement forestier peut évoluer d'un fonctionnement de type mull initial à un fonctionnement de type moder après quelques décennies (Karroum *et al.*, 2005). La fertilisation contrarie la formation des moders (Deleporte et Tillier, 1999; Deleporte, 2001). Inversement, la fermeture de

la canopée inhibe la strate herbacée et conduit l'humus vers le moder, particulièrement sous épicea, pin, chêne et sapin Douglas (pour revue voir Karroum *et al.*, 2005).

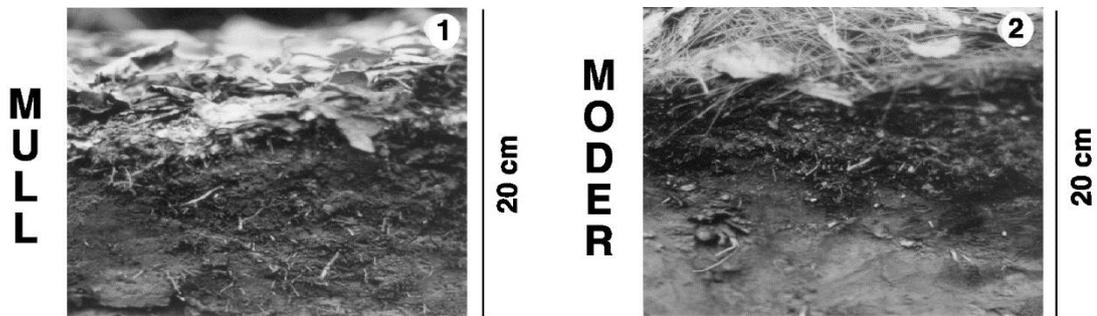


Figure 21: Dans une hêtraie en Bretagne, un mull s'est formé sous gaulis de 27 ans et un moder sous futaie de 87 ans. Dans ces conditions environnementales, le moder apparaît comme l'évolution du mull (Illustrations originales tirées de Karroum *et al.*, 2005)

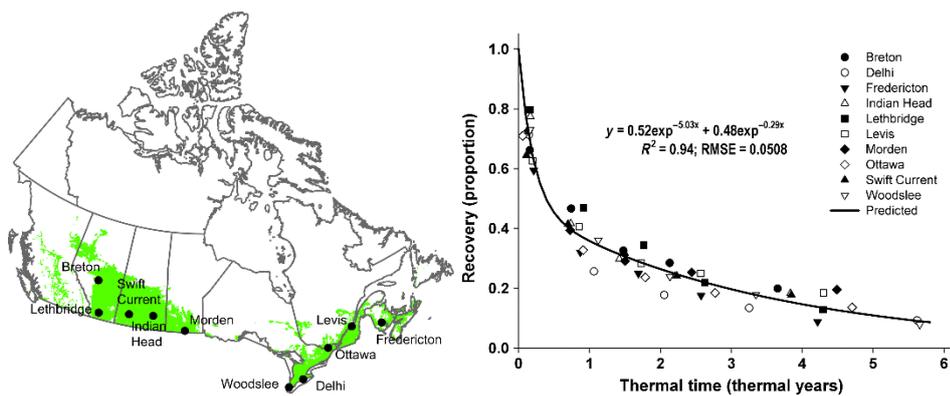
Un humus absorbe 5 à 6 fois son poids en eau, ce qui en fait un bon moyen de lutter contre les excès d'humidité dans le sol toute en limitant la formation d'une croûte de battance, obstacle à l'infiltration (Gendry, 2018).

***A retenir :*** *Même sur roches-mères filtrantes, les moders ont une capacité de rétention d'eau plus importante que des mulls à texture sableuse (Rousseau, 1960). Les moders aboutissent à la production de quantité d'humus moins importantes que les mulls. En compostage de basse énergie, un fonctionnement de type moder devra donc être recherché pour limiter les quantités de compost produites, absorber les excès d'humidité des biodéchets, sources de développement bactérien et de production de chaleur, et pour éviter d'arroser le compost. Il faudra pour cela favoriser l'activité des arthropodes et des vers épigés décomposeurs (faune fréquentant les horizons O de surface) et des enchytréides et des collemboles (faune des horizons A plus profonds). Il faudra veiller à composter sur le compost ancien pour le recharger en particules fines, maintenir les populations animales au contact des biodéchets et aboutir à la formation des complexes argilo-humiques dans l'horizon A.*

#### 2.2.1.6. Influence de la température sur l'humification

Duchaufour (1953) avait déjà remarqué que « *la matière organique est décomposée beaucoup plus rapidement dans les climats à opposition saisonnière marquée, à étés ensoleillés succédant à des hivers froids et enneigés, que dans des climats humides, à forte nébulosité et à extrêmes peu accentués* ». Une expérience récente (Gregorich *et al.*, 2017), menée par des chercheurs canadiens, a permis de confirmer ces observations et de démontrer que la décomposition de la litière est contrôlée par la température et non par les propriétés physico-chimiques du sol.

Cette expérience a consisté à marquer des feuilles d'une litière au C13 et de les placer en extérieur dans des sols canadiens de natures différentes. A intervalles réguliers, des feuilles ont été prélevées pour doser le C13 restant. La quantité de chaleur accumulée reçue par les litières a été calculée en degrés-jours<sup>32</sup>, afin de donner une expression en année thermique.



**Figure 22: En conditions expérimentales, Gregorich *et al.* (2017) ont montré que la vitesse de décomposition de la litière forestière est contrôlée par la température et non par les propriétés du sol (illustrations originales tirées de l'article)**

Si on analyse la quantité de carbone résiduelle en fonction du temps thermique exprimé en années thermiques (reflétant donc une accumulation de chaleur), on voit que l'essentiel de la perte de carbone à partir de la litière s'explique par la température de l'environnement. Autrement dit, si on retire d'un modèle explicatif conçu à partir des données empiriques le poids de la chaleur accumulée, il n'y a plus de différences significative entre les sites expérimentaux, qui ont pourtant des sols et des microfaunes différentes.

<sup>32</sup> La formule de calcul est la suivante : ((température maximale + température minimale sur 1 journée)/2)-température de base.

Par exemple, si la température de base = 0°C, la température maxi = 15 et la température minimale = 3, la quantité de chaleur reçue est de 9 degrés-jours ((15+3)/2)-0). 1 degré-année = 365,25 degrés jours et 1 année thermique = 10 degré-années.

L'étude scientifique de l'humification nous apprend qu'en milieu naturel la décomposition de la matière organique dépend de la quantité de chaleur accumulée par la litière par rapport à une température de base en deçà de laquelle l'activité biologique est bloquée (Gregorich *et al.*, 2017). Dans le cas de l'étude canadienne, la température de base était de 0°C. Il apparaît aussi que les variations de températures accélèrent la décomposition et que celle-ci peut parfaitement intervenir au sein de la gamme naturelle des températures journalières et de leurs variations saisonnières.

***A retenir : La quantité de chaleur accumulée par rapport à une température de base en deçà de laquelle l'essentiel de l'activité biologique est bloqué, joue un rôle essentiel dans la décomposition de la matière organique. Les variations de température accélèrent la décomposition de la matière organique. En compostage de basse énergie, il serait donc judicieux de veiller à ce que la température du compost en formation ne descende pas sous un seuil critique (maintien du système hors-gel) tout en pouvant varier naturellement tout au long de l'année.***

#### *2.2.1.7. Influence du solum sur l'humification*

La nature du sol peut accélérer ou ralentir le processus d'humification et modifier le taux de minéralisation des complexes organiques, qui est naturellement de l'ordre de 2% par an en moyenne. La présence de fer à l'état amorphe (hydroxyde) provoque par exemple l'insolubilisation d'une partie importante des composés phénoliques colorés des lessivats de litière (= « tannins ») sous forme d'acides fulviques et d'acides humiques. Sous l'action des alternances de sécheresse et d'humidité, ces produits évoluent et aboutissent à la formation de molécules plus condensées et insolubles (humines), qui, avec la matière minérale, forment un complexe argilo-humique stable, responsable d'une forte agrégation et d'une bonne aération (Toutain, 1981).

De plus les propriétés du sol peuvent influencer sur le ratio C/N en fin de processus d'humification. Ainsi, partant d'un ratio C/N de feuilles de hêtre fraîches de 19 à 20 (Figure 19), Duchaufour (1950) constate que le ratio C/N des formes d'humus atteint 12 à 13 seulement sur sol brun décalcifié en forêt de Haye, contre 15 à 17 sur sol gréseux acide en forêt des Basses Vosges (correspondant aux Vosges du Nord). Le pH des formes d'humus varie également selon le sol : un pH de 8 a été mesuré par Duchaufour (1950) sur sol très calcaire (Plateau de Langres) et de moins de 5 sur sol gréseux acide à

Fontainebleau par exemple. En Bretagne, sur sol brun lessivé sous hêtraie, Karroum relève des pH de seulement 4,2 dans les couches OL et OF d'un mull et de 3,6 pour un moder (Karroum *et al.*, 2005).

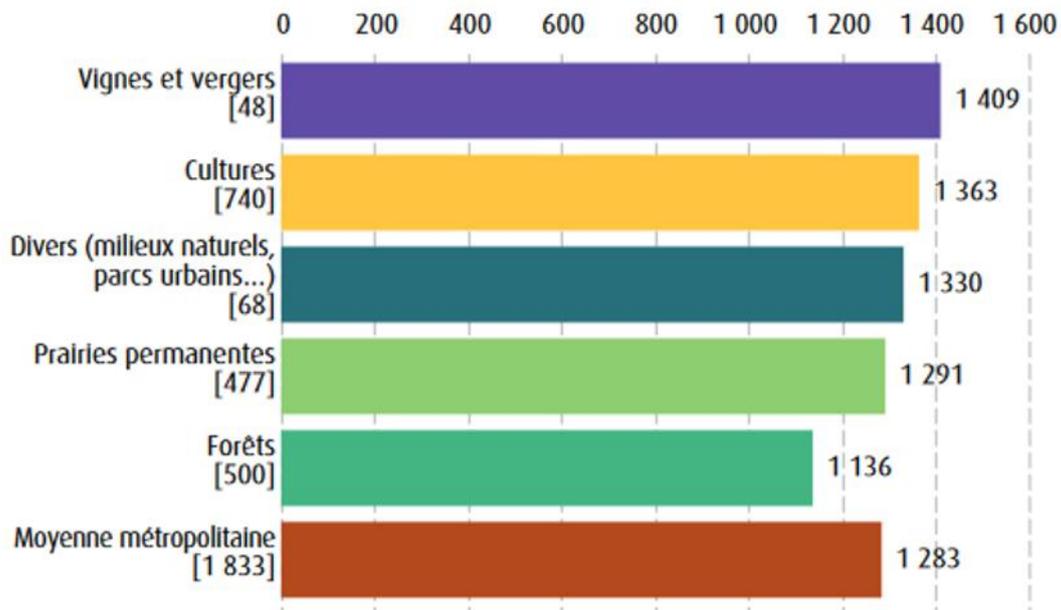
***A retenir : - La formation des complexes argilo-humiques nécessite une mise en contact d'éléments minéraux avec des substances humiques issues de l'activité des organismes décomposeurs. Sur sol artificiel (béton, bitume) ou fortement dégradé (sol tassé, minéral...) il faudra veiller à constituer une litière épaisse de broyat, de compost semi-mûr et de terre naturelle sous le composteur de basse énergie afin d'apporter les éléments constitutifs d'un sol (matière organique, organismes vivants et éléments minéraux). Le pH de la couche A sous un composteur posé sur sol calcaire et/ou corrigé avec des apports spécifiques (coquilles d'œufs et de mollusques, etc) sera basique. Il pourrait plaire aux vers et favoriser une densité élevée en bactéries du sol. Dans les autres cas, il faut s'attendre à une acidification du compost, qui pourrait plaire aux larves de diptères.***

### 2.2.2. Influence de la biodiversité sur l'humification

Le sol terrestre contient plusieurs milliers d'espèces animales, plusieurs centaines de milliers d'espèces de champignons et des millions d'espèces de bactéries. Les organismes vivants du sol représentent aussi une biomasse importante: En milieu prairial par exemple, ils pèsent 6 tonnes à l'hectare dont 3 tonnes de champignons, 1,5 tonnes de bactéries, 1 à 2 tonnes de vers de terre. (Leclerc, 2017). Selon le Commissariat général au développement durable (2015), les champignons, les bactéries et les animaux peuvent représenter à eux seuls jusqu'à 80%, 60% et 33% respectivement de la biomasse végétale récoltée en surface sur une prairie permanente. La vraie richesse d'un milieu terrestre est donc souterraine et échappe largement à nos sens.

En forêt, la biodiversité microbienne est plus faible qu'en milieu agricole (Figure 23). En France en 2015, le nombre de taxons bactériens forestiers (500 sites échantillonnés) était seulement de 1136 contre 1409 en milieux viticoles et en vergers (48 sites échantillonnés) (Commissariat général au développement durable, 2015). Cette différence s'explique par le fait qu'un écosystème forestier est peu perturbé et que la flore microbienne y est donc composée de populations stables, bien adaptées à leur

milieu. Le labour augmente la diversité microbienne, sans que cela soit forcément bénéfique aux fonctions agroenvironnementales du sol, en raison de la prévalence, dans cette diversité, d'organismes opportunistes. De plus le labour réduit la diversité fongique (Commissariat général au développement durable, 2015).



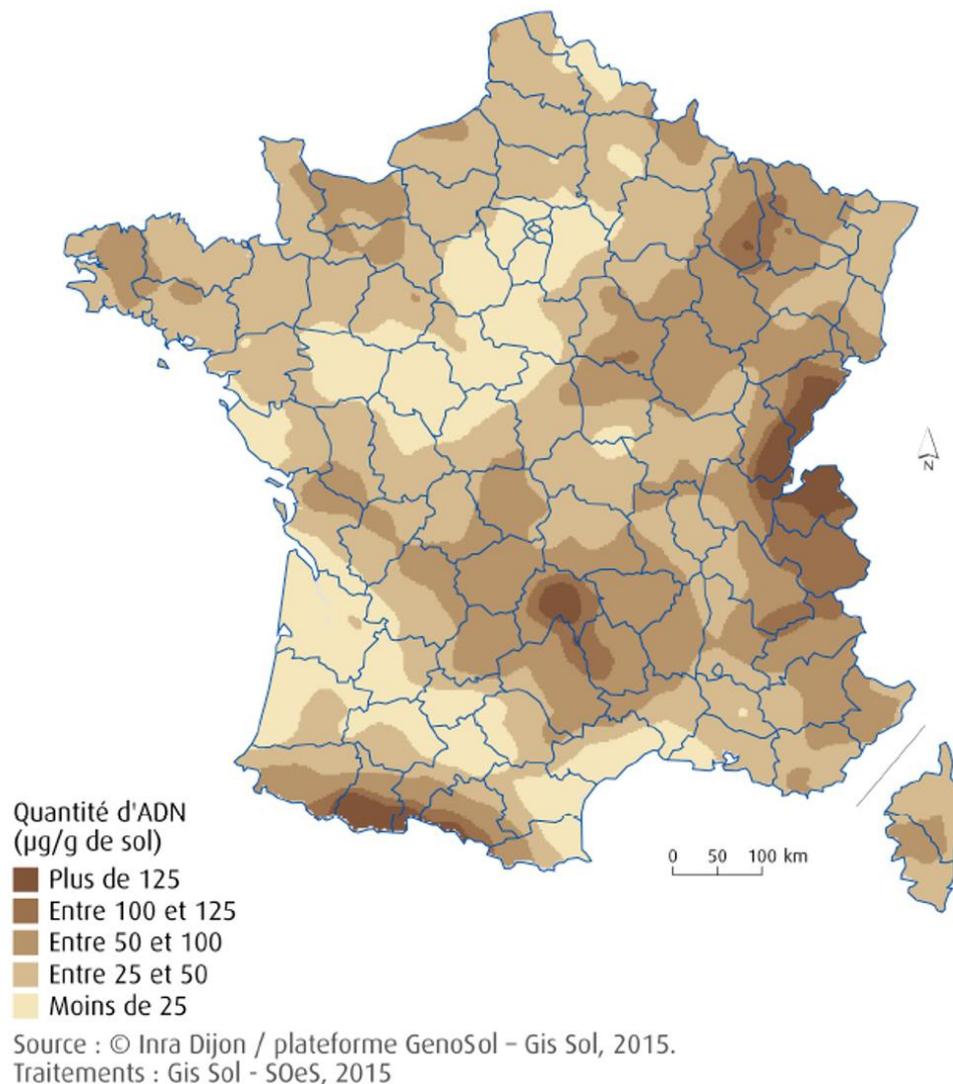
Note : [] = nombre de sites.

Sources : Inra/UMR Agroécologie, plateforme Genosol ; Gis Sol, RMQS, 2015.

Traitements : Gis Sol, 2015

Figure 23: Nombre de taxons bactériens dans les unités pédo-écologiques françaises (illustration originale tirée de Commissariat général au développement durable, 2015)

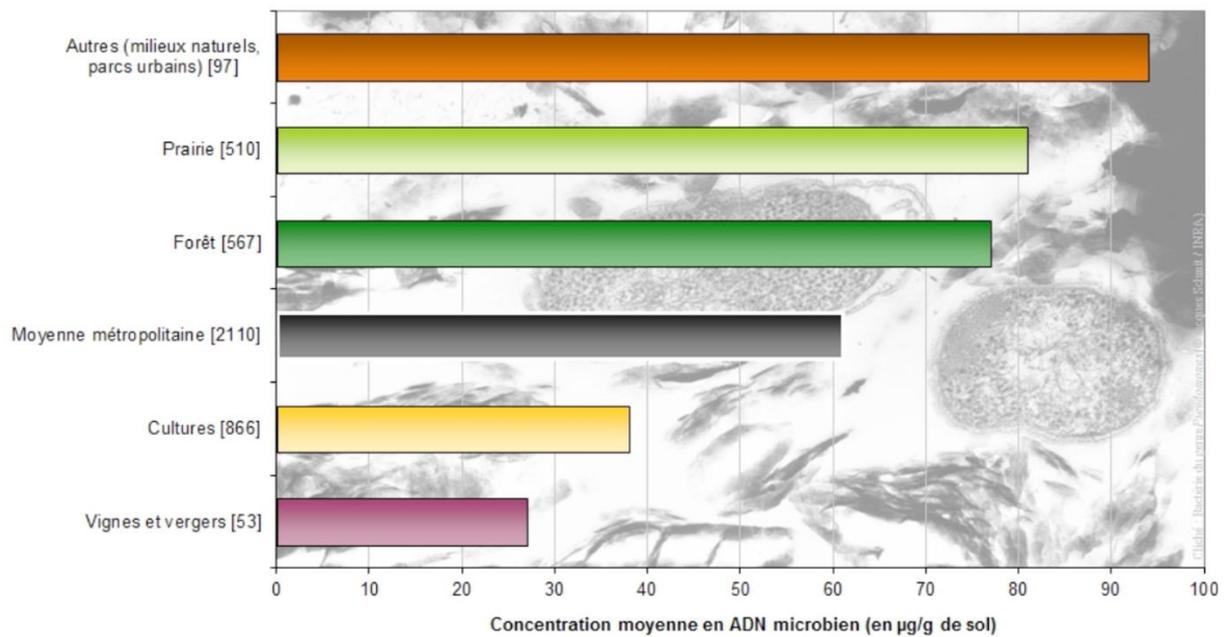
La biomasse microbienne des sols a été mesurée dans les sols de France métropolitaine, grâce à une estimation de la quantité d'ADN bactérien par gramme de sol (ONB, 2015) (Figure 24).



**Figure 24: Biomasse microbienne moyenne des sols en France métropolitaine et en Corse sur la période 2000-2009 (illustration originale tirée de ONB, 2015). Les résultats sur les bactéries proviennent de l'analyse de 2093 échantillons de sols issus du Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS).**

Elle s'échelonne de 2 à 629 µg d'ADN par gramme de sol (la valeur moyenne s'établissant à 61 µg). Les sols les plus riches en ADN microbien sont situés en Lorraine et en Champagne-Ardenne et en montagne (Alpes, Massif central, Pyrénées, Vosges). Les sols les plus pauvres se trouvent dans les Landes, le Nord et le Nord-Ouest de la France. Près de 75% des sols analysés ont des valeurs comprises entre 10 et 100 µg. En Indre-et-Loire, la concentration moyenne en ADN bactérien des sols est relativement faible : moins de 25 µg/g de sol en moyenne (ONB, 2015). Cette distribution géographique s'explique par plusieurs paramètres environnementaux (texture des sols, pH, teneur en carbone organique) et par les modes d'occupation du sol dominants. Les sols présentant la plus grande densité microbienne sont argileux, basiques et riches en carbone

organique. En règle générale, les sols sous prairie ou sous forêt ont une densité microbienne bien plus importante (bien que la diversité spécifique y soit moindre) que les sols cultivés en monoculture ou les sols de vignobles (ONB, 2015) (Figure 25).



**Figure 25: Biomasse microbienne moyenne des sols en France métropolitaine sur la période 2000-2009 en fonction du type d'occupation des sols (illustration originale tirée de ONB, 2015)**

A l'action des bactéries sur la décomposition de la nécromasse, il convient d'ajouter le rôle primordial des champignons saprophytes et mycorhiziens dont les hyphes parcourent l'humus (Rayner, 1993). Les champignons saprophytes basidiomycètes (pourriture blanche des feuilles par exemple) sont des agents lignolytiques, responsables de la décomposition de la lignine et des tannins des débris d'essences forestières. Ils complètent le rôle des agents cellulolytiques (bactéries et autres champignons saprophytes) qui décomposent la cellulose. Ils préparent également la nécromasse végétale à l'attaque des champignons mycorhiziens, dont les enzymes (protéases, peroxydases, laccases, phénol-oxydases, tyrosinases,...) permettent la libération de l'azote et du phosphore organiques. Les champignons mycorhiziens établissent avec les plantes des relations symbiotiques, allant du mutualisme au parasitisme, et leur présence améliore la qualité de l'humus et la structure du sol. Ils régulent notamment les excès d'humidité par leur extraordinaire pouvoir de colonisation du volume du sol. On estime que pour un mètre de racine végétale mycorhizée, le champignon fournit jusqu'à 1 km d'hyphes (fins filaments) qui vont capter de l'eau et des sels minéraux au profit de la plante, en échange de sucres et de

lipides. Plus de 200 associations mycorhiziennes différentes sont connues par exemple pour le hêtre.

La faune du sol joue également un rôle majeur dans la décomposition des litières forestières. Elle se subdivise en trois groupes différenciés selon leur taille : la microfaune (taille inférieure à 0,2 mm), la mésofaune (taille de 0,2 à 2 mm) et la macrofaune (supérieure à 2 mm). L'ensemble de ces espèces se concentre dans les 30 premiers centimètres de l'épisolium forestier.

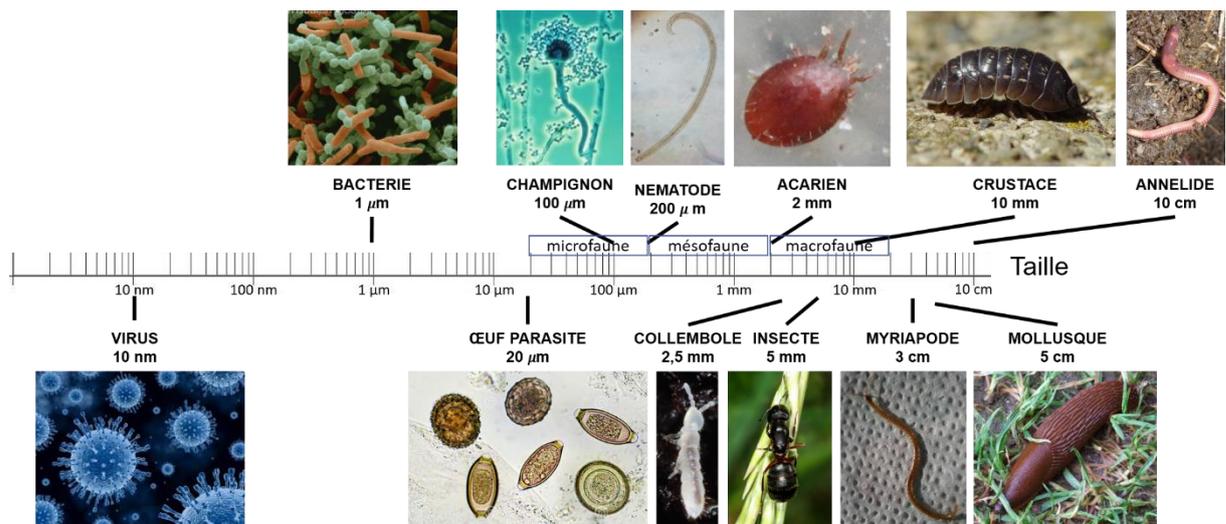


Figure 26: Micro et macroorganismes de l'humus<sup>33</sup>

Les nématodes, appartenant à la microfaune, sont des prédateurs de la microflore du sol (bactéries, champignons), ils stimulent donc son renouvellement. La mésofaune réunit principalement les collemboles et les acariens (Figure 27). Ils fragmentent les résidus végétaux. Cloaguen et Touffet (1982) ont réalisé une expérience montrant l'influence de la mésofaune dans l'abaissement du ratio C/N d'un moder constitué à partir de feuilles de hêtre sous climat atlantique. En plaçant des feuilles de hêtre en sachets nylon de mailles de 0,3 à 2 mm entre les couches F et L d'une litière de hêtre ou de conifères pendant 3 ans et demi, les auteurs ont empêché l'action de la mésofaune sur les débris végétaux.

<sup>33</sup> Sources des images utilisées dans cette illustration : Collembole (*Folsomia candida*) : Anna Faddeeva-Vakhrusheva et al., CC BY 4.0 ; Annélide (*Eisenia foetida*) : Rob Hille, CC BY-SA 3.0 ; Acarien : © Thomas Legrand, 2014, tous droits réservés ; Crustacé (*Armadillidium vulgare*) : Franco Folini, CC-BY-SA-2.5 ; Mollusque : Christophe Finot, CC-BY-2.5 ; Myriapode (*Geophilus flavus*) : EnDumEn, CC BY-SA 3.0 ; Fourmi (*Camponotus herculeanus*) : Munich Makro Freak CC-BY-SA-2.5; Nematode: Christina Menta, CC-BY-3.0; Araignée: Josve05a, CC-BY-2.0; Diplopedes: © Animateur-nature.com, 2016, tous droits réservés.

## DÉCOMPOSITION D'UNE FEUILLE DE HÊTRE

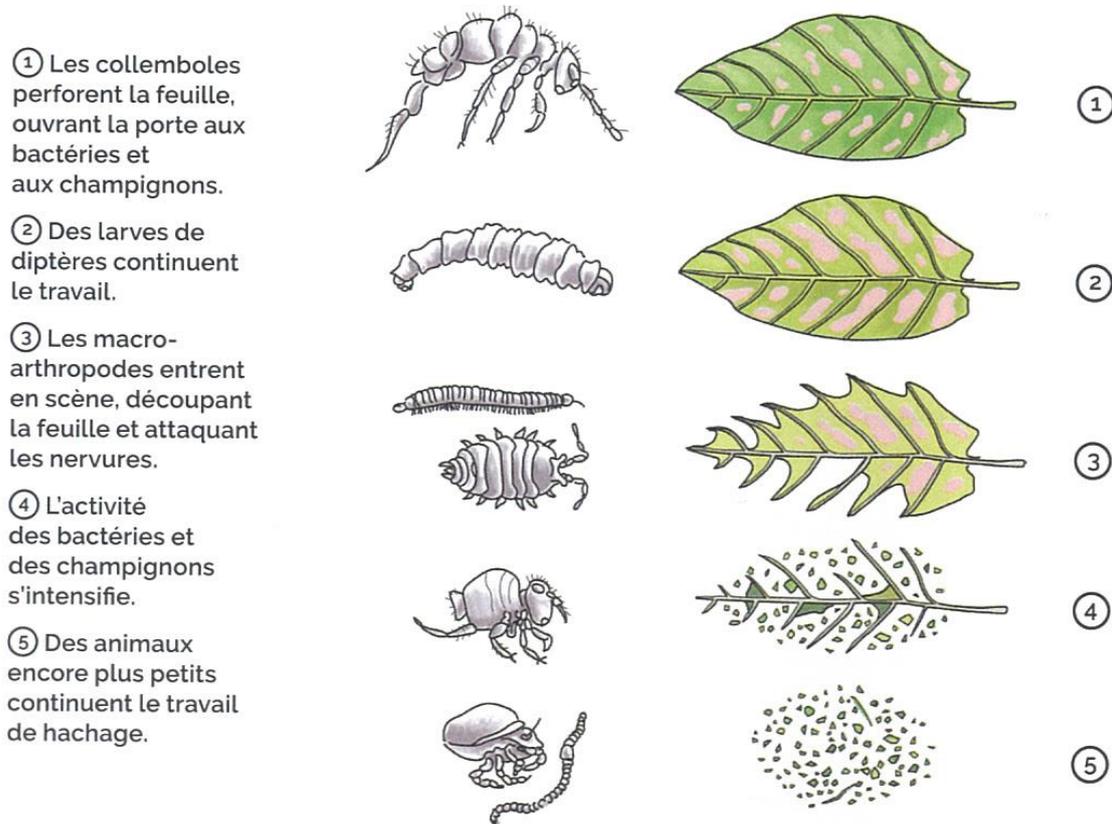


Figure 27: Décomposition d'une feuille de hêtre par la faune du sol (illustration originale tirée de Leclerc, 2017)

Les teneurs en carbone et azote totaux et les ratio C/N relevés dans les différents horizons de cet épisolium humifère expérimental étaient les suivants :

- Horizons OL et OF: 41 à 45% de carbone total, 1,62 à 1,92% d'azote total. Ratio C/N=27,78 (à T0) à 21,35 (après 3 ans ½) ;
- Horizons OH: 43,5% de carbone total, 2,12% d'azote total. Ratio C/N=20,52 ;
- Horizons A: 11,6% de carbone total, 0,6% d'azote total. Ratio C/N=19,33

Cette expérience montre qu'en l'absence d'action de la mésofaune, le ratio C/N de cet épisolium humifère reste très élevé, y compris dans la couche d'humus A1, et proche de celui d'une feuille fraîche. L'action des collemboles et des acariens est donc indispensable à l'accélération de la minéralisation du carbone grâce à leur activité coprogène (production de boulettes fécales à la base de la formation de l'humus).

Enfin, la macrofaune (fourmis, vers de terre, etc.) fragmente les résidus végétaux morts qu'elle incorpore au sol. Elle crée par ailleurs sa propre porosité (galerie, déjection, turricules, fourmilière), qui influence la circulation de l'air et de l'eau dans le sol.

L'ensemble de ces animaux travaille lentement mais ils travaillent longtemps (pendant des décennies parfois comme dans le cas de la décomposition d'un tronc d'arbre dont les forestiers disent qu'il mettra une durée équivalente à la moitié de son âge lors de l'abattage pour se décomposer). Surtout, ils peuvent survivre plusieurs mois à l'absence de matière organique fraîche ou en cas de précipitations faibles car ils ont généralement la possibilité de migrer vers des couches plus profondes et plus humides.

Dans l'épisolum humifère, l'association fonctionnelle entre animaux du sol et microorganismes aboutit à une décomposition efficace de la matière organique. Karroum *et al.* (2005) ont suivi l'évolution d'une litière de hêtre et la transformation des biopolymères, lignines et polysaccharides dans un mull et un moder. Dans les horizons supérieurs (OL) des deux formes d'humus, les champignons de la pourriture blanche dégradent de la même manière les tissus foliaires. Dans les horizons A en revanche, les deux formes d'humus présentent des activités fauniques différentes, qui ont des répercussions structurales et fonctionnelles importantes. Au microscope électronique, l'action des vers de terre du mull se traduit par une association intime entre les constituants organiques et minéraux (flocons polysaccharidiques sur lesquels se fixent des minéraux) au sein de laquelle des colonies de bactéries viennent se loger. Dans le moder, l'action des enchytréides et des collemboles conduit à une juxtaposition d'agrégats hérités (donc issu des horizons supérieurs) avec d'une part des agrégats de matière organique (déjections) et d'autre part de la matière minérale. Les bactéries sont davantage présentes dans l'horizon OH du moder, tandis qu'elles sont bien présentes dans les horizons OF, OH et A du mull. Ces différences de répartition de la biodiversité au sein du mull et du moder conduisent à des modifications microscopiques des horizons qui aboutissent elles-mêmes à des structures macromorphologiques bien distinctes. Ces résultats confirment des études antérieures sur les rôles respectifs de la pourriture blanche, des vers de terre, des enchytréides et des microarthropodes sur la décomposition des feuilles de hêtre (Toutain, 1981).

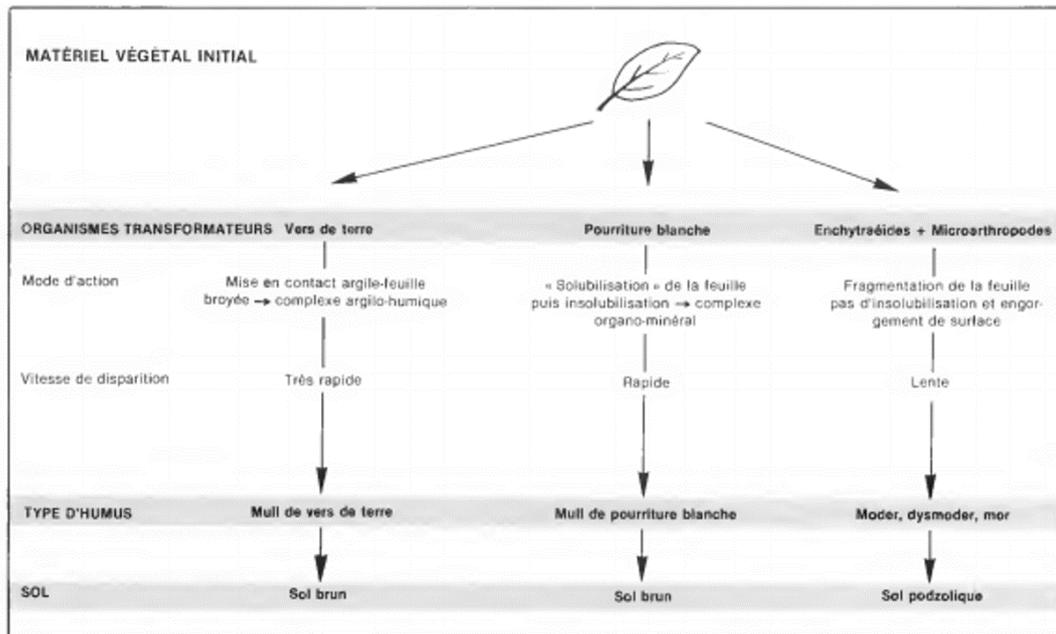


Figure 28: Représentation schématique des divers modes de transformation d'une feuille de hêtre en milieu aéré (illustration originale tirée de Toutain, 1981)

Dans une étude portant sur l'abondance et la richesse de la biodiversité des sols bretons selon l'occupation des sols (Réseau de Mesures de la Qualité des Sols), l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes a révélé que les sites forestiers sont caractérisés par des valeurs de biomasse microbienne et d'abondance d'acariens les plus élevées, alors que les abondances en lombricidés sont les plus faibles (50 ind./m<sup>2</sup>), (Figure 29). L'abondance en vers de terre est la plus forte sous prairie (350 ind./m<sup>2</sup>) et intermédiaire sous cultures (215 ind./m<sup>2</sup>).

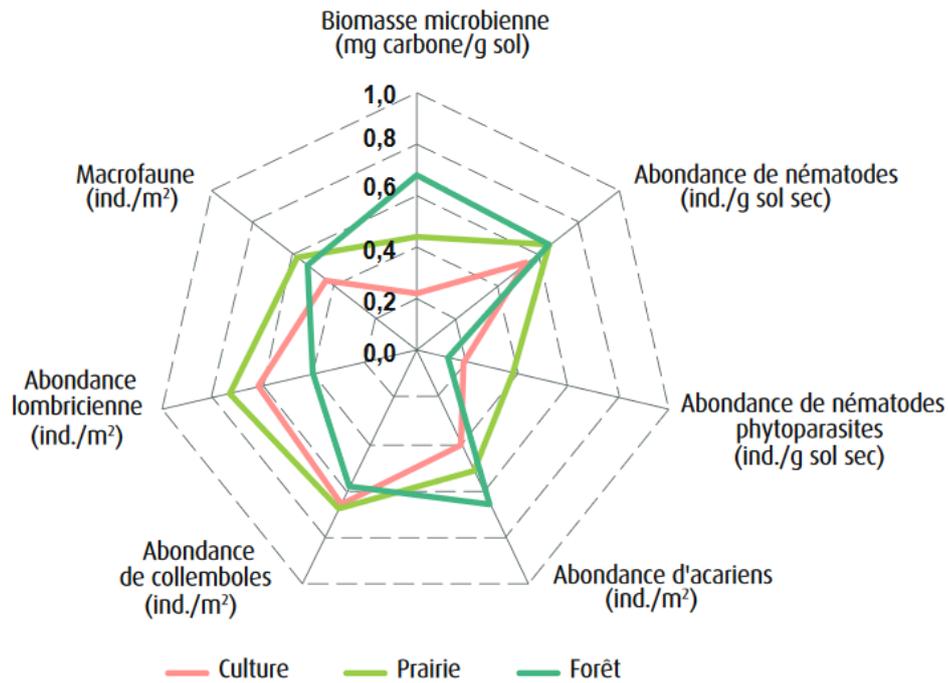


Figure 29: Abondance et richesse de la biodiversité des sols bretons selon l'occupation des sols (illustration originale tirée de Commissariat général au développement durable, 2015 et adaptée d'une étude de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes)

Dans l'intestin des animaux forestiers on trouve une microflore symbiotique riche et diversifiée, généralement anaérobie. Ces bactéries et protozoaires intestinaux permettent notamment la dégradation de la lignine et de la cellulose et éliminent une partie des microbes circulants par compétition. Ils jouent donc un rôle important d'épurateurs de l'environnement qui évite que les litières forestières ne se transforment en réservoirs de microorganismes pathogènes malgré les quantités importantes de matières organiques en décomposition qui s'y trouvent.

Des espèces prédatrices sont présentes en abondance dans les sols forestiers et jouent un rôle complémentaire de régulation des invertébrés. Il s'agit notamment des staphylins, des araignées, des carabes, des chilopodes, des opilions et des pseudoscorpions.

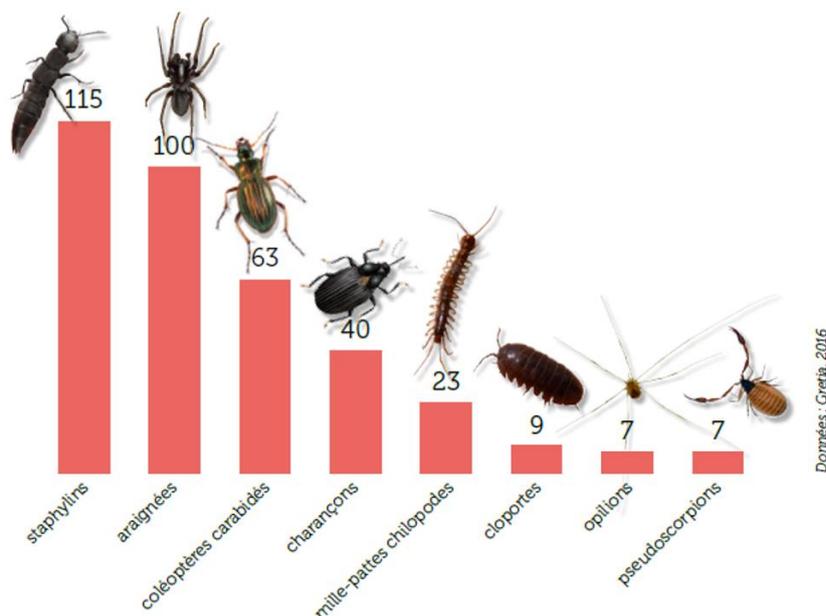


Figure 30: Nombre d'espèces prélevées dans une dizaine de sites forestiers en Bretagne (illustration originale tirée de Savelli, 2016, d'après Gretia, 2016)

**A retenir :** Il serait optimum d'installer le composteur de basse énergie sur un sol vivant et de l'ensemencer avec du compost semi-mûr contenant des invertébrés décomposeurs et prédateurs après un mois de fonctionnement, afin que les biodéchets aient eu le temps d'être dégradés par un cortège de bactéries et de champignons saprophytes pionniers. En limitant les perturbations profondes du milieu, les organismes pourront se répartir en fonction de leurs besoins et de leurs préférences et exploiter au mieux les différentes strates de biodéchets. Les arthropodes devraient se concentrer dans les horizons OL, OF et OH : cloportes, acariens et forficules dans les zones les plus sèches (OL), larves de diptères et collemboles dans les zones plus humides (OF), larves de cétoines et fourmis dans les couches de matières fines (OH). Des annélides épigés et anéciques et des collemboles pourraient exploiter l'horizon A si l'humidité y est suffisante. Sur sol drainant (sable), il sera difficile de maintenir une population d'annélides efficace. En revanche, ils devraient pouvoir se maintenir juste au-dessus d'un sol imperméabilisé (béton, bitume). Les champignons zygomycètes (pourriture grise des aliments par exemple) devraient se rencontrer dans les horizons secs à modérément humides et les basidiomycètes dans les horizons les plus humides. En théorie, il devrait être possible de nourrir des champignons ectomycorhiziens avec

***les sucres et lipides issus des biodéchets et de bénéficier en retour de leur capacité structurante et absorbante pour réguler les excès d'humidité, dans un composteur de basse énergie. La faune se concentrant dans les 30 premiers centimètres de l'épisolum forestier, la hauteur du compost mis en maturation ne devrait pas excéder cet ordre de grandeur. La flore symbiotique des animaux devrait pouvoir jouer un rôle d'épuration permettant d'hygiéniser les biodéchets, même en l'absence de montée en température.***

### 2.2.3. Le compostage, un état dégradé du processus d'humification

Au vu des éléments recueillis à l'issue de l'analyse critique du compostage de haute énergie et des informations rassemblées sur le processus d'humification, il apparaît que les méthodes actuelles de compostage de haute énergie constituent des états dégradés du processus d'humification, car :

- Elles sont très consommatrices en énergie ;
- Elles sont dépendantes d'une intervention humaine pour le contrôle de certains paramètres-clés (humidité, oxygénation, température, etc.) et affiner le produit final par tamisage ;
- Elles conduisent à un tassement sévère de l'humus en raison d'une masse de matières importante au-dessus de l'humus en formation, à surface équivalente ;
- Elles nécessitent des volumes importants d'intrants (matières carbonées, eau) pour décomposer correctement les biodéchets et mobilisent parfois des substrats additionnels non indispensables (activateurs de compost, correcteurs d'acidité) ;
- Elles mobilisent une faible biodiversité ;
- Elles perturbent en permanence le milieu de vie des animaux du composteur ;
- Elles n'aboutissent presque jamais à la formation de complexes argilo-humiques car les lombricidés anéciques fréquentent peu le compost en formation ou en maturation ;
- Elles n'améliorent pas la structure du sol car le compost est généralement collecté et transféré en fin de processus.

L'état le plus dégradé de ce processus d'humification est sans doute le compostage mécanisé, qui nécessite la consommation d'énergies fossiles, un contrôle

strict des facteurs abiotiques et qui s'effectue sur sol artificialisé, sans participation significative de la faune au processus.

Sur un continuum de qualité du processus d'humification, on peut donc placer les différentes formes d'humus naturels produits en milieux forestiers à côté des méthodes de compostage (figure suivante).

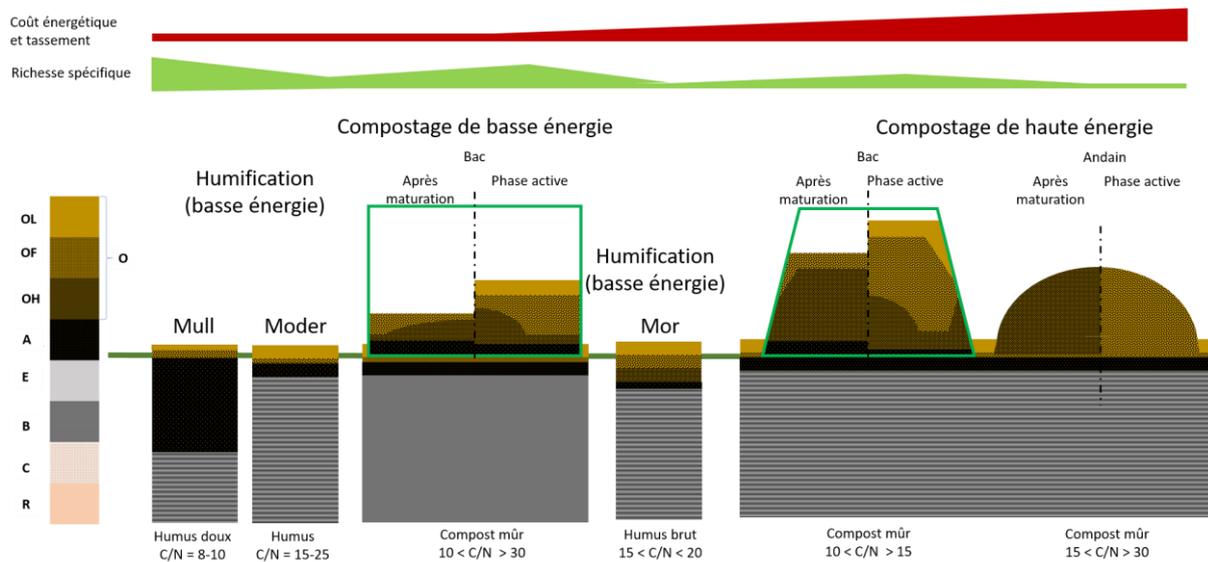


Figure 31: De l'humification naturelle au compostage

L'objectif de notre travail était de proposer une méthode de compostage de basse énergie qui s'intercale sur ce continuum au moins entre le mor, une forme d'humus peu actif dans lequel les couches de matière organique en décomposition se superposent en couches distinctes et le moder, forme d'humus dans laquelle une activité faunique permet la fragmentation et l'incorporation au sol de la matière organique.

#### 2.2.4. Des solutions naturelles pour un composteur bioinspiré à basse énergie

La figure ci-dessous montre comment, à partir de l'étude de la formation de l'humus forestier, nous avons proposé de répondre aux questions posées en section 2.1.2.

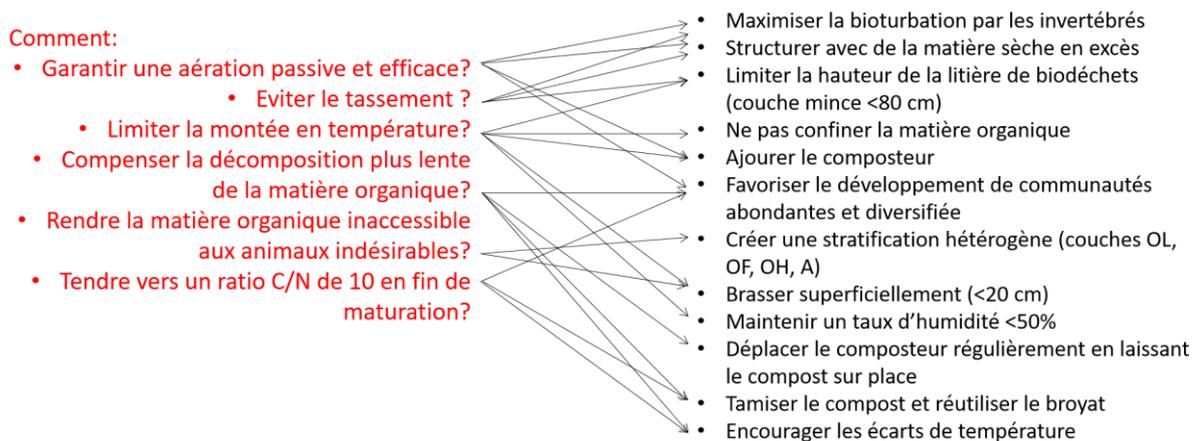


Figure 32: Solutions mises en œuvre pour le Compostou, à l'issue de l'étude de l'humification en milieu forestier

Dans la méthode Compostou, l'**aération passive** est avant tout assurée par une bonne structuration du compost, grâce à un excès de matière sèche et carbonée (broyat de branches). Une proportion minimum de 50% de broyat de branches doit être ajoutée dans le Compostou à chaque apport de biodéchets. Cet excès de broyat de branches absorbe l'humidité et crée un réseau de microcavités qui oxygène le compost, y compris en profondeur. Les microcavités servent de zones de vie et de refuge aux invertébrés du sol. Ceux-ci peuvent circuler plus librement dans le compost en formation et maximiser la bioturbation du compost (homogénéisation du milieu par l'activité animale). En circulant profondément et aisément dans toute la masse du compost en formation, les animaux peuvent mieux exploiter l'ensemble des ressources nutritionnelles, ce qui influence positivement leur développement et leur reproduction et optimise le compostage. Peu à peu, une communauté animale abondante et diversifiée se met en place, d'autant plus rapidement et durablement que le milieu est peu perturbé. Les interstices entre les planches du Compostou, réalisé en bois, peuvent servir de gîtes et de nurserie à de nombreuses espèces et attirent particulièrement les animaux grégaires tels que les cloportes, qui font preuve de thigmotactisme. Des ajours pratiqués dans les parois du Compostou permettent la libre circulation des animaux depuis et vers les biodéchets. Ces ajours assurent aussi une ventilation passive qui permet l'évacuation des gaz (méthane, sulfure d'hydrogène, CO<sub>2</sub>, vapeur d'eau...) et assèche l'atmosphère dans l'appareil. L'évaporation de l'eau est facilitée, ce qui augmente la porosité du compost et donc son oxygénation.

Les biodéchets juxtaposés aux éclats de branches broyées sont progressivement consommés par les animaux et transformés en boulettes fécales fines. Par gravité et

bioturbation, la perméabilité des horizons supérieurs augmente à mesure que s'accroît la densité et l'humidité des horizons inférieurs. Un horizon organo-minéral, composé de boulettes fécales héritées des horizons humifères supérieurs et d'éléments minéraux remontés des horizons inférieurs, peut se former sous l'action de lombricidés. Les conditions sont réunies pour la formation des complexes argilo-humiques caractéristiques de l'humus dans un délai raisonnable (8 à 12 mois).

Structuré et poreux, le compost issu du Compostou est moins dense que des composts produits dans des composteurs traditionnels. En limitant la hauteur du compost en formation, on diminue la pression qui s'exerce sur le compost plus ancien et **l'humus est moins tassé**. Pour rester dans des conditions proches de celles observées en forêt, une hauteur limite de 80 cm de compost en formation doit être respectée. Par précaution, cette hauteur limite est ramenée à 50 cm dans le Compostou.

Pour **limiter la montée en température** du compost et rester en compostage de basse énergie, le milieu est maintenu relativement sec (taux d'humidité inférieur à 50%) par l'ajout de broyat en excès. L'objectif recherché est de toujours rester en dessous des 40°C, même lors de pics de température estivale. La chaleur produite est dispersée grâce aux ajours et ouvertures ménagés dans la paroi du Compostou et par l'absence de confinement de la matière. En permanence, un grand volume d'air renouvelé de manière continue et correspondant à plus de 50% du volume de biodéchets et de broyat en décomposition, refroidit le compost en formation. Grâce aux brassages superficiels, le milieu garde son hétérogénéité, ce qui empêche les bactéries thermophiles de se répartir de manière uniforme dans le compost et de métaboliser rapidement toutes les ressources nutritionnelles disponibles. Le compost n'est jamais arrosé. Abaisser la température du compost permet d'abaisser celle de l'air environnant, à l'intérieur du Compostou. Or, plus l'air est chaud, plus il peut contenir d'eau sous forme vapeur. Inversement, quand l'air se refroidit, la vapeur condense et forme des gouttelettes d'eau liquide. Le seuil de la saturation augmente donc avec la température. En réduisant la température du compost on facilite la condensation de l'eau sur les parois du Compostou et son infiltration, par gravité à travers les biodéchets, vers les horizons plus profonds. L'eau de pluie infiltrée et la vapeur d'eau atmosphérique, l'eau remontant du sol par capillarité, l'eau issue des biodéchets et du broyat et l'eau métabolique produite par les organismes du composteur suffisent à répondre aux besoins hydriques de ce mini écosystème.

Pour **compenser une décomposition éventuellement plus lente** de la matière organique, due à une faible activité bactérienne thermophile, le développement d'une communauté d'animaux abondante et diversifiée est privilégié. Ceci est accéléré en ensemençant le silo de compostage avec un inoculum composé d'organismes variés : phytophages, nécrophages, détritivores, prédateurs, parasites, ... En pratique, un inoculum d'une dizaine de litres de compost semi-mûr, riche en vers de terre, et obtenu par compostage de biodéchets ménagers en andain en milieu forestier (Figure 33) est déversé dans un Compostou après un mois d'utilisation.



Figure 33: Compostage en andain en milieu forestier permettant de produire « l'inoculum » des Compostous

Il est également possible, voire préférable, d'utiliser pour l'ensemencement du compost immature issu d'un second Compostou. Toutefois, ce compost est parfois délicat à prélever en cours de fonctionnement (nécessité de déposer les modules du silo de compostage pour accéder au compost en formation). La constitution d'une petite plateforme de compostage en milieu forestier a également l'avantage de pouvoir y

transférer et y traiter d'éventuels excès de biodéchets produits par les utilisateurs de Compostous, sans avoir à déclencher prématurément des rotations. Nous avons eu ce problème sur les premiers sites Compostou implantés, où le nombre limite d'utilisateurs n'était pas encore bien fixé, une situation qui a conduit à des apports excédant les capacités de l'appareil. Par la suite, nous avons constaté qu'il était important de limiter le nombre d'utilisateurs à 15 personnes adultes pour éviter d'avoir à transférer les biodéchets ou à déclencher des rotations trop fréquemment. Afin que les animaux recolonisent facilement et rapidement le Compostou après une rotation, le compost mature est laissé sur place. Le passage des animaux au ras du sol est facilité par les ajours dans les parois du Compostou. En diminuant l'humidité du compost en formation, le broyat résiste mieux au processus de compostage. Une grande quantité peut être réutilisée après tamisage, avec des variations de masse de broyat résiduelle selon les essences forestières utilisées. Le broyat de chêne, en particulier, a une très bonne tenue dans le temps. Ce broyat recyclé est imprégné de microorganismes (bactéries en biofilms et champignons ascomycètes) et permet d'accélérer la colonisation microbienne du compost en formation, et donc sa décomposition après une rotation. Enfin, la décomposition de matière organique est accélérée en favorisant les écarts de température subis par les biodéchets en mélange avec le broyat. Le Compostou est installé à mi-ombre, une situation qui lui permet de subir de la fraîcheur et de la chaleur au moins une partie de la journée.

**Afin de limiter la présence d'animaux indésirables** dans le Compostou, plusieurs dispositions sont prises. Tout d'abord, le Compostou fonctionnant principalement à l'aide d'animaux, la notion d'indésirables est restreinte à une courte liste afin de limiter le nombre d'espèces à contrôler, sans impacter les auxiliaires utiles. Les animaux indésirables sont ici les chats, les rongeurs et les moucheron en abondance.

Les chats peuvent transmettre aux humains au moins 9 agents zoonotiques différents à l'occasion de morsures ou de griffures occasionnelles (Brown *et al.*, 2005) et 28 à 80% des morsures de chats s'infectent (Talan *et al.*, 1999). Ils apprécient d'uriner et de déféquer sur les substrats souples tels que le compost mûr. Ils peuvent emporter et disséminer des restes alimentaires autour d'un composteur si ces restes leur sont accessibles. Une analyse multivariée des facteurs de risque à l'origine de

l'hyperthyroïdisme chez des chats en Nouvelle-Zélande a notamment montré que l'utilisation de fertilisants et d'amendements organiques au jardin (compost, fumier) multiplie par un facteur 5 le risque pour les chats de souffrir de cette maladie (Olczak *et al.*, 2005). Il y a donc un intérêt réciproque à exclure les chats des Compostous, mais à les maintenir dans leur environnement pour réguler les populations de rongeurs. Ceci a été réalisé en concevant des ajours du Compostou d'une taille inférieure à celle d'un chat, afin qu'il ne puisse pas s'y glisser à l'intérieur. De plus, chaque carré de compost mûr, produit par le Compostou, est protégé par un grillage à poule, qui empêche le chat d'y faire ses besoins.

En ce qui concerne les rongeurs, leur présence est tolérée dans l'enclos de maturation, car ils contribuent positivement à la bioturbation du compost en maturation et donc à son oxygénation. Les mulots et les souris consomment les graines des adventices qui ont résisté au compostage. Les musaraignes et les rats régulent les populations d'insectes. Les jeunes rats, qui sont confinés au nid pendant un mois, ne sont généralement pas porteurs de maladies car celles-ci se transmettent par contacts sexuels ou morsures entre rats adultes (Ayrat, 2015). Les rats adultes sont en revanche non tolérés dans le silo de compostage car ils sont potentiellement réservoirs de 4 agents zoonotiques en France (Virus cowpox, Hantavirus, *Leptospira* sp. et *Toxoplasma gondi*) (Ayrat, 2015) et généralement peu appréciés des utilisateurs. Lorsque leur présence est avérée, le Compostou est équipé de morceaux de grillage à poule sous le silo de compostage, afin d'éviter leur entrée par le sol et au niveau des ajours des modules.

Enfin, l'abondance des moucheron et mouches drosophiles dans le silo de compostage du Compostou est surveillée car il s'agit d'espèces indicatrices de milieux humides et de restes de fruits et de légumes trop accessibles. Ils ne doivent pas être totalement exclus du Compostou car ils participent à la décomposition des biodéchets. Mais leurs populations doivent être limitées car, en grand nombre, ils peuvent représenter une nuisance pour les utilisateurs. Pour limiter leur prolifération, le compost en formation doit être asséché en permanence: les biodéchets sont étalés et recouverts de broyat à chaque apport, puis légèrement enfouis sous des biodéchets plus anciens et à nouveau recouverts de broyat. En cas de pullulation excessive un brassage plus profond peut être réalisé. La présence d'araignées prédatrices des moucheron et

des drosophiles est encouragée, en laissant les toiles d'araignées en place dans le Compostou.

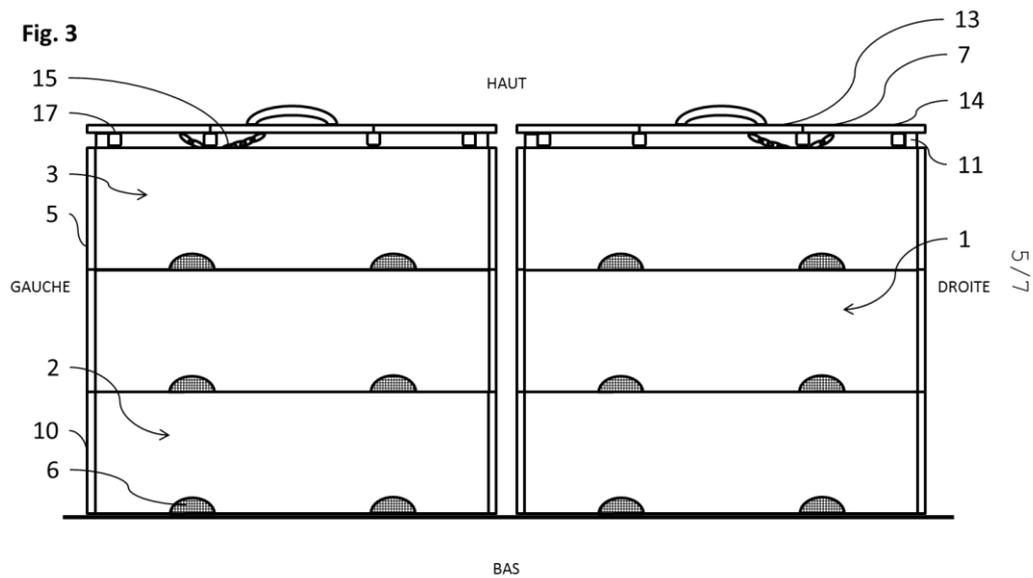
Afin de tendre vers un ratio C/N de 10, il est important que la matière organique serve de support à une intense activité biologique, qui va utiliser le carbone des biodéchets et du broyat comme source principale d'énergie et accélérer sa minéralisation. L'azote, facteur limitant du développement des organismes décomposeurs devra être utilisé moins rapidement et en proportion moindre que le carbone. Pour atteindre cet objectif, la communauté des organismes du Compostou doit être la plus abondante et la plus diversifiée possible, afin que toute molécule intermédiaire issue de la décomposition de la matière organique soit prise en charge par une catégorie d'animaux, de champignons ou de microorganismes. En tamisant une partie du compost, il est possible de retirer une certaine proportion de matières sèches et dures, riches en carbone, du compost en formation, afin de diminuer plus rapidement le ratio C/N. Enfin, les écarts de température sont encouragés car ils accélèrent la décomposition de la matière organique, et donc l'abaissement du ratio C/N.

### 2.3. Valoriser le compost sur place

La production et la valorisation sur place de compost sont rendues possibles par la mise en œuvre du compostage de basse énergie grâce à un modèle de composteur unique, le Compostou.

#### 2.3.1. Spécificités techniques du Compostou, composteur de basse énergie

Le Compostou a une structure modulaire : il est composé de 2 blocs de 3 modules (cadres en bois) identiques de 32 cm centimètres de hauteur sur 1 m de large et 1 m de profondeur, empilés les uns sur les autres (figure suivante). Au total l'appareil a un volume utile d'environ 2 m<sup>3</sup> et occupe au sol une superficie de 2 m<sup>2</sup>.



**Figure 34: Dessin d'un Compostou en vue externe. 1 : silo de compostage, 2 : enclos de maturation, 3 : réserve de broyat (illustration tirée de la requête en délivrance de brevet FR 17 70042)**

Dans le premier bloc, le module en position intermédiaire possède un plancher pour supporter une charge de broyat de branches. Sous ce module se trouve un module servant d'enclos de maturation (équivalent au bac de maturation d'un site de compostage de haute énergie), qui contient le compost en cours de maturation. Le module à plancher est surmonté d'un autre module afin d'accroître le volume de la réserve de broyat (=bac à broyat). L'autre bloc forme le silo de compostage (= bac d'apport). Il est constitué par l'empilement de 3 modules.

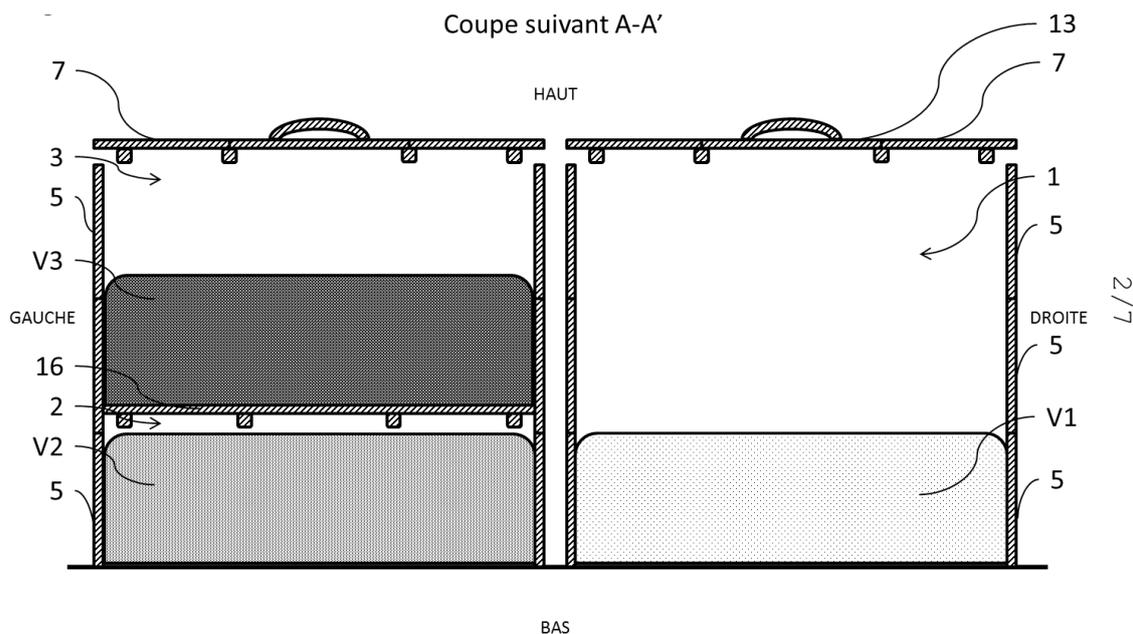


Figure 35: Dessin d'un Compostou en coupe transversale. 1 : silo de compostage, 2 : enclos de maturation, 3 : réserve de broyat (illustration tirée de la requête en délivrance de brevet FR 17 70042)

Comparativement à un site de compostage partagé traditionnel constitué, en compostage de haute énergie, d'un bac d'apport, d'un bac de maturation et d'un bac à broyat, le Compostou permet un gain de place car le broyat y surplombe le compost en maturation.

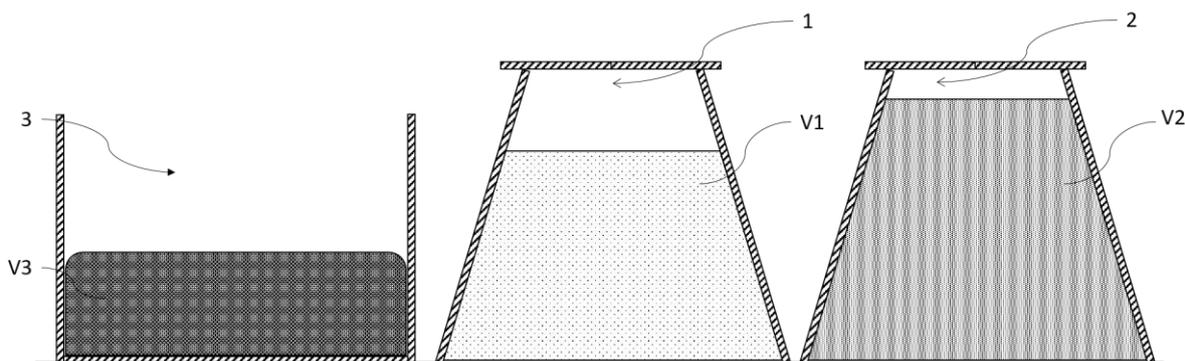


Figure 36: Site de compostage partagé traditionnel : 1, bac d'apport ; 2, bac de maturation ; 3, bac à broyat ; V1, biodéchets en cours de décomposition, en mélange avec du broyat de branches ; V2, compost en cours de maturation ; V3, broyat de branches.

Lorsque la hauteur de biodéchets et de broyat de branches en mélange atteint 50 cm dans le silo de compostage, les blocs du Compostou sont démontés, déplacés et remontés juste à côté de leur position initiale au cours d'une opération appelée « rotation ». Avec une quinzaine d'utilisateurs adultes, il faut environ 4 à 6 mois pour

atteindre ce volume de biodéchets, qui représente environ 250 litres de biodéchets et 250 litres de broyat de branches. Pendant cette opération, les biodéchets restent sur place et c'est donc le composteur qui se déplace.

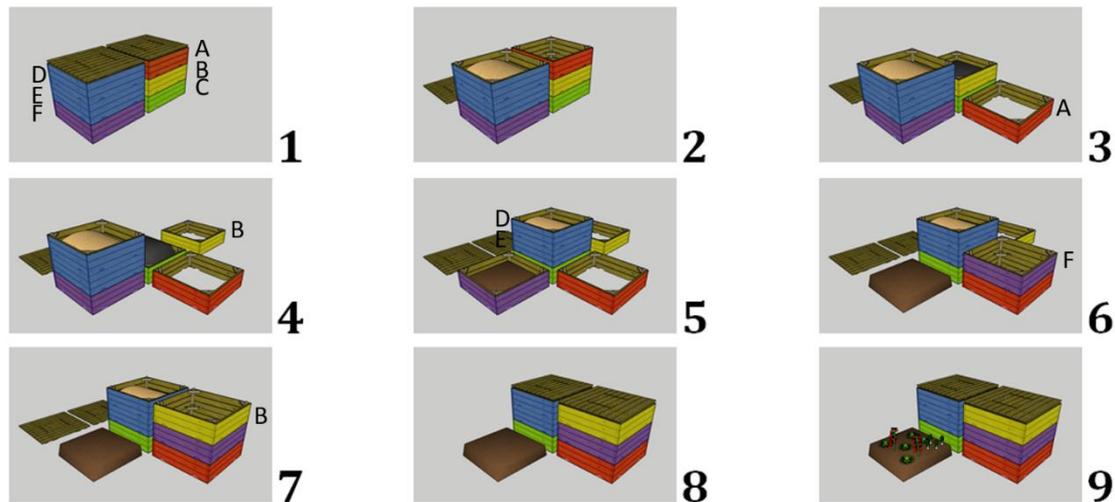


Figure 37: Etapes de la rotation du Compostou

Neuf étapes sont nécessaires pour effectuer la rotation correctement :

- Etape 1 : le silo de compostage est rempli à 50% et le compost de l'enclos de maturation est mûr, il faut effectuer la rotation ;
- Etape 2 : Retirer les couvercles des deux blocs ;
- Etape 3 : Déplacer le module A en haut du silo de compostage vers un emplacement libre adjacent ;
- Etape 4 : Déposer le module B intermédiaire du silo de compostage et le garder en réserve, il sera utilisé plus tard. Transférer l'excédent de biodéchets qui dépassent du module C resté au sol dans le module A ;
- Etape 5 : Transférer les deux modules D et E constituant la réserve de broyat sur le module C ;
- Etape 6 : Transférer le module F, qui servait d'enclos de maturation, sur le module A ;
- Etape 7 : Placer le module B sur le module E, pour former le nouveau silo de compostage ;
- Etape 8 : Replacer les couvercles sur les deux blocs du Compostou ;
- Etape 9 : La rotation est terminée, il ne reste plus qu'à planter et à cultiver directement dans le carré de compost mûr.

Ainsi, à chaque rotation, le Compostou laisse dans son sillage un mètre-carré de compost mûr qui peut servir de planche de culture. Le Compostou peut se déplacer en ligne droite (le long d'une haie ou d'un mur par exemple) ou être déplacé d'un quart de tour à chaque fois, comme dans la figure précédente.

En vue aérienne, la rotation pluriannuelle du Compostou lui permet de fertiliser tour à tour 4 planches de cultures, lorsque l'appareil est tourné d'un quart de tour à chaque rotation (par exemple en mars et en septembre).

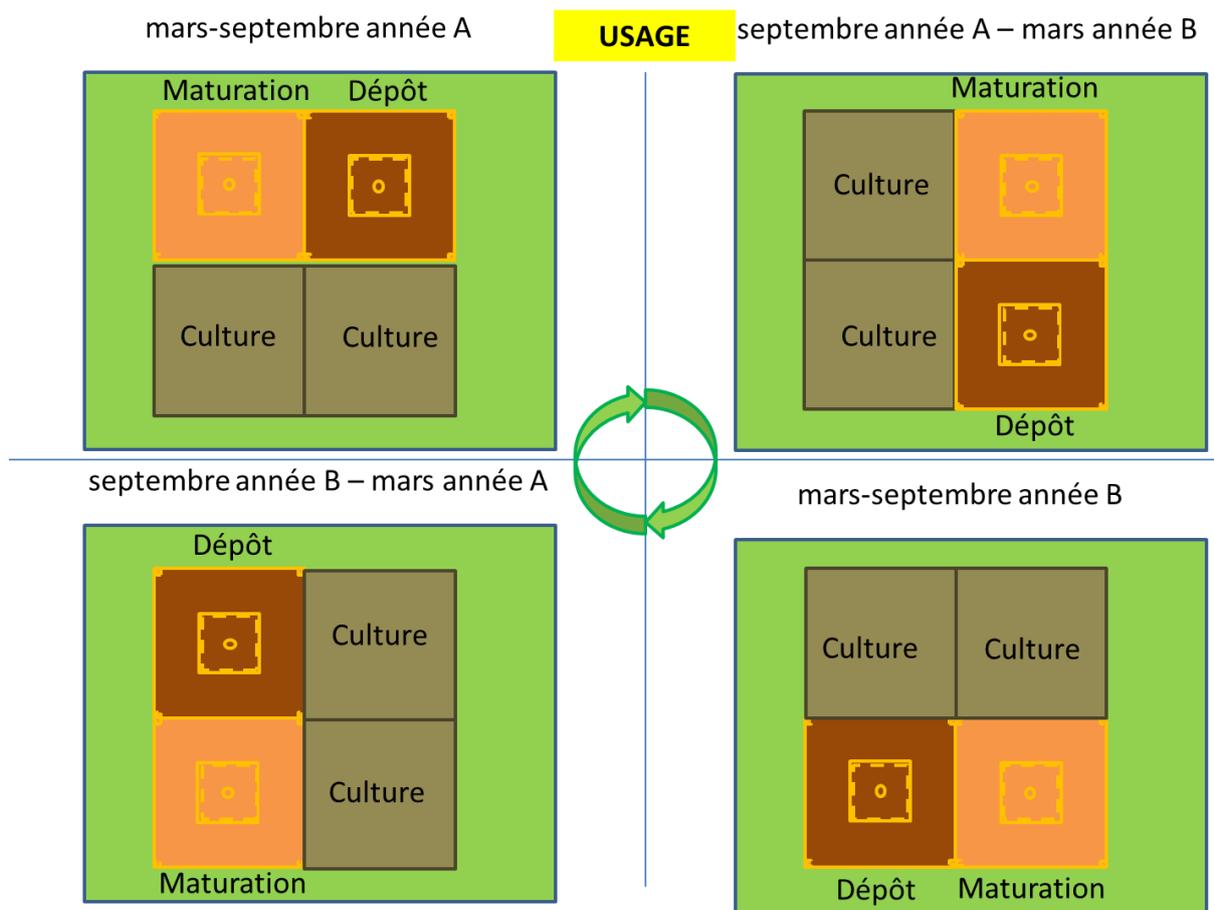


Figure 38: Succession des positions d'un Compostou lors de rotation bisannuelles.

### 2.3.2. Intérêts de la valorisation sur place du compost

D'un point de vue économique, la valorisation sur place du compost permet tout d'abord de réduire les dépenses énergétiques et les coûts associés au transport de compost du site de production vers un site d'utilisation secondaire. D'un point de vue social, elle autorise aussi les utilisateurs du Compostou à concevoir des usages

personnels (distributions en parts individuelles) ou collectifs (mise en place d'un jardin partagé) pour ce compost, en un mot, à le considérer comme une ressource commune produite par un bien commun. Une gestion partagée peut alors se mettre en place entre utilisateurs, ce qui renforce le sentiment de communauté, d'autonomie et d'implication des acteurs.

D'un point de vue écologique enfin, la valorisation du compost sur place permet de mettre en place un triple cycle biologique, qui assure le recyclage du broyat, la transformation des biodéchets en humus et la production de ressources végétales, de manière efficace. La communauté des animaux décomposeurs est considérablement moins perturbée en l'absence de transferts de compost.

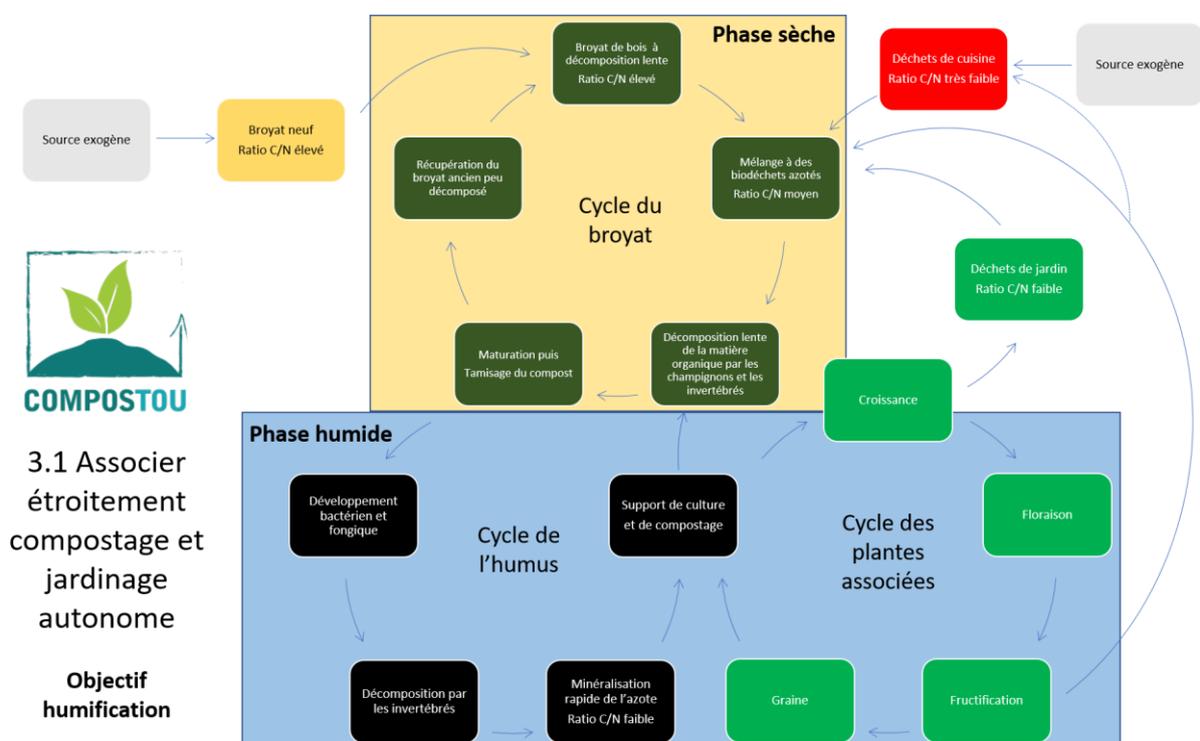


Figure 39: Le fonctionnement du Compostou repose sur la mise en place et la perpétuation d'un triple cycle biologique

Dans l'hypothèse où le broyat proviendrait d'arbres abattus ou élagués (première source exogène de matière organique de cet écosystème), le triple cycle débute avec la fourniture de broyat neuf, dont le ratio C/N est initialement élevé. Débute alors le premier cycle, ou « cycle du broyat », au cours duquel le broyat est mélangé à des biodéchets (déchets de cuisine ou de jardinage issus d'une seconde source exogène) dans le silo de compostage du Compostou, ce qui abaisse le ratio C/N du mélange à un

optimum de 35 à 40. Cette matière organique sert principalement de support au développement de champignons et d'invertébrés qui la décomposent lentement, à moins de 40°C. De manière secondaire et complémentaire, des bactéries libres aérobies attaquent les parties les plus molles et humides des biodéchets et provoquent leur décomposition rapide, et engendrent une très légère élévation de la température du compost. Quatre à six mois après le début des premiers apports, le compost entre en maturation pour une période de même durée. Le cycle du broyat marque la phase sèche du fonctionnement du Compostou, pendant laquelle tous les moyens sont mis en œuvre pour assécher le compost et ne pas provoquer une importante montée de sa température.

Lorsqu'après une rotation, du compost mûr d'un ratio C/N allant de 10 à 20 est libéré dans le sillage du Compostou, débute alors le second cycle, ou « cycle de l'humus », pendant lequel la décomposition de la matière organique héritée de l'activité biologique du cycle précédent se poursuit en conditions plus humides. Ces conditions favorisent une reprise de l'activité bactérienne libre et une prolifération de champignons. Les annélides épigés et anéciques sont attirés et transforment progressivement le compost en humus, dont le ratio C/N tend alors vers 10, en agglomérant des particules minérales à des particules de matière organique décomposée (substances humiques). La formation de complexes argilo-humiques permet que l'humus et le compost en cours d'humification servent directement de supports à la culture de végétaux. Ce compost en voie de transformation constitue aussi un support de compostage intéressant, car les organismes qu'il contient recolonisent rapidement les biodéchets frais et accélèrent le nouveau cycle du broyat.

Les plantes associées au Compostou et qui poussent dans le carré de compost mûr et d'humus qui jouxte le composteur croissent, fleurissent et fructifient au cours du troisième cycle fonctionnel, le « cycle des plantes associées ». Ce cycle appauvrit le substrat en nutriments directement assimilables et l'enrichit en matière organiques vivantes ou mortes. En fin de vie, leurs parties végétatives (feuilles, tiges, racines) ou reproductrices (fleurs, fruits, graines) alimentent alors le cycle du broyat par un retour au Compostou sous forme de dépôts de biodéchets. Un nouveau cycle du broyat peut alors débiter afin de transformer cette nécromasse d'origine végétale.

En théorie il existe une possibilité de circulariser presque totalement le fonctionnement de ce triple cycle : il suffirait que les plantes associées au Compostou produisent à la fois des déchets verts et des déchets bruns (fonctionnellement équivalents au broyat de branches), dans des proportions équitables. Si ces plantes permettaient la nutrition humaine ou animale, il y aurait aussi la possibilité qu'elles créent les déchets de cuisine nécessaires à l'abaissement du ratio C/N des déchets bruns. Ce type de fonctionnement écosystémique ferait du Compostou la pierre angulaire d'un mode de production totalement autonome, dans l'esprit de l'aquaponie, où invertébrés, microorganismes et plantes remplaceraient les poissons, les bactéries et les plantes aquatiques.

#### 2.4. Compenser le manque de disponibilité des sources carbonées

Le broyat de branches est produit principalement au printemps et en hiver par les élagueurs. Il peut provenir d'opérations de mise en sécurité d'arbres dangereux, de tailles de haies ou être des sous-produit d'activités sylvicoles. En ville, il est occasionnellement produit lors d'entretien de végétaux en surplomb ou en bordure de voirie. Pour une structure accompagnatrice au compostage partagé, s'approvisionner en broyat est une affaire d'opportunité et de réseautage stratégique, car le broyat vient toujours à manquer sur un site de compostage au bout de quelques mois.

Dans le compostage de type Compostou, les faibles montées en température et l'humidité réduites évitent que le broyat de branches soit trop décomposé par les microorganismes et les animaux décomposeurs. A chaque fin de cycle de l'humus ou de cycle des plantes associées, le broyat peu dégradé peut repartir pour un nouveau cycle du broyat, après tamisage. Jusqu'à 1/3 du volume du compost brut mature issu de Compostous peut être constitué de broyat non dégradé. La réutilisation de ce broyat peut se révéler profitable dans des circonstances où le broyat neuf viendrait à manquer. Nous avons constaté sur des carrés de compost brut laissés à l'air libre, que l'eau de pluie et la bioturbation lessivent le broyat et aboutissent après quelques mois à la formation en surface d'un horizon OL de plusieurs centimètres d'épaisseur. Celui-ci est presque exclusivement composé de broyat peu décomposé. Il est donc préférable de ne pas tamiser le compost ancien afin de ne pas perturber les animaux du sol et laisser cette sédimentation des éléments organiques fins du compost s'opérer naturellement.

En aucun cas il ne faudrait perturber l'horizon organo-minéral A où s'accumulent les complexes argilo-humiques.

## 2.5. Faciliter la maintenance

Le compostou a été conçu afin d'optimiser sa réparabilité et sa maintenance. En cas de dégradation, il est possible de ne changer qu'une planche, qu'une paroi ou qu'un module ou couvercle de l'appareil. Les réparations se font simplement et rapidement car le Compostou n'est constitué que de bois et de vis.

Un point important a été de limiter la diversité des longueurs de planches et de lambourdes afin de pouvoir aisément les remplacer. Il n'y a que 5 longueurs de planches différentes sur un compostou : 100 cm (parois des modules préassemblées et couvercle), 96 cm (planche pour paroi à assembler), 95 cm pour le plancher, 44 cm et 42 cm pour les couvercles. Les lambourdes sont taillées selon 2 longueurs différentes : 88 cm (grands renforts de plancher) et 31 cm (montants verticaux des parois et petit renfort de plancher).

L'inconvénient du bois est sa putrescibilité et ses variations de volumes en fonction des conditions atmosphérique. Afin de limiter ces inconvénients, le Compostou est fabriqué en bois traité à la chaleur, ce qui réduit sa sensibilité aux champignons saprophytes. A chaque rotation ou fixation de planches, tous les modules sont inspectés et brossés sommairement afin d'éliminer les résidus de biodéchets adhérents aux planches. En déplaçant régulièrement les modules lors des rotations, on évite que ce soit toujours les mêmes planches qui restent des années au contact du sol, ce qui facilite aussi la maintenance. Des espaces doivent être prévus entre les planches d'un Compostou neuf (de l'ordre de 5 mm minimum) afin de laisser le bois se dilater en automne et se gorger d'eau. Le gonflement des planches réduit le passage de la pluie (notamment au niveau du couvercle) et donc régule l'humidité du compost. A chaque changement de saison, des petits ajustements des parties métalliques (charnières et porte-cadenas) sont parfois à effectuer pour que les couvercles s'ajustent à la dimension des trappes. La signalétique ne doit être fixée sur les couvercles qu'avec deux vis maximum car sinon le gonflement du bois entraîne une distorsion disgracieuse des supports.

L'avantage du bois est qu'il est facile de retailer ou de raboter une planche qui aurait gonflé. C'est un matériau robuste et bon marché qui est peu cassant à condition d'utiliser des planches d'une épaisseur minimale de 2 cm.

Le Compostou est équipé de vis aggro ordinaires qui rouillent et cassent peu si le composteur est un peu abrité et que des espaces de dilatation suffisants ont été ménagés entre les planches. Les têtes de vis ne sont pas apparentes sur le couvercle pour éviter qu'elles rouillent trop vite (vissage par le dessous). Au niveau des modules, les planches sont vissées de l'extérieur afin que les têtes de vis ne soient pas en contact avec les biodéchets (risque accru de rouille ou d'encrassement sinon) et pour faciliter une intervention depuis l'extérieur de l'appareil.

## 2.6. Améliorer la formation et l'accompagnement des utilisateurs

### 2.6.1. Initiation, accompagnement et formation des utilisateurs

La formation des utilisateurs commence dès l'installation du Compostou et la livraison de broyat de branches. Un chantier participatif est organisé, sous la direction d'un accompagnateur formé selon le référentiel GPROX (Réfèrent de site de compostage, Guide-Composteur ou Maître composteur), afin que chacun s'approprie le Compostou à son arrivée. Pour certaines personnes peu bricoleuses, c'est l'occasion d'apprendre à se servir d'outils tels qu'une visseuse ou un tournevis pour la première fois. Les enfants, en particulier, apprécient beaucoup cette activité. Un Compostou n'est installé ou maintenu sur un site que si deux référents sont désignés formellement. Leurs noms et adresses de courriel sont conservés dans plusieurs bases de données :

- Liste des membres de la « Composteam » (passionnés de compostage) ;
- Système de gestion de contenu lié au site web de l'association permettant l'édition d'une cartographie des composteurs partagés de Touraine ;
- Espace Framaboard de gestion des sites de compostage ;
- Base de donnée Framaforms alimentée par le remplissage de formulaires de suivi de site ;

A la fin du chantier participatif, une initiation aux bons gestes de compostage des personnes présentes (référents et premiers utilisateurs) est assurée par

l'accompagnateur. Le Compostou est généralement immédiatement opérationnel. Il peut être inauguré officiellement un mois après l'installation, lorsque l'accompagnateur revient pour ensemencher le Compostou avec du compost semi mûr riche en organismes. Puis des accompagnateurs reviendront encore au moins deux fois par an pour des visites de contrôle et autant de visites que nécessaire sur simple demande.



Chantier participatif pour le montage



Initiation des utilisateurs



Inauguration



Rotation et maintenance



Tamisage du compost mûr



Conseils pour les plantations

**Figure 40 : Principales étapes de l'accompagnement des utilisateurs de Compostous.**

De retour du chantier participatif d'installation, l'accompagnateur place le nouveau site sur la cartographie interactive des composteurs partagés de Touraine, hébergée sur le site web de ZDT. Grâce à ce système, une personne intéressée peut géolocaliser la position d'un composteur partagé en Touraine, obtenir des renseignements précis sur ce composteur et contacter directement ses référents par l'intermédiaire d'un formulaire en ligne.

[RETOUR À LA LISTE DES COMPOSTEURS](#)

## Tours - Grandmont - Compostou RCVL04

Référents : Sébastien Moreau, Laure Timperman, Jean-Paul Bakyono

Ce Compostou est situé dans l'enceinte de la Faculté des Sciences et Techniques de Tours, entre les bâtiment E et D.

Ce Compostou est en accès libre.

Si vous souhaitez rejoindre gratuitement la communauté des utilisateurs de ce Compostou, contactez les référents de ce site à l'aide du formulaire de contact ci-contre.

Ils vous donneront quelques conseils pour utiliser correctement le Compostou en toute autonomie.

Localisation : avenue Monge, 37000 Tours



### Contactez le référent du composteur

Prénom

Nom

Email

Votre message

Veillez confirmer que vous n'êtes pas un  
robot

Je ne suis pas un robot



Confidentialité - Conditions

ENVOYER

Figure 41: Capture d'écran de la cartographie des composteurs partagé de Touraine mise en ligne par ZDT

L'accompagnateur indique également, à l'aide d'un formulaire de suivi de site créé sur Framafoms, la date de création du site, les coordonnées des référents et le type de matériel installé. Après chaque visite sur un site de compostage, l'accompagnateur devra remplir le formulaire de suivi de site et indiquer la nature de son intervention : livraison de broyat, rotation, maintenance, résolution de problèmes divers, prélèvement de compost ou de biodéchets en excès... Ainsi un registre des interventions est maintenu à jour en ligne, de manière collaborative et partagée, sur la base de données Framafoms.

# Suivi de site compostage partagé

Mon signalement concerne:

- Un site de compostage partagé déjà en service  
 Un nouveau site de compostage partagé

Code d'identification du site de compostage partagé

Le code d'identification figure sous le couvercle de chaque composteur et de chaque bac à broyat du site de compostage partagé.

Indiquez les 4 premières lettres du code d'identification du site de compostage

RCVL

Indiquez les 2 chiffres du code d'identification du site de compostage

04

Code illisible ou absent?

Oui

Suivi de site

Date de la visite

13

nov

2019



Motif principal de la visite

Rotation/Retournement de tas

Figure 42: Début du formulaire de suivi de site de compostage partagé mis en place par ZDT sur Framiforms

Le rôle des référents est de tenir à jour une liste des utilisateurs du Compostou et de leur transmettre les consignes d'utilisation et l'éventuel code d'accès au Compostou en échange de leur adresse de courriel. Les référents veillent au respect des consignes et contactent les utilisateurs par courriel en cas de problèmes constatés (photos à l'appui lorsque cela est possible), pour les inviter à des rencontres (rotations, apéro compost, formations) ou leur signaler toute information utile. Les référents sont répertoriés, par site accompagné, dans la liste des membres de la Composteam, avec une indication précisant s'ils ont reçu une formation du référentiel GPROX. Au moins une fois par an les membres de la Composteam sont réunis de manière conviviale, pour les remercier pour leur engagement soit à titre de référents soit à titre d'accompagnateurs des sites de compostage. Des formations de niveau Référent de site (1 journée de formation) sont régulièrement organisées, avec l'appui de l'IUT de Tours, pour permettre aux référents des Compostou de monter en compétence et de s'autonomiser dans la gestion de leur site.

Les référents informent également les accompagnateurs de l'association ZDT de toute situation nécessitant une intervention : manque de broyat, nuisances, dégradation

matérielle, besoin de maintenance, rotation nécessaire, etc, via le formulaire de suivi de site hébergé par Framaforms. Suite au remplissage de ce formulaire, une bénévole régulatrice reçoit une notification et attribue une mission d'intervention à un accompagnateur. Celui-ci a 2 semaines pour effectuer son intervention, si possible en présence des référents, sauf urgence matérielle nécessitant une intervention plus rapide. Les visites obligatoires et les interventions supplémentaires sont planifiées et répertoriées grâce à l'outil en ligne de gestion de projets Framaboard, où chaque site de compostage est identifié par une fiche.

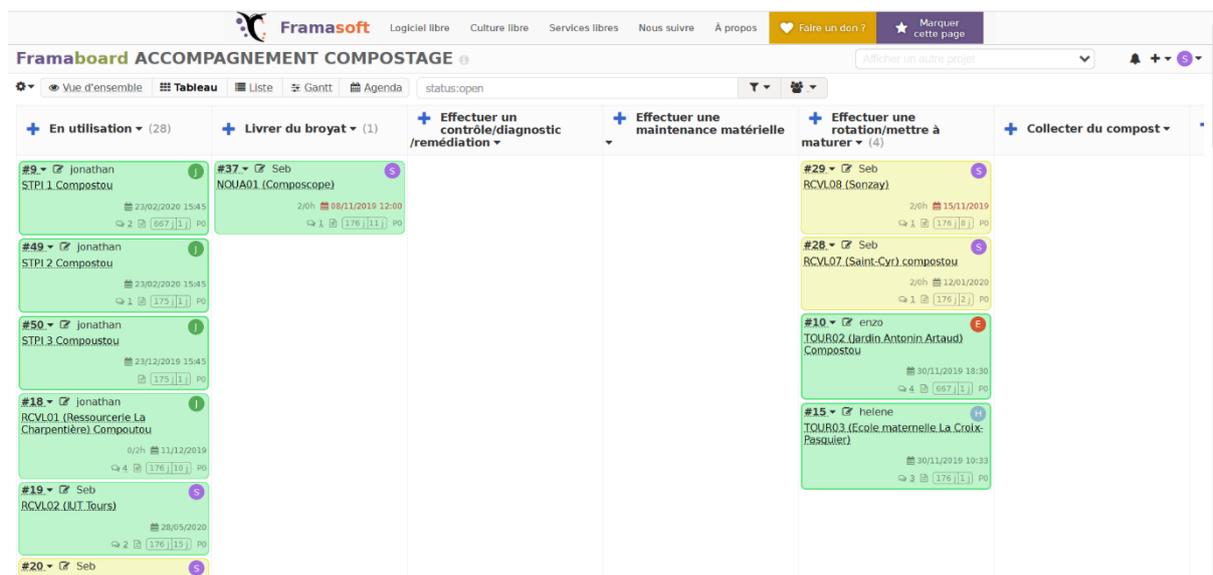


Figure 43: Sur Framaboard, chaque site de compostage partagé fait l'objet d'une fiche qui est déplacée selon la nature des interventions à y mener.

La fonction Diagramme de Gantt de Framaboard donne une vue d'ensemble des composteurs et facilite la programmation des visites de contrôles obligatoires.

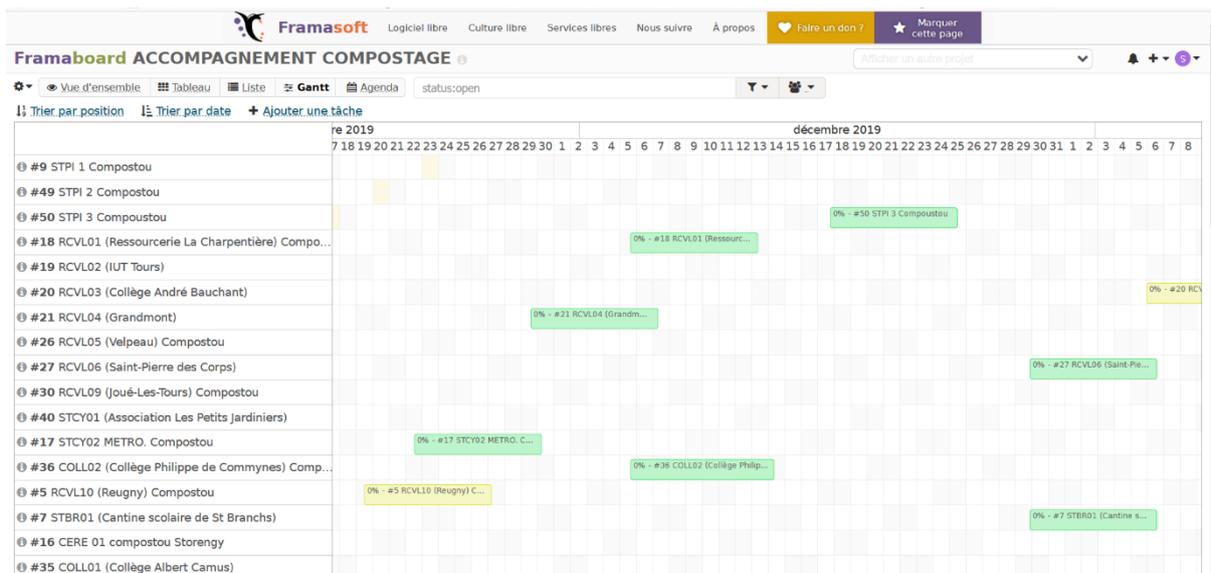


Figure 44: La fonction Diagramme de Gantt du gestionnaire collaboratif de projets Framaboard permet de planifier les interventions sur les différents sites de compostage accompagnés par l'association

## 2.7. Eviter la mise en concurrence avec d'autres modes de valorisation des biodéchets

### 2.7.1. Positionnement stratégique du Compostou

Le Compostou est adapté aux modalités suivantes de compostage de proximité :

- **Compostage en bas d'immeuble ;**
- **Compostage pédagogique** (écoles, collèges, lycées, université, centres de loisir, crèches) ;
- **Compostage thérapeutique** (centre de repos, hôpital...)
- **Compostage en établissement** (petite cantine, maison de retraite, entreprise, bâtiment administratif...)
- **Compostage sur espace public** (parc et jardins municipaux...)

Le Compostou n'est pas adapté aux modalités suivantes de compostage de proximité :

- **Compostage domestique** chez un particulier

- Compostage en établissement, de quartier ou de bas d'immeuble pour un **gisement de biodéchets supérieur à 1 tonne/an.**

En se positionnant sur le segment des petits gisements de biodéchets produits collectivement, le Compostou évite une mise en concurrence avec d'autres modes de valorisation des biodéchets (méthanisation, compostage sur plateformes) pour lesquels la mise en place d'une collecte ne serait pas rentable. L'offre technique que constitue le Compostou est pertinente en milieu urbain où les espaces extérieurs libres sont rares ou doivent être partagés avec d'autres usages déjà existants (massifs, aires de jeux ou de picnic, stationnement de vélos, bancs...) Son principal concurrent actuel est le compostage partagé de haute énergie pour des gisements de biodéchets inférieurs à 1 tonne/an. Nous avons vu que le Compostou permettait de résoudre des difficultés inhérentes à cette méthode de compostage, notamment les nuisances, et simplifiait les pratiques. Ces deux points constituent les principaux freins qui s'opposent actuellement au développement du compostage partagé en France.

Même si sa capacité de traitement est limitée, son faible coût de production et de mise à disposition permettent d'envisager son utilisation à large échelle. Un parc de 300 Compostous sur le territoire de Tours Métropole Val de Loire permettrait ainsi:

- De doter le territoire métropolitain de près d'1 composteur partagé par km<sup>2</sup> ;
- À 4500 personnes de pouvoir composter (soit 1,54% de la population) ;
- Créer 3 à 4 emplois à temps plein (fabrication, maintenance, approvisionnement en broyat)
- D'éviter la collecte, le transport et le traitement de 300 tonnes de biodéchets/an (soit 1,9% des biodéchets de la métropole) ;
- D'éviter le traitement par la collectivité de 150 tonnes de broyat de branches ;
- De produire environ 30 tonnes de compost, valorisées sur place (pas de transport) ;
- De produire l'été 2250 kg de pommes de terre nouvelles, sur la base d'un rendement de 500 g/pied et une densité de plantation de 15 pieds/m<sup>2</sup> ;
- De produire l'hiver 600 kg de poireaux, sur la base d'un rendement moyen de 2 kg/m<sup>2</sup> ;
- De recycler 30 km de planches de palettes si ce matériau est utilisé pour la fabrication des Compostous.

Compostou est donc une solution économique, utile socialement et écologiquement, qui ne remet pas en cause les autres modes de valorisation des biodéchets (compostage

individuel ou sur plateforme, méthanisation) et qui ne peut qu'être difficilement remise en cause par eux.

### 2.7.2. Intérêt du brevet et du dépôt d'une marque commerciale

Le fait d'avoir demandé un brevet d'invention pour cette innovation confère plusieurs avantages à l'association qui en aura la jouissance et qui devra en assurer la défense:

- Transformer une idée en un objet nouveau, inventif, industrialisable ;
- Faire reconnaître l'antériorité de l'invention ;
- Créer une communauté d'intérêts avec les élus locaux, en territorialisant fortement cette innovation (mise en avant d'un composteur 100% Made in Touraine). Obtenir leur soutien en faveur du compostage partagé, à travers le soutien au Compostou ;
- Valoriser les connaissances scientifiques et les innovations techniques issues de la conception du projet ;
- Etablir un monopole communautaire non capitaliste sur l'invention ;
- Rendre possible l'industrialisation ;
- Convaincre les financeurs des opportunités économiques liées à l'invention ;
- Valoriser le travail des concepteurs, médiatiser l'invention, attirer l'attention aux échelons régionaux et nationaux ;
- Se faire reconnaître comme association innovante et crédible sur la question du compostage.

Le dépôt d'une marque et la réservation de plusieurs noms de domaines associés à cette marque (compostou.org, compostou.fr, compostou.eu et compostou.com) a permis la reconnaissance de l'antériorité du choix de ce nom et de rapidement communiquer dessus. Ce choix est un point stratégique car une innovation se doit d'être clairement identifiable auprès du public auquel elle s'adresse.

Compostou est un mot polysémique (plusieurs sens). Il s'agit de la contraction des mots « compost » et de plusieurs mots commençant par les lettres TOU :

- **Touraine** : lieu de conception, de production et d'utilisation. Référence à ZDT ;
- **Tout** : allusion au fait que pratiquement tout type de biodéchet peut être déposé dans un Compostou

- **Tous** : Tout le monde peut l'utiliser grâce à la simplification de la méthode de compostage ;
- **Tourne** : référence au fonctionnement du Compostou qui implique des rotations régulières des modules qui le composent.
- **Toue** : allusion à un bateau en bois à fond plat utilisé sur la Loire et ses affluents et souvent muni d'une cabane, dont la forme a inspiré celle du Compostou ;

Compostou est un nom court, facile à mémoriser, à la sonorité douce et rassurante, comme un surnom familial. Son seul inconvénient est qu'il est parfois mal orthographié par les journalistes et devient alors « Compost'ou » ou « compostout ».

### Classe 21

✓ Récipients à usage ménager

✓ Poubelles

### Classe 40

✓ Traitement des déchets (transformation)

✓ Tri de déchets et de matières premières de récupération (transformation)

✓ Recyclage d'ordures et de déchets

### Classe 44

✓ Services d'agriculture, d'horticulture et de sylviculture

✓ Jardinage

✓ Services de jardiniers-paysagistes

**Figure 45: Classes pour lesquelles la marque Compostou a été déposée auprès de l'INPI.**

La marque Compostou a été déposée vis-à-vis de trois classes de produits et de services. Nous n'avons pas étendu la protection plus que nécessaire afin de ne pas monopoliser inutilement ce nom, ce qui laissera à d'autres acteurs économiques la possibilité de l'utiliser pour des applications commerciales sans rapport avec le compostage.

La conception graphique du logo Compostou est l'œuvre de Camille Ratia, secrétaire de l'association ZDT, qui n'a pas souhaité déposer ce modèle.



Figure 46: Logo du Compostou

Il représente un tas de compost surmonté d'un végétal stylisé afin d'indiquer la finalité du compostage et mettre l'accent sur l'importance de la biodiversité dans le fonctionnement du Compostou. Le cadre esquissé autour des éléments centraux fait référence à la forme carrée de chacun des deux blocs du Compostou et à la production artisanale de l'appareil (comme un tracé de crayon de menuisier). La flèche à droite est un rappel symbolique d'une tour, évocatrice des châteaux de la Loire. Elle fait aussi référence à la hauteur limite de biodéchets qui est acceptée dans un Compostou et dont l'atteinte doit déclencher une rotation de l'appareil afin de rester en compostage de basse énergie et sur couche mince. Les couleurs et la police reprennent les couleurs dominantes et la police du logo de ZDT.

## 2.8. Etre économiquement compétitif avec les méthodes actuelles de traitement des OMR

Le développement commercial du Compostou ayant été confié à ZDT, une association à but non lucratif, la rentabilité du modèle économique Compostou n'a pas été recherchée en priorité, comme l'aurait probablement fait une entreprise. Ceci a abouti à la formulation d'un modèle économiquement viable, plus innovant socialement et écologiquement plus responsable. Douze étapes sont généralement nécessaires pour passer d'une prise de contact avec une structure intéressée par le Compostou et la fin de sa première année de mise en service.

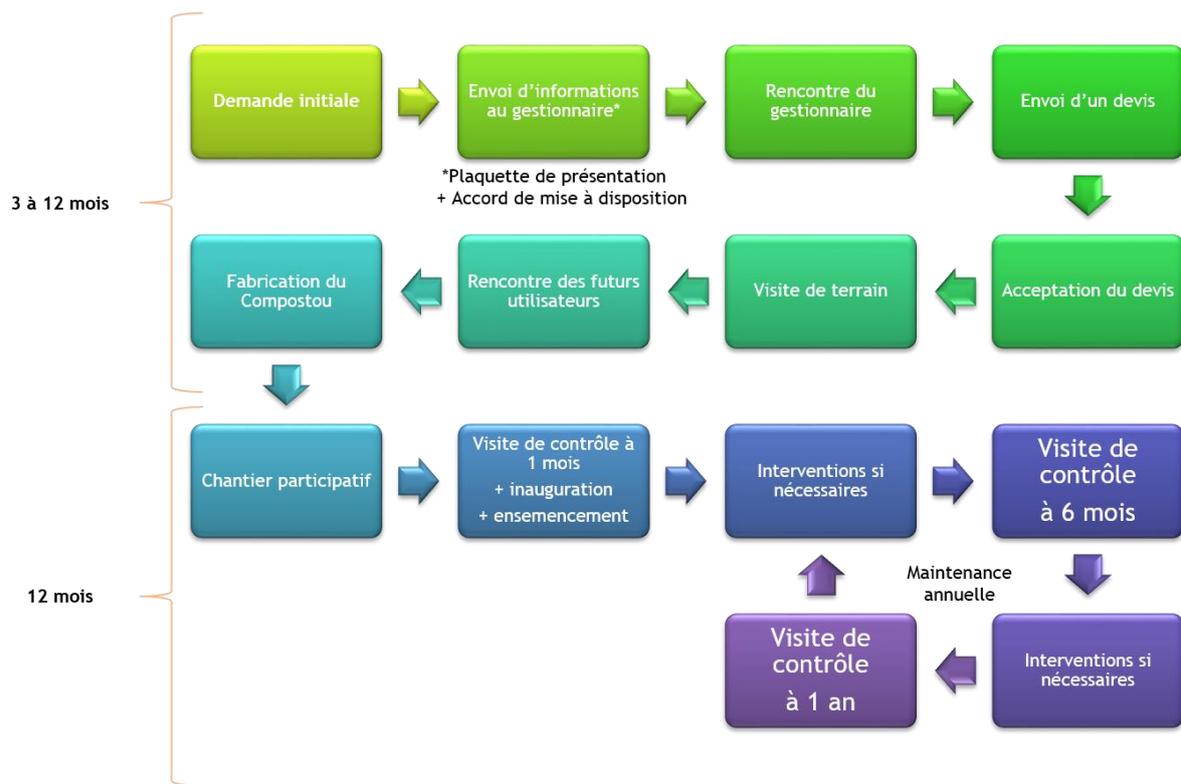


Figure 47: Processus de déploiement et d'accompagnement d'un Compostou.

Nous souhaitons avant tout que le modèle économique du Compostou soit en rupture avec les pratiques commerciales généralement adoptées par les structures accompagnatrices au compostage partagé, afin d'avoir un avantage concurrentiel durable sur nos compétiteurs. Généralement, les associations ou entreprises accompagnatrices au compostage de proximité proposent une formule qui inclut la création d'un site de compostage partagé ou en établissement et un accompagnement important au cours des 2 ou 3 premières années après la mise en service des composteurs. Une structure que nous avons interrogée propose ainsi de venir tous les 15 jours pendant 6 mois, puis une fois par mois pendant les 6 mois suivants, soit 18 interventions la première année. Elle ne vient pratiquement pas la seconde année du contrat d'accompagnement, ce qui lui libère du temps pour prospecter de nouveaux clients. Une autre structure propose 6 visites la première année, puis 4, 3, 2 et 1 visite/an les années suivantes. A certains endroits, des permanences ont lieu une à deux fois par semaine pour l'ouverture des composteurs partagés ou de chalets de compostage. L'inconvénient de ces formules est leur coût élevé (environ 1000 euros par an/site) et la dégressivité de l'accompagnement. Au bout de quelques années seulement,

le site est considéré comme autonome et ne fait plus toujours l'objet d'un réel suivi, malgré les sommes importantes investies par les collectivités. La métropole rennaise a ainsi passé avec Compostri un marché public d'un montant total de 689 644 euros pour l'accompagnement de 210 sites déjà existants et la création de 20 à 40 nouveaux sites/an, pendant 3 ans. Ce marché inclut aussi des actions de formation au compostage pour les habitants, pour un montant de 122 640 euros (informations collectées lors du séminaire des 10 ans du réseau compost citoyen). Malgré ces investissements importants de la part de Rennes Métropole, au printemps 2018, nous avons été assaillis par des centaines de milliers de drosophiles à l'ouverture d'un composteur délaissé dans un quartier de Rennes. Sur d'autres sites, nous avons constaté le mauvais état de la signalétique, des outils manquants ou cassés, des erreurs de tri très fréquentes et la présence de rats. Nous avons aussi visité des sites fonctionnant bien, heureusement ! Ceci nous a convaincu que la pérennité d'un site de compostage repose beaucoup sur les sérieux et l'engagement des personnes qui l'utilisent et sur la réactivité de celles et ceux qui l'accompagnent techniquement.

Ce modèle doit aussi être compatible avec toute politique de prévention des déchets, unilatéralement décidée et mise en œuvre par une collectivité, y compris une décision de créer et d'accompagner gratuitement des sites de compostage partagés par ses propres agents, ce qui pourrait localement « tuer le marché ». Enfin, nous avons souhaité développer une offre aisément accessible à un petit collectif de citoyens, une association de quartier, la coopérative scolaire d'une école, la mairie d'une petite commune ou à une TPE/PME.

La commercialisation du Compostou a donc été l'occasion de mettre en application plusieurs principes socio-économiques hétérodoxes : économie sociale et solidaire, économie circulaire, économie de la fonctionnalité, économie non croissanciste, économie communaliste basée sur l'auto-organisation des utilisateurs à l'échelle d'un territoire, municipalisme libertaire. Beaucoup en parlent, nous nous sommes contentés de mettre ces notions en pratique.

Pour faire de ce modèle économique radical une proposition de portée politique et sociale facile à défendre, nous avons choisi de proposer le Compostou à **un prix inférieur au coût de collecte et de traitement d'une tonne d'ordures ménagères**, afin qu'il ne puisse pas nous être reproché de proposer une solution plus chère que des solutions industrielles de traitement des déchets (collecte par camions-bennes et

enfouissement, incinération, broyage-méthanisation ou broyage-compostage). Pour ne pas avoir à les mettre en œuvre, il est en effet souvent reproché aux solutions les plus écologiques d'être plus coûteuses, ce qui permet de se cacher derrière un prétexte économique. Or il est connu que les solutions plus polluantes sont artificiellement moins chères car on inclut rarement le coût de leurs externalités négatives dans leur prix de revient réel pour la société. Ainsi par exemple, un fast-food peut proposer à ses clients des aliments à emporter à petit prix, car il ne supporte pas financièrement à lui seul le surcoût qu'entraîne le nettoyage des rues polluées par les emballages et les déchets alimentaires que son activité génère. Il ne finance pas non plus les dépenses de santé supplémentaires occasionnées par la dégradation de la santé publique que la généralisation de ce mode de consommation entraîne. Il ne contribue pas non plus directement aux dépenses de sécurité (envoi de patrouilles de police, interpellations, frais de procédures...) liées aux troubles à l'ordre public que son ouverture tardive peut provoquer. Sans parler des conséquences des pratiques agricoles intensives, du dumping social, de l'évasion fiscale ou du transport international de marchandises dont le fast-food dépend pour la pérennité de son modèle économique à bas coût.

Selon l'ADEME (2015d), le coût complet moyen pour la collecte et le traitement d'une tonne d'ordures ménagères résiduelles était de 226 euros en 2015 (53 euros après déduction de la vente de produits industriels, des soutiens des éco-organismes et des aides publiques). Nous avons donc choisi de proposer le Compostou hors options à moins de 226 euros/an car sa capacité de traitement recommandée est de 1 tonne/an.

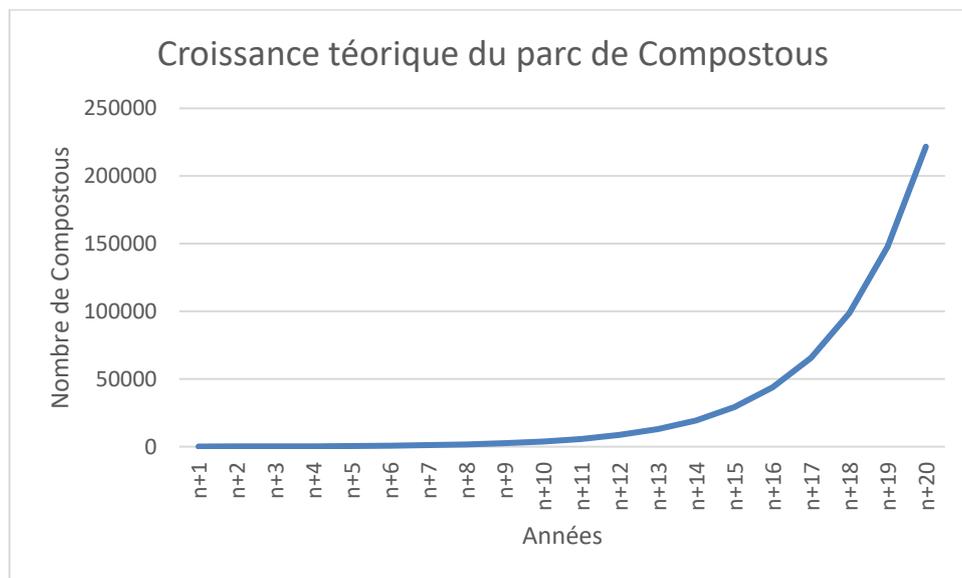
L'inconvénient pour nous est qu'à ce prix-là, les coûts de production et d'équipement ne permettent pas de dégager une marge intéressante, en raison de l'échelle artisanale de production (prix de revient tout équipé : 209.53 euros TTC). Certains fabricants français parviennent à sortir de leurs usines des composteurs partagés en bois à un coût inférieur à 40 euros TTC l'unité (soit moins de 120 euros TTC pour 1 bac d'apport, 1 bac de maturation et un bac à broyat, sans équipements ni signalétique). Ceci est rendu possible grâce à des subventions publiques pour l'emploi de personnes en situation de handicap (cas de la marque Emeraude adossée à un ESAT et gérée par une association) ou grâce à une mécanisation et une automatisation poussée des process de production et une fourniture en matières premières qui n'est qu'en partie nationale. Gardigame, par exemple produit chaque année dans le Jura plus de 32 000 composteurs individuels et

collectifs. Toutefois, ses composteurs ne sont pas réparables, l'entreprise ne fournit pas de pièces détachées et s'approvisionne en bois en partie à l'étranger.

La vente de Compostous sous le plafond-prix désiré n'étant pas financièrement intéressante pour l'association, nous avons opté pour la mise à disposition annuelle de l'appareil avec un service de maintenance et d'accompagnement des utilisateurs à 185 euros TTC hors options (255 euros avec la fourniture de broyat de branches, d'outils de compostage, de cadenas à codes et de porte-cadenas). Durant l'année de mise à disposition, l'association s'engage à effectuer au moins 2 visites de contrôle obligatoires et à intervenir autant de fois que nécessaire sur simple demande des référents d'un site Compostou. Les interventions supplémentaires sont généralement assurées par des accompagnateurs bénévoles, ou par le Guide-Composteur salarié en cas d'urgence. Cette solution a l'avantage d'assurer aux utilisateurs du Compostou un accompagnement continu adaptée à leurs besoins réels et la mise à disposition d'un appareil toujours en bon état. Pour l'association, cette solution est rentable financièrement car la fabrication et l'équipement du Compostou sont amortis dès sa première année de location. La seconde année de mise à disposition, le montant de la mise à disposition descend à 165 euros TTC pour le client (180 euros TTC avec la fourniture de broyat de branches). Cette somme permet de financer les 2 visites de contrôle obligatoires par le Guide-Composteur salarié, qui est rémunéré 20 euros nets de l'heure (soit presque 2 fois le SMIC horaire net). Ces visites de contrôle rémunérées engendrent une dépense minimale, cotisations du salarié et de l'employeur comprises, d'environ 74 euros pour l'association. Les 91 euros restants permettent soit de financer la moitié de la fabrication et de l'équipement d'un nouveau Compostou, soit de rémunérer le Guide-Composteur de l'association pour effectuer des visites supplémentaires.

Avec ce modèle économique, la croissance du parc de Compostous est garantie car elle peut être réalisée sans recourir à des emprunts bancaires et ne demande pas des investissements technologiques ou logistiques importants. Elle n'est pas non plus freinée par le reversement de dividendes à des actionnaires ou à des sociétaires. Si la moitié des revenus annuels issus des Compostous est systématiquement réinvestie dans la fabrication de nouveaux Compostous, la croissance du parc peut être exponentielle. A partir d'un seuil de 100 Compostous installés sur le territoire au premier janvier d'une

année  $n$ , il serait théoriquement possible d'auto-financer la fabrication, l'accompagnement et la maintenance de 44000 Compostous en l'espace de 16 ans seulement (soit de quoi traiter l'ensemble des 40 000 tonnes de biodéchets produits chaque année en Indre-et-Loire) ! Ceci serait réalisé **sans dépenses supplémentaires pour les collectivités** car le coût de traitement via cette solution est inférieur aux dépenses actuellement consenties pour la collecte des biodéchets en mélange dans les OMR et pour leur traitement. En revanche, si le financement des Compostous est assuré par d'autres acteurs (écoles, communes, entreprises, associations...) n'ayant pas d'intéressement à la réduction des déchets ménagers par le biais d'une tarification incitative, le développement du Compostou utilisera une partie de leur budget annuel et se fera donc au détriment de leurs autres activités, tandis que les collectivités réduiront leurs charges de fonctionnement. Nous voyons donc que l'engagement des collectivités dans le développement du Compostou est socialement et économiquement justifié afin que ce développement se fasse réellement sans surcoût pour la société.



**Figure 48: Croissance théorique du parc de Compostous basée sur l'hypothèse d'un réinvestissement systématique des gains issus de la mise à disposition de 2 Compostous pour la fabrication d'1 Compostou supplémentaire l'année suivante. Année  $n$  = 100 Compostous installés.**

Comme toute solution de compostage de proximité, la solution Compostou limite le transport de biodéchets et de compost. Elle nécessite en revanche des déplacements pour l'installation du Compostou, sa maintenance, l'accompagnement et la fourniture du broyat. Afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre, une partie au moins de ces déplacements peut être effectuée en vélo ou en triporteur à assistance électrique. Le

retour au sol d'une partie du carbone issu des biodéchets et la croissance de biomasse sur le compost produit compensent une partie des émissions de carbone liées au cycle de vie de l'appareil, dans des proportions qu'il serait intéressant de quantifier et à comparer avec des modes de traitement classiques.

Afin que ce modèle soit viable, il importe que les collectivités s'engagent à soutenir cette solution, par le biais de conventions, accords de mise à disposition ou de passation de marchés publics. Mais le fait que l'association reste propriétaire des Compostous la protège en cas de perte de marchés. Les Compostous précédemment mis à disposition seront simplement démontés, révisés et remis en utilisation le plus rapidement possible auprès de nouveaux clients. Le modèle économique choisi limite aussi les risques en termes d'image, liés à l'abandon ou à la dégradation non réparable de composteurs partagés, comme cela est parfois visible à certains endroits (écoles notamment), après l'arrêt de l'accompagnement par perte de marché ou arrêt du projet de compostage en établissement.

Enfin, ce modèle économique est créateur d'emplois dignes, non délocalisables et correctement rémunérés et créateur d'une activité bénévole génératrice de liens. Nous estimons qu'1 à 3 équivalents temps plein salariés et plus de 600 postes de bénévoles peuvent être créés par tranche de 300 Compostous installés, sur des activités de fabrication, accompagnement-maintenance et livraison de broyat. Pour un parc de 44 000 Compostous, cette initiative pourrait donc créer 147 emplois directs et mobiliser plus de 88 000 bénévoles, pour un coût annuel de moins de 8 millions d'euros, déjà compris dans les charges de fonctionnement des collectivités d'Indre-et-Loire. Laisser dans les OMR les 40 000 tonnes de biodéchets que les Compostous pourraient traiter, leur coûtera bien plus cher à l'avenir avec la forte augmentation de la TGAP dès 2021, la réduction des capacités d'incinération décidée par le plan régional de prévention et de gestion des déchets adopté récemment et la fermeture programmée de plusieurs centres d'enfouissement départementaux. De plus, maintenir en activité des personnes âgées, en situation de handicap ou privées d'emplois, par le biais du bénévolat, a d'indéniables bienfaits et ne peut que contribuer à restaurer la cohésion du tissu social.

## 3. Bilan du projet Compostou (2017-2019)

### 3.1. Objectifs

Le projet COMPOSTOU prévoyait la fabrication d'un prototype de Compostou selon les plans de la requête en délivrance de brevet soumise à l'INPI, ainsi que l'implantation et le suivi pendant 2 ans d'une dizaine de Compostous afin de constituer autant d'espaces de démonstration. Il s'agissait donc de tester en phase de préindustrialisation le marché ciblé (composteurs partagés de bas d'immeubles ou en établissements, composteurs pédagogiques), tout en créant 10 espaces de démonstration permanents pour la formation des acteurs du compostage de proximité de Touraine et de la Région Centre Val de Loire. Pour inscrire ce projet sur le long terme, nous avons prévu :

- La production de ces composteurs innovants par une association d'aide à l'insertion par le travail (E&S) ;
- La création d'outils originaux de communication et de mobilisation citoyenne en lien avec plusieurs EPCI partenaires ;
- La formation de Guides-Composteurs ;
- L'initiation et l'accompagnement des premiers utilisateurs ;
- La réalisation de suivis techniques par des experts des domaines concernés ;
- La co-animation de filières régionales de formation au compostage à l'IUT de Tours et l'antenne de Tours de la Maison Pour la Science.

Les suivis devaient notamment permettre de valider les aspects socio-techniques, pédologiques, microbiologiques et écologiques de la solution de compostage proposée avant un éventuel déploiement à plus large échelle (phase d'industrialisation prévue à partir de 2020). Les sites créés seront accompagnés gracieusement pendant 5 ans.

### 3.2. Equipe projet

L'équipe du projet COMPOSTOU regroupait notamment :

- Sébastien Moreau, Président de ZDT et co-inventeur du Compostou, actuellement en formation de Maître-composteur. Référent scientifique bénévole de ZDT, il a encadré M. Lecharpentier et les différents stagiaires affectés au projet COMPOSTOU, en tant que

coordinateur du projet. Il exerce actuellement la profession d'enseignant-chercheur en biologie des organismes à l'Université de Tours. Ses thématiques de recherche portent sur le compostage et les abeilles sauvages.

- Jonathan Lecharpentier, Guide-Composteur salarié de l'association ZDT. Il est intervenu pour l'organisation des chantiers participatifs, la communication auprès des utilisateurs et la maintenance des Compostous expérimentaux.
- Hugo Meslard-Hayot est le référent technique de ZDT sur le compostage, en tant que Maître-composteur bénévole. Il a passé sa formation de Maître-composteur en 2016 auprès de l'école du compost Organeo (Metz) et auprès d'Eisenia (Nantes). Il a assisté la Composteam de l'association ZDT sur les différentes techniques de compostage et leurs spécificités. Il exerce actuellement la profession de chargé de la politique de prévention et tri des déchets dans une collectivité territoriale. Il s'est spécialisé sur les thématiques de réduction des déchets (compostage, vrac, consigne, réemploi).
- David Violleau est référent technique bénévole en prévention des déchets au sein de l'association ZDT. Il est par ailleurs enseignant-chercheur en chimie à l'Université de Tours, où il enseigne la gestion de l'environnement. Il est le responsable de la Licence professionnelle « Déchets et Economie Circulaire », ainsi que des parcours de formation « Référents de site » et « Guide-Composteur » proposés au sein de l'IUT de Tours, dans le cadre du référentiel GPROX (ADEME - Réseau Compost Citoyen). Il est aussi l'un des co-inventeurs du Compostou et référent du site RCVL02.
- Virginie Gorgeart est Trésorière de l'association ZDT. Elle est en charge du paiement des prestataires et fournisseurs du projet COMPOSTOU et est référente du site RCVL06.
- Camille Ratia est Secrétaire de ZDT et autrice du livre « Zéro Déchet, des conseils adaptés à votre rythme et à vos objectifs » (Rustica éditions, 2018) et du blog [camille-se-lance.com](http://camille-se-lance.com). Egalement Administratrice de la page Facebook « Zéro Déchet à Tours » (3592 membres au 07/07/2019), Mme Ratia a une grande expérience de la démarche Zéro Déchet. Elle est l'autrice de la signalétique, des visuels et des documents de communication du projet COMPOSTOU.
- Valérie Breillad est actuellement responsable de l'épicerie vrac mobile Tour'N Vrac. Ancienne vice-Présidente de ZDT, elle est l'autrice des plans industriels du Compostou 1.1.
- Danielle Gouye est régulatrice bénévole pour l'association ZDT et professionnelle de santé. Elle attribue les missions d'assistance aux accompagnateurs de ZDT en fonction des besoins des utilisateurs et tient à jour un historique des interventions pour chaque site de compostage.
- Paul Huguen est menuisier à la coopérative Artefacts et adhérent de ZDT. Il a co-inventé le Compostou et créé le premier prototype de Compostou, actuellement conservé à la Faculté de Sciences et Techniques de Tours.
- Maxime Cornillon est ingénieur chez Innophyt et co-inventeur du Compostou. Il a apporté son expertise agronomique au projet.
- Corinne Taste est Maîtresse de Conférences à l'IUT de Tours, spécialisée en microbiologie. Elle a encadré des stagiaires dans la mise en place d'une analyse microbiologique de certains Compostous en 2018.
- Pierre-Jean Glasson est Maître-Composteur à Compost'Âge (Ligugé, 86). Il a apporté son expertise dès le début du projet, lors de la table-ronde de janvier 2017 qui a lancé le projet

COMPOSTOU. Il a ensuite permis au projet COMPOSTOU d'être présenté lors du séminaire des 10 ans du RCC.

- Stéphane Chérioux et toute l'équipe d'Entraide et Solidarités ont été des partenaires précieux pour la production des premiers Compostous, avec qui une relation de confiance a pu se mettre en place.

Le projet COMPOSTOU c'est aussi 20 référents de site, des étudiants stagiaires de la Licence Professionnelle Déchets et Economie circulaire<sup>34</sup> et des dizaines de personnes ressources formées par ZDT qui ont donné bénévolement de leur temps pour la réussite de ce projet. Qu'elles en soient sincèrement remerciées.

### 3.3. Partenaires du projet COMPOSTOU

Le projet s'est déroulé en Indre-et-Loire, sur le territoire des collectivités adhérentes au syndicat mixte Touraine Propre. Porté par l'association ZDT et coordonné par son Président, Sébastien Moreau, il a associé plusieurs partenaires dont :

- L'association Compost'Âge (Ligugé, 86), membre du Réseau Compost Citoyen ;
- L'association étudiante pour la protection de la nature et de l'environnement (APNE) ;
- L'association Les Jardins de Nouâtre ;
- L'association Velpeau en Transition ;
- L'Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte (IRBI) ;
- La communauté de communes Gâtine et Choisilles - Pays de Racan ;
- La commune de Joué-Lès-Tours ;
- La commune de Nouâtre ;
- La commune de Reugny ;
- La commune de Saint-Cyr-Sur-Loire ;
- La Faculté des Sciences et Techniques de Tours ;
- La Ressourcerie La Charpentière ;
- Le collège André Bauchant de Château-Renault ;
- Le Département Génie Biologique de l'IUT de Tours (DGB) ;
- Touraine logement ;
- Tours Métropole Val de Loire ;

---

<sup>34</sup> En 2017, le projet tutoré de Ninon Le Galloudec et de Jessy Rousseau a porté sur le compostage partagé et a permis de démarrer le projet COMPOSTOU. Yathreb Klai, élève ingénieure en agronomie en Tunisie est venue étudier le fonctionnement du Compostou, au Composcope de Nouâtre en 2018. Erwann Beaulieu, Kaïna Homawoo et Thomas Lamour ont mené une première évaluation scientifique du fonctionnement du Compostou sous la direction de Corinne Taste en 2018. Oswaldo Bribiesca, Valentin Barron-Roques et Alma Trochu ont écrit un guide de montage et d'utilisation du Compostou en 2019.

- Val Touraine Habitat.

Pour le projet COMPOSTOU, l'association ZDT a sollicité et obtenu une aide financière de la part de la Région Centre Val de Loire et de l'ADEME, dans le cadre de l'appel à projets Economie circulaire 2017. Elle a également obtenu une aide complémentaire de la part de Touraine Propre (appel à projets novembre 2017), de l'IRBI, de l'IUT de Tours et d'APNE.

### 3.4. Mise en œuvre du projet

#### 3.4.1. Choix des sites

Pour des raisons de cohérence avec les objectifs environnementaux et socio-économiques de l'association ZDT et pour des questions de facilité de suivi, le projet COMPOSTOU a été mis en œuvre dans un périmètre territorial relativement limité (quart nord-est de l'Indre-et-Loire) mais qui présentait des enjeux importants. Le site de production des composteurs (Chambray-Lès-Tours) était situé à moins de 50 km de l'espace de démonstration le plus éloigné (Château-Renault). Une majorité d'espaces de démonstration (7/10) a été implantée sur le territoire de Tours Métropole Val de Loire, principale intercommunalité d'Indre-Loire. Trois autres communautés de communes étaient concernées par le projet : la CC Touraine Est-Vallées (pour le Compostou de Reugny), la CC du Castelrenaudais (pour le Compostou du collège André Bauchant) et la CC Gâtine et Choisses - Pays de Racan (pour le Compostou de Sonzay). Les quatre intercommunalités sont adhérentes du syndicat mixte Touraine Propre.

Les 10 espaces de démonstration ont été implantés aux endroits suivants :

Tableau 3: Liste des 10 Compostous expérimentaux du projet COMPOSTOU.

Numéro	Site	Commune	Typologie d'usages	Modèle
<b>RCVL01</b>	Ressourcerie La Charpentière	La Riche	Composteur de quartier	Compostou 1.1
<b>RCVL02</b>	IUT de Tours	Tours	Composteur d'établissement	Compostou 1.1
<b>RCVL03</b>	Collège André	Château-	Composteur	Compostou 1.2

	Bauchant	Renault	d'établissement	
<b>RCVL04</b>	Faculté des Sciences et techniques de Tours	Tours	Jardin partagé	Compostou 1.2
<b>RCVL05</b>	Place Velpeau	Tours	Composteur de quartier	Compostou 1.2
<b>RCVL06</b>	La Rabaterie	Saint-Pierre des Corps	Composteur de bas d'immeuble	Compostou 1.2
<b>RCVL07</b>	La Ménardière	Saint-Cyr-sur-Loire	Composteur de bas d'immeuble	Compostou 1.2
<b>RCVL08</b>	Immeuble VTH	Sonzay	Composteur de bas d'immeuble	Compostou 1.2
<b>RCVL09</b>	La Rabière	Joué-Lès-Tours	Composteur de quartier	Compostou 1.2
<b>RCVL10</b>	Rue de la Poste	Reugny	Composteur de quartier	Compostou 1.2

L'acronyme RCVL fait référence à Région Centre Val de Loire, afin de remercier ce principal soutien financier du projet COMPOSTOU.

Les sites choisis pour l'implantation des espaces de démonstration offraient une grande diversité de contextes sociaux (centres-villes, quartiers prioritaires, zone périurbaine ou rurale) et d'usages : bas d'immeubles, parcs publics, établissements, parcelle privée, jardin partagé. Nous avons également saisi l'opportunité d'ancrer le projet dans des structures à forts enjeux éducatifs : dans le plus grand collège d'Indre-et-Loire en nombre d'élèves, sur deux campus de l'université de Tours et l'extérieur d'une ressourcerie associative.

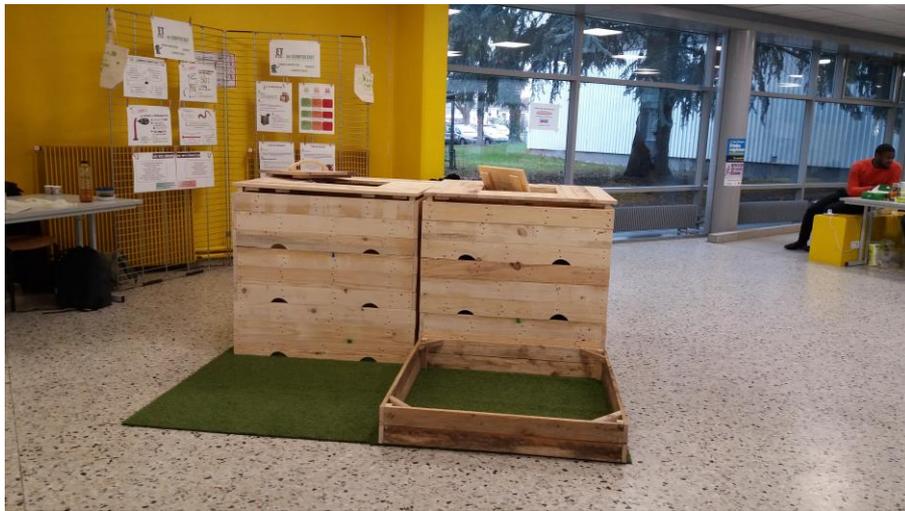
### 3.4.2. Modèles testés

Au cours du projet COMPOSTOU, le Compostou a évolué techniquement :

- Le modèle 1.0, élaboré par Paul Huguen en 2017 a été le premier prototype de Compostou strictement conforme aux figures jointes à la requête en délivrance de brevet transmise à

l'INPI. Ce prototype n'a jamais servi et il est actuellement conservé à la Faculté des Sciences et Techniques de Tours ;

- Le modèle 1.1 était conforme au premier prototype du Compostou, à l'exception de liens obliques qui ont été omis dans un souci d'économie. Fabriqué par E&S, il a été déployé sur les 2 premiers espaces de démonstration ;
- Le modèle 1.2 présentait 3 changements majeurs par rapport au modèle 1.1 : un sens d'emboîtement des modules inversé (montant verticaux des modules en saillie désormais vers le bas), des trappes décentrées et des espaces de dilatation entre les planches. Il a été fabriqué par E&S et déployé sur les 8 autres espaces de démonstration.



**Figure 49: Prototype du Compostou (Compostou 1.0) lors de sa première présentation au public à l'IUT de Tours (fabrication Paul Huguen).**

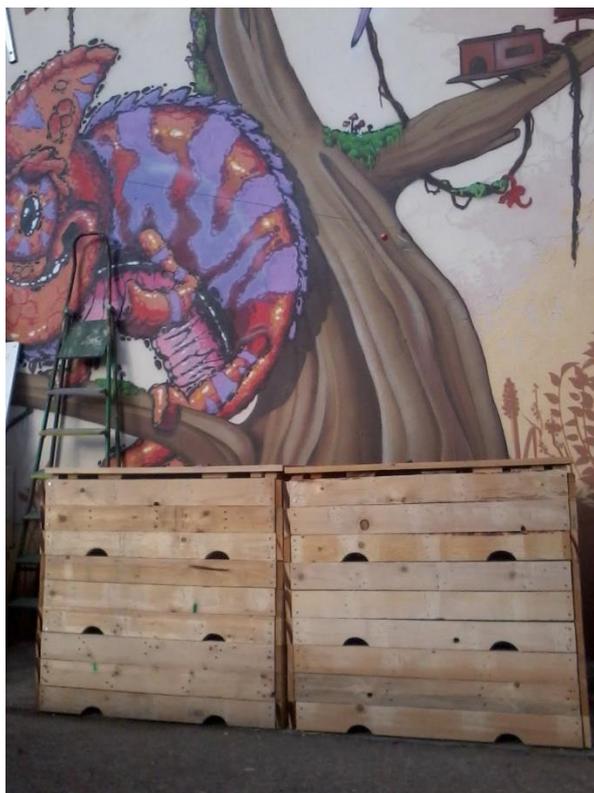


Figure 50: Modèle de Compostou 1.1 déployé à la Ressourcerie la Charpentière (fabrication E&S).

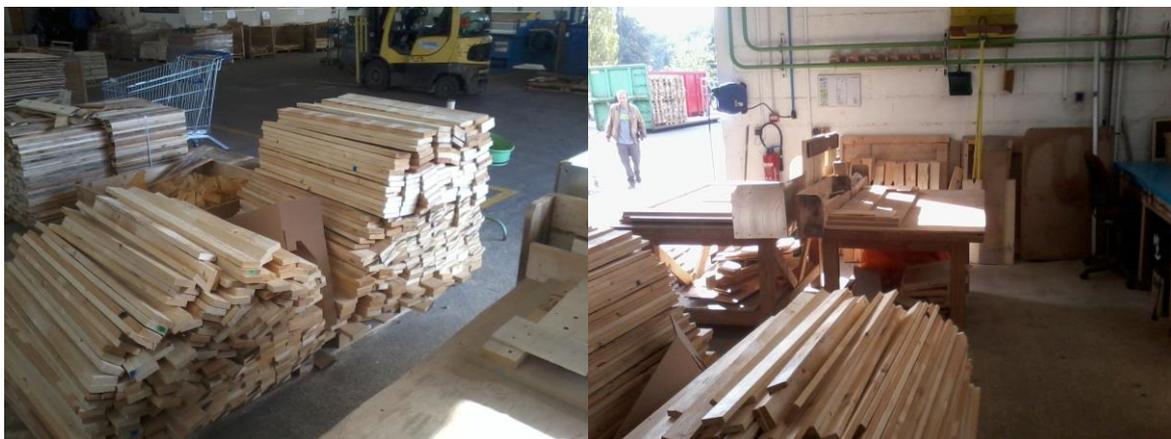


Figure 51: Modèle de Compostou 1.2 installé dans le quartier de la Ménardière, à Saint-Cyr-Sur-Loire.

### 3.4.3. Choix du fabricant et des matériaux du Compostou

Les Compostous déployés sur les 10 espaces de démonstration du projet COMPOSTOU ont tous été fabriqués par E&S. Le choix de ce partenaire a été motivé par plusieurs aspects :

- E&S est une association de réinsertion par le travail qui encadre des personnes en situation personnelle difficile (personnes vivant sans domicile fixe et/ou en réinsertion après une peine de prison). Leur confier la fabrication du Compostou donnait une plus-value sociale au projet ;
- E&S possède un atelier menuiserie qui s'était spécialisé dans la récupération et le recyclage de palettes en bois à l'échelle locale. L'atelier désassemblait des palettes usagées en coupant directement leurs clous et retaillait les planches à la longueur souhaitée par un de ses clients. Celui-ci les reconditionnait en palettes plus petites. Fabriquer le Compostou à partir de matériaux recyclés lui donnait une plus-value environnementale ;
- E&S possède des encadrants techniques expérimentés et consciencieux. Leur confier la fabrication du Compostou garantissait la fiabilité technique du projet ;
- E&S est une association locale subventionnée dont les coûts horaires de main d'œuvre sont relativement faibles (environ 7,5 euros/heure). Passer par cette association permettait de respecter le plafond de coût de production que nous nous sommes fixés pour le Compostou.



**Figure 52: Partie de l'atelier menuiserie d'E&S consacrée à la fabrication des Compostous.**

Grâce à son activité de récupération de palettes usagées, E&S pouvait donc collecter les planches nécessaires à la fabrication des Compostous. Notre choix s'est porté sur un type particulier de planches, représentant à peine 10 à 15% du gisement de palettes traitées annuellement par l'association E&S. Il s'agissait de planche de palettes dites « lourdes », d'environ 2 cm d'épaisseur et d'une longueur minimale de 95 cm, sans

fissures. Pour éviter la contamination des composteurs (et donc du compost) avec des agents chimiques indésirables, seules des planches traitées à la chaleur ont été utilisées pour fabriquer le Compostou.



**Figure 53: Les palettes lourdes traitées à la chaleur de bonnes dimensions ne représentaient que 10 à 15% du gisement de palettes recyclées arrivant chez E&S.**

Les palettes dont le bois a été ainsi traité sont reconnaissables par la présence d'un cachet pyrogravé « HT DB » (« *heat treated debarked* »), signifiant écorcé et traité à la chaleur, semblable à celui-ci :

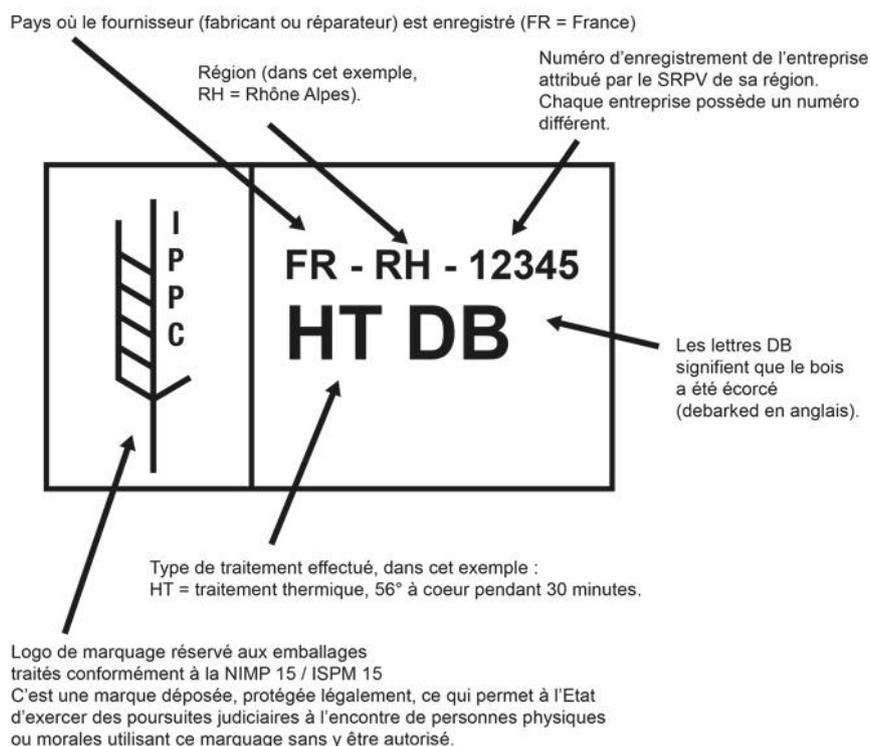


Figure 54: Cachet apposé sur un bois traité selon la norme NIMP 15 (source : <http://www.ecopalette.fr>).

Selon le site [ecopalette.fr](http://www.ecopalette.fr), « *Les Normes internationales pour les mesures phytosanitaires 15 (NIMP 15) est une mesure phytosanitaire internationale élaborée par la Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV), qui aborde directement la nécessité de traiter les matériaux en bois d'une épaisseur supérieure à 6 mm, utilisé pour expédier des produits entre les pays.*

*Son objectif principal est d'empêcher le transport international et la propagation des maladies et des insectes qui pourraient affecter de façon négative les plantes ou les écosystèmes. NIMP 15 affecte tout le matériel d'emballage en bois (palette de manutention, caisses, dunnages, etc) en exigeant qu'ils soient écorcés (DB pour debarked) et puis traité thermiquement (HT pour heat treated). »*

Ainsi la matière première du Compostou est un bois non imprégné chimiquement qui a simplement fait l'objet d'un écorçage et d'un traitement à cœur à 56°C, éliminant les organismes parasites du bois. Ce bois peut donc servir de support de vie à la faune du Compostou, sans crainte d'en impacter la dynamique à cause de la présence de polluants résiduels. En revanche, il était su et assumé que la durabilité dans le temps de ce composteur serait limitée et qu'il finirait par se dégrader. **C'est donc un composteur périssable et compostable.** Après discussion avec les responsables d'E&S, nous avons

estimé que la moitié du parc de Compostous installé serait à renouveler après 5 à 7 ans d'exploitation. Cette **obsolescence programmée** permettait de ne pas figer techniquement le Compostou et de remplacer progressivement les Compostous les plus anciens par des modèles plus élaborés ou mieux adaptés.

L'obsolescence programmée mise en place pour des raisons marketing sur des produits vendus a mauvaise réputation et c'est justifié. L'association Halte à l'Obsolescence Programmée (HOP) et Zero Waste France luttent activement contre cette pratique industrielle et commerciale. Généralement, cette obsolescence se fait au détriment du client grâce à un produit délibérément non réparable et/ou qui dysfonctionne prématurément. Ce type d'obsolescence programmée génère inutilement des déchets et gaspille des ressources, au seul profit du fabricant et du distributeur.

La situation est très différente pour l'obsolescence programmée sur des produits loués, réparables et recyclables. Ce type d'obsolescence est plus vertueuse car elle crée une pression sur le loueur qui l'encourage, via un service de maintenance, à consolider les points forts du produit mis sur le marché (sécurité, performance, ergonomie), tout en pouvant l'adapter aux évolutions permanentes dudit marché. Le client n'est pas victime du procédé car le loueur s'engage à lui procurer un produit toujours sûr et performant, qu'il n'est pas dans l'intérêt de ce dernier de faire dysfonctionner prématurément. Si le produit loué peut être recyclé en fin de vie, son impact environnemental est réduit. Le compostage étant un mode de recyclage matière particulièrement économe en ressources, il nous a semblé préférable de pouvoir broyer et composter un Compostou en fin de vie, plutôt que de le déconstruire en vue de recyclage. De plus, il aurait fallu pour cela, le fabriquer dans un matériau imputrescible (plastique, bois traité chimiquement), générateur de déchets plus problématiques en phase de production et en fin de cycle et limitant toute évolution technique significative pendant plusieurs années.

Le choix effectué est donc en quelque sorte un compromis entre fixisme et évolution technologique, solidité et souplesse, rentabilité et adaptabilité. C'est aussi pour cette raison que nous n'avons pas utilisé de vis inox, environ 3 fois plus coûteuses que des vis classiques, lors de la fabrication des Compostous. Pour que l'utilisation de vis inox soit économiquement rentable, il aurait fallu que chaque vis classique d'un Compostou soit remplacée plus de 3 fois lors de son cycle de vie. L'utilisation de vis

classiques dans la fabrication des 10 premiers Compostous expérimentaux nous a permis de vérifier ce point (voir la section « maintenance » des résultats du projet).

### 3.4.4. Plans

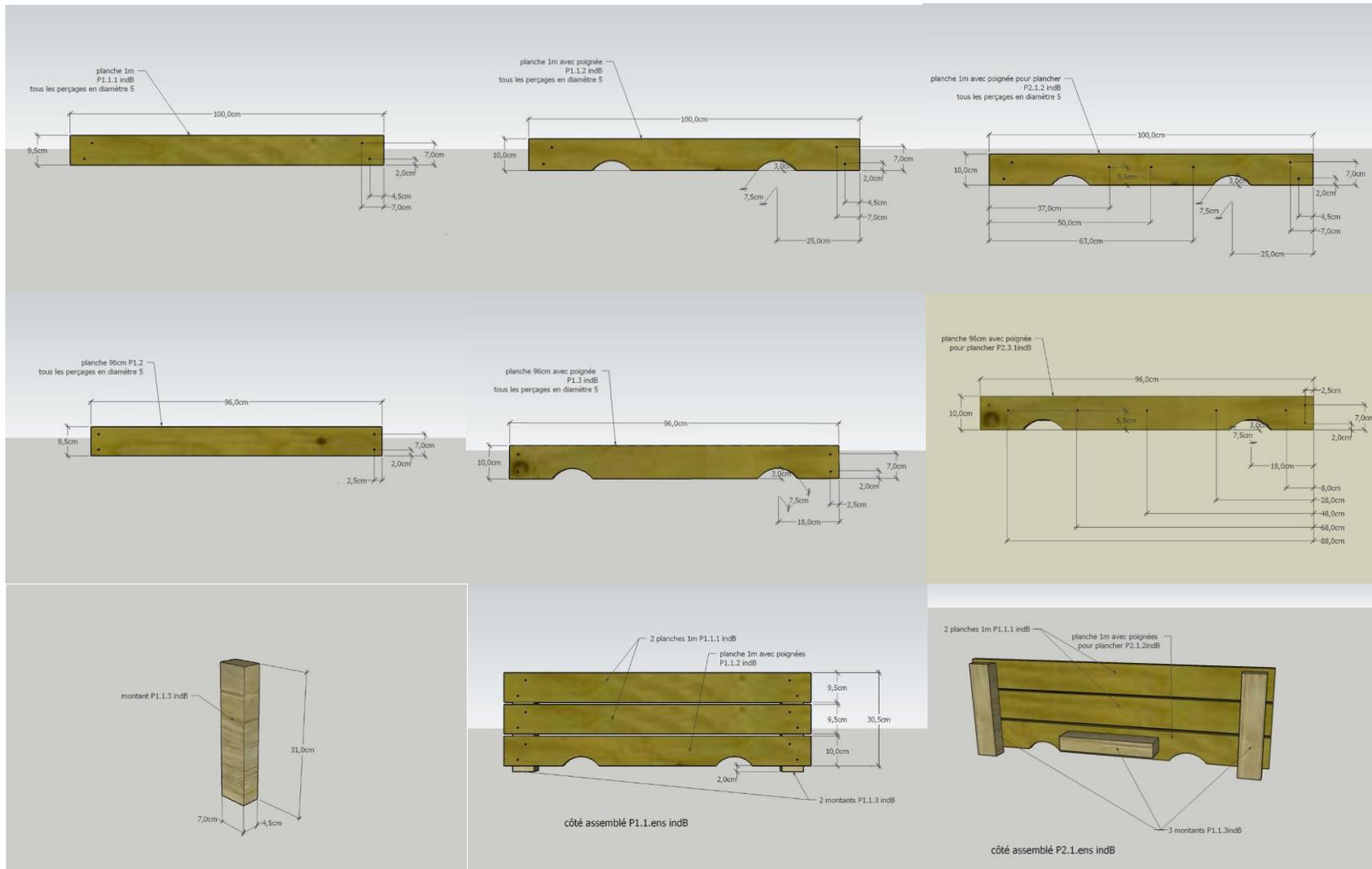
La conception technique du prototype Compostou 1.0 est l'œuvre de Paul Huguen, menuisier à la coopérative Artefacts et co-inventeur du Compostou, sur propositions des trois autres co-inventeurs de l'appareil : Sébastien Moreau, Maxime Cornillon et David Violleau.

Les plans industriels et la nomenclature des modèles Compostou 1.1 et 1.2 ont été réalisés par Valérie Breillad, ingénieure et Vice-Présidente de l'association ZDT de 2017 à 2018. Au total, 10 versions différentes des plans ont été nécessaires pour passer du modèle 1.0 au modèle 1.2.

	composé par :		composé par :		composé par :		plan
	Qté / SE	Sous-Ensemble	Qté / SE	Sous-Ensemble	Qté / SE	Sous-Ensemble	
<b>compostou</b> <b>P.ens indB</b>	5	module simple P1.ens indB	2	côté assemblé P1.1.ens indB	2	planche 1m	P1.1.1 indB
					1	planche 1m avec poignée	P1.1.2 indB
					2	montant	P1.1.3 indB
					12	vis à bois 4, lg 50	
			4	planche 96cm	P1.2		
			2	planche 96cm avec poignée	P1.3 indB		
			24	vis à bois 4, lg 50			
	1	module avec plancher P2.ens indB	2	côté assemblé P2.1.ens indB	2	planche 1m	P1.1.1 indB
					1	planche 1m avec poignée pour plancher	P2.1.2 indB
					3	montant	P1.1.3 indB
15					vis à bois 4, lg 50		
4			planche 96cm	P1.2			
2	planche 96mm basse P2.3.ens	1	planche 96cm avec poignée pour	P2.3.1 indB			

				indB		plancher				
					1	montant pour plancher	P2.3.2 indB			
					5	vis à bois 4, lg 50				
			1	plancher P2.4.ens indA	2	planche 96cm encoche plancher	P2.4.1 indB			
					8	planche 96cm	P1.2			
			24	vis à bois 4, lg 50						
					toit P3.ens indB	10	planche 1m toit		P1.1.1 indB	
						8	planche 27cm toit		P3.1 indB	
						48	vis à bois 4, lg 35			
4	vis à bois 4, lg 70, pour fixation toit sur compostou									
2		couvercle P4.ens indB	2	planche 44cm poignée couvercle						
			2	planche 44cm toit						
			2	planche 36cm toit						
			16	vis à bois 4, lg 35						

Tableau 4: Nomenclature d'un Compostou 1.2 (document V. Breillad pour ZDT).



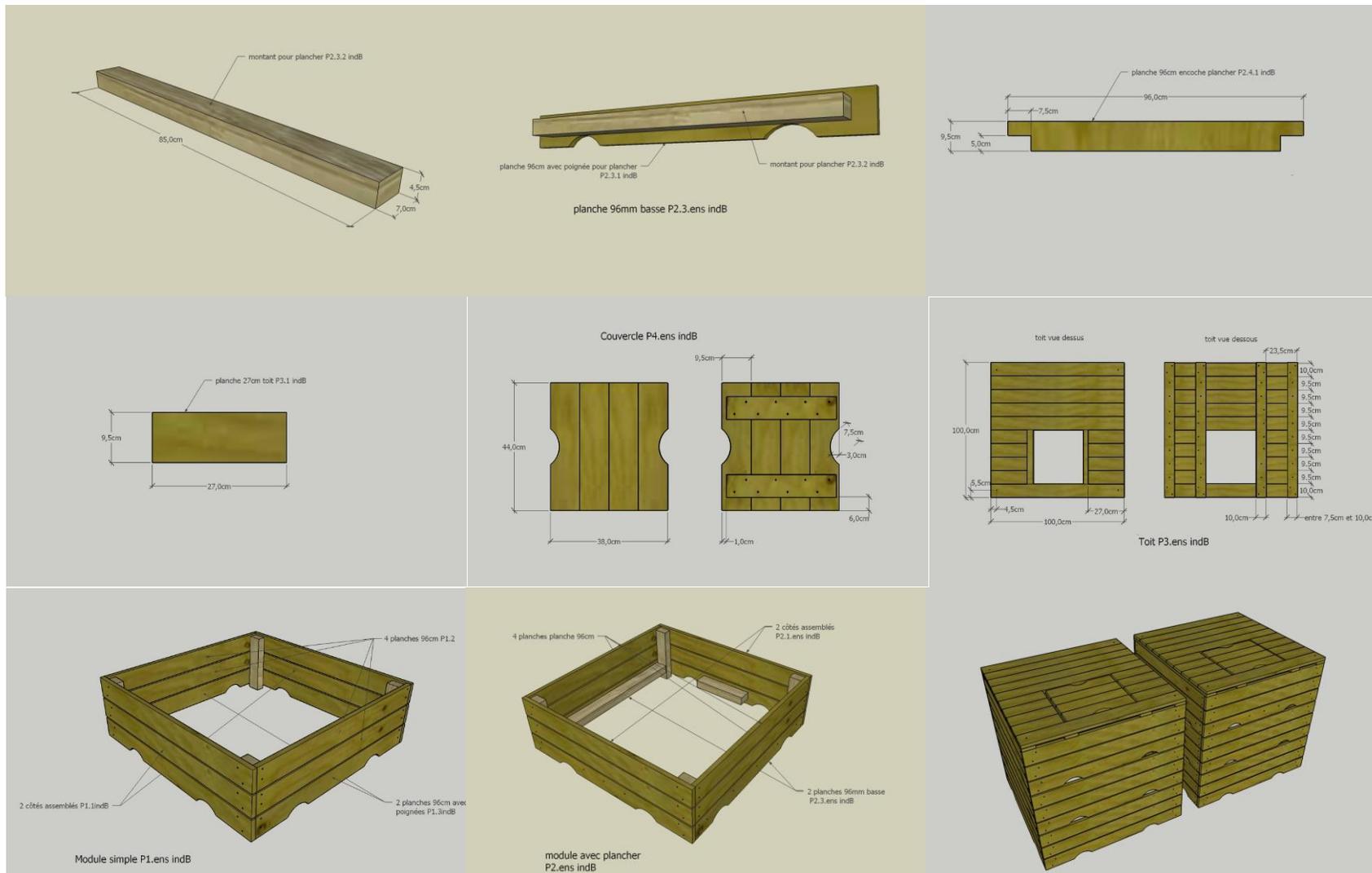


Figure 55: Plans des différents éléments constitutifs d'un Compostou 1.2 (documents V. Breillad pour ZDT).

### 3.4.5. Signalétique

Pour que les utilisateurs aient toujours des instructions appropriées lors de leurs dépôts de biodéchets, une signalétique particulière a été créée par Camille Ratia, Secrétaire de l'association ZDT et a été fixée sur les couvercles des 10 Compostous expérimentaux. Un panneau signalait la présence de broyat de branches et demandait à ne pas déposer de déchets dans la réserve de broyat. Un second, situé sur le couvercle surplombant le silo de compostage expliquait le fonctionnement du Compostou.



Figure 56: Signalétique Compostou pour la réserve de broyat (réalisation Camille Ratia pour ZDT).

# Ici, on composte ENSEMBLE



Figure 57: Signalétique Compostou pour le silo de compostage (réalisation Camille Ratia pour ZDT).

La signalétique a été imprimée en couleur sur feuilles de papier blanc A4 et plastifiée avec des pochettes de plastification de 125 µm d'épaisseur. Les feuilles plastifiées ont ensuite été fixées avec de l'adhésif à double face 3M ou Scotch sur des fers plats en acier zingué perforés recoupés à une taille d'environ 25 cm. L'ensemble a été fixé sur chaque couvercle de Compostou à l'aide de vis 4 x 16 mm à têtes rondes pourvues de rondelles.



Figure 58: Les signalétiques plastifiées fixées sur un Compostou (Sonzay).

### 3.5. Résultats

#### 3.5.1. Chantiers participatifs d'installation

Avant chaque chantier participatif, les Compostous étaient déstockés de l'entrepôt d'E&S.



Figure 59: A gauche, Philippe, l'ouvrier d'E&S qui a fabriqué les premiers Compostous.



Figure 60: Sortie des ateliers d'E&S des deux premiers Compostous 1.1 (RCVL01 et RCVL02) le 18/10/2017.

Pendant la durée du projet COMPOSTOU, 10 chantiers participatifs ont été organisés, pour l'installation de chaque Compostou dans chaque espace de démonstration. Ces chantiers ont été très appréciés du public participant (voir la section « retours des utilisatrices et utilisateurs »). Pour certaines personnes, c'était la première fois qu'elles utilisaient une visseuse électrique.

Les chantiers ont été animés soit par Sébastien Moreau, soit par Jonathan Lecharpentier, Guide-Composteur salarié de l'association. La durée moyenne de ces installations était d'1 heure 30 environ, variable selon le nombre de participants (entre 2 et 15 personnes environ). Le déroulé était le suivant :

- Présentation orale rapide du projet COMPOSTOU ;
- Présentation des deux référents du Compostou ;
- Sortie des éléments du Compostou du véhicule ;
- Acheminement des éléments en faisant une chaîne humaine jusqu'au site d'implantation ;
- Rangement des éléments par catégories ;
- Instructions de montage données à tout le groupe par le membre de ZDT encadrant le chantier ;
- Organisation de 2 ou 3 groupes (selon le nombre de visseuses disponibles) pour le montage de modules en parallèle ;
- Emboîtement des modules pour former les deux blocs du Compostou ;
- Pose et fixation des toits ;
- Fixation des charnières et des porte-cadenas ;
- Fixation de la signalétique ;
- Sécurisation des accessoires (griffe à fleur et pelle à terreau) avec un câble acier et des manchons en aluminium ;
- Mise en place des cadenas à code ;
- Transmission du code aux référents ;
- Inscription du numéro du Compostou sous chacun des couvercles.

Après la phase de montage, l'encadrant du chantier donnait à l'ensemble du groupe les instructions d'utilisation du Compostou et répondait aux questions. Puis le

Compostou était alimenté en broyat de branches, soit le jour même soit dans les jours suivants pour une mise en service rapide.

De retour du chantier, l'encadrant du chantier déclarait le nouveau site via le formulaire de suivi de site et rappelait aux référents le numéro de leur Compostou, le code des cadenas et les instructions d'utilisation y compris le lien vers le formulaire de suivi de site. Puis le site était géolocalisé sur la cartographie des composteurs partagés de Touraine, hébergée sur le site web de ZDT.

Les 10 Compostous ont été installés aux dates suivantes :

**Tableau 5: Dates d'installation des 10 Compostous expérimentaux.**

<b>Numéro du composteur</b>	<b>Date d'installation</b>	<b>Nombre de participants au chantier d'installation</b>
<b>RCVL01</b>	02/04/2018	3
<b>RCVL02</b>	23/02/2018	2
<b>RCVL03</b>	17/11/2017	10
<b>RCVL04</b>	22/05/2018	6
<b>RCVL05</b>	17/05/2018	8
<b>RCVL06</b>	17/05/2018	15
<b>RCVL07</b>	18/10/2017	10
<b>RCVL08</b>	26/06/2018	11
<b>RCVL09</b>	02/02/2019	10
<b>RCVL10</b>	06/05/2019	8



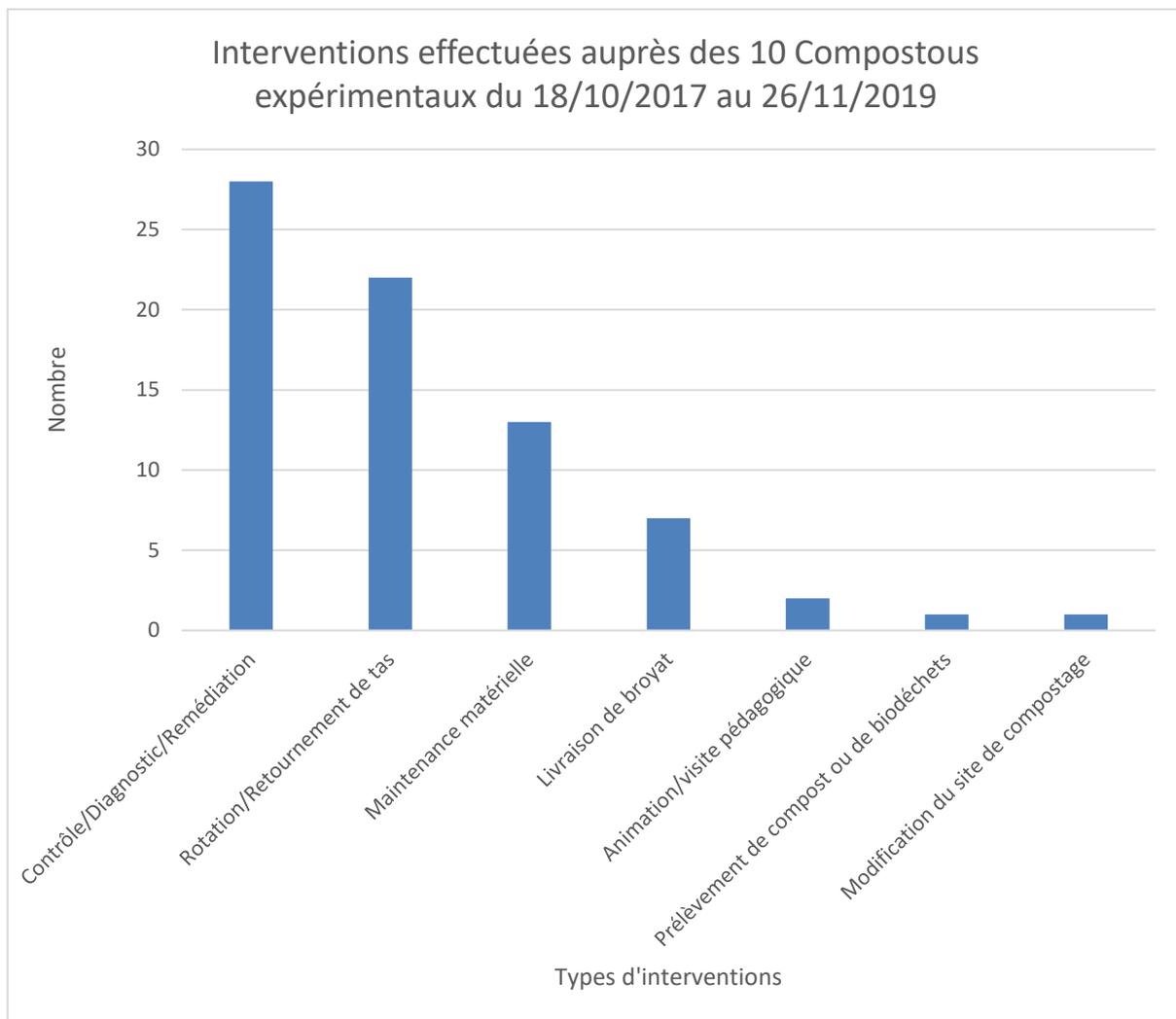
Figure 61: Chantier participatif du Compostou RCVL09 (Joué-Les-Tours).



**Figure 62 : Lucie Dubuc, étudiante en DUT Génie Biologique à l'IUT de Tours, a été la première personne au monde à utiliser un Compostou. Ses premiers mots après cet instant magique ont été « C'est cool ». Un petit geste pour la femme, un grand geste pour l'humanité...**

### 3.5.2. Maintenance

Au total, les 10 Compostous expérimentaux du projet COMPOSTOU ont fait l'objet de 84 interventions d'accompagnateurs de l'association ZDT entre le 18/10/2017 et le 26/11/2019, réparties en 10 chantiers participatifs pour l'installation des Compostous et 74 interventions post-installation.



**Figure 63: Interventions effectuées auprès des 10 Compostous expérimentaux du 18/10/2017 au 26/11/2019.**

L'essentiel des interventions post-installation a porté sur des opérations de contrôle des appareils, réalisées soit spontanément soit à l'occasion des visites de contrôle obligatoires bisannuelles. Une vingtaine de rotations ont été effectuées pendant ces deux années d'activité, soit en moyenne 2 rotations par an et par appareil, conformément au fonctionnement théorique voulu pour le Compostou. Seules 13 interventions pour maintenance ont été nécessaires pendant cette période, ce qui est peu pour un parc de 10 appareils. Les autres interventions concernaient la livraison de broyat sur les sites non ou mal alimentés par nos partenaires, quelques visites pédagogiques, des prélèvements de compost pour analyses et un déplacement du site de Compostage pour des raisons pratiques (RCVL01).

Lorsqu'on analyse la relation entre le nombre d'interventions effectuées et la durée d'utilisation des Compostous, on constate que 2 groupes se détachent assez nettement :

- Le groupe des Compostous « sous surveillance » : RCVL01, 02 et 07 ;
- Le groupe des Compostous « non problématiques » : RCVL03, 04, 06 et 08.

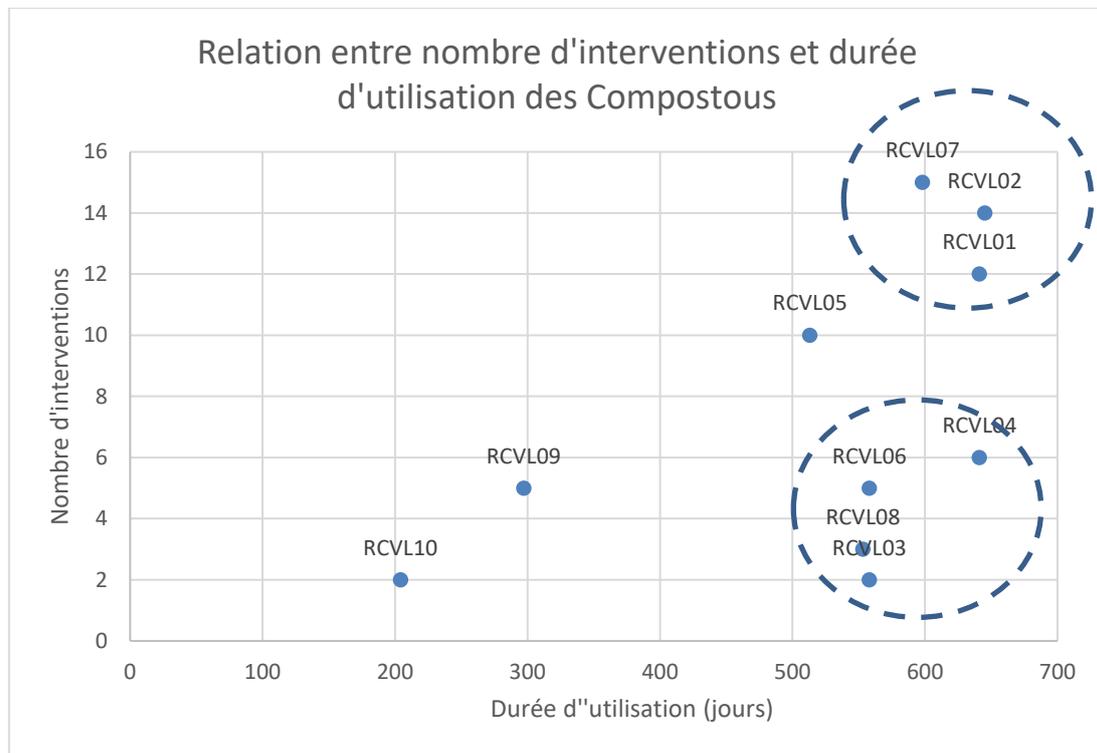


Figure 64: Relation entre nombre d'interventions et durée d'utilisation des Compostous.

Dès les premiers mois d'utilisation, plusieurs types de problèmes ont en effet été identifiés et ont dû être solutionnés sur les 2 premiers Compostous de type 1.1 (RCVL01 et RCVL02) installés :

- Les planches des premiers modèles présentaient des fibres en saillie qui pouvaient se transformer en échardes. **Nous avons demandé au fabricant de poncer les angles des planches.**
- Lorsque le bois s'est gorgé d'eau suite aux pluies, plusieurs planches des modules sont tombées car le gonflement du bois a fait casser les vis. **Nous avons demandé au fabricant de prévoir des espaces de 5 mm minimum entre les planches des modules du Compostou pour permettre au bois de gonfler à l'automne sans déformer les parois.**
- Un grand nombre de vis a dû être changé car elles ont cassé en leur centre. Il s'est avéré que ces vis possédaient des états de corrosion importants, même neuves, et qu'elles étaient

recouvertes d'une fine couche de couleur métallisée pour masquer leur alliage médiocre. Nous avons changé 304 vis et demandé au fabricant du Compostou de changer son approvisionnement.

- Les vis étaient enfoncées en force dans les planches, ce qui a contribué à les fragiliser. Nous avons demandé au fabricant de pré-percer les planches au diamètre des vis et de ne pas enfoncer les têtes de vis dans les planches (têtes affleurantes).
- Chaque planche du plancher sous la réserve de bois était initialement fixée sur des lambourdes de renfort. Or en gonflant, ce plancher s'est fortement bombé. Nous avons cessé de fixer les planches aux lambourdes et avons prévu un espace d'au moins 1 cm entre chaque planche du plancher.
- Un point de faiblesse important est apparu au niveau des toits : les montants verticaux des modules faisant initialement saillie en dépassant vers le haut, le toit cassait au ras de ces montants si on s'appuyait dessus. Le problème a été résolu en inversant le sens d'emboîtement des modules sur les Compostous de type 1.2. Sur les deux premiers modèles 1.1 déjà produits, des tasseaux de chêne ont été mis en bordure de la face interne de chaque toit pour les consolider.
- Un second point de faiblesse, lui aussi dû au sens d'emboîtement des modules initialement choisi, a été identifié : les planches ajourées du module du bas, à la base de chaque bloc du Compostou 1.1 avaient tendance à s'écarter du module car sur elles reposait tout le poids de chaque bloc. Ce problème a aussi été résolu en inversant le sens d'emboîtement des modules.

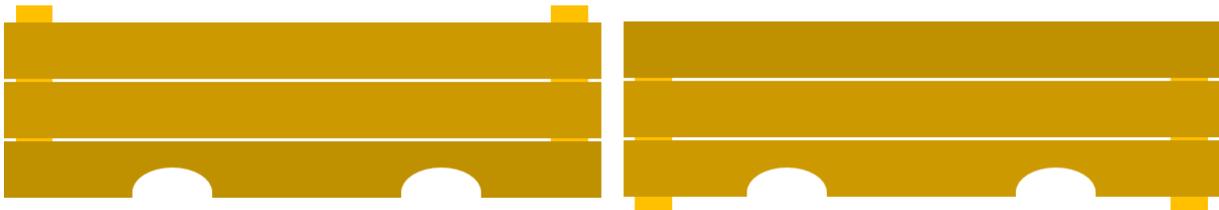


Figure 65: Inversement du sens d'emboîtement des modules entre la version 1.1 (à gauche) et 1.2 (à droite).



Figure 66: A gauche, des fibres en saillie pouvant provoquer des échardes. A droite un point de faiblesse identifié sur les toits des premiers modèles (Compostous 1.1).

Le Compostou RCVL07 a aussi nécessité beaucoup d'interventions car le nombre d'utilisateurs inscrits avait été mal maîtrisé au lancement du site. Nous ignorions alors quelle était la limite raisonnable d'utilisateurs pour un Compostou et plus de 20 personnes se sont inscrites, ce qui a engendré davantage de visites de maintenance et de rotations qu'ailleurs. **Nous avons ensuite fixé la limite à 15 utilisateurs pour les autres Compostous.**

On constate que les Compostous les moins problématiques étaient ceux qui étaient les moins utilisés, ce qui souligne **l'intérêt de déployer sur un territoire de nombreux composteurs partagés de petites capacités plutôt qu'un nombre restreint de composteurs de quartiers de grande capacité.**

Les Compostous RCVL05 et 09 représentaient un bon compromis, entre nombre d'utilisateurs acceptable et interventions nécessaires.

### 3.5.3. Ergonomie

Au niveau de l'ergonomie, plusieurs points ont dû être améliorés :

- Les trappes des toits étaient initialement centrales et étaient difficilement accessibles pour des personnes de taille moyenne (<1m70). Nous ne nous étions pas rendu compte de cela lors des essais sur le prototype car tous les co-inventeurs mesurent plus d'1m75 ! **Nous avons demandé au fabricant de les décentrer dans la version 1.2.**

- Pour être privatisés, les premiers Compostou ont été équipés de charnières, de porte-cadenas et de petits cadenas à code. Ces derniers étaient peu adaptés à un usage extérieur et se grippaient au bout de quelques mois. **Un modèle de cadenas pour extérieur, plus grand que le précédent et donc nécessitant des porte-cadenas plus grands a ensuite été utilisé.**
- Un point de faiblesse a été identifié sur chaque couvercle de trappe : il s'agit de la première planche ajourée, qui est prise en main par l'utilisateur pour soulever le couvercle et sur laquelle est fixée une partie du porte-cadenas. Si le bois gonfle trop cette planche empêche la fermeture de la trappe, travaille et fini par se détacher ou casser. **Nous avons demandé au fabricant de bien respecter un écart minimal de 1 cm entre le bord de cette planche et le bord de la trappe, une fois le couvercle fermé. Les planches ont aussi été retaillées et refixées dès les premiers signes de dysfonctionnement pour éviter qu'elles travaillent.**
- Le Compostou RCVL02 a été décoré par des étudiants de l'IUT. Malheureusement, ils ont peint ses parois sans considérer que les modules allaient devoir être déplacés. **Nous avons précisé aux utilisateurs des autres Compostous que les modules peuvent être décorés, mais indépendamment les uns des autres.**
- Après une rotation, le compost libéré était laissé en tas. Nous avons constaté que des chats utilisaient ce compost pour y faire leurs besoins. **Nous avons donc recouvert les tas de compost de grillage à poule à mailles serrées, que n'apprécient pas les chats car ils ne peuvent pas gratter le sol pour recouvrir leurs besoins. Ultérieurement, des carrés potagers seront installés sur les sites de démonstration pour faciliter le jardinage collectif au pied des Compostous.**



**Figure 67: A droite, les trappes centrales des premiers modèles de Compostous n'étaient pas pratiques pour les personnes de tailles inférieure à 1m70. A gauche, les trappes ont été décentrées sur les modèles 1.2.**



Figure 68: Pour en restreindre l'accès à 15 utilisateurs maximum, ce Compostou a été équipé de charnières, de porte-cadenas et de cadenas d'un modèle ne convenant pas à l'extérieur (à gauche à La Riche), rapidement remplacé par un modèle plus résistant (à droite à Reugny).



Figure 69: La décoration d'un Compostou est possible mais doit se faire module par module car l'ordre des modules change à chaque rotation. A gauche, sur le dessus du Compostou 1.1, on aperçoit le toit cassé en raison d'un point de faiblesse. A droite, on voit une planche de couvercle de trappe cassée.



Figure 70: Un simple grillage à poule évite que les chats viennent uriner sur le tas de compost mûr, en attendant que des végétaux lèvent sur cette planche de culture. Des carrés potagers seront installés à la fin du projet.

#### 3.5.4. Approvisionnement en broyat de branches

Au début du projet COMPOSTOU, il a été difficile de trouver du broyat de branches de qualité. Pour nos premières livraisons, nous nous en sommes procurés sans autorisation le long de talus SNCF, ce qui n'était pas très pratique et un peu risqué. Puis nous avons demandé aux collectivités ou aux structures partenaires du projet de faire livrer du broyat sur les sites, avec des résultats très contrastés selon les sites (voir tableau ci-dessous). Ces difficultés nous ont encouragé à structurer notre propre réseau de fourniture de broyat de branches à l'échelle locale, avec des élagueurs professionnels produisant le broyat, des sites de dépôts en périphérie du territoire de Tours Métropole Val de Loire (où se concentrent les sites accompagnés) et un système de gestion des dons de broyat sur internet. Une première enquête a été réalisée par Perrine Delost, bénévole de ZDT et a permis d'identifier une dizaine d'entreprises prêtes à nous fournir du broyat.

Tableau 6: Bilan des partenariats établis pour la fourniture de broyat de branches.

Numéro du Compostou	Structures sollicitées pour fournir du broyat	Résultats
<b>RCVL01</b>	Ressourcerie La Charpentière	<p><b>Positif</b></p> <p>2018 : que de la paille, du carton et des boîtes à œufs au début comme matières carbonées. Nous avons effectué quelques livraisons de broyat pour alimenter le site.</p> <p>2019 : fourniture d'un broyat de qualité lorsque la référente a pris conscience de l'importance d'avoir un broyat de qualité et qu'elle a pu en obtenir auprès d'une connaissance.</p>
<b>RCVL02</b>	IUT de Tours	<p><b>Positif</b></p> <p>Au début, nous avons alimenté le site en broyat jusqu'à ce que nous puissions utiliser un stock de broyat généré sur place au cours d'une opération d'élagage.</p>
<b>RCVL03</b>	Collège André Bauchant	<p><b>En voie d'amélioration</b></p> <p>Le broyat obtenu par le collège est trop fibreux (broyeur à marteaux). Il n'est pas assez structurant et reste trop humide. Les référentes vont essayer de trouver un meilleur broyat.</p>
<b>RCVL04</b>	Antenne technique de Grandmont E&S Nicolas Léger élagueur	<p><b>En voie d'amélioration</b></p> <p>Une situation paradoxale : le Compostou est entouré de 33 hectares de bois. Pourtant c'est là où nous avons eu le plus de difficultés à trouver du broyat...</p> <p>2018 : Au début, l'antenne technique de Grandmont, qui gère les espaces verts</p>

		<p>du campus scientifique de Grandmont n'a pas souhaité nous donner accès à son broyeur ou nous fournir du broyat. Puis nous nous sommes fait livrer un broyat de mauvaise qualité (trop fibreux, trop vert, mélange d'essence persistante et à épines...) par E&amp;S. Un habitant de Tours nous a proposé de la sciure de tronçonneuse... qui a été testée, sans succès (elle a colmaté le compost et a provoqué des montées en température). De plus elle sentait fortement l'essence.</p> <p>2019 : l'antenne technique nous a autorisé à utiliser du broyat généré par une opération d'élagage. Un accord a été passé avec un élagueur pour qu'il nous livre du broyat occasionnellement.</p>
<b>RCVL05</b>	Commune de Tours et Tours Métropole Val de Loire	<p><b>Négatif</b></p> <p>Les services espaces verts de la commune de Tours et de la Métropole ont refusé de nous fournir du broyat. Après négociation, des refus de tri de la plateforme de compostage métropolitaine du Bois des Hâtes nous ont été proposés en guise de broyat. Nous les avons refusés car ils contenaient beaucoup de déchets plastiques et métalliques, sentaient les hydrocarbures et la matière organique était déjà très décomposée...</p> <p>Depuis le début du projet nous devons alimenter ce site nous-mêmes en broyat.</p>
<b>RCVL06</b>	Touraine Logement	<p><b>Positif</b></p> <p>Nous avons eu l'autorisation d'utiliser le broyat généré par une opération d'abattage, puis de faire livrer du broyat sur site par un élagueur.</p>

<b>RCVL07</b>	Commune de Saint-Cyr-sur-Loire	<b>Positif</b> Les services communaux nous livrent régulièrement du broyat de bonne qualité. Ils sont réactifs et aidants.
<b>RCVL08</b>	Communauté de Communes Gâtine et Choisilles - Pays de Racan	<b>Négatif</b> La Communauté de Communes Gâtine et Choisilles - Pays de Racan a demandé à la commune de Sonzay de nous fournir du broyat, ce que cette dernière a accepté. Malheureusement, à la première livraison, le broyat était en fait très décomposé. Par la suite il y a eu des ruptures fréquentes d'approvisionnement ou du broyat trop fibreux ou trop humide. Nous avons dû livrer du broyat plusieurs fois sur le site.
<b>RCVL09</b>	Commune de Joué-Lès-Tours	<b>Positif</b> Les services communaux nous livrent régulièrement du broyat de bonne qualité. Ils sont réactifs et aidants.
<b>RCVL10</b>	Commune de Reugny	<b>En voie d'amélioration</b> Les services communaux ont livré du broyat un peu trop fin qui a entraîné une montée en température. Nous leur avons demandé un broyat plus structurant.



Figure 71: « Broyat » de branches proposé par Tours Métropole Val de Loire pour le site RCVL05. Il s'agissait en fait de refus de tri issu d'une plateforme de compostage de déchets de voirie et d'espaces verts communaux, trop pollués pour être utilisables. Nous l'avons refusé.

### 3.5.5. Mésusages

Malgré nos instructions et la signalétique disposée sur les Compostous, nous avons déploré une proportion non négligeable d'éléments indésirables non compostables dans le compost. **En obtenant les courriels des utilisateurs, il a été plus facile et plus rapide de communiquer auprès de ceux-ci et de corriger leurs pratiques que lorsque les sites étaient en accès libre.**

Les sacs en plastique dits biodégradables étaient particulièrement problématiques car certains utilisateurs les jetaient tels quels, sans étaler leur biodéchets et sans les mélanger à du broyat de branches. Nous avons également trouvé beaucoup d'autocollants plastifiés de fruits, d'élastiques, de liens de bouquets, d'opercules en plastiques ou en métal, d'emballages de médicaments et de couverts dits biodégradables, qui n'ont pratiquement pas été abimés par 8 à 12 mois de compostage. **Lorsque c'est arrivé, nous avons immédiatement demandé aux référents de site de rappeler les consignes d'utilisation du Compostou aux utilisateurs.**



Figure 72: Exemples de déchets non compostables retrouvés dans un Compostou.

Un autre problème récurrent était les biodéchets trop gros (ananas, trognons de choux...). **Nous avons demandé aux utilisateurs, via les référents, de couper ceux-ci avant dépôt pour accélérer leur décomposition.**

Il est arrivé une fois que des gros morceaux de fromage et près de 10 kilos de grosses pommes de terre soient déposés intacts dans un Compostou. **Nous avons alors communiqué sur l'importance d'éviter le gaspillage alimentaire et proposé des solutions.**

A quelques occasions, de la litière animale a été déposée dans un Compostou. Ceci était très problématique en compostage de basse énergie car la température montait immédiatement à plus de 50°C. **La litière a été transférée dans un composteur de haute énergie, du broyat en excès a été déposé dans le Compostou et un brassage un peu plus profond a été réalisé pour disperser les restes de litière.**

**Afin d'améliorer l'utilisation du Compostou, nous avons changé la signalétique au-dessus du silo de compostage, pour la rendre plus explicite.**

# Ici, on composte ENSEMBLE



**COMPOSTOU**  
Le composteur qui ne s'achète pas... mais qu'on peut partager!

- 1 Jetez vos **biodéchets\*** dans le composteur et étalez-les (**pas de sacs en plastique biodégradable, SVP!**)
- 2 Mélangez légèrement avec les biodéchets plus anciens
- 3 Recouvrez le tout d'une couche de **broyat de branches\***

**\*Biodéchets**  
Déchets de cuisine en petits morceaux, mouchoirs en papier, fleurs fanées...

**\*Broyats de branches**  
Branches broyées ou autres matériaux secs et carbonés (feuilles mortes, carton, boîtes à oeufs...) Toujours en petits morceaux

100% Made in Touraine

Pour aller plus loin :  
[contact@zerodechettouraine.org](mailto:contact@zerodechettouraine.org)  
[www.compostou.org](http://www.compostou.org)  
Une innovation de :

Projet soutenu par :



Figure 73: Nouvelle signalétique du Compostou mise en place en 2019.

La plupart des affiches A4 plastifiées que nous avons apposées sur les Compostous au début du projet n'étaient plus en bon état après un an d'exposition aux intempéries. Les couleurs étaient passées et les pochettes plastiques étaient fissurées, ce qui laissait s'infiltrer l'eau de pluie. **Nous avons fait imprimer la nouvelle signalétique sur panneaux A5 en PVC expansé de 3 mm avec lamination matte anti-UV. Outre sa bonne tenue dans le temps, cette solution permettait de ne plus utiliser que 2 vis pour fixer chaque panneau (au lieu de 4 vis et 2 fers plats perforés en acier galvanisé auparavant).**



Figure 74: Nouvelle signalétique imprimée sur panneaux PVC avec lamination anti-UV.

### 3.5.6. Incivilités

A de très rares occasions des Compostous ont été la cible d'incivilités :

- Il a été constaté à Saint-Pierre des Corps, peu de temps après l'installation du Compostou RCVL06, une tentative d'effraction sur un couvercle, protégé par un cadenas à code. Le couvercle a été en partie endommagé. **Nous avons réparé le couvercle, retiré les cadenas pendant 3 jours et laissé la trappe ouverte. Plus aucun problème n'a été signalé depuis.**
- A Saint-Cyr-sur-Loire (Compostou RCVL07), nous avons retrouvé le module supérieur de la réserve de broyat sur une aire de jeux pour enfants, à une quinzaine de mètres du Compostou. On avait essayé de prendre la pelle à terreau, sécurisée par un câble en acier. **Le module a été remis à sa place et maintenu sur le module inférieur par des vis supplémentaires.**
- Toujours à Saint-Cyr, les premiers cadenas posés ont été volés. **Ils ont été remplacés par des cadenas à 4 chiffres, plus difficiles à ouvrir.**

- Sur ce même site (décidément !) des croquettes à chat ont été régulièrement déposées sur le toit du Compostou. Nous n'en connaissons pas la raison (nourrissage de chats errants en vue d'éloigner les rongeurs ?). **Nous avons balayé les toits à chaque fois que c'était nécessaire et les dépôts de croquettes ont cessé.**
- En novembre 2019, le Compostou RCVL01 a été retrouvé en partie démantelé, probablement suite à une collision avec un véhicule. Aucune planche n'avait cassé, seule l'une d'entre elles était légèrement fissurée. **Soixante-trois vis ont été changées et les planches ont été refixées.**

### 3.5.7. Convivialité et bénévolat

L'installation ou l'inauguration des Compostous a été à chaque fois l'occasion d'un moment de grande convivialité avec les utilisateurs. A plusieurs reprises, les partenaires du projet ont offert aux participants un verre de l'amitié pour prolonger les discussions autour de l'appareil et initier les futurs utilisateurs.



Figure 75 : Inauguration du Compostou de la Ménardière (RCVL07) à St Cyr-Sur-Loire.



Figure 76: L'installation des Compostous a suscité beaucoup d'enthousiasme et de nombreux échanges entre les participants. Images du haut : Collège de Château-Renault (RCVL03) et Sonzay (RCVL08). Images du bas : place Velpeau à Tours (RCVL05).

Sur l'ensemble des 2 ans, le coordinateur du projet, Sébastien Moreau lui a consacré au moins 254 heures de travail bénévole (les seules retenues au titre du budget du projet). A cela, s'ajoutent 346 heures de bénévolat consenties par les 83 volontaires aux chantiers participatifs, les 20 référents, les 81 membres de la Composteam de Zéro Déchet Touraine et les concepteurs bénévoles du Compostou. **Au total le projet COMPOSTOU a donc requis au moins 600 heures de bénévolat et mobilisé plus d'une centaine de personnes.**

### 3.5.8. Retours des utilisatrices et utilisateurs

Nous avons procédé à une enquête de satisfaction auprès des utilisatrices et utilisateurs des 10 Compostous expérimentaux, *via* un formulaire Framiforms, du 01/12/2019 au 07/12/2019. Vingt et une personnes ont répondu à nos questions.

#### 3.5.8.1. Chantier participatif d'installation du Compostou

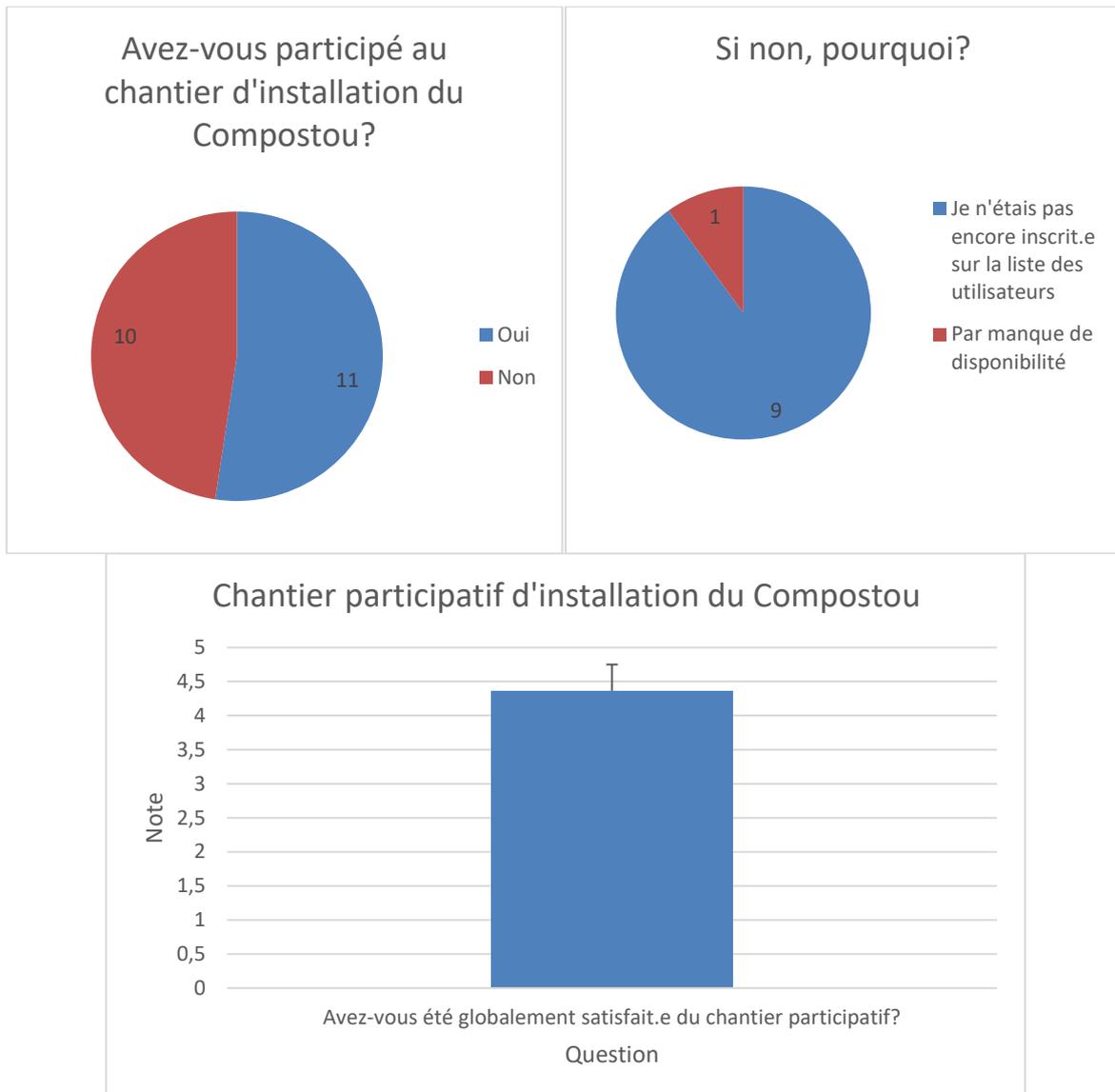


Figure 77: État de satisfaction des utilisateurs quant au chantier participatif d'installation de leur Compostou. Graphiques du haut : résultats exprimés en nombre de réponses avec  $n = 21$  pour le premier et  $n = 9$  pour le second. Graphique du bas, note globale moyenne (1 = « Non pas du tout », 5 = « Oui tout à fait ») et écart-type.

Plus de 52 % des répondants ont participé au chantier d'installation de leur Compostou. Lorsqu'ils ne l'ont pas fait, c'est très majoritairement parce qu'ils n'étaient pas encore inscrits parmi les utilisateurs de l'appareil et non par manque de volonté, par manque de motivation ou par crainte de ne pas savoir bricoler (autres propositions).

A la question « Auriez-vous des remarques ou suggestions d'amélioration au sujet du chantier d'installation du Compostou? », l'une des personnes interrogées a répondu « meilleure qualité de bois ». Cette remarque suggère que la qualité du bois de palette utilisé pour les Compostous a été jugée insatisfaisante. Mais nous ignorons pourquoi.

### 3.5.8.2. Le Compostou et vous

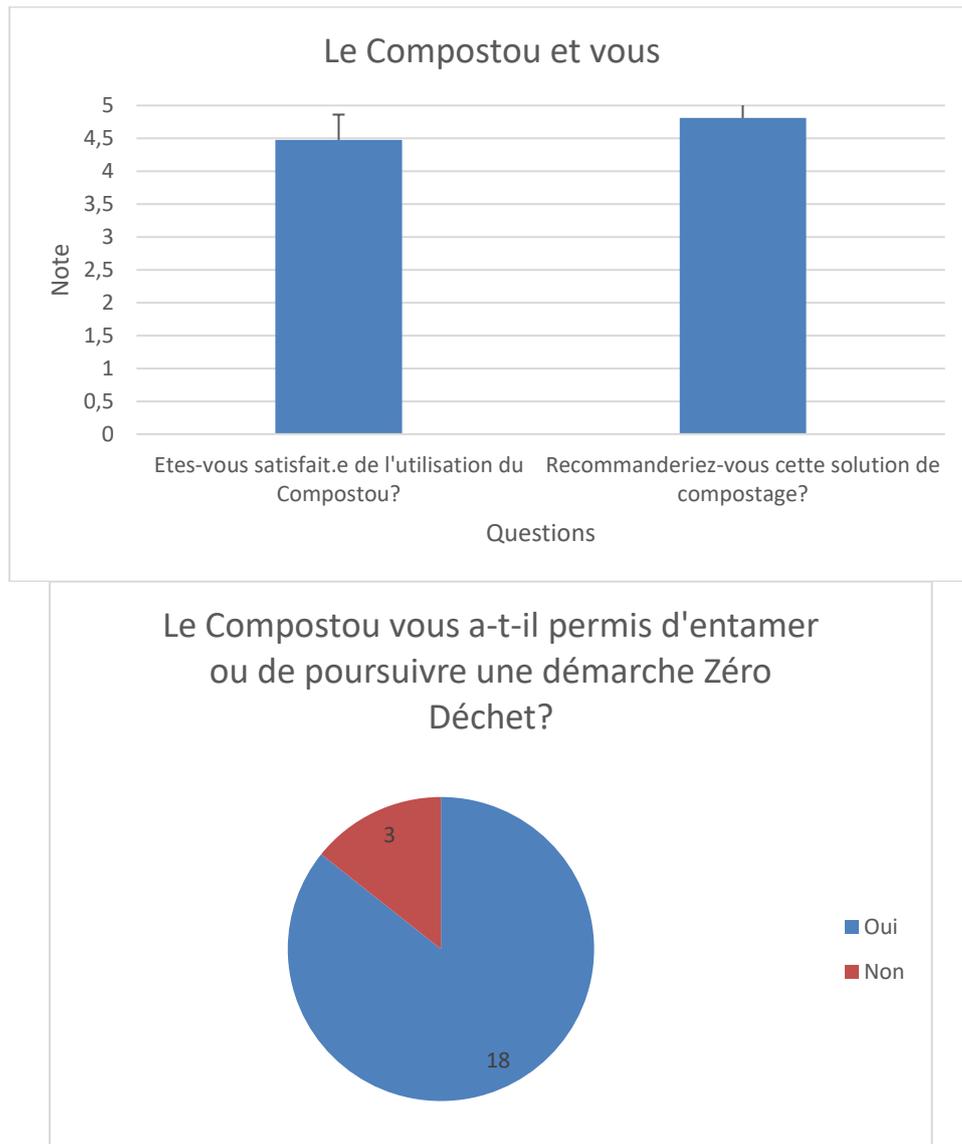


Figure 78: Etat de satisfaction générale des utilisateurs quant à l'utilisation du Compostou (n = 21). En haut, notes moyennes (1 = « Non pas du tout », 5 = « Oui tout à fait ») et écarts-types à la moyenne.

Le Compostou a été globalement très apprécié de ses utilisateurs (en moyenne  $4.48 \pm 0,8$  sur 5), qui sont prêts à le recommander ( $4.81 \pm 0,51$ ).

Pour la grande majorité des répondants (18 sur 21), le Compostou est identifié comme un élément facilitateur pour entamer une démarche Zéro Déchet.

D'après les utilisateurs, les principaux points forts du Compostou sont les suivants :

Pour vous le principal point fort du Compostou c'est...



Figure 79: Les points forts du Compostou selon ses utilisateurs.

La réduction des déchets et leur valorisation collective via le Compostou sont appréciées des utilisateurs, surtout ceux vivant en appartement. Mais ceci n'est pas une caractéristique intrinsèque de l'appareil. La technique du Compostou, son système de rotation et son fonctionnement écologique sont toutefois cités par plusieurs répondants. Une personne évoque sa discrétion et son esthétisme.

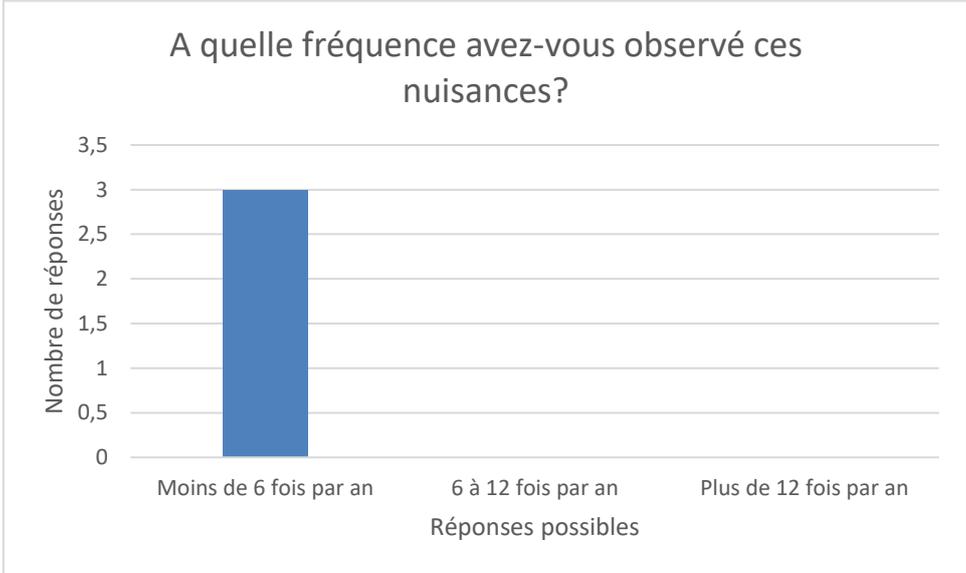
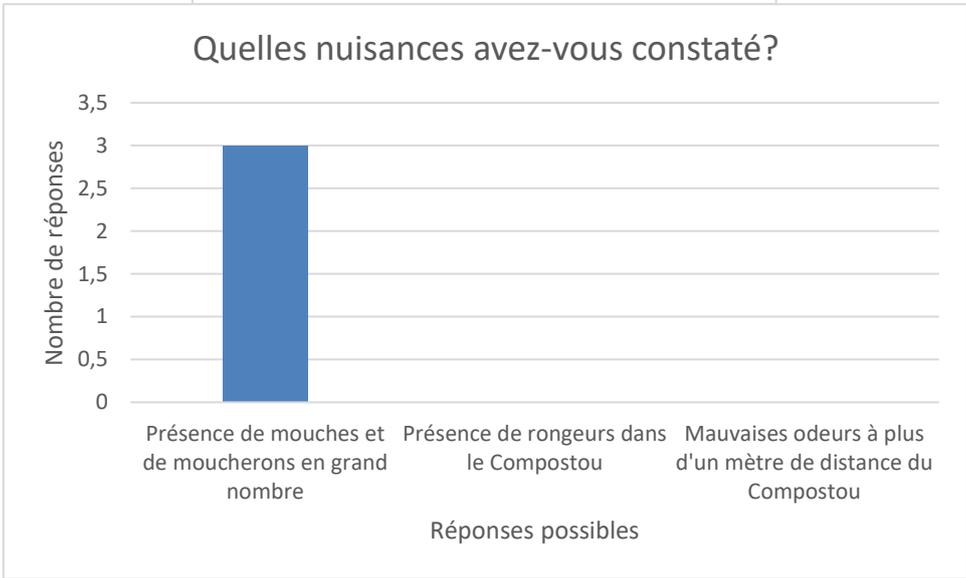
Mais le Compostou a aussi des points faibles sur lesquels travailler :

### Pour vous le principal point faible du Compostou c'est...



Figure 80: Les points forts du Compostou selon ses utilisateurs.

Parmi les points d'amélioration identifiés par les utilisateurs figurent des aspects matériels (fragilité des vis, parties métalliques, bois), des questions d'ergonomie (trappe trop petite, silo de compostage trop haut, volume inadéquat), d'implantation (trop loin, ou mal situé) ou de fonctionnement du site (incertitudes quant à l'utilisation et à la distribution de compost). Ces informations sont précieuses et vont nous aider à désigner la prochaine version du Compostou.



**Figure 81: Types et fréquences des nuisances constatées par les utilisateurs (n = 21 pour le graphique du haut, n = 3 pour les deux autres graphiques).**

La plupart des utilisateurs n'ont pas constaté de nuisances particulières. Trois personnes seulement nous ont fait part de pullulations de mouches et de moucherons très occasionnelles (moins de 6 fois par an).

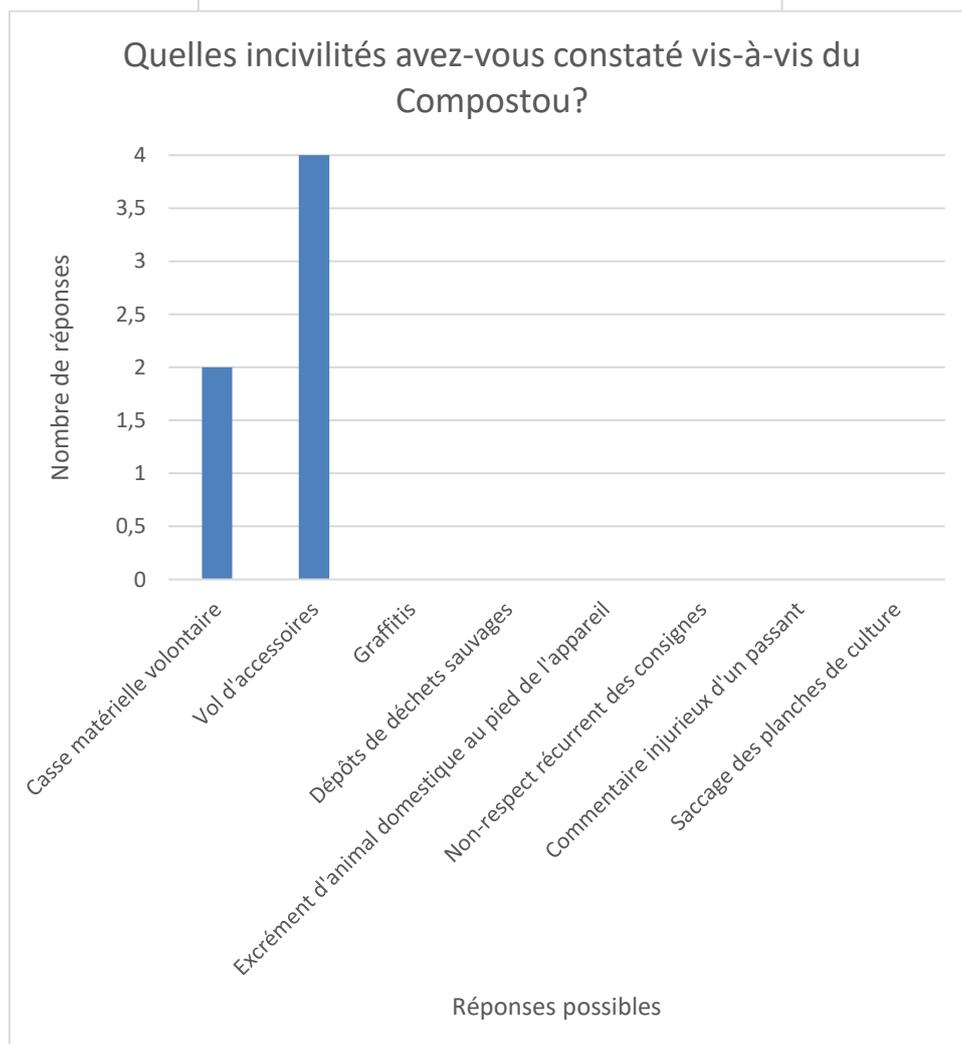
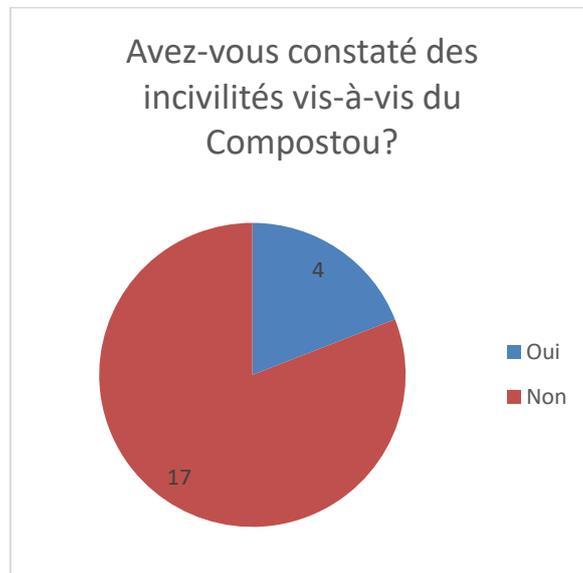


Figure 82: Incivilités rapportées par les utilisateurs de Compostou (graphique du haut, n = 21, graphique du bas, n = 4).

Quatre personnes nous ont fait part d'incivilités, principalement des actes de vol ou de casse matérielle volontaire. Heureusement ces actes étaient rares.

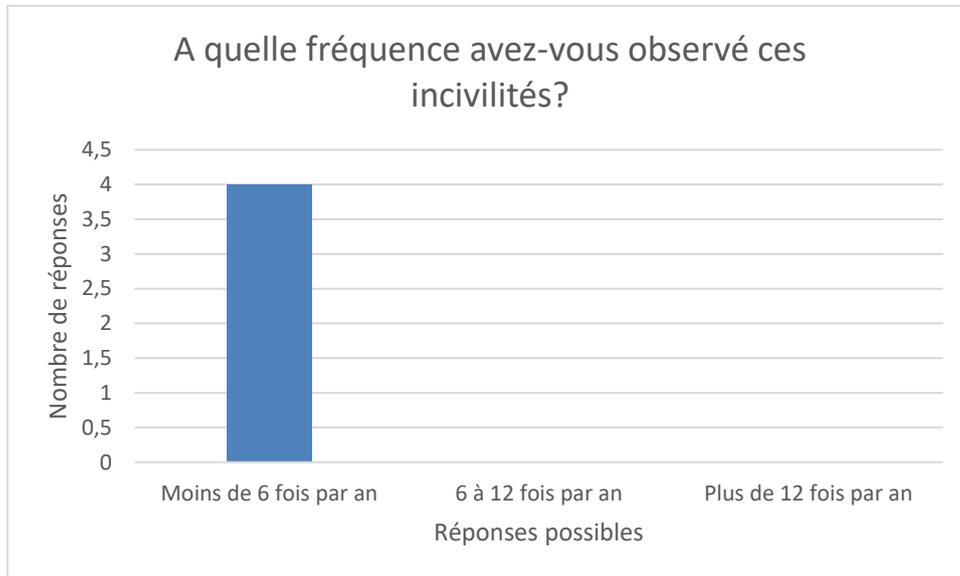


Figure 83: Fréquence des incivilités constatées par les utilisateurs.

### 3.5.8.3. Ergonomie, design et esthétique du Compostou

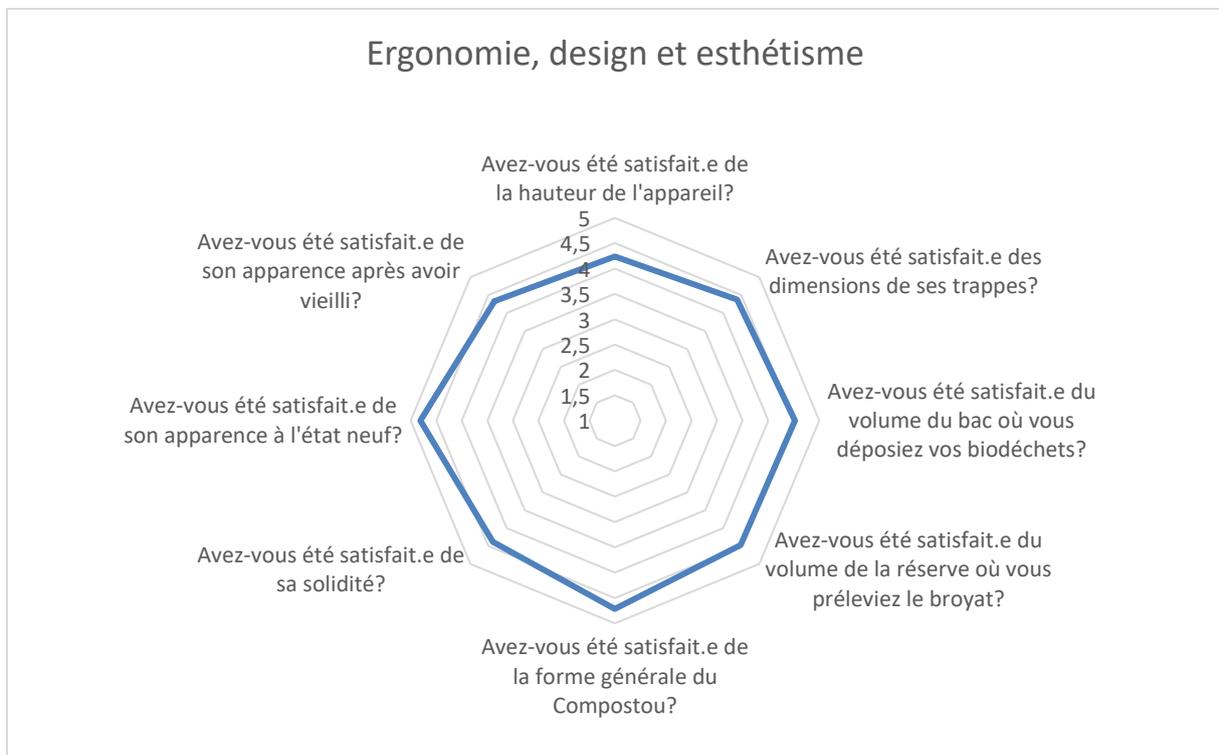
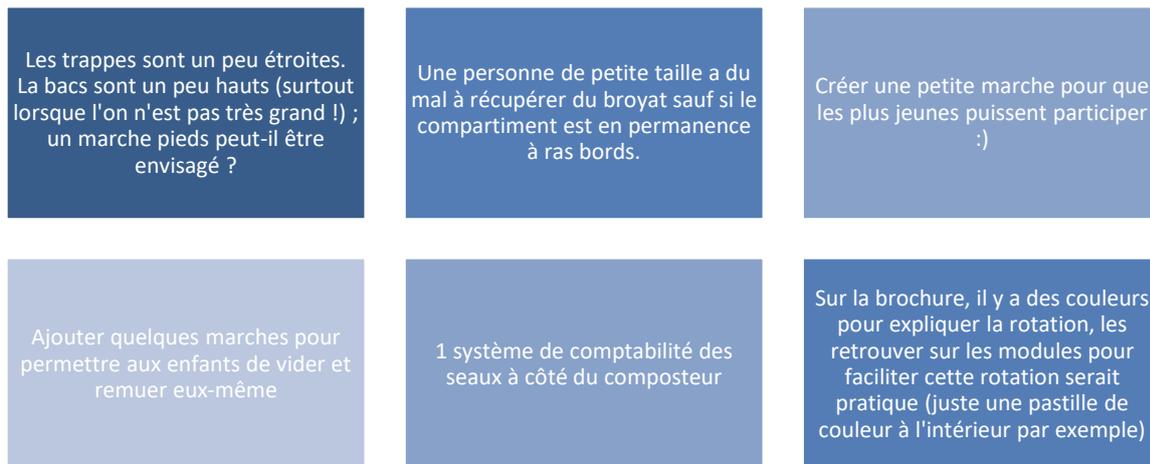


Figure 84: Notes moyenne des utilisateurs concernant l'ergonomie, le design et l'esthétique du Compostou (1 = « Non pas du tout », 5 = « Oui tout à fait »). Les écarts-types ont été omis pour plus de clarté.

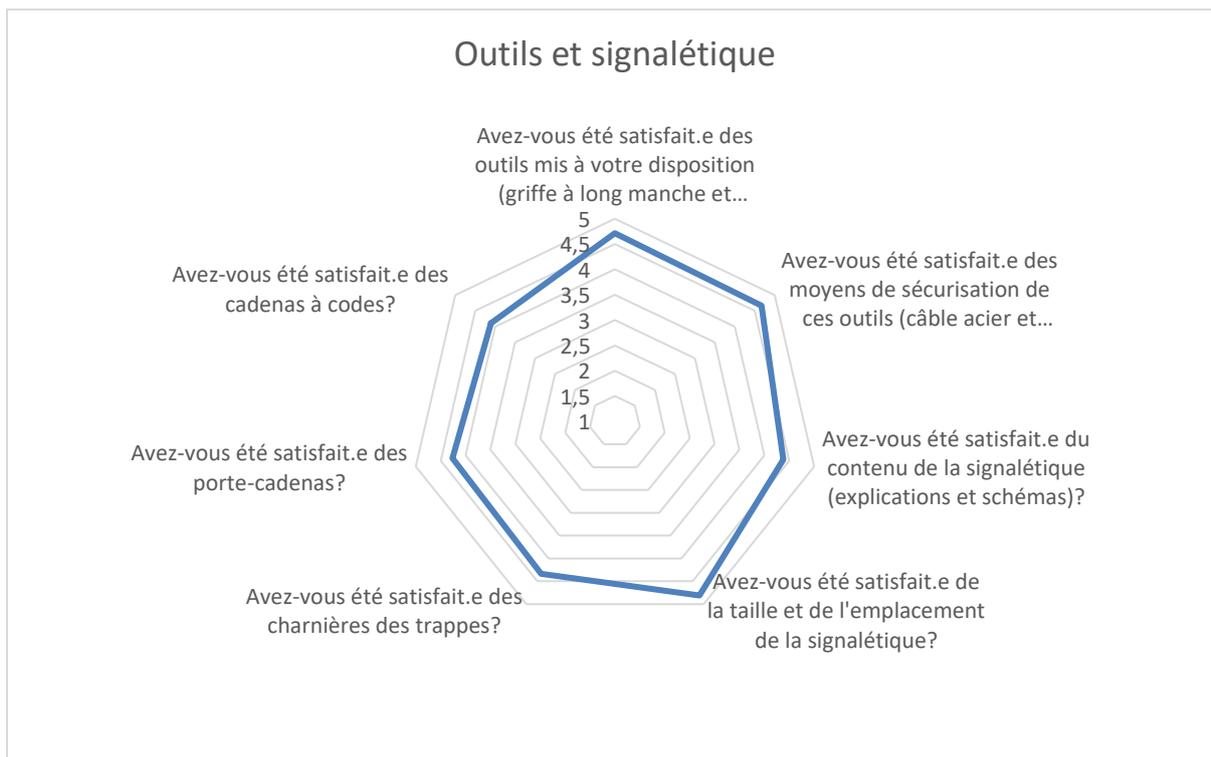
Sur tous les aspects ergonomiques le Compostou est bien noté par les utilisateurs, qui ont particulièrement apprécié sa forme, son apparence à l'état neuf et le volume de son silo de compostage.

A la question « *Auriez-vous des remarques ou suggestions d'amélioration au sujet de l'ergonomie du Compostou?* », les utilisateurs ont néanmoins précisé certains points, liés à l'accessibilité de l'appareil ou à la facilitation des rotations par exemple.



**Figure 85: Suggestions d'améliorations ergonomiques esthétiques.**

#### 3.5.8.4. Accessoires et signalétique



**Figure 86: Notes moyennes des utilisateurs concernant les outils et la signalétique du Compostou (1 = « Non pas du tout », 5 = « Oui tout à fait »). Les écarts-types ont été omis pour plus de clarté.**

A nouveau, le Compostou est bien noté en ce qui concerne les outils mis à la disposition des utilisateurs et la signalétique, qui leur rappelle les consignes de base pour composter en autonomie. Quelques suggestions nous ont été faites sur ces points :

Auriez-vous des remarques ou suggestions d'amélioration en ce qui concerne les accessoires ou la signalétique du Compostou?

Le câble qui maintient les pelles est un peu coupant

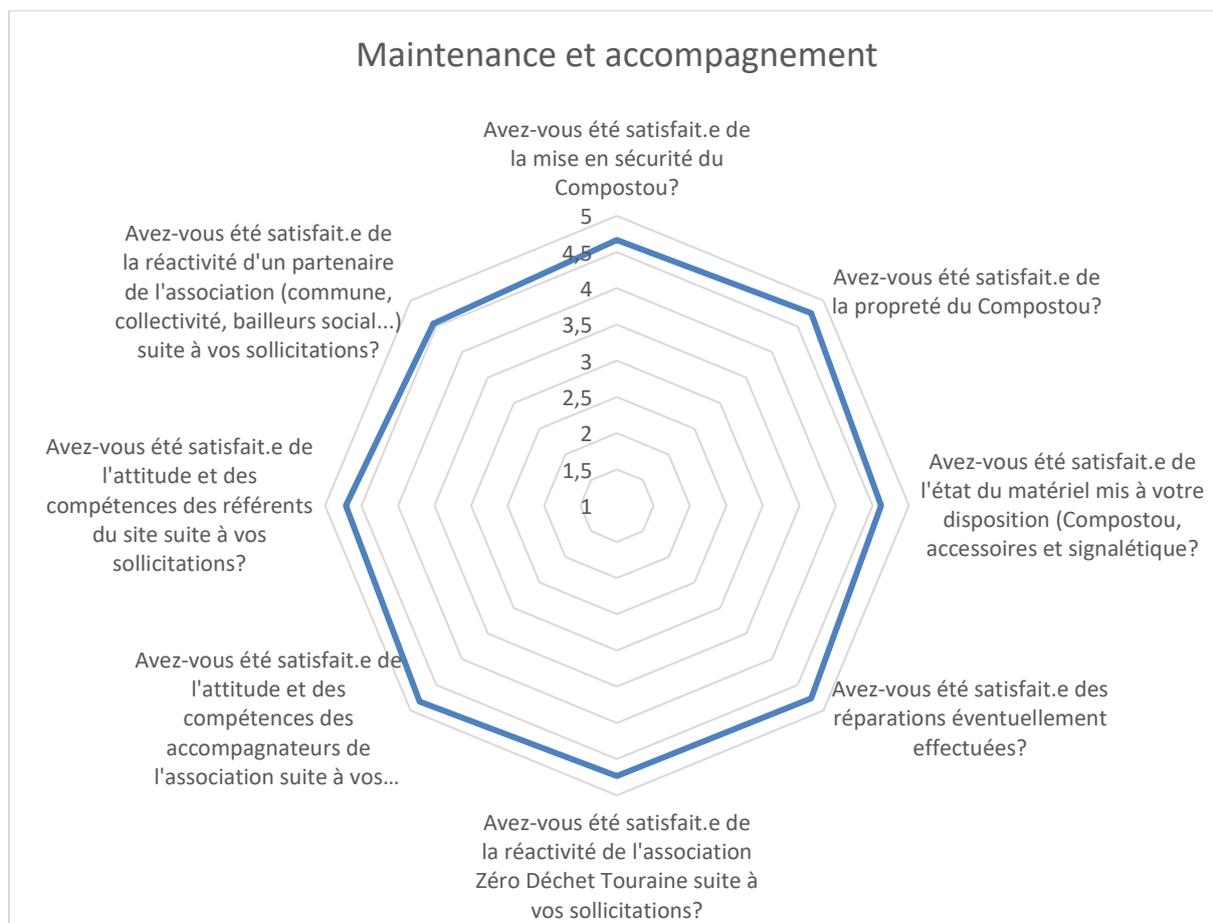
Les cadenas sont un peu durs à l'usage

Diminuer la longueur du manche du râteau pour plus de maniabilité et pour que les enfants puissent remuer :) . Augmenter la taille de la pelle à broyat peut être.

Pelle pas assez large  
Câble acier trop fin qui s'enroule (gênant)

**Figure 87: Suggestions des utilisateurs quant aux outils et à la signalétique.**

### 3.5.8.5. Maintenance et accompagnement



**Figure 88: Notes moyennes des utilisateurs quant à la maintenance et à l'accompagnement (1 = « Non pas du tout », 5 = « Oui tout à fait »). Les écarts-types ont été omis pour plus de clarté.**

Les notes obtenues pour la partie maintenance et accompagnement sont très satisfaisantes, signe que le soin que nous avons consacré à l'accompagnement des utilisateurs a été reconnu et apprécié.

L'ensemble de cette évaluation est très positif pour le projet COMPOSTOU et des pistes d'améliorations ont été clairement identifiées.

### 3.5.9. Formations de personnes ressources

#### 3.5.9.1. Guides-Composteurs (GC)

Le projet COMPOSTOU prévoyait initialement la formation de 20 Guides-Composteurs, en priorité parmi les utilisateurs des 10 Compostous expérimentaux. Or il

n'existait en 2017 aucune formation de Guide-Composteurs en Région Centre Val de Loire. **Nous avons donc dû en créer une et la faire agréer par l'ADEME, en collaboration étroite avec différents partenaires du projet COMPOSTOU.**

La formation de Guides-Composteurs de compostage partagé de Tours a été créée en octobre 2017 par David Violleau, Responsable de la Licence Professionnelle Déchets et Economie circulaire à l'IUT de Tours et co-inventeur du Compostou. Elle concernait les Modules GC 11, GC12, GC13 et GC 22 du référentiel GPROX de l'ADEME.

Pierre-Jean Glasson, Maître-Composteur et Directeur de l'association Compost-Âge, Hugo Meslard-Hayot, Maître-Composteur bénévole de ZDT ont participé à l'élaboration du contenu des deux premières sessions de formation de Guides-Composteurs et à leur animation. Corinne Taste, microbiologiste du Département Génie Biologique de l'IUT de Tours et Sébastien Moreau, biologiste à l'IRBI ont également contribué à l'élaboration et à l'animation des parties scientifiques de la formation. Chaque session a duré 2 jours et demi et s'est tenue à l'IUT de Tours et à Poitiers, où des sites de compostage partagés ont été visités. **Au total, le projet COMPOSTOU a contribué à la formation de 24 Guides-Composteurs, dont 11 bénévoles et 1 salarié travaillant directement pour ZDT.**



Figure 89: Formation GC à l'IUT de Tours et à Poitiers en octobre 2017.



Figure 90: Visite de terrain d'un site de paillage et de compostage à Tours lors de la Formation GC de mars 2018.

### 3.5.9.2. *Référents de site (RS)*

Un certain nombre de référents de Compostous nous ont indiqué qu'ils ne pouvaient pas se rendre disponibles pour suivre les 2 journées et demi de la formation GC. **Il a donc été décidé de leur faire bénéficier d'une formation de référents de site (RS) de compostage partagé d'une durée d'une journée seulement à l'IUT de Tours. Cette formation portait sur les modules RS 11 et GC 22 du référentiel GPROX de l'ADEME.**

Les intervenants dans ces formations étaient Corinne Taste, David Violleau et Sébastien Moreau.

Même en réduisant à une journée le temps nécessaire à la formation, certaines personnes n'étaient pas disponibles en semaine pour suivre la formation RS. **Nous nous sommes adaptés en organisant, avec l'aide du Fonds de Développement de la Vie Associative (FDVA), une formation RS un samedi.**

**Au total, le projet COMPOSTOU a permis de former 26 référents de site.**



Figure 91: Formation RS organisée le samedi 21/09/2019 dans les locaux de la Ressourcerie La Charpentière (La Riche).

### 3.5.9.3. Enseignants référents en compostage pédagogique

Il n'existait pas en Région Centre val de Loire de formation au compostage pédagogique pour les enseignants. **Nous avons donc créé, avec l'appui de la Maison pour La Science Centre Val de Loire (MPLS) et en partenariat avec le Rectorat de l'Académie d'Orléans-Tours, l'IUT de Tours, la Faculté des Sciences et Techniques de Tours et l'IRBI, une formation intitulée « Le compostage à l'école et au collège : pratiquer pour comprendre et réussir ».** D'une durée de 2 journées, cette formation reprend le contenu scientifique et technique de la formation GC en compostage partagé précédemment créée. En supplément, elle aborde la formation du sol, les applications pédagogiques du compostage en établissement scolaire et la médiation des connaissances scientifiques auprès des élèves.

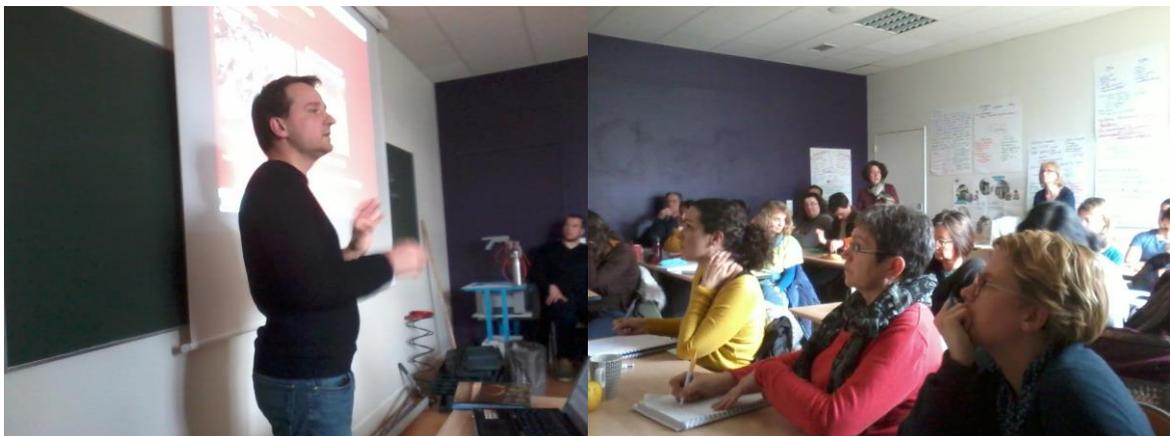


Figure 92: Première session de formation « Le Compostage à l'école et au collège... », organisée à la Faculté des Sciences et Techniques de Tours, les 12 et 13 mars 2018.

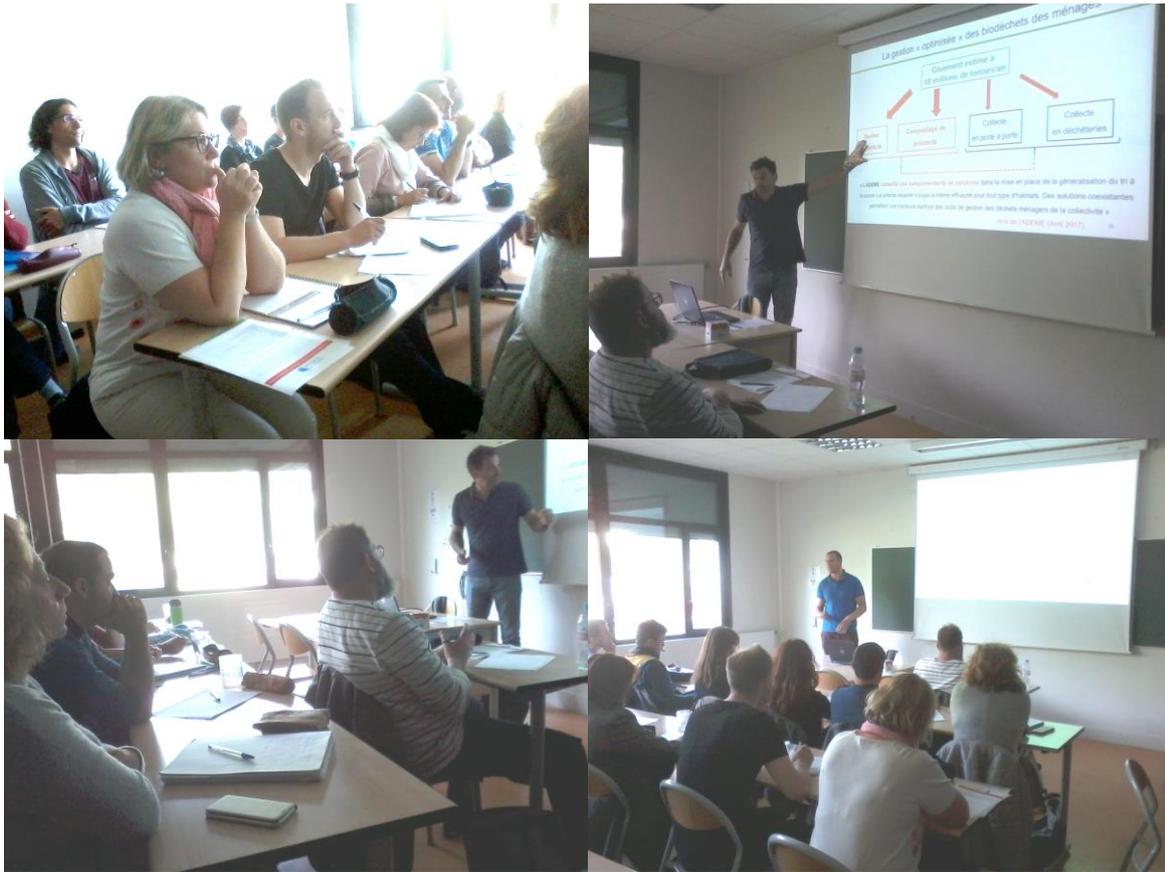


Figure 93: Deuxième session de formation « Le compostage en école et au collège... », les 29 et 30 avril 2019 à la Faculté des Sciences et Techniques de Tours.

**Au total, le projet COMPOSTOU a permis de former 40 enseignant.e.s parmi les professeurs des écoles et des collèges de la Région Centre-Val de Loire.**

#### 3.5.9.4. *Composcope de Nouâtre*

Nous nous sommes rendus compte qu'il était important de doter des territoires ruraux de structures de formation au compostage de proximité. **Nous avons donc établi un partenariat avec la commune de Nouâtre, située à 46 km au sud de Tours afin d'y créer un espace de formation à plusieurs techniques de compostage, appelé Composcope.** Cette commune mettait en effet déjà à disposition de l'association « Les Jardins de Nouâtre », l'espace André Boutault, un terrain communal, afin que cette dernière y anime un jardin partagé dédié à la permaculture. Le Composcope, géré par ZDT, permettait donc de compléter cette offre à destination du grand public.

Le Composcope présente désormais 4 techniques de compostage :

- Compostage en andain ;

- Compostage de surface ;
- Compostage de haute énergie ;
- Compostage de basse énergie de type Compostou.

A terme, il est prévu qu'il puisse aussi présenter le compostage de toilettes sèches, le lombricompostage, le compostage bokashi et le compostage Indore.

Le Composcope sert d'espace d'animations « grandeur nature » auprès du grand public (journées portes ouvertes, semaine européenne de réduction des déchets, semaine nationale « Tous au compost »...) et de groupes d'enfants (ALSH et collège de Nouâtre).

Le Composcope a aussi une vocation scientifique. Il permettra aux chercheurs de l'IRBI de comparer l'efficacité de différentes techniques de compostage et la composition de leurs communautés d'organismes respectives, dans des conditions environnementales identiques.



Figure 94: Le Composcope est un espace d'initiation et de recherche consacré au compostage partagé. Ici un groupe d'enfants de l'ALSH de Nouâtre reçu le 25/07/2018.

Via le Composcope, le projet COMPOSTOU a déjà permis de recevoir et d'initier au compostage 24 enfants et 22 adultes, avec le soutien financier de la commune de Nouâtre et le soutien technique de l'association Les Jardins de Nouâtre.

#### 3.5.9.5. *Initiations au compostage autonome en établissement*

Le fonctionnement de certains sites de compostage classiques et de sites Compostous situés à l'Université de Tours devait être optimisé. **Nous avons donc organisé deux conférences-ateliers à l'université.** D'une durée de 2 heures chacune, ces animations permettaient de sensibiliser les participants au tri à la source des biodéchets et à leur valorisation par le biais du compostage autonome en établissement. Elles étaient particulièrement adaptées à un public d'actifs qui n'avaient pas le souhait de se former sur une durée plus longue qu'un temps de pause méridienne. Le contenu de ces initiations était libre, mais globalement proche du module RS11 du référentiel ADEME, et assuré par une personne dûment formée (Hugo Meslard-Hayot, Maître-Composteur bénévole de ZDT).



Figure 95: Initiation de deux référentes d'un site de compostage autonome en établissement à l'Université de Tours le 20/02/2018.

### 3.5.9.6. *Maître-Composteur (MC)*

Le projet COMPOSTOU prévoyait initialement de recourir à l'emploi d'un Maître-Composteur pour former les GC du projet et assurer le suivi technique des sites expérimentaux. **Nous avons finalement préféré recruter un GC salarié et financer la formation d'un second Maître-Composteur bénévole pour l'association.** En effet, le premier MC bénévole, Hugo Meslard-Hayot, pressenti pour devenir salarié de ZDT a dû quitter la région Centre Val-de Loire. Cette région et ses 2.3 millions d'habitants ne disposait donc plus que d'une seule personne formée à ce niveau de compétences, Fanny Groussain, indisponible pour le projet COMPOSTOU car employée à temps plein par VAL-ECO à Blois.

Le projet a donc permis la formation auprès de la Coopérative EISENIA (Rennes) de Sébastien MOREAU, en tant que nouveau MC bénévole de ZDT.



Figure 96: Visites de sites de compostage partagé à Rennes lors des premières et secondes sessions de formation MC en avril et mai 2018.

Le suivi des premiers modules de formation MC a été d'une grande aide pour les aspects techniques du projet COMPOSTOU et pour améliorer le plaidoyer auprès des élus en faveur du compostage de proximité.

### 3.6. Etudes scientifiques

#### 3.6.1. Relevé des températures des composts en formation

Nous avons relevé la température extérieure (Temp. Ext.), la température à 10 cm de la surface (Temp. 10 cm) et à 20 cm de la surface (Temp. 20 cm) de différents composts en formation entre février et novembre 2019. Ces relevés de température ont porté sur les 10 Compostous expérimentaux (105 mesures) et sur 6 composteurs de haute énergie (45 mesures) accompagnés par l'association ZDT et situés sur différents sites universitaires.

Les séries ont fait l'objet d'un test de normalité de Shapiro-Wilk (cf Annexe RT1). Au risque consenti ( $\alpha = 0,05$ ), l'hypothèse nulle de conformité à une distribution normale ne peut pas être écartée ( $p\text{-value} = 0,965278$ , valeur seuil critique 0,1478 supérieure au risque consenti) pour les températures mesurées à 10 cm de la surface du compost. C'est aussi le cas pour les températures mesurées à 20 cm de profondeur ( $p\text{-value} = 0,963320$  et valeur seuil de 0,1225 supérieure au risque consenti). En revanche ce n'est pas le cas pour les températures extérieures ( $p\text{-value} = 0,947353$  et valeur seuil de 0,0266 inférieure au risque consenti).

Les distributions des températures relevées ne suivant pas toutes une loi normale, il nous faut donc appliquer un test non-paramétrique (test de Fisher-Yates-Terry-Hoeffding) pour procéder à la comparaison des moyennes des températures relevées à l'extérieur, à 10 ou 20 cm de la surface des composts en formation (analyse de la variance à 1 facteur sur les rangs, pour des séries indépendantes) (cf Annexe RT2).

Les probabilités critiques du test ( $p\text{-value}_{Temp. ext} = 0,26091$  et  $p\text{-value}_{Temp. 10 cm} = 0,06302$ ) sont supérieures au risque consenti ( $\alpha = 0,05$ ) pour les températures extérieures et les températures relevées à 10 cm sous la surface du compost respectivement. Nous pouvons donc accepter l'hypothèse nulle d'égalité des températures relevées à l'extérieur et à 10 cm sous la surface du compost en formation

entre les deux méthodes de compostage mises en œuvre. En revanche, à 20 cm sous la surface, les températures relevées sont significativement différentes entre les composts de Compostous et les composts de composteurs de haute énergie ( $p\text{-value}_{Temp. 20\text{ cm}} = 0,03867$ , inférieure au risque consenti).

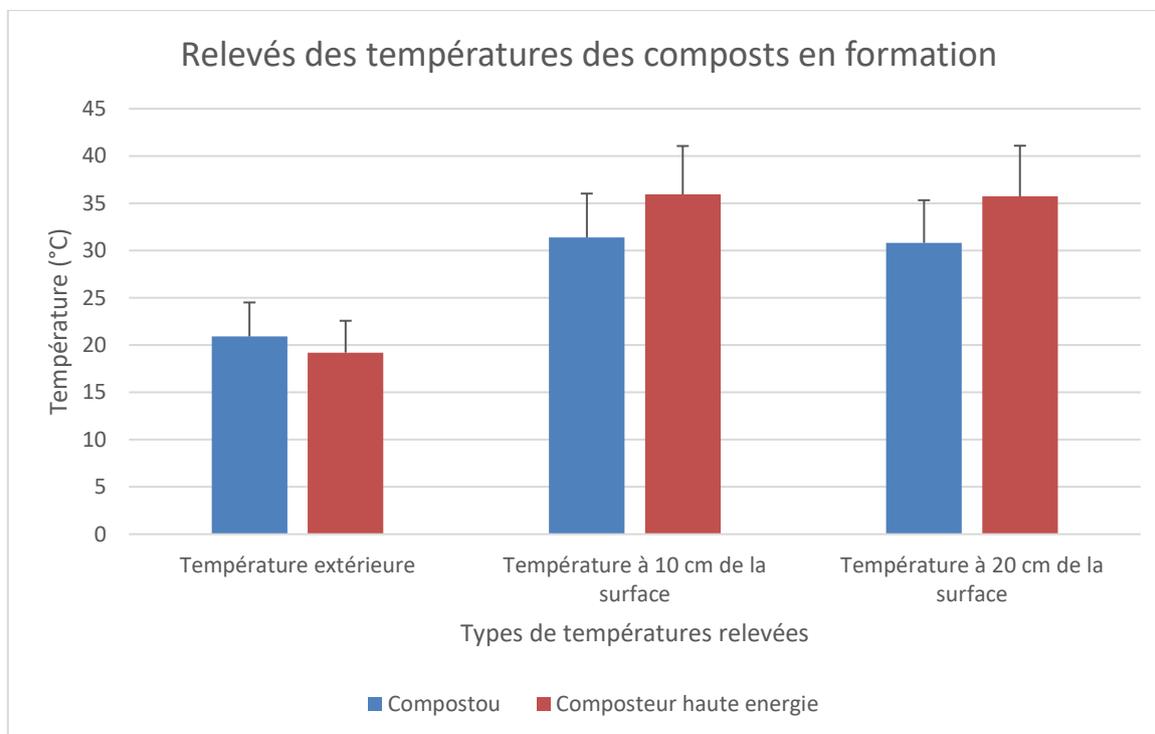
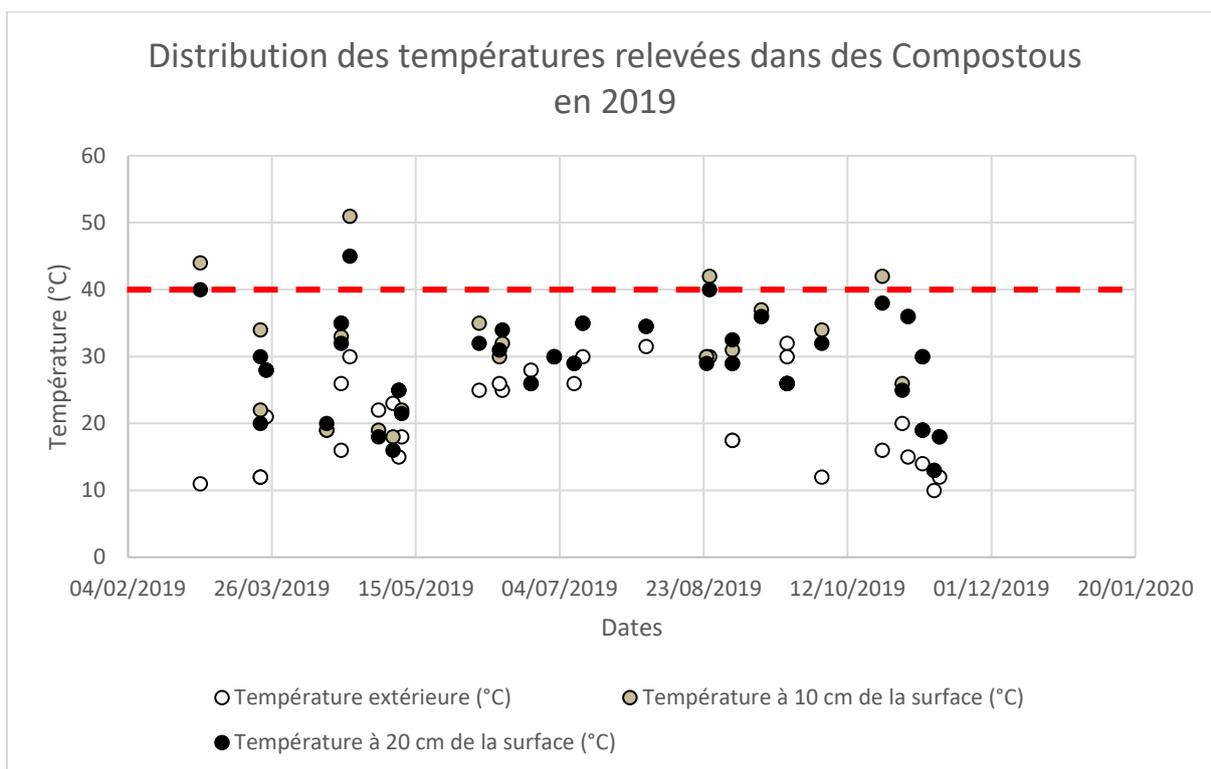
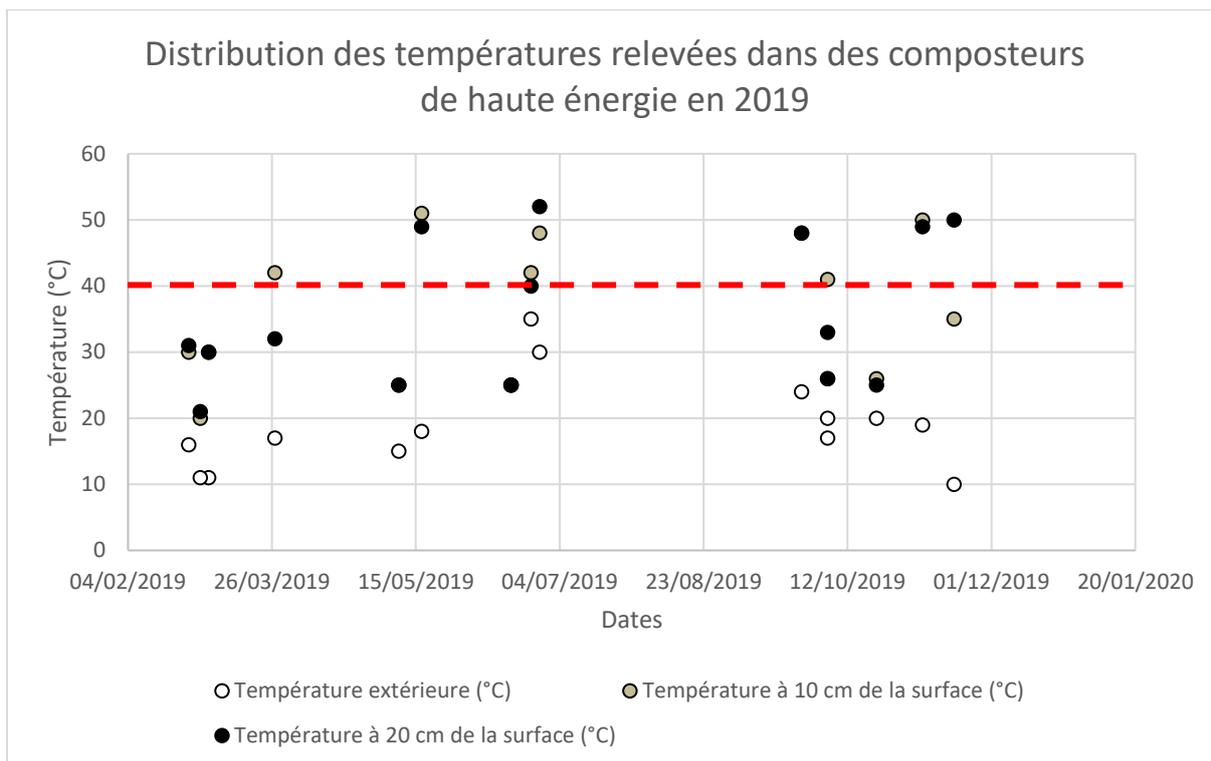


Figure 97: Relevés des températures de composts en formation. Bleu : compost issu de Compostous ; rouge : compost issu de composteurs de haute énergie.

Ce résultat est confirmé par deux autres tests non-paramétriques : le test de Kruskal-Wallis (cf Annexe RT3) et le test de Van der Waerden (cf Annexe RT4), mais seulement à un risque consenti plus élevé dans le premier cas ( $\alpha = 0,101$ ). Ceci signifie que pour observer des différences plus nettes entre les deux méthodes de compostage, le fonctionnement des sites de haute énergie aurait dû être optimisé, ce qui n'était pas le but premier de cette étude, portant avant tout sur le compostage de basse énergie de type Compostou.

Néanmoins, un résultat important à souligner est que nous sommes parvenu à contrôler les montées en température des Compostous : **dans 88,5% des cas, les températures relevées à 10 cm sous la surface du compost ont été inférieures à 40°C**. A titre de comparaison, en composteurs de haute énergie, cette situation n'a été observée que dans 46,7% des relevés de température à 10 cm de la surface du compost.



**Figure 98: Distribution des températures extérieures, à 10 cm ou à 20 cm sous la surface du compost en formation, pour des composteurs de haute énergie (en haut) ou pour des Compostous (en bas).**

### 3.6.2. Quantités de biodéchets valorisées

L'évaluation des quantités de biodéchets traitées par les 10 Compostous expérimentaux a pu être réalisée selon 2 méthodes.

#### 3.6.2.1. Quantités de biodéchets valorisées en bas d'immeuble

En bas d'immeuble (RCVL05, 06, 07 et 08), lorsque la liste des utilisateurs était connue, nous avons demandé aux référents des Compostous de nous envoyer régulièrement un état des volumes et des poids de biodéchets déposés chaque mois par les utilisateurs. Selon les sites, ce suivi a pu être réalisé pendant une durée plus ou moins longue (6 à 19 mois). Connaissant les volumes déposés, le nombre d'utilisateurs et la durée du suivi, il a été possible de déterminer pour chaque site le volume moyen de biodéchets traités par an, rapporté à chaque utilisateur.

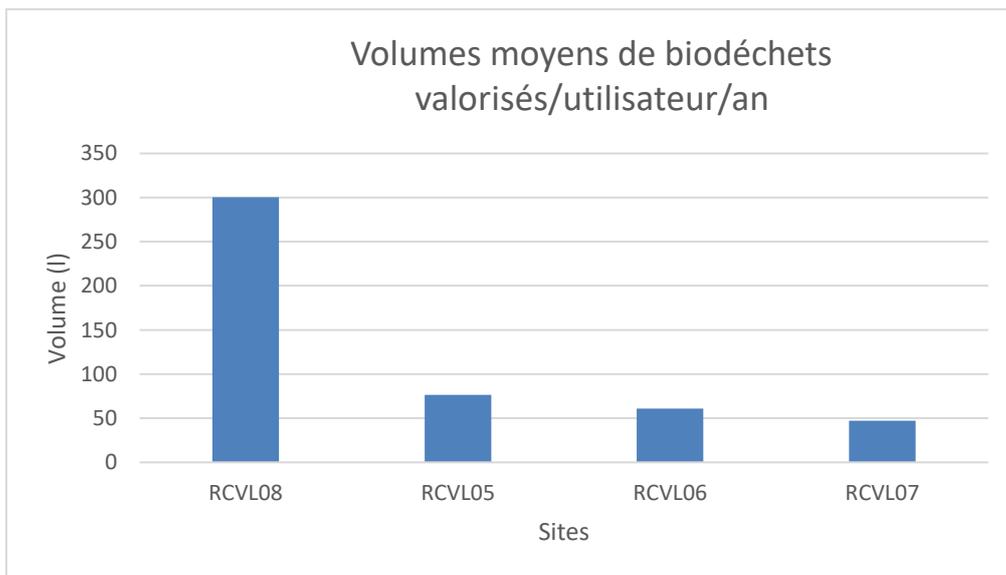
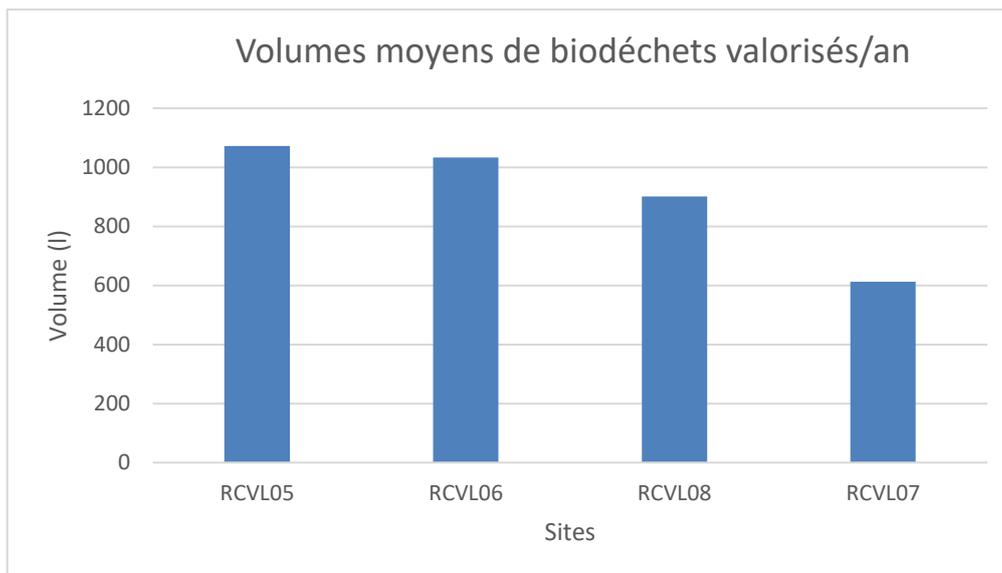


Figure 99: Volumes moyens de biodéchets valorisés par utilisateur et par an, en bas d'immeubles.



**Figure 100: Volumes moyens de biodéchets valorisés par an, en bas d'immeubles.**

Sur chaque site, entre 47 et 300 litres de biodéchets ont ainsi été valorisés par utilisateur et par an (moyenne de  $121,23 \pm 103,97$  litres/utilisateur/an). En admettant une densité moyenne des biodéchets de  $0,425$  kg/l (densité relevée sur le site RCVL05), 19 à 120 kg de biodéchets auraient ainsi été valorisés par les utilisateurs des Compostous de bas d'immeuble, chaque année (moyenne de  $48,49 \pm 41,59$  kg/utilisateur/an). Sur ces quatre sites, le nombre d'utilisateurs variait de 3 à 17 personnes. Chaque Compostou a donc permis de traiter entre 613 et 1072 l de biodéchets par an chacun (260 à 456 kg de biodéchets/an, moyenne de  $384,55 \pm 76,57$  kg/an).

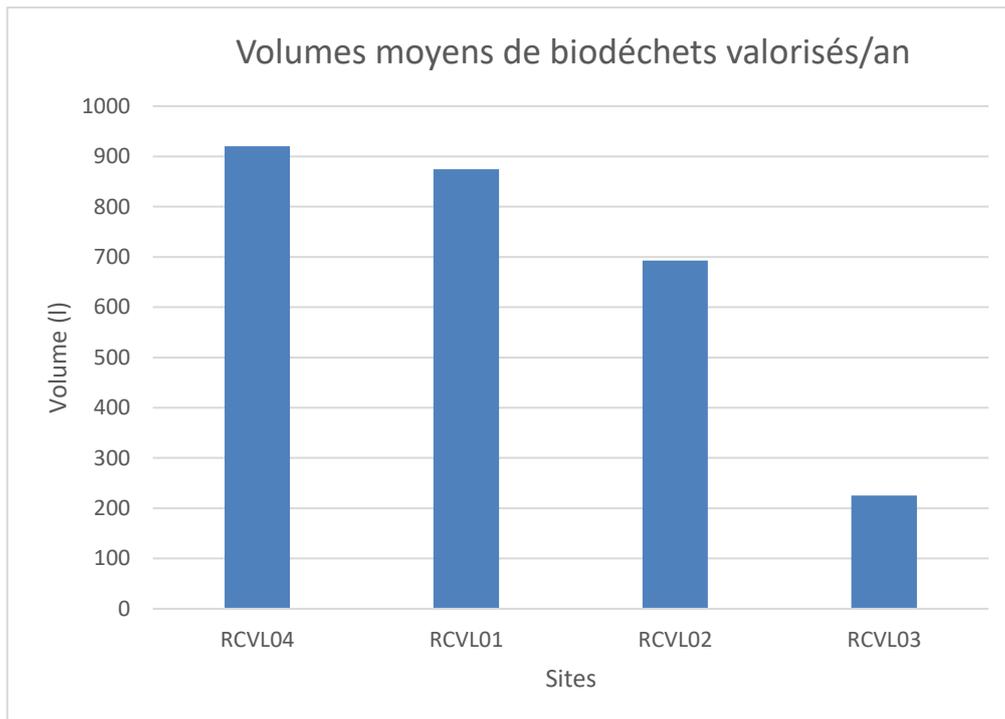
Au 26/11/2019, nous n'avions pas encore de données consolidées pour les Compostous RCVL09 et RCVL10. Ils n'ont donc pas été pris en compte dans ce bilan.

### *3.6.2.2. Composteurs d'établissements*

Sur les sites en établissements, où le nombre d'utilisateurs n'était pas connu et les quantités de biodéchets valorisées étaient susceptible de varier en cours d'année (RCVL01, 02, 04), nous nous sommes basé sur le temps nécessaire pour atteindre 50% de remplissage du Compostou afin d'évaluer les volumes et les poids de biodéchets valorisés chaque année.

Sur chaque site, entre la mise en service et la première rotation, environ 500 l de biodéchets et de broyat en mélange ont été déposés, remplissant 50% du volume du silo de compostage du Compostou. Puis, lors de cette rotation, le Compostou a été déplacé et 150 litres de compost frais en formation ont été transférés à la pelle sur l'emplacement du nouveau silo de compostage, afin de l'ensemencer en organismes. La seconde rotation a été déclenchée lorsque 350 litres de biodéchets et de broyat en mélange supplémentaires ont été apportés par les utilisateurs, amenant une nouvelle fois le volume de compost en formation à 500 l. Lors de la seconde rotation, 150 litres de compost frais en formation ont encore été transférés sur l'emplacement du nouveau silo de compostage. Puis le remplissage s'est poursuivi jusqu'à atteindre une troisième fois 500 l de biodéchets en mélange avec du broyat, déclenchant une troisième rotation.

En théorie, entre la mise en service et la troisième rotation, le volume total de biodéchets et de broyat en mélange apportés dans le Compostou était donc de 500 l + 350 l + 350 l, soit 1200 l. Au cours du processus de compostage, les biodéchets frais ont perdu une partie de leur eau et de leurs fibres et se sont tassés. Toutefois, cette perte de volume a été globalement compensée par l'apport de broyat ajouté en mélange à chaque dépôt de biodéchets. On peut donc estimer que **le volume de compost en formation correspond approximativement au volume de biodéchets déposé** dans chaque Compostou entre deux rotations, moins le volume réutilisé lors de chaque rotation en guise d'ensemencement.



**Figure 101: Volumes moyens de biodéchets valorisés par an, en établissements.**

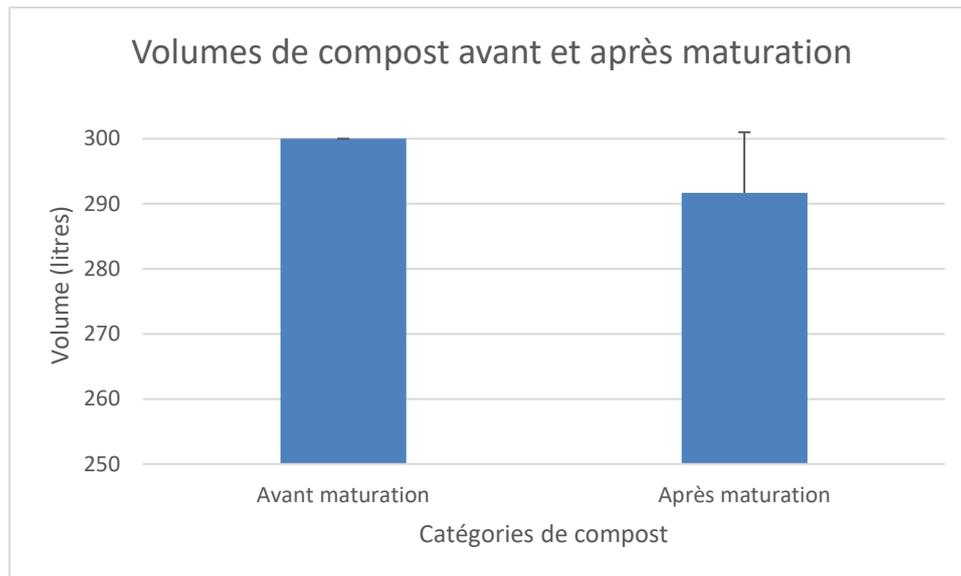
Les trois Compostous expérimentaux les plus utilisés situés en établissements ont donc permis de valoriser entre 693 et 920 litres de biodéchets par an (moyenne de  $829,15 \pm 98,06$  litres/an). Exprimées en poids, ces quantités de biodéchets représentent entre 294 et 391 kg de biodéchets/an chacun, la moyenne s'établissant à  $352,39 \pm 41,67$  kg/an.

A ces Compostous s'ajoutent le Compostou RCVL03, du collège de Château-Renault, dont l'utilisation a été relativement faible au cours du projet, mais qui a néanmoins permis de valoriser environ 225 l de biodéchets/an (soit 90 kg/an).

### 3.6.3. Volume de compost produit

A 6 reprises nous avons déterminé le volume de compost mûr brut (non tamisé) à l'issue d'une rotation et nous l'avons tamisé afin de déterminer :

- Le volume de compost mature fin produit (éléments de taille inférieure à 1 cm) ;
- Le volume de biodéchets non décomposés de taille supérieure à 1 cm.
- Le volume de déchets non biodégradables.



**Figure 102: Volumés moyens de compost avant et après mise en maturation. Chaque barre représente l'erreur type de la moyenne (n=6).**

Après 111 à 173 jours de maturation, le compost des Compostous a très peu perdu de volume (-2.8% seulement en moyenne). A partir de 300 litres de compost mis en maturation, nous avons collecté en moyenne  $291.7 \pm 18.63$  litres par site. La distribution des valeurs de volumés de compost avant et après mise en maturation ne suivant pas une loi normale (cf Annexe VC1), il faut appliquer un test non paramétrique pour comparer les volumés moyens (test de Kruskal-Wallis, cf Annexe VC2). Au risque consenti ( $\alpha = 0.05$ ), la différence de volume du compost avant ou après mise en maturation n'est pas significative. **Il s'agit de la mise en évidence d'une différence majeure par rapport au compostage de haute énergie**, dans lequel le compost peut parfois perdre jusqu'à 40% de son volume après maturation. Ici, le compostage de type de Compostou semble être très conservatif, en raison de conditions de maturation plus sèches qui limitent la décomposition du broyat de branches. Ceci permet au compost de garder sa structure pendant la maturation. Seules les particules de matière organique facilement assimilables sont décomposées dans les intervalles lacunaires du broyat.

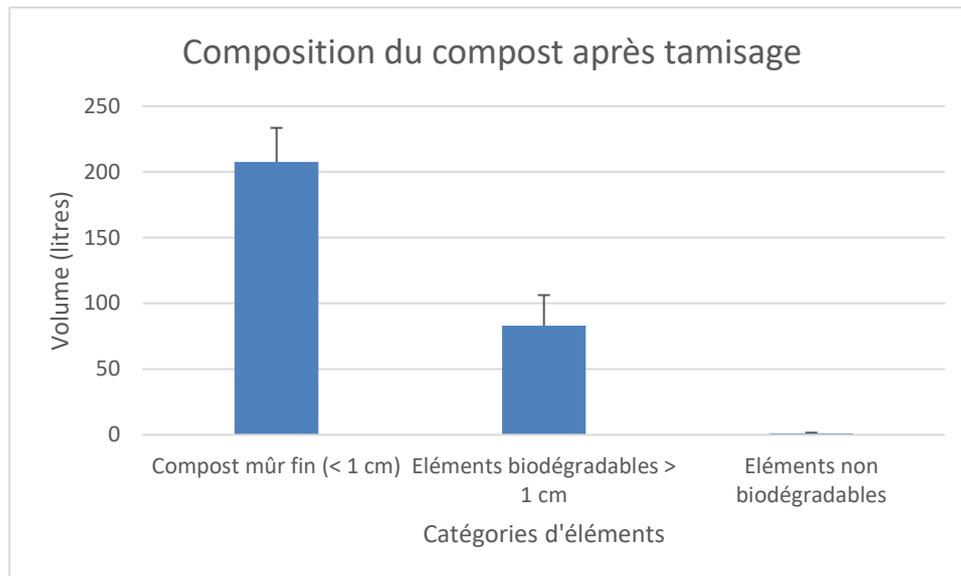


Figure 103: Composition du compost après tamisage de compost mûr (volume total = 291,7 litres de compost en moyenne par site étudié). Chaque barre représente l'erreur type de la moyenne (n=6).

Sur les 291.7 litres de compost brut obtenu après maturation, le compost mûr fin (particules <1 cm) représentait  $207,5 \pm 52$  litres (soit 71,13% du volume tamisé). Les éléments biodégradables représentaient  $83,08 \pm 46,37$  litres (28,48% du volume tamisé). Ils correspondaient essentiellement à des morceaux de broyat de branches, ou à des biodéchets très résistants (peaux ou noyaux d'avocat, coquilles de noix peu fragmentées, coquilles de mollusques...). Les éléments non biodégradables macroscopiques étaient présents en proportion relativement faible (0,39% du volume tamisé) et constituaient  $1,08 \pm 1,09$  litres sur les 291,7 litres de compost mûr initiaux.

La production de compost mûr fin étant d'environ 208 litres après chaque rotation, le nombre total de rotations effectuées sur l'ensemble des sites expérimentaux du projet COMPOSTOU nous permet de connaître le volume total de compost produit, du début du projet jusqu'au 26/11/2019.

Il y a eu en tout 22 rotations et donc 22 lots de 300 litres de compost mis en maturation, ce qui représente un total de 6600 litres de compost. **Après maturation, nous pouvons estimer que le projet a permis la production d'environ 6415 litres de compost mûr brut dont 4563 litres de compost fin (<1 cm).**

En jardinage, il est recommandé d'épandre le compost sur le sol en surface, sur une épaisseur d'1 à 2 cm. **La quantité de compost produite aurait donc permis d'amender plus de 228 m<sup>2</sup> de potager.**

#### 3.6.4. Coûts de traitement

Avec un coût complet de collecte et de traitement qui s'élève en France à 226 euros en moyenne pour une tonne d'OMR (ADEME, 2015d), la quantité annuelle de biodéchets traitée par 8 des 10 Compostous expérimentaux (2685,47 kg de biodéchets/an) aurait coûté 607 euros à collecter et à traiter en simples OMR. Dans l'hypothèse où ce service eut été payant (165 euros/an/Compostou<sup>35</sup>), les 8 Compostous coûteraient chaque année aux collectivités et aux structures qui les mettraient à disposition des utilisateurs, 1320 euros plus 120 euros de broyat de branches (8 x 15 euros/m<sup>3</sup>), soit un total de 1440 euros. Le compostage de ces biodéchets représente donc un surcoût de 833 euros de plus que la collecte et le traitement classiques, mais il apporte d'autres bénéfices : pas de transport routier des déchets, création de lien social, retour de carbone à la terre, production d'un amendement agronomique...

Ce ne sont pas les performances de ces appareils qui sont en cause, mais plutôt leur taux d'utilisation, qui devrait être augmenté pour que la solution Compostou soit rentable pour les collectivités. En effet, on constate que les Compostous expérimentaux n'ont été utilisés en moyenne qu'à 31% de leur capacité maximale, qui est de 8000 kg/an pour 8 Compostous. Or à partir d'une utilisation à 73% de leur capacité annuelle maximale (730 kg de biodéchets valorisés par an et par Compostou, soit 5840 kg pour 8 Compostous), la location de ces appareils deviendrait économiquement plus compétitive que la collecte et le traitement de ces biodéchets en OMR.

La sous-utilisation de nos Compostous expérimentaux s'explique en partie par le fait que, pour garantir à nos premiers utilisateurs de bonnes conditions d'utilisation, nous avons volontairement limité leur nombre à 15 personnes adultes maximum par Compostou. Or les quantités de biodéchets déposées (20 à 30 kg par personne) ont été inférieures à nos prévisions (70 kg/personne) sur 3 sites sur 4. Avec de tels apports limités, il serait possible d'accueillir 2 fois plus d'utilisateurs par Compostou et ainsi atteindre plus facilement le seuil de rentabilité de l'appareil. Toutefois, sur le site de Sonzay, la quantité annuelle de biodéchets valorisée par utilisateur a été beaucoup plus importante (120 kg/utilisateur/an), ce qui doit donc appeler à la prudence dans l'élargissement des communautés d'utilisateurs.

---

<sup>35</sup> Montant de la prestation de mise à disposition, maintenance et accompagnement d'un site Compostou.

Au vu de ces résultats, il nous semble prioritaire de continuer à limiter le nombre d'utilisateurs afin de leur garantir à ceux-ci une bonne expérience de compostage, même si cela réduit les performances économiques de l'appareil.

### 3.6.5. Biodiversité

Le projet COMPOSTOU prévoyait la mise en place d'un suivi écologique des Compostous expérimentaux. Cette partie a malheureusement dû être reportée pour plusieurs raisons :

- La subvention de fonctionnement demandée à la Région Centre Val de Loire était de 25952 euros. Or celle-ci nous a accordé 10411 euros de moins que ce qui nous était nécessaire pour travailler. **Il a donc fallu faire des choix dans nos priorités et restructurer notre budget prévisionnel ;**
- Pour mener malgré tout nos travaux scientifiques, un projet de recherche d'intérêt régional, intitulé COMSCOPE, a été déposé fin 2017 auprès de la Région Centre Val de Loire sous l'égide de l'IRBI, afin d'étudier la biodiversité des composteurs, en utilisant notamment les 10 Compostous expérimentaux et les infrastructures du Composcope de Nouâtre pour nos études. Ce projet a malheureusement été refusé au motif que « *la partie plus scientifique d'étude de la biodiversité n'apporte pas de plus-value à la politique régionale sur les déchets et au développement du compostage* ». **De nombreux efforts de pédagogie restent donc nécessaires pour faire entrer les sciences du compostage dans l'agenda politique de la Région Centre Val de Loire... La COP régionale changera-t-elle cette situation ?**

Néanmoins, nous avons procédé à des prélèvements d'organismes en vue d'identifications future et effectué des observations préliminaires :

- Nos premières observations semblent indiquer que la faune endogée ou épigée (vivant dans ou sur le sol) préexistante à l'implantation des Compostous peine à les coloniser spontanément et à décomposer à elle-seule les biodéchets des utilisateurs. Il est vrai que les apports en matière sont considérablement plus importants que dans le cas du fonctionnement d'une litière forestière. En retenant le chiffre de 500 g de débris végétaux alimentant chaque année 1 m<sup>2</sup> de litière de hêtraie, nous constatons que les 354 kg de biodéchets déposés en moyenne chaque année dans nos Compostous expérimentaux représentent une quantité de matière organique 354 fois plus importante au mètre carré

(car le Compostou utilise généralement 2 m<sup>2</sup> au sol par an, avec une rotation tous les 4 à 6 mois) ! De telles quantités de biodéchets excèdent largement les capacités des organismes du sol à assurer correctement leur fonction écologique de décomposition des matières organiques. **Pour stimuler l'activité biologique dans les Compostous, nous avons donc décidé de les ensemercer avec des organismes provenant de compost semi-mûr.**

- Dans un premier temps, nous avons procédé à l'ensemencement des Compostous dès leur mise en service (RCVL01, RCVL02). Cette approche s'est révélée peu efficace car en l'absence de litière de biodéchets déjà constituée, les animaux n'ont pas été fixés dans les Compostous et n'y sont pas restés. **Nous avons donc décidé pour les autres Compostous de procéder à l'ensemencement après au moins un mois d'apports. Ce délai permet aux biodéchets de commencer à se décomposer sous l'action des micro-organismes et offre donc davantage de ressources disponibles pour les animaux décomposeurs.**
- Les Compostous hébergeaient souvent une belle diversité d'acariens oribates et gamasides et de collemboles qu'il importerait d'identifier et de caractériser précisément. Nous avons notamment observé des pseudoscorpions, prédateurs d'acariens et d'insectes et de nombreuses espèces de staphylins.



MyrmecoFourmis .fr

Figure 104: Pseudoscorpion (source : © Cosmin Mancu/Dreamstime) et staphylin (source : myrmecofourmis.fr).

- L'apport de vers épigés (de type *Eisenia*) s'est révélé peu efficace sur sol naturel, en particulier sur sol sableux drainant. Ceux-ci semblent avoir peu apprécié les conditions relativement sèches du compost en formation dans les Compostous. En revanche, nous avons vu qu'ils proliféraient à l'extérieur des Compostous, dans les tas de compost libérés par de précédentes rotations et qu'ils contribuaient à leur donner une structure grumeleuse. **Il est donc préférable de fixer les populations de vers épigés sous couvert de broyat, en dehors du Compostou, en évitant autant que possible de transférer le compost produit sur un autre site, de le redistribuer aux utilisateurs ou de le tamiser après rotation.**
- Sur sol artificiel en revanche (béton et bitume sous le Compostou RCVL01 par exemple), les vers épigés sont restés durablement dans les couches profondes du compost, rendues plus humides par l'imperméabilisation du sol. **Des apports de terre naturelle sont venus compléter l'ensemencement pour donner aux vers les éléments minéraux dont leur croissance a besoin et qu'ils ne peuvent détacher du béton ou trouver dans le compost en formation.**
- Comme les autres espèces de diptères, les mouches-soldats semblent coloniser assez peu les Compostous, hormis en été, où elles sont plus visibles (observations dans les Compostous RCVL02, 04 et RCVL07). La sécheresse relative et l'absence de températures élevées des Compostous ne semblent pas leur convenir, tandis qu'elles pouvaient être très abondantes dans les composteurs de haute énergie accompagnés par ailleurs par l'association ZDT. Dans ces derniers, la pullulation des mouches-soldats semblait se faire au détriment des vers épigés. **Lorsque nous en avons trouvé dans les Compostous, nous avons laissé les larves de mouches-soldats compléter leur cycle de vie dans les biodéchets car l'espèce ne présentait pas de gêne pour les utilisateurs, y compris à l'âge adulte.**
- Les cloportes se sont parfaitement bien acclimatés aux Compostous et sur chaque site leurs populations sont rapidement devenues très abondantes voire dominantes sur les autres espèces. En particulier nous avons noté dans le Compostou RCVL01 une grande prolifération de l'espèce *Porcellionides pruinosus*, un cloporte appréciant la sécheresse et tolérant des températures élevées. L'espèce se reconnaît grâce à l'extrémité pâle de ses articles antennaires, sa coloration violacée et la présence sur sa carapace d'une couche cireuse évocatrice de la pruine de certains fruits. Les cloportes colonisent généralement les coins supérieurs et la surface du compost en formation (zones les plus sèches) et les interstices des Compostous. Là où ils sont présents, les vers épigés sont généralement absents. **Nous essayons de respecter ces animaux autant que possible lors de chaque rotation, en évitant de les disperser et en évitant de mélanger les horizons superficiels du compost en formation.**



Figure 105: A gauche, *Porcellionides pruinosus* (photo Pascal Dubois) une espèce très abondante dans certains sites. A droite, une autre espèce de cloporte non identifiée très abondante dans le Compostou RCVL02 (*Armadillidium vulgare* ?)

- Dans le Compostou RCVL04, nous avons eu la surprise de trouver une population très abondante de forficules européens (*Forficula auricularia*), un insecte polyphage et grégaire qui consomme à la fois des végétaux en décomposition et des insectes. **Encore plus que pour les cloportes, il est très important de ne pas disperser les forficules ni de les enfouir lors des rotations car chez cette espèce les relations sociales et les soins apportés aux jeunes par les mères sont très sophistiqués.**



Figure 106: *Forficula auricularia* (photo : ArtMechanic, CC BY-SA 3.0).

- Dans un Compostou hors projet (STCY01, implanté à l'entrée des jardins familiaux de l'association Les Petits Jardiniers de Saint-Cyr-Sur-Loire), nous avons trouvé une douzaine de

larves et de femelles de « Rhinocéros » (*Oryctes nasicornis*), un imposant coléoptère xylophage, probablement apporté avec le broyat. La plus grosse larve mesurait près de 7 cm de long ! Ces insectes ont été replacés dans le silo de compostage après la rotation.



Figure 107: Larves et femelle d' *Oryctes nasicornis* trouvées dans le Compostou STCY01.

- Un seul rongeur a été observé en 2 ans : un rat sous le compost en formation du Compostou RCVL08, le 28/11/2019. Le compost était très humide et présentait des poches de décomposition putride anaérobie, à cause d'un broyat qui n'était pas assez structurant et trop décomposé. L'absence de nid constitué indiquait que l'animal avait dû être attiré par les mauvaises odeurs émanant exceptionnellement de ce Compostou. Nous avons demandé à la Communauté de Communes Gâtine et Choisilles - Pays de Racan, en charge de l'alimentation du site en broyat via la commune de Sonzay, d'améliorer la qualité du broyat fourni.
- Sur deux autres sites Compostous hors projet, des rats ont été observés, à chaque fois en raison de dysfonctionnements causés par les utilisateurs : étalement ou apports de broyat insuffisants, biodéchets non recouverts ou en quantités trop importantes. Sur l'un de ces sites, nous avons expérimenté un dispositif anti-rongeurs composé d'un grillage à poules placé sous le Compostou et de petites grilles placées au niveau des ajours des parois. Comme les pratiques n'ont pas été améliorées... le rat est logiquement revenu, en passant par les ajours des couvercles des trappes. Depuis, ce Compostou a été retiré à ses utilisateurs.



**Figure 108: Dispositif anti-rongeurs mis en place sur un Compostou mal géré par ses utilisateurs (hors projet).**

- En ce qui concerne les plantes, des pousses spontanées de courges et de tomates ont été observées à plusieurs endroits, soit dans le compost mûr, soit directement dans le silo de compostage : une culture de melon luxuriante et spontanée a poussé dans le compost produit par le Compostou RCVL06. Une culture de courges spaghetti a poussé dans le compost mûr du Compostou STCY01 (hors projet). Ailleurs, un module de Compostou pourvu d'un plancher a été converti en jardinière pour une culture en bac hors-sol (TOUR01, hors projet). Enfin, sur sol artificiel, des plants de tomates ont poussé à travers les ajours des parois du silo de compostage du Compostou RCVL01.



Figure 109: En haut à gauche, Compostou RCVL06. En haut à droite, Compostou STCY01 (hors projet). En bas à gauche, le Compostou TOUR01 (hors projet). En bas à droite, le Compostou RCVL01 sur sol artificiel.

- Un champignon potentiellement intéressant a été identifié dans un lot de broyat de branches alimentant les Compostous RCVL02 et RCVL04. Les filaments mycéliens de ce champignon structuraient très fortement le broyat, jusqu'à former des sortes de chignons denses mélangeant éclats de bois, boulettes fécales d'animaux décomposeurs et mycellium. Des échantillons de ce champignon ont été récupérés et sont entretenus à l'IRBI en attente d'identification. Il pourrait s'agir d'un champignon basidiomycète ectomycorhize, dont les pouvoirs structurants et absorbants pourraient se révéler utiles en compostage de basse énergie.



Figure 110: Champignon basidiomycète poussant dans le broyat de branches observé à la loupe binoculaire.

Nous n'avions pas réellement anticipé une segmentation spatiale de la biodiversité à l'échelle des Compostou. A posteriori, il était pourtant évident que les espèces de l'inoculum n'allaient pas rester à l'endroit de leur dépôt après l'ensemencement ni se répartir de manière homogène dans le compost en formation.

Nos observations ont confirmé que la plupart des animaux décomposeurs se répartissent dans les premiers 15 à 25 cm du compost (en formation ou mis à maturer). Ce sont à la fois les zones les plus riches en biodéchets frais, donc à haute valeur énergétique, et les plus sèches, donc les plus oxygénées. Les vers épigés et anéciques fréquentent plutôt le compost mûr et contribuent à l'humification du compost. Il pourrait y avoir un intérêt à recouvrir le sol naturel sous les Compostous, d'une bâche semi-perméable et à la couvrir d'une couche de matériaux drainants (éclats de briques, billes d'argiles, petits graviers) et d'éléments minéraux plus fins (sable, argile). Cet ajout permettrait probablement de recréer dans le Compostou un horizon minéral indépendant du sol (et donc de ses pollutions éventuelles) et une zone de vie pour les vers épigés, tout en drainant les excès d'humidité. Les coins des Compostous pourraient aussi être aménagés avec des structures lamellaires de sorte à servir d'abris permanents aux espèces thigmotactiques. Les abris seraient simplement déplacés lors d'une rotation, ce qui éviterait de disperser les individus de même parentèle.

### 3.6.6. Test du cresson interne

### 3.6.6.1.1. Introduction

L'objectif de cette étude était d'évaluer la phytotoxicité potentielle de quatre composts issus de Compostous avant analyse de ces échantillons par un laboratoire indépendant (voir section 3.6.7).

### 3.6.6.1.2. Matériels et méthodes

Les composts de quatre sites Compostous ont été collectés à l'occasion d'une rotation. Les composts étaient issus des Compostous suivants :

Tableau 7: Historique des sites échantillonnés.

Numéro du composteur	Date de début des apports biodéchets	Date de mise en maturation	Date de prélèvement
<b>RCVL02</b>	19/02/2018	04/12/2018	19/04/2019
<b>RCVL05</b>	02/08/2018	02/12/2018	17/04/2019
<b>RCVL06</b>	17/05/2018	28/10/2018	19/04/2019
<b>RCVL07</b>	05/07/2018	03/12/2018	02/05/2019

Les composts ont été soumis à un test du cresson, adapté de Aylaj et Lhadi (2008), les 6 et 7 juin 2019. Les conditions initiales de réalisation de ce test ont été modifiées afin qu'il soit réalisable avec des conditions matérielles simples (pas d'utilisation de four pour l'estimation de la quantité de matière sèche contenue dans le compost, pas d'ultrafiltration), rapide (résultat en 3 jours), applicable en routine sur de nombreux échantillons (test mené en boîtes de Pétri et non en pots) et fiable (augmentation de la quantité de matière active en contact avec les graines de cresson et allongement de la durée de mise en culture des graines avant mesure de l'indice de germination).

Les composts ont été criblés au moment de leur prélèvement avec un tamis de mailles d'1 cm de côté afin de réemployer le broyat non décomposé dans chaque Compostou d'origine. Vingt-cinq litres de compost tamisé ont été prélevés sur chaque site et placés dans une boîte de rangement en plastique semi-hermétique de 57 l de contenance. Les composts tamisés ont été placés à 20°C à l'obscurité jusqu'à atteindre un état de maturité caractérisé par :

- Une diminution notable de la densité des populations d'organismes décomposeurs (quasi absence en surface) ;
- La germination spontanée de graines contenues dans le compost puis leur dépérissement complet par manque de lumière et d'eau ;
- Un assèchement progressif du compost jusqu'à atteindre un taux d'humidité inférieur à 60% ;
- L'émission d'une odeur de géosmine (« odeur d'humus »).

Dans nos conditions expérimentales, ce processus de mûrissement a duré 5 à 7 semaines, à l'issue desquelles les composts tamisés issus des Compostous ont été à nouveau tamisés avec un tamis de mailles d'1 cm de côté pour éliminer les morceaux de broyat encore trop grossiers. Pour chaque échantillon, 10 g de compost ont été transférés dans un tube Falcon de 50 ml, recouverts d'eau distillée jusqu'à saturation complète, en notant la masse d'eau ajoutée (M1). L'échantillon a alors été mis à incuber 1h à 20°C en remettant régulièrement le compost en suspension. Si nécessaire, une seconde masse d'eau (M2) de poids connu a été ajoutée afin que le compost soit encore à saturation après l'incubation. La masse d'eau totale ajoutée (Mt) a été calculée en ajoutant les valeurs M1 et M2. Le taux d'humidité de ce compost saturé d'eau étant approximativement de 90%, il était possible d'évaluer la quantité de matière sèche présente dans 10 g de compost tamisé (MS10) avec la formule suivante :

$$\mathbf{MS10=(100-Th)/10}$$

où Th a été calculé de la manière suivante :

$$\mathbf{Th=(10*900)/(Mt+10)}$$

Pour chaque échantillon de compost, une solution-mère de compost a été constituée contenant l'équivalent de 7,5 g de matière sèche et 40 ml d'eau distillée. Cette solution-mère a été mise en incubation pendant 1h à 20°C, en remettant régulièrement le compost en suspension.

La solution-mère a été filtrée à travers une passoire à mailles de 2 mm de côté, puis centrifugée à 600 rpm pendant 15 min à 20°C. Le surnageant a été filtré sur papier filtre d'une porosité de 15 µm, puis complétée à 40 ml avec de l'eau distillée.

Deux solutions diluées ont été constituées à partir de chaque solution mère : la solution C75 correspondait à une dilution de 25% de la solution-mère, la solution C50 correspondait à une dilution de 50% de la solution-mère.

Pour chaque solution diluée, 5 ml ont été déposés dans une boîte de Pétri contenant du papier filtre. Dix graines de cresson alénois (*Lepidium sativum*) préalablement incubées dans de l'eau distillée pendant 1 h ont été placées par boîte, en ne retenant que les graines dont le mucilage était visible après la réhydratation. Cinq boîtes de dix graines ont ainsi été constituées pour chaque dilution et placées en incubation à 20°C pendant 3 jours. Un lot de cinq boîtes « témoin » a également été constitué lors de chaque journée de démarrage de tests, en remplaçant les 5 ml de solution diluée de compost par 5 ml d'eau distillée. Les boîtes témoin ont été placées dans les mêmes conditions d'incubation que les lots de boîtes contenant des extraits de compost. Les composts issus des Compostous RCVL05 et RCVL06 ont été mis en incubation le 6/06/2019. Les composts issus des Compostous RCVL02 et RCVL07 ont été mis en incubation le 7/06/2019.

Après 3 jours, la longueur de chaque plantule de cresson alénois, prise de l'extrémité de la racine jusqu'à la base des cotylédons, a été mesurée et le nombre de graines germées par boîte a été compté. Les indices de germination (IG) ont été évalués pour chaque lot de boîtes traitées aux solutions diluées de compost avec la formule suivante :

$$\text{IG} = \frac{(\text{LGm des boîtes traitées} \times \text{PGm des boîtes traitées})}{(\text{LGm des boîtes témoins} \times \text{PGm des boîtes témoins})}$$

où :

LGm = longueur moyenne des plantules issues de graines de cresson alénois germées

PGm = pourcentage moyen de germination

Ainsi l'IG<sub>RCVL02.C50</sub> correspondait, par exemple, à l'IG calculé à partir du lot de 5 boîtes traitées à la solution diluée C50, du compost issu du Compostou RCVL02 et du lot de 5 boîtes témoins constitué ce jour-là.

Pour chaque compost issu d'un Compostou « x », un IG moyen (IGm) a été calculé comme suit :

$$IGm_x = (IG_{x.C50} + IG_{x.C75})/2$$

#### 3.6.6.1.3. Tests statistiques

Les séries de données ont été soumises à des tests de normalité de Shapiro-Wilk afin de vérifier si leurs distributions respectives étaient conformes à des distributions normales. Lorsque les données suivaient une distribution normale, leur variance a été analysée grâce à un test paramétrique de type ANOVA à un facteur (au risque consenti  $\alpha = 0.05$ ), suivi d'un test à postériori de Newman-Keuls afin d'identifier l'origine d'éventuelles différences significatives. Lorsque les données ne suivaient pas une distribution normale, leur variance a été analysée grâce à un test non-paramétrique (Test H de Kruskal-Wallis,  $\alpha = 0.05$ ) pour procéder à la comparaison des moyennes.

#### 3.6.6.1.4. Résultats

##### 3.6.6.1.4.1. Estimation des taux d'humidité des composts tamisés lors du test du cresson

En admettant que le taux d'humidité des composts saturés d'eau était de 90%, on obtient les valeurs suivantes :

Tableau 8: Taux d'humidités des 4 composts étudiés.

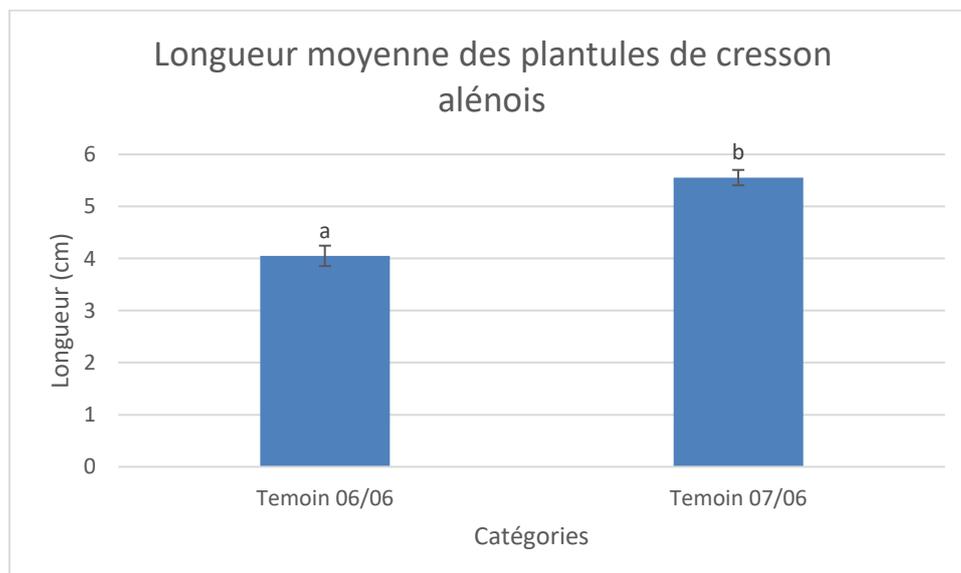
Compost	Taux d'humidité estimé (%)
RCVL02	45,69
RCVL05	36
RCVL06	43,69
RCVL07	36,29

##### 3.6.6.1.4.2. Hétérogénéité des lots de boîtes témoins

Les LGm et PGm des lots de boîtes témoins des 06/06/2019 et 07/06/2019 ont été comparés afin de savoir si ces données étaient homogènes et pouvaient être regroupées.

Pour cela, les séries ont fait l'objet d'un test de normalité de Shapiro-Wilk. Au risque consenti ( $\alpha = 0,05$ ), l'hypothèse nulle de conformité à une distribution normale ne peut pas être écartée ( $p\text{-value} = 0,941819$ , supérieure à la valeur seuil critique 0,0005) (Annexe TC1).

Les données suivant très probablement une loi normale, il est possible d'analyser les variances grâce à un test paramétrique de type ANOVA à un facteur. **Ce test indique que les longueurs moyennes des plantules issues des graines de cresson germées (LGm) provenant de chaque lot de boîtes témoins diffèrent significativement l'une de l'autre** ( $p\text{-value} = 0,000000$ ) (Annexe TC2). Ce résultat est confirmé par un test non paramétrique H de Kruskal-Wallis ( $p\text{-value} = 0,000000$ ) (Annexe TC3). Il n'est donc pas possible de regrouper les données de longueurs de plantules pour les boîtes témoins en une seule série statistique. La série du 06/06 sera utilisée pour les comparaisons avec les résultats obtenus à partir des boîtes réalisées ce même jour (dilution des composts RCVL05 et RCVL06), tandis que la série du 07/06 sera utilisée avec les boîtes traitées avec les dilutions des composts RCVL02 et RCVL07.



**Figure 111: Comparaison des longueurs moyennes des plantules de cresson alénois issues des lots de boîtes témoins du 6/06 (n = 46) et du 07/06 (n = 45). Les histogrammes surmontés de lettres différentes indiquent des différences significatives entre les moyennes.**

Concernant les pourcentages moyens de germination (PGm) des lots témoins, la distribution des données suit très probablement une loi normale (Annexe TC4) et il est possible d'analyser leur variance à l'aide d'un test paramétrique de type ANOVA à un facteur. Ce test indique qu'en revanche, **les deux séries de données issues des boîtes témoins ne présentent pas de différence significative quant à leurs pourcentages moyens de germination respectifs** ( $p\text{-value} = 0,770713$  supérieure au seuil de risque consenti  $\alpha = 0,05$ ) (Annexe TC5).

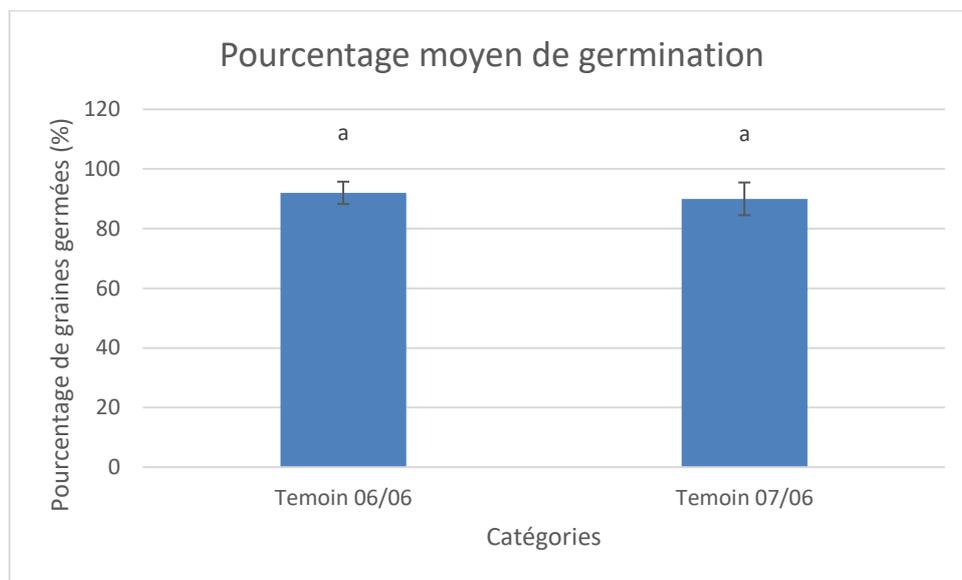


Figure 112: Comparaison des pourcentages moyens de germination des lots de boîtes témoins ( $n = 5$  pour chaque catégorie). Les histogrammes surmontés de lettres différentes indiquent des différences significatives entre les moyennes.

#### 3.6.6.1.4.3. Longueurs moyennes des plantules de cresson des boîtes traitées

##### 3.6.6.1.4.3.1. Traitements RCVL05.C75, RCVL05.C50, RCVL06.C75, RCVL06.C50

La distribution des données de longueurs des plantules suit très probablement une loi normale (Annexe TC6). **Les LGm diffèrent significativement dans leur ensemble** (ANOVA à un facteur,  $p\text{-value} = 0,000116$ , inférieure au seuil de risque consenti  $\alpha = 0,05$ ) (Annexe TC7). La comparaison multiple des LGm des différentes séries à l'aide d'un test à postériori de Newman-Keuls indique que l'origine de la

différence statistique constatée réside dans la différence de LGm entre les traitements RCVL06.C50 et RCVL06.75 d'une part et les autres conditions d'autre part ; **le compost du Compostou RCVL06 avait un effet significativement négatif sur la croissance des plantules de cresson aux deux dilutions testées**, tandis que **le compost issu du Compostou RCVL05 n'avait pas d'effet significatif** comparé à la croissance des plantules témoins, traitées à l'eau distillée.

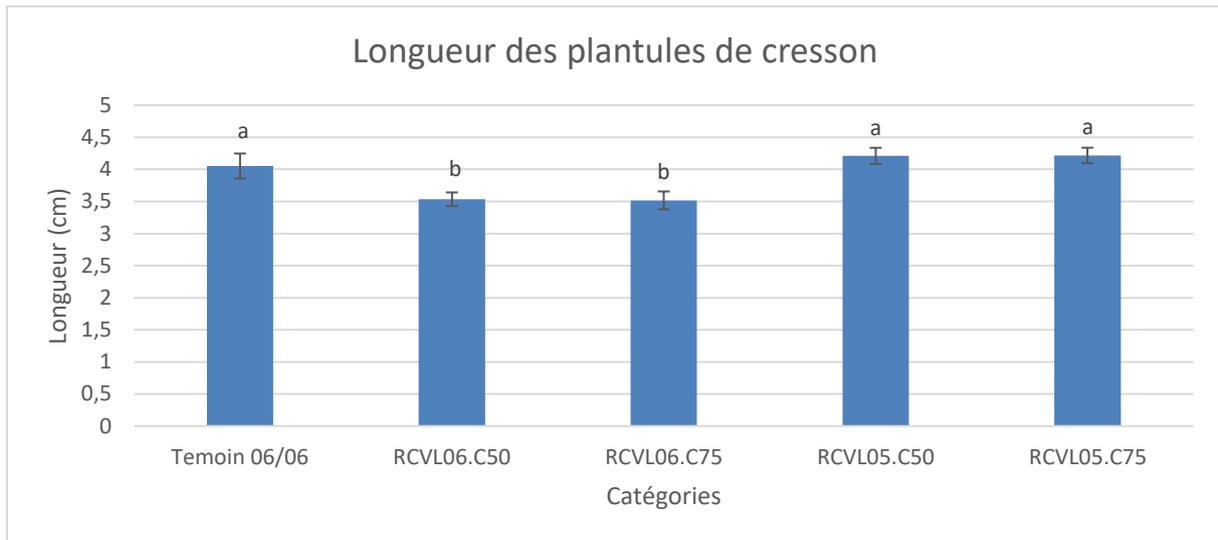


Figure 113: Comparaison des longueurs moyennes des plantules des lots de boîtes témoins 06/06 (n = 46), RCVL06.C50 (n = 42), RCVL06.C75 (n = 49), RCVL05.C50 (n = 44) et RCVL05.C75 (n = 43). Les histogrammes surmontés de lettres différentes indiquent des différences significatives entre les moyennes. Chaque barre représente l'erreur type de la moyenne.

#### 3.6.6.1.4.3.2. Traitements RCVL02.C75, RCVL02.C50, RCVL07.C75, RCVL07.C50

La distribution des données de longueurs de plantules suit une loi normale (Annexe TC8). **Les LGm diffèrent significativement dans leur ensemble** (ANOVA à un facteur,  $p$ -value = 0,000001, inférieure au seuil de risque consenti  $\alpha = 0,05$ ) (Annexe TC9). Un test à postériori de Newman-Keuls indique que l'origine de la différence statistique constatée réside dans la différence de LGm entre le lot de boîtes témoins et les autres lots d'une part, et entre les traitements d'autre part. **Les composts des Compostous RCVL02 et RCVL07 avaient des effets significativement positifs sur la croissance des plantules de cresson, aux deux dilutions testées**. La solution la plus concentrée réalisée à partir du compost RCVL07 (traitement RCVL07.C75) a induit une

croissance des plantules significativement plus importante que tous les autres traitements.

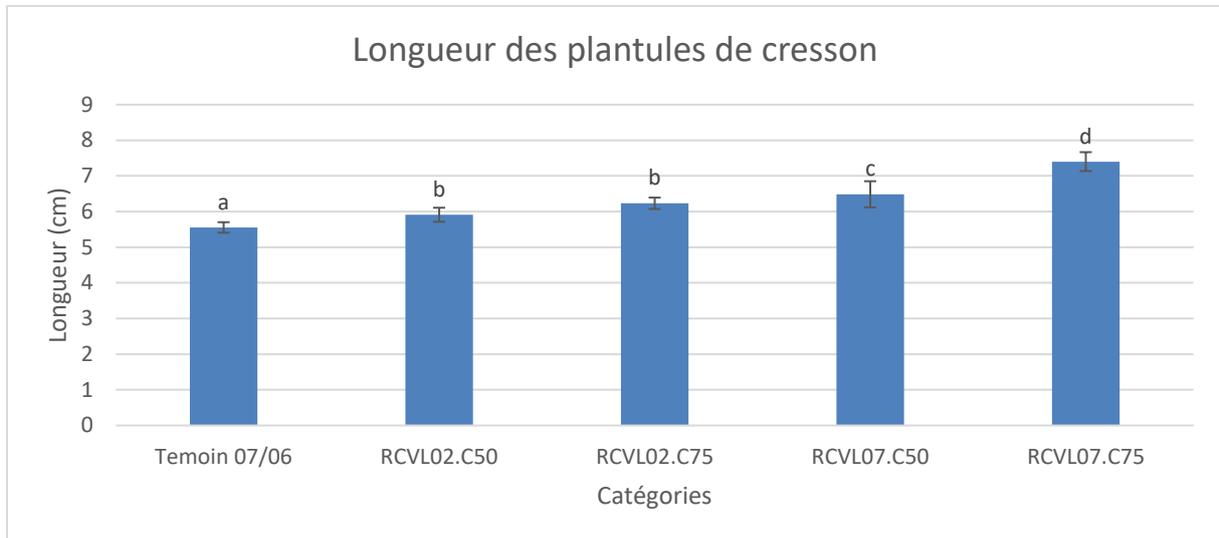


Figure 114: Comparaison des longueurs moyennes des plantules des lots de boîtes témoins 07/06 (n = 45), RCVL02.C50 (n = 46), RCVL02.C75 (n = 42), RCVL07.C50 (n = 44) et RCVL07.C75 (n = 49). Les histogrammes surmontés de lettres différentes indiquent des différences significatives entre les moyennes. Chaque barre représente l'erreur type de la moyenne.

#### 3.6.6.1.4.4. Pourcentages moyens de germination dans les boîtes traitées

##### 3.6.6.1.4.4.1. Traitements RCVL05.C75, RCVL05.C50, RCVL06.C75, RCVL06.C50

La distribution des données suit une loi normale (Annexe TC10). Les PGM ne sont pas significativement différents les uns des autres (ANOVA à un facteur,  $p$ -value = 0,397591, supérieure au seuil de risque consenti  $\alpha = 0,05$ ) (Annexe TC11). Par conséquent, **les composts issus des Compostous RCVL05 et RCVL06 n'ont pas eu d'effets significatifs sur le pourcentage de germination des graines de cresson, aux dilutions testées.**

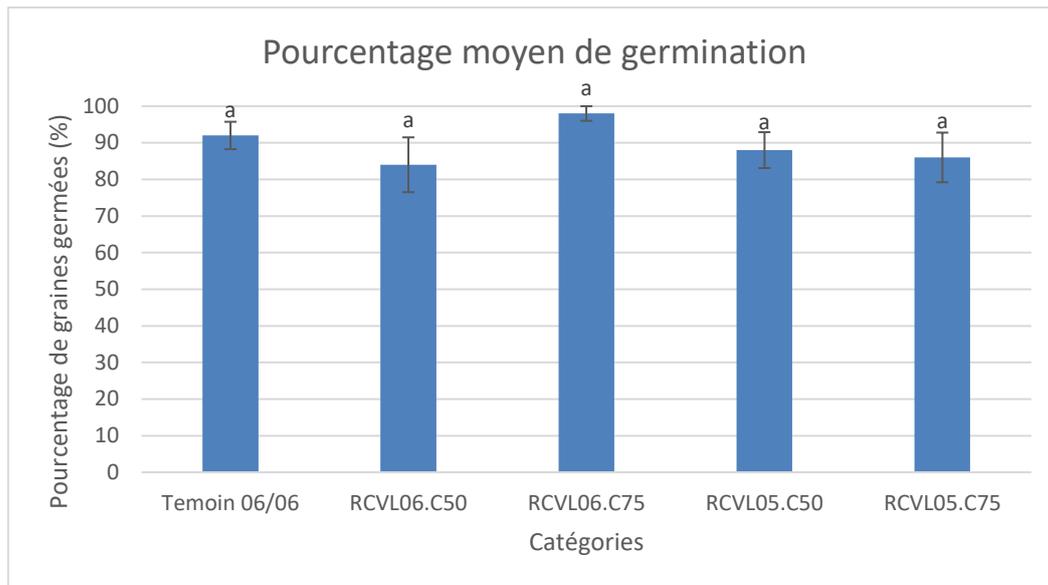
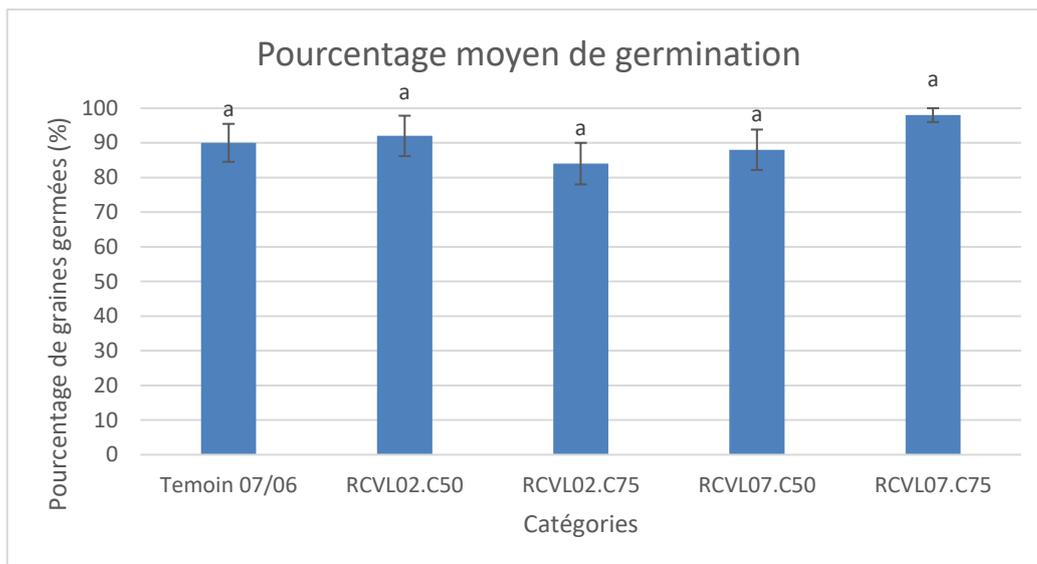


Figure 115: Comparaison des pourcentages moyens de germination des lots de boîtes traitées (n = 5 pour chaque catégorie). Les histogrammes surmontés de lettres différentes indiquent des différences significatives entre les moyennes. Chaque barre représente l'erreur type de la moyenne.

#### 3.6.6.1.4.4.2. Traitements RCVL02.C75, RCVL02.C50, RCVL07.C75, RCVL07.C50

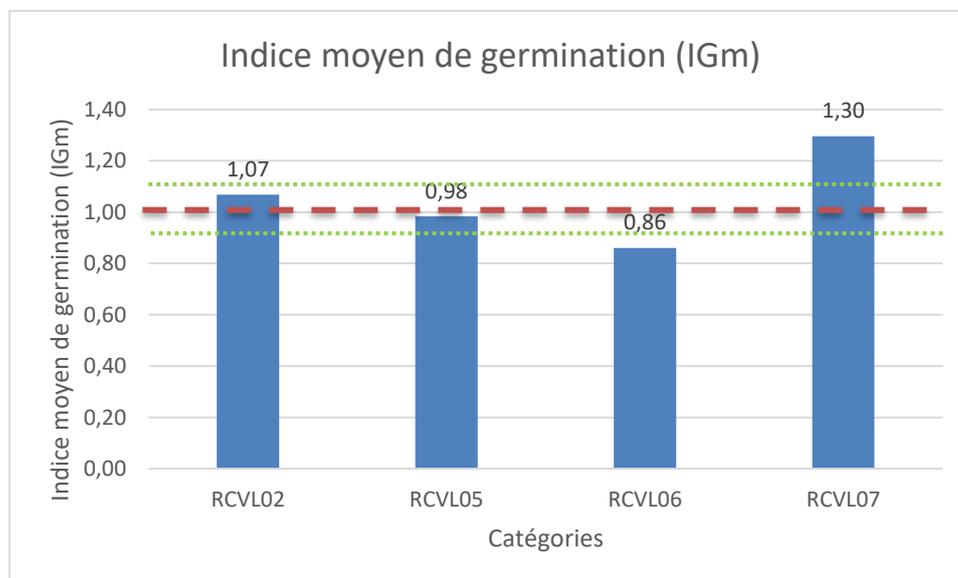
La distribution des données suit une loi normale (Annexe TC12). Les PGM ne sont pas significativement différents les uns des autres (ANOVA à un facteur, *p-value* = 0,445194, supérieure au seuil de risque consenti  $\alpha = 0,05$ ) (Annexe TC13). Par conséquent, **les composts issus des Compostous RCVL02 et RCVL07 n'ont pas eu non plus d'effets significatifs sur le pourcentage de germination des graines de cresson, aux dilutions testées.**



**Figure 116: Comparaison des pourcentages moyens de germination des lots de boîtes traitées (n = 5 pour chaque catégorie). Les histogrammes surmontés de lettres différentes indiquent des différences significatives entre les moyennes. Chaque barre représente l'erreur type de la moyenne.**

#### 3.6.6.1.4.5. Indices moyens de germination (IGm)

L'IGm de chaque compost testé est donné sur la figure suivante.



**Figure 117: Comparaison des indices de germination (IGm) des différents composts testés. La barre horizontale rouge en pointillés indique le seuil au-dessus duquel le compost a un effet positif sur la germination des graines de cresson alénois.**

Les deux lignes horizontales vertes pointillées indiquent les limites, supérieure et inférieure, d'un intervalle de confiance arbitrairement fixé à 10% de la valeur seuil, soit  $1 \pm 0.1$ .

L'IGm, dont le calcul combine les PGm et LGm mesurés pour les deux dilutions de chaque compost, rapportés aux PGm et LGm des témoins, est un indicateur synthétique concernant chaque échantillon de compost. Nous constatons ici qu'un compost (RCVL07) avait un IGm supérieur à 1 (effet globalement positif sur la germination du cresson), deux composts (RCVL02 et RCVL05) avaient des IGm proches de 1 (effets neutres par rapport aux témoins) et un compost (RCVL06) avait un IGm nettement inférieur à 1 (effet globalement négatif sur la germination du cresson).

Nous avons voulu savoir si l'IGm était corrélé à d'autres variables mesurées, telles que le taux d'humidité des composts estimé avant le test ou à la durée de différentes périodes ayant marqué la formation du compost (durée des apports, durée de la maturation, durée totale de formation du compost).

**L'IGm ne semble pas être associé au taux d'humidité du compost avant le test** (test de corrélation linéaire, coefficient  $R^2 = 0,2058$ ,  $p\text{-value} = 0,5464$ ) (Annexe TC14).

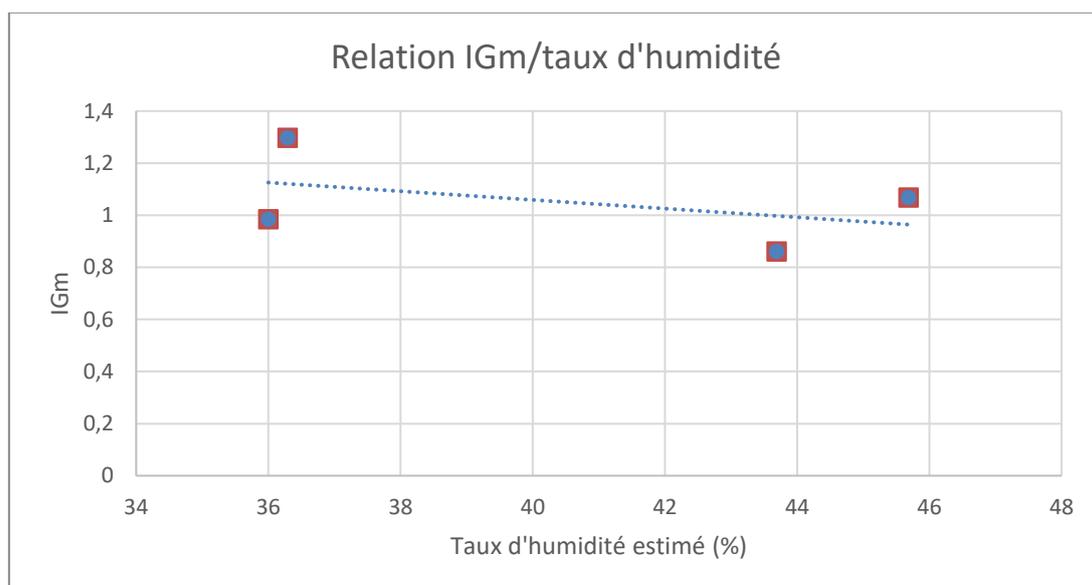


Figure 118: Relation entre l'IGm et le taux d'humidité estimé pour les quatre composts étudiés. La droite bleue en pointillés est une courbe de tendance calculée automatiquement.

De la même manière, **l'IGm ne semble pas être associé à la durée des apports en biodéchets** (test de corrélation linéaire, coefficient  $R^2 = 0,0016$ ,  $p\text{-value} = 0,9598$ ) (Annexe TC15), **ni à la durée de la période de maturation des composts** ( $R^2 = 0,1445$ ,  $p\text{-value} = 0,6199$ ) (Annexe TC16), **ni à la durée totale de formation du compost** ( $R^2 = 0,0163$ ,  $p\text{-value} = 0,8722$ ) (Annexe TC17).

En revanche, nous constatons que le taux d'humidité semble positivement corrélé à la durée totale de formation de chaque compost ( $R^2 = 0,8558$ ,  $p\text{-value} = 0,0749$ ) (Annexe TC18).

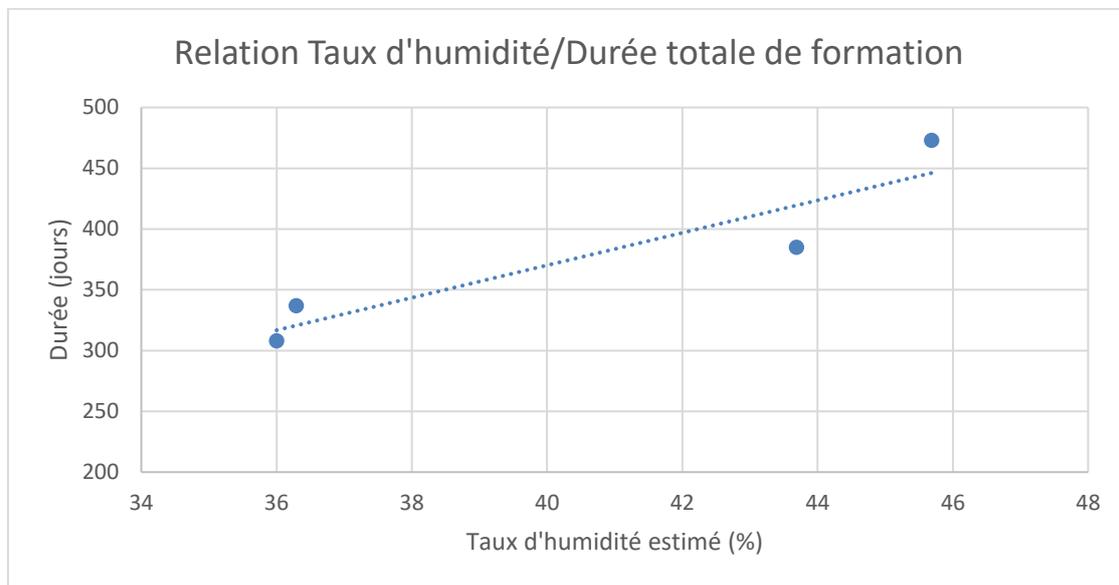


Figure 119: Relation entre le taux d'humidité estimé pour les quatre composts étudiés et leur durée totale de formation. La droite bleue en pointillés est une courbe de tendance calculée automatiquement.

#### 3.6.6.1.5. Discussion

Sur les quatre composts issus de Compostous testés, deux d'entre eux n'ont pas montré d'effet significativement différent de celui de l'eau distillée (RCVL02 et RCVL05), un a présenté un effet positif sur la germination de graines de cresson alénois dans nos conditions expérimentales (RCVL07), et le dernier a présenté un effet significativement négatif (RCVL06).

Les effets observés portaient exclusivement sur l'élongation de la racicule et de la tige de la plantule et non sur le pourcentage de germination des graines de cresson. Nous pouvons donc en conclure que ces composts n'ont pas eu d'effets inhibiteurs sur la capacité des graines de cresson à germer, mais qu'ils peuvent avoir des effets neutres, positifs ou négatifs vis-à-vis des premières étapes de la croissance des plantules. Des

analyses physico-chimiques complémentaires permettront probablement d'identifier les causes possibles à l'origine des différences constatées et de confirmer celles-ci.

D'ores et déjà, nous pouvons établir que les différences d'effets sur la croissance des plantules ne s'expliquent pas par les différences de taux d'humidité apparents des quatre composts étudiés, évaluées au moment de la réalisation des tests. Les composts analysés étaient plutôt secs (36 à 46% d'humidité). Le compost le plus âgé (RCVL02, 473 jours de formation) était le plus humide et globalement, le taux d'humidité des composts était positivement corrélé à la durée totale de leur formation. Les composts n'ayant pas été arrosés pendant toute la période de leur formation, l'eau présente dans ces composts provenait exclusivement des biodéchets apportés par les utilisateurs, de l'eau de pluie infiltrée à l'intérieur du composteur, de l'humidité atmosphérique, de l'humidité du sol et de l'eau métabolique produite par les organismes décomposeurs. **Ceci semble indiquer que dans des conditions climatiques tempérées, la teneur en eau « naturellement » présente dans les composteurs est suffisante pour obtenir un processus de compostage complet aboutissant à du compost mature.**

### 3.6.7. Analyses indépendantes de la conformité de composts issus de Compostous à la norme NF U 44-051

#### 3.6.7.1.1. Introduction

L'objectif de cette étude était d'évaluer par un laboratoire indépendant la conformité de quatre composts issus de Compostous expérimentaux à la norme française NF U 44-051. Cette norme spécifie 11 dénominations de type d'amendements organiques sans engrais et 11 dénominations de type d'amendements organiques avec engrais. Il est souvent avancé que la conformité d'un compost à cette norme serait obligatoire pour pouvoir le céder à un tiers, à titre gracieux ou onéreux, lorsque celui-ci n'a pas le statut d'exploitant au sens de l'Arrêté du 9 avril 2018 <sup>36</sup>, ou de producteur de déchets contribuant au site de compostage partagé dont provient le compost. Toutefois, notons qu'il existe au moins deux moyens pour commercialiser ou distribuer gracieusement un compost qui ne répondrait pas aux spécifications de la norme NF U 44-051 :

---

<sup>36</sup><https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000036830969&categorieLien=id>

- Par l'obtention d'une autorisation de mise sur le marché et d'un permis d'introduction en France, délivrés à l'issue d'une évaluation qui, « *dans les conditions d'emploi prescrites, révèle son absence d'effet nocif sur la santé humaine, la santé animale et sur l'environnement et son efficacité, selon les cas, à l'égard des végétaux et produits végétaux ou des sols* » (Art. L255-2 et L255-7 du Code rural et de la pêche maritime) ;
- Par l'obtention d'une autorisation de mise sur le marché dans un autre pays européen suivie d'une demande de permis d'introduction en France, dès lors que le compost est réputé « *identique à un produit dit " de référence " bénéficiant déjà d'une autorisation de mise sur le marché en France* » (Art. L255-3 du Code rural et de la pêche maritime).

Même si la norme NF U 44-051 fixe des objectifs d'innocuité assez pertinents, l'utilisation d'un compost normé n'est pas forcément sans risque pour l'utilisateur et son environnement. Ainsi, seules quatre catégories d'organismes potentiellement dangereux pour l'être humain sont recherchées (entérocoques, *Escherichia coli*, *Salmonella*, œufs d'helminthes viables). A ce jour, des lots de compost normés possiblement contaminés par *Toxoplasma gondii* (responsable de la toxoplasmose)<sup>37</sup> (Bastien, 2017) ou par *Aspergillus fumigatus* (responsable de la pneumonie aspergillaire<sup>38</sup>) (Russell *et al.*, 2008) pourraient être théoriquement mis sur le marché en tant que composts normés. En termes d'impacts environnementaux, aucun organisme phytopathogène ou entomopathogène n'est recherché, pas plus que les principaux pesticides agricoles utilisés en agriculture conventionnelle. Par ailleurs, la norme tolère une pollution aux micro-plastiques divers pouvant aller jusqu'à 0.8% de la matière sèche (soit 8 g par kg de compost sec), ainsi qu'une faible proportion de petits débris de verre et métalliques (jusqu'à 20 g par kg de compost sec). Inversement, un compost non conforme n'est pas forcément dangereux ou sans intérêt agronomique. Ainsi il a été observé que les composts produits sur sols volcaniques, comme sur l'île de la Réunion (Zéro Déchet La Réunion, communication personnelle), ou sur sol sablonneux, comme en Afrique ou aux Caraïbes (Bromblet et Somaroo, 2015), présentent des pourcentages de métaux lourds et de matières minérales trop élevés pour les normes françaises et européennes, bien

---

<sup>37</sup> La toxoplasmose figure parmi les maladies parasitaires les plus fréquemment contractées par les jardiniers amateurs.

<sup>38</sup> En 2008, la revue Lancet a signalé le décès d'un jardinier britannique mort après avoir respiré des spores d'*Aspergillus fumigatus* contenu dans de la matière organique en décomposition qu'il avait répandue la veille. Deux autres cas de contamination par du broyat d'écorces ont été signalés en 2006 (Arendrup *et al.*, 2006).

que constituant des amendements agricoles couramment utilisés par les populations locales.

Nous avons voulu savoir si des composts issus de Compostou pouvaient prétendre à la dénomination n°5 de la norme NF U 44-051, désignant des « composts de fermentescibles alimentaires et/ou ménagers » :

- Mode d'obtention et matière utilisée : Compost obtenu à partir de la fraction fermentescible des déchets ménagers et assimilés et/ou des déchets alimentaires, collectée sélectivement ou obtenue par tri mécanique, brute ou après prétraitement anaérobie, et ayant subi un procédé de compostage caractérisé ou de lombricompostage, avec ou sans les autres matières répondant aux dénominations de la présente norme ;
- Spécification : taux de matière organique supérieure ou égale à 20 % de la masse brute.

Afin de prétendre à la norme NF U 44-051, les amendements organiques doivent respecter ces spécifications, ainsi qu'un taux de matière sèche supérieure ou égale à 30 % de la masse brute. Les valeurs seuils de la norme NF U 44-051 sont librement consultables sur Wiki Aurea<sup>39</sup>, portail dédié aux informations d'intérêt agronomique.

Nous avons donc fait procéder à des analyses indépendantes par le laboratoire SADEF d'échantillons de composts mûrs issus de Compostous, au regard de la norme NF U 44-051. Nous avons également fait procéder à des analyses complémentaires telles que des mesures d'indice de stabilité de la matière organique (ISMO), des tests du cresson en conditions normées, une analyse de la contamination aux adventices.

#### *3.6.7.1.2. Matériel et Méthodes*

Des échantillons de compost issus des Compostous RCVL02, RCVL05, RCVL06 et RCVL07 ont été envoyés le 15/06/2019 pour analyse à la société SADEF (Aspach le Bas, France) en glacières réfrigérées et selon le protocole de conditionnement standardisé imposé par ladite société.

Les mesures et calculs demandés ont été les suivants :

- Quantification des composés inertes selon la norme NF U 44-164 ;
- Dosages de trois hydrocarbures aromatiques polycycliques (Fluoranthène , Benzo(b) fluoranthène, Benzo(a) pyrène) par chromatographie en phase gazeuse couplée à la

---

<sup>39</sup> [https://wiki.aurea.eu/index.php/NF\\_U\\_44-051](https://wiki.aurea.eu/index.php/NF_U_44-051)

spectrométrie de masse en tandem (GC-MS-MS) : selon la méthodologie interne MA7-107 adaptée de la méthode normée XP X 33-012 ;

- Mesure de la concentration en entérocoques (bactéries pathogènes opportunistes) selon la norme NF EN ISO 7899-1 ;
- Mesure de la concentration en *Escherichia coli* (bactérie intestinale responsable d'intoxications alimentaires et d'infections urinaires) selon la norme NF EN ISO 16649-2 ;
- Mesure de la concentration en *Salmonella* (bactéries responsables d'intoxications alimentaires, de la fièvre typhoïde, la fièvre paratyphoïde et de la salmonellose) selon la norme NF EN ISO 6579-1 ;
- Recherche d'œufs d'helminthes (vers parasites) viables selon la méthode FD X33-040 (évolution de la méthode XP X 33-017 imposée par la norme NF U 44-051 et datant de 2013) ;
- Mesure de la Masse Volumique (MV) compactée selon la norme NF EN 13040 ;
- Dosage de l'azote ammoniacal (N-NH<sub>4</sub>) soluble dans l'eau selon la norme NF EN 13652 ;
- Dosage de l'azote nitrique (N-NO<sub>3</sub>) soluble dans l'eau selon la norme NF EN 13652 ;
- Dosage de l'azote uréique (colorimétrie PDAB) par la méthode interne MA7-15 Colorimétrie PDAB ;
- Calcul de l'azote organique ;
- Mesure du taux de Matière Sèche (MS, composés organiques) selon la norme NF EN 13040 ;
- Mesure du taux de Matière Organique (MO) par perte au Feu selon la norme NF EN 13039 ;
- Mesure du taux de Carbone Organique (C) par oxydation chimique ou combustion ;
- Calcul de l'azote total (N) ;
- Rapport C/N ;
- Rapport MO/N ;
- Dosage de l'hémipentaoxyde de phosphore (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) total, de l'oxyde de potassium (K<sub>2</sub>O) total, de l'oxyde de calcium (CaO) total, de l'oxyde de magnésium (MgO) total selon les normes NF EN 13650, Dosage ICP MS NF EN ISO 17294 ou ICP AES NF EN ISO 11885 ;
- Dosage du cuivre total, du chrome total, du nickel total, du plomb total et du zinc total selon les normes NF EN 13650, Dosage ICP MS NF EN ISO 17294 ou ICP AES NF EN ISO 11885 ;
- Dosage de l'arsenic, du cadmium total et du sélénium selon les normes NF EN 13650 et dosage ICP MS NF EN ISO 17294 ;

- Dosage du mercure total (Analyse élémentaire) selon la méthode interne MA7-82 (Combustion O2 + AAS VF) ;
- Calcul de l'Indice de stabilité de la matière organique (ISMO) selon le protocole normalisé XP U 44-162 (indiquée FD U 44-162 dans les rapports d'analyse de SADEF)<sup>40</sup> ;
- Test du Cresson et évaluation du niveau de « salissure » par les adventices sur plaque (méthode interne PE07-03 modifiée de la méthode FDU 44-165).

Le Test du cresson SADEF est décrit ainsi par l'entreprise SADEF :

*« Ce test vise à s'assurer de la non phytotoxicité d'un produit et vérifie le niveau de salissure par les adventices (graines et propagules de « mauvaises herbes »). Il utilise comme plante indicatrice le cresson alénois (*Lepidium sativum*, type Alénois, faculté germinative > à 80%), en semis direct en plaque de germination.*

*Le produit à étudier est tamisé à 10 mm (proportion de refus :0,6%) puis dilué dans une tourbe de référence avant essai (en volume : 60 % de tourbe + 40 % de produit à étudier).*

*L'émergence du cresson est mesurée à trois et sept jours. La croissance foliaire (biomasse fraîche coupée au ras du sol) et racinaire (nombre de racines >5 cm franchissant le plancher du support d'essai) est mesurée à sept jours. Ces paramètres sont comparés à ceux obtenus pour un échantillon de référence (tourbe blonde). Le test est effectué en serre régulée, en conditions de température et de luminosité contrôlées. Le nombre de plantules anormales montre un risque de phytotoxicité lorsque cette valeur dépasse le seuil de 20% » (communication personnelle SADEF, 2019).*

#### 3.6.7.1.3. Résultats

Les résultats détaillés des analyses indépendantes de compost sont présentés en dans les annexes AI1, AI2, AI3 et AI4 (concernant les composts RCVL02, 05, 06 et 07 respectivement) et sont résumés dans les paragraphes suivants.

---

<sup>40</sup> Le calcul de l'ISMO (indice de stabilité de la matière organique) est obtenu à partir de la formule suivante, établie par la norme XP U 44-162:

$$\text{ISMO}^* = 44,5 + (0,5 \times \text{Fraction soluble}^*) - (0,2 \times \text{Cellulose}^*) + (0,7 \times \text{Lignine et Cutine}^*) - (2,3 \times \text{carbone organique minéralisé à 3 jours})$$

\* en % de la MO

### 3.6.7.1.3.1. Seuils d'innocuité

#### 3.6.7.1.3.1.1. Composés inertes légers (densité <1) et mi-lourds (densité comprise entre 1 et 1.35)

Aucun polluant de type films plastiques ou polystyrène expansé (PSE) de plus de 5 mm, plastiques mi-lourds de plus de 5 mm ou matières synthétiques supérieures à 2 mm n'a été détectée dans les quatre compost analysés.

#### 3.6.7.1.3.1.2. Composés inertes lourds (densité >1.35)

Aucun élément métallique ou en verre de plus de 2 mm n'a été détecté dans les quatre composts analysés.

En ce qui concerne leur composition en cailloux et fines, les deux composts issus de Tours nord (plateau argilo-calcaire), RCVL02 et RCVL07, présentent les pourcentages de fines les plus réduits. Les pourcentages de cailloux et calcaire de plus de 2 mm sont équivalents dans les quatre composts. **La norme NF U 44-051 ne fixe pas de valeur seuil pour ce paramètre.**

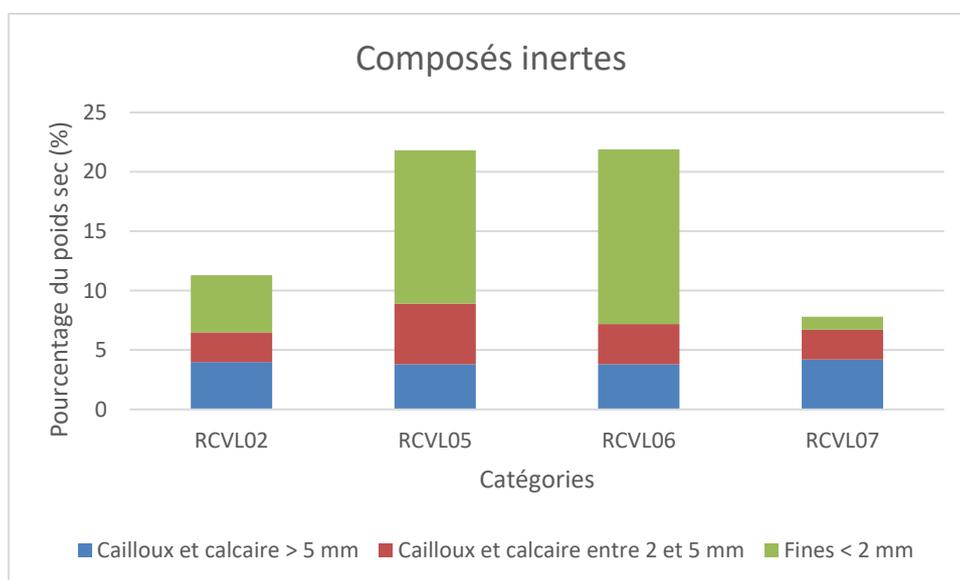


Figure 120: Granulométrie des composés minéraux inertes.

**Les quatre composts satisfont donc aux valeurs limites en inertes et impuretés de la norme NF U 44-051.**

### 3.6.7.1.3.2. Oligoéléments et éléments traces métalliques (ETM)

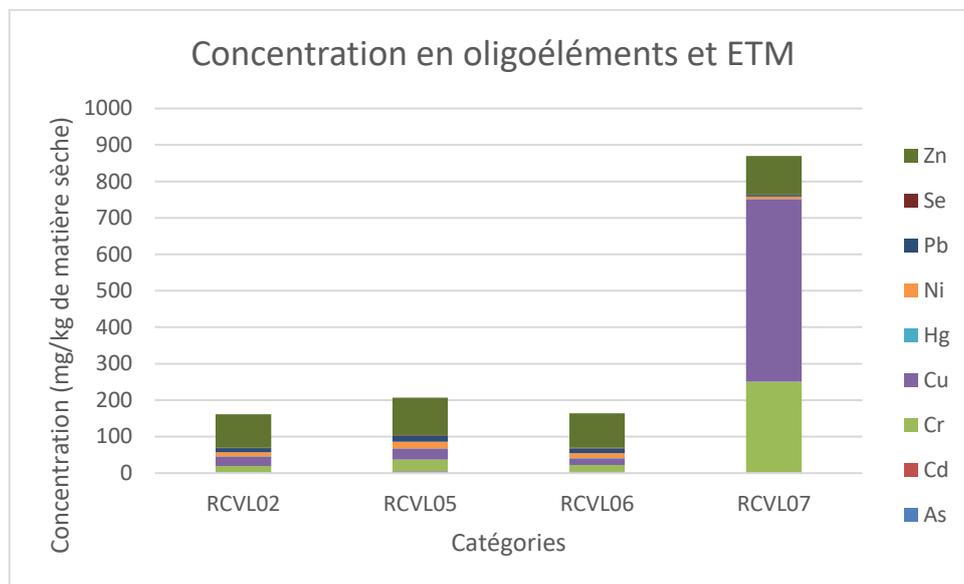


Figure 121: Teneurs en oligoéléments et éléments traces métalliques des composts analysés.

**Trois des quatre composts analysés respectent les seuils réglementaires en matières d'oligoéléments et d'ETM.**

Le compost issu du Compostou RCVL7 **ne respecte pas les seuils de chrome (249 mg/kg de MS au lieu de 120) et de cuivre (500 mg/kg de MS au lieu de 300)** fixés par la norme NF U 44-051.

### 3.6.7.1.3.3. Composés traces organiques

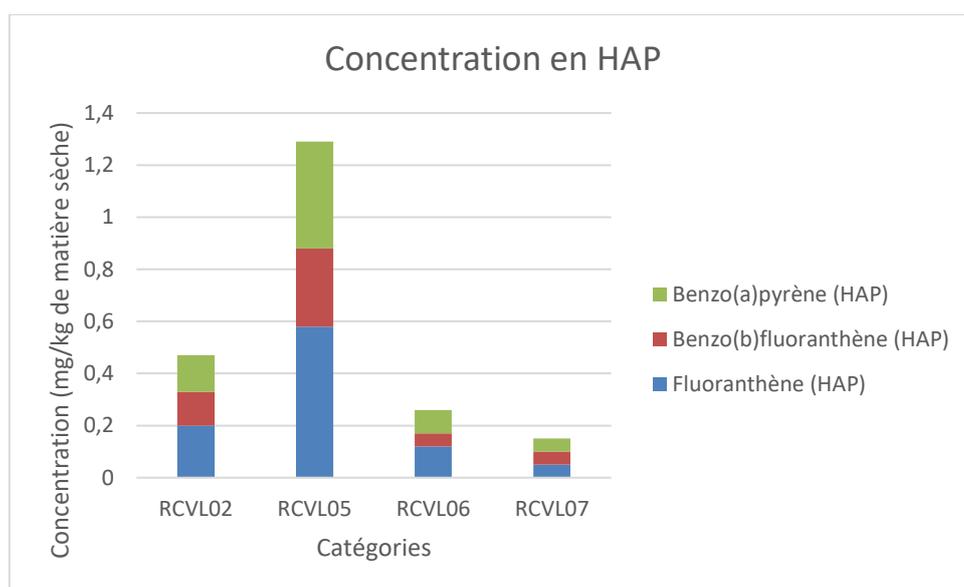


Figure 122: Concentration en composés traces organiques.

**Tous les composts analysés respectent les seuils réglementaires pour les 3 hydrocarbures aromatiques polycycliques recherchés.**

#### 3.6.7.1.3.4. Micro-organismes pathogènes

Tableau 9: Quantification des pathogènes indicateurs de traitement.

Organismes	RCVL02	RCVL05	RCVL06	RCVL07
Entérocoques (nombre/g de compost brut)	3200	290	570	1200
<i>Escherichia coli</i> (UFC/g de compost brut)	<100	<100	<1000	<10000
Œufs d'Helminthes viables (nombre/1,5 g de compost brut)	0	0	0	0
<i>Salmonella</i> spp (nombre dans 25 g de compost brut)	0	0	0	0

**Tous les composts analysés respectent les seuils d'innocuité en culture maraîchère (les plus drastiques) de la norme NF U 44-051 en ce qui concerne les micro-organismes pathogènes** (absence de *Salmonella* et d'œufs d'helminthes viables). **Les indicateurs de traitement révèlent le caractère hygiénisant du processus de compostage pour les compost RCVL02 et RCVL05.** La présence de colonies non caractéristiques interférentes a empêché le laboratoire de dénombrer les colonies d'*E. coli* dans les échantillons RCVL06 et RCVL07. Toutefois **tous ces composts présentent des concentrations en entérocoques réduites**, inférieures au seuil maximum recommandé de 10 000 entérocoques/gramme de compost brut, ce qui révèle l'efficacité du traitement *a minima* sur cette catégorie de micro-organismes.

#### 3.6.7.1.3.5. Seuils agronomiques

### 3.6.7.1.3.5.1. Matière sèche (MS)

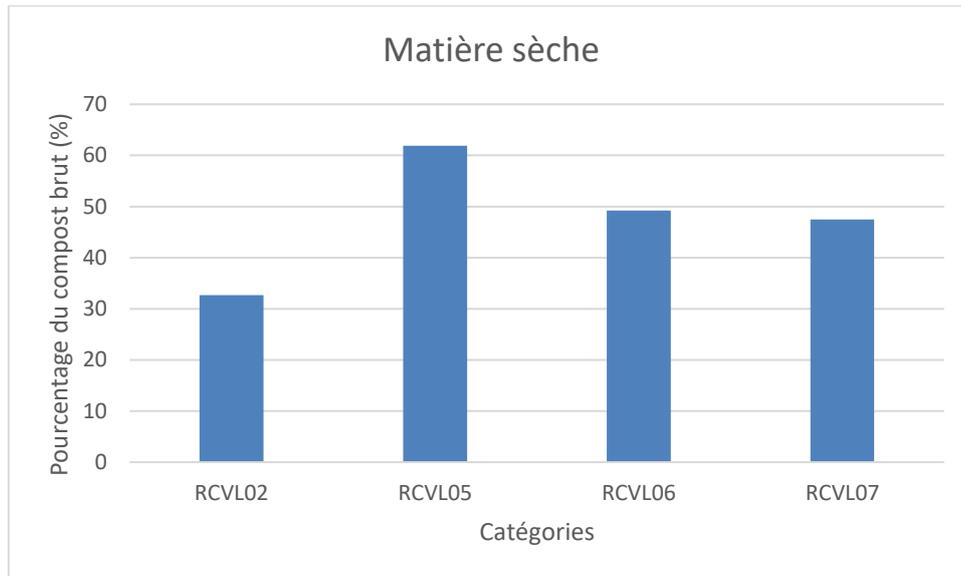


Figure 123: Teneurs en MS des quatre échantillons de compost analysés.

La teneur en MS des quatre composts analysés varie de 32,7 à 61,9%. **La norme NF U 44-051 ne fixe pas de valeur seuil pour ce paramètre.**

### 3.6.7.1.3.5.2. Azote

#### Azote total (N)

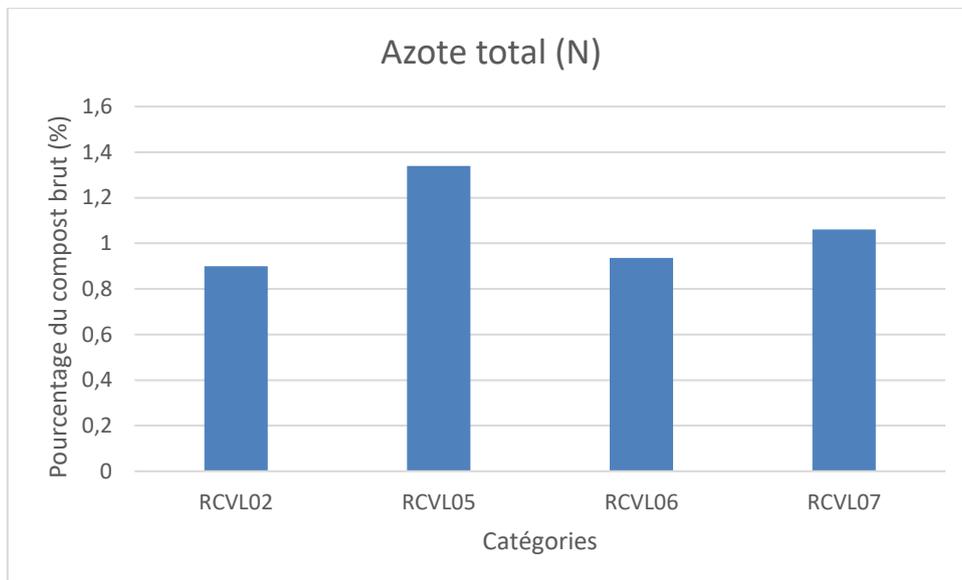


Figure 124: Teneurs en azote total des quatre échantillons de compost analysés.

Les teneurs en N total variaient de 0,9 à 1,34% du compost brut. Tous les composts **satisfont à la norme NF U 44-051 en ce qui concerne ce critère** (seuil de 3% du compost brut maximum).

## Azote ammoniacal (N-NH<sub>4</sub>), azote nitrique (N-NO<sub>3</sub>) et azote uréique

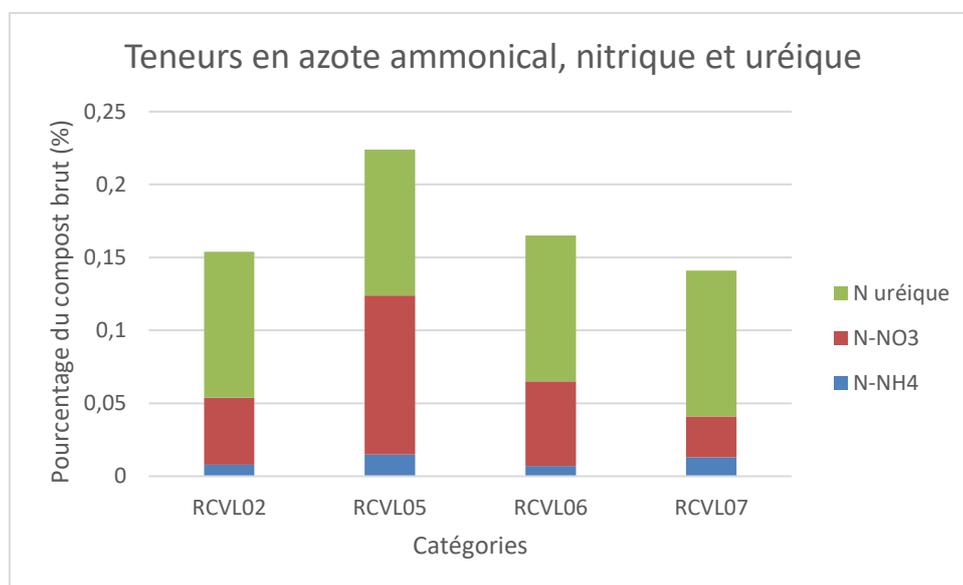


Figure 125: Teneurs en azote ammoniacal, nitrique et urique des composts analysés.

Les teneurs en N-NH<sub>4</sub> variaient de 0,007 à 0,015% du compost brut, le compost RCVL05 étant le plus riche en azote ammoniacal. Ce compost contenait également la teneur en N-NO<sub>3</sub> la plus élevée (0,109% du compost brut). Les teneurs en azote urique étaient toutes inférieures à 0,1% du compost brut.

**La conformité à la norme NF U 44-051 est respectée pour ces trois formes azotées.**

### 3.6.7.1.3.5.3. Teneurs en phosphore (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), potassium (K<sub>2</sub>O), calcium (CaO) et magnésium (MgO)

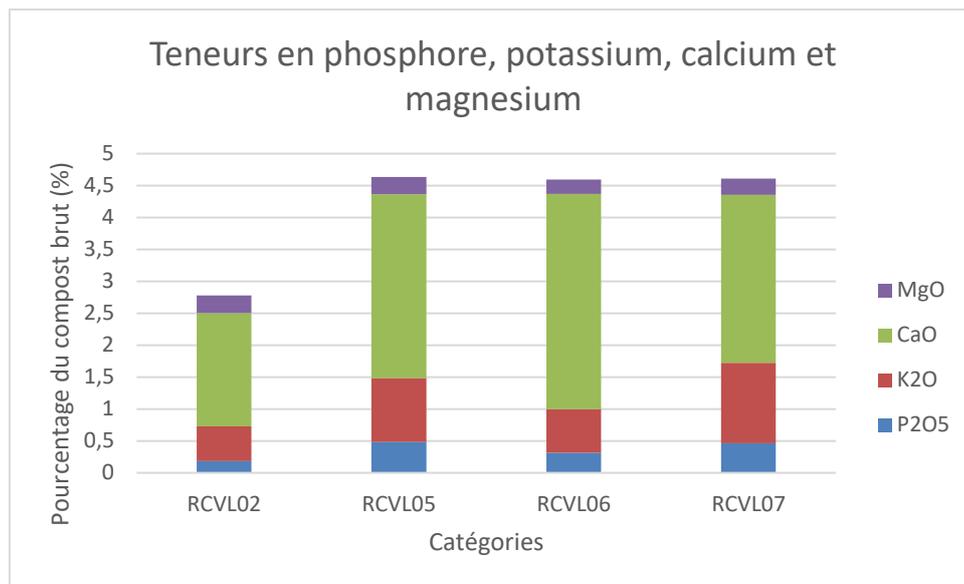


Figure 126: Teneurs en phosphore, potassium, calcium et magnésium des composts analysés.

Les teneurs en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et en K<sub>2</sub>O des quatre composts analysés varient de 0,185% à 1,26%. **Ils respectent donc la norme NF U 44-051, qui fixe un seuil limite de 3% pour chacun de ces éléments.**

**La norme est également respectée pour les quatre composts en ce qui concerne la formule NPK (N + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+ K<sub>2</sub>O) qui doit être inférieure à 7% du compost brut.**

Les composts présentent des teneurs en magnésium homogènes, comprises entre 0,225% et 0,274% et des teneurs en calcium variant de 1,78% à 3,37%. Il n'y a pas de seuil réglementaire pour ces deux éléments.

#### 3.6.7.1.3.5.4. Rapport carbone total sur azote total (C/N) et pourcentage de matière sèche (MS)

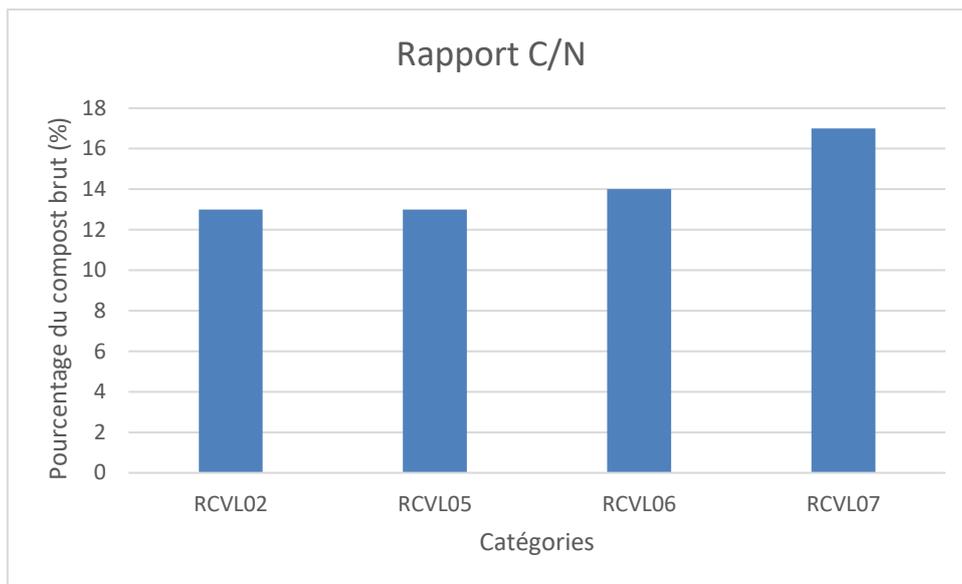


Figure 127: Rapports C/N des composts analysés.

**Tous les composts analysés ont des rapports C/N qui satisfont la norme NF U 44-051 (valeur seuil de 8).**

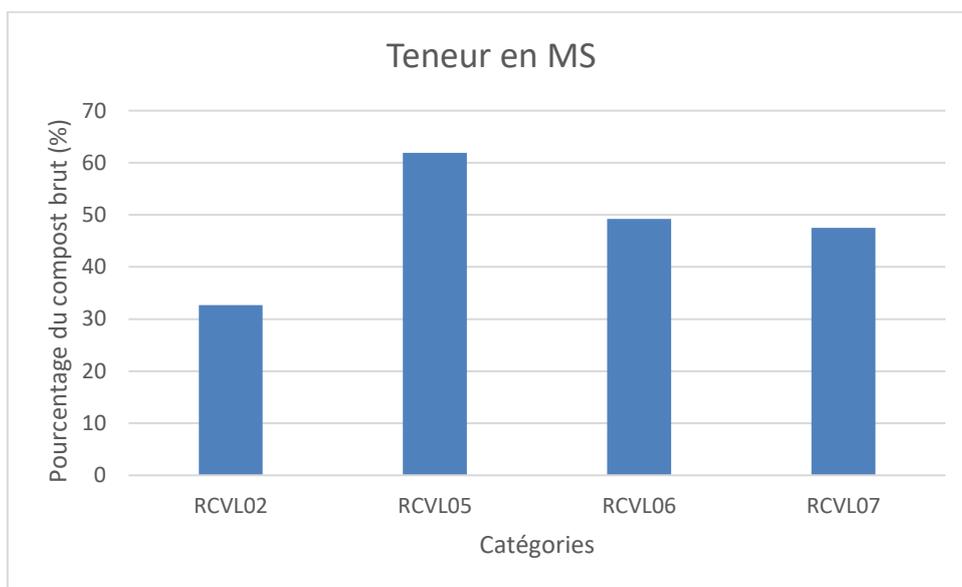


Figure 128: Teneur en matière sèche des composts analysés.

**Tous les composts analysés ont des pourcentages de matière sèche supérieurs à 30%, conformément à la norme NF U 44-051.**

#### 3.6.7.1.3.5.5. Matière organique

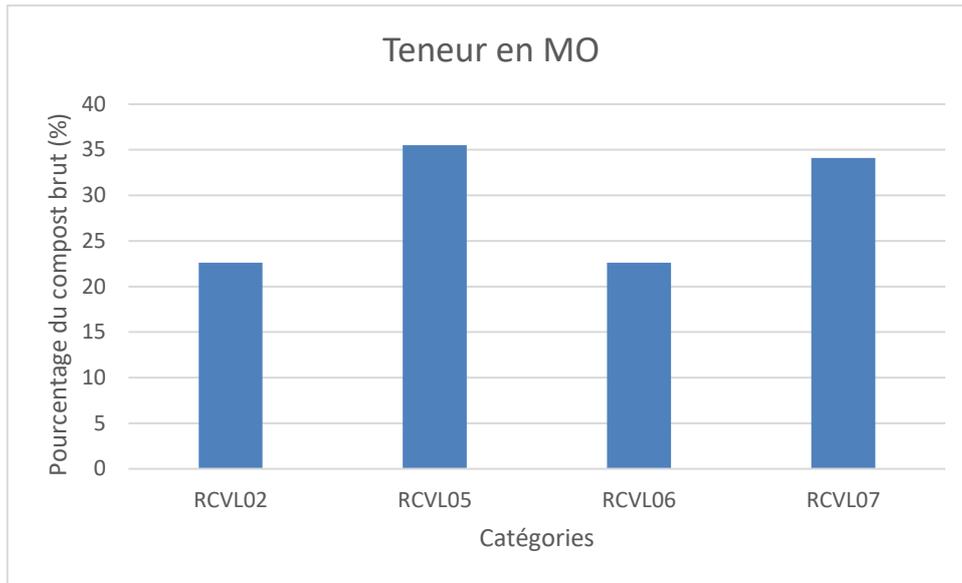


Figure 129: Teneur en matière organique.

La valeur seuil réglementaire d'au moins 30% de matière organique dans le compost brut est respectée pour les quatre composts analysés.

#### 3.6.7.1.3.5.6. Masse volumique compactée

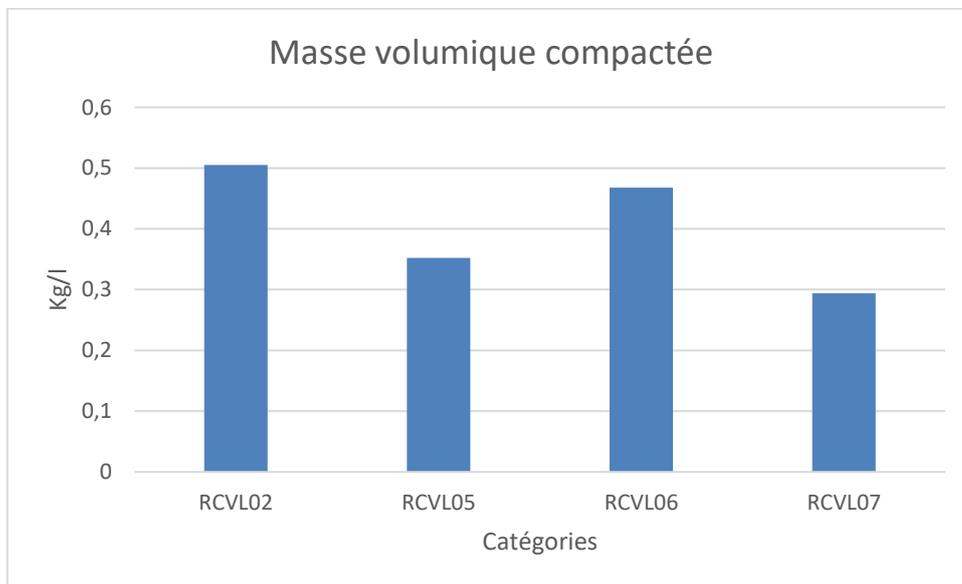


Figure 130: Masse volumique compactée des quatre composts analysés.

La masse volumique des composts analysés est comprise entre 0,294 (RCVL07) et 0,505 (RCVL02) kg/l. La masse volumique compactée moyenne des quatre échantillons est de 0,405 kg/l.

### 3.6.7.1.3.6. Indice de stabilité de la matière organique (ISMO)

#### 3.6.7.1.3.6.1. Composition de la matière brute

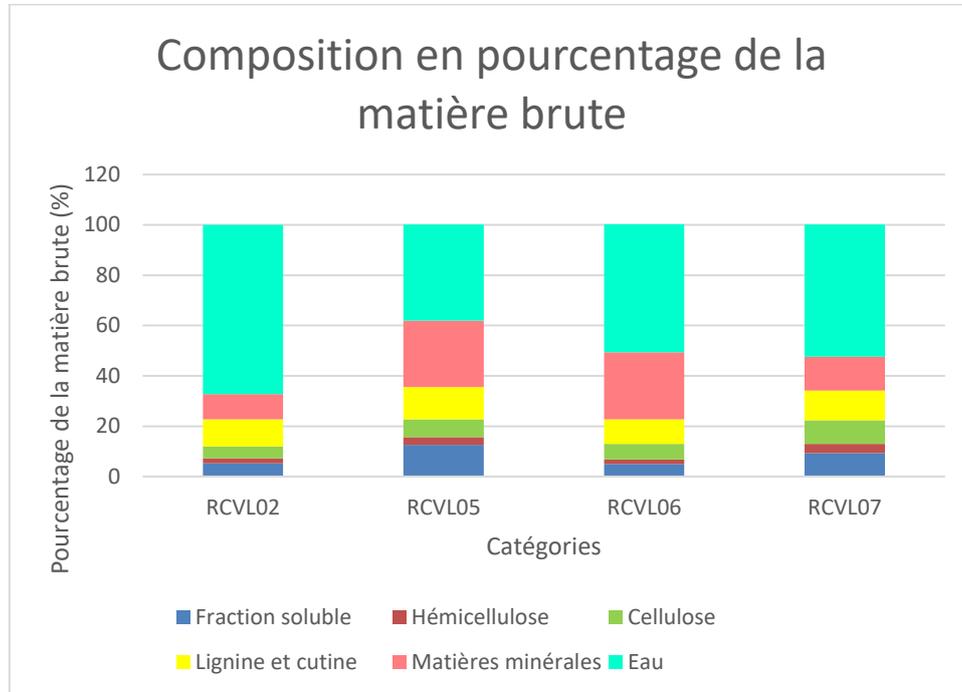
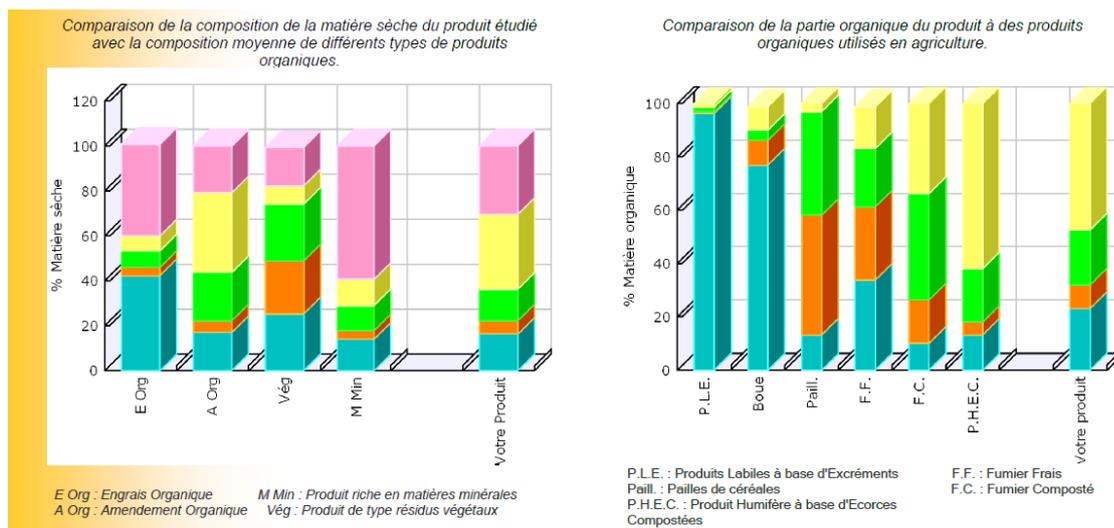


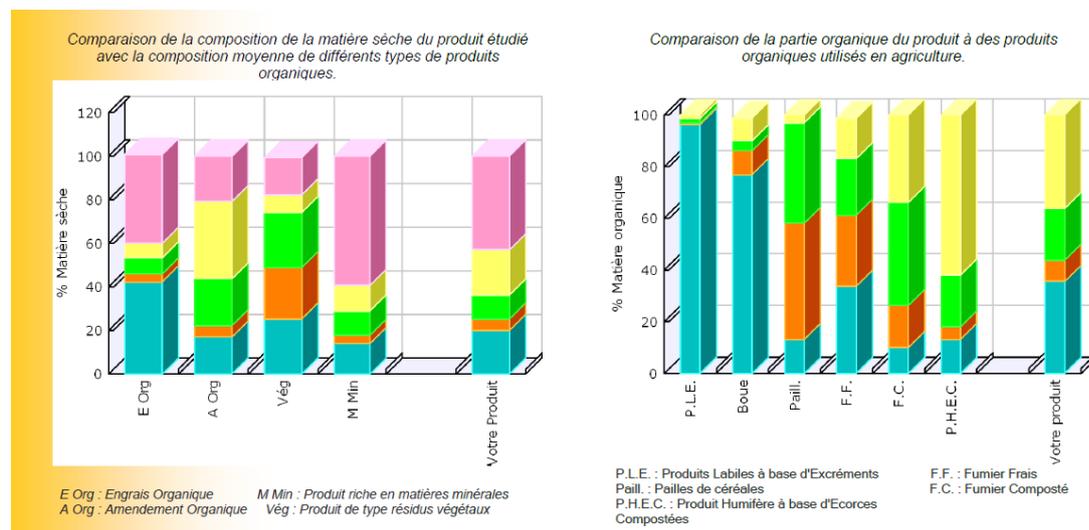
Figure 131: Composition de la matière brute des composts analysés.

Le compost RCVL02 se caractérise par un pourcentage d'humidité élevé (67,3% d'eau) et des teneurs en matières minérales et en cellulose faibles (respectivement 10 et 4,7%). La composition de sa matière sèche présente des similitudes avec celle d'un amendement organique de référence. La composition de sa matière organique est comparable à celle d'un produit humifère à base d'écorces compostées qui serait plus pauvre en lignine et cutine et plus riche en fraction soluble.



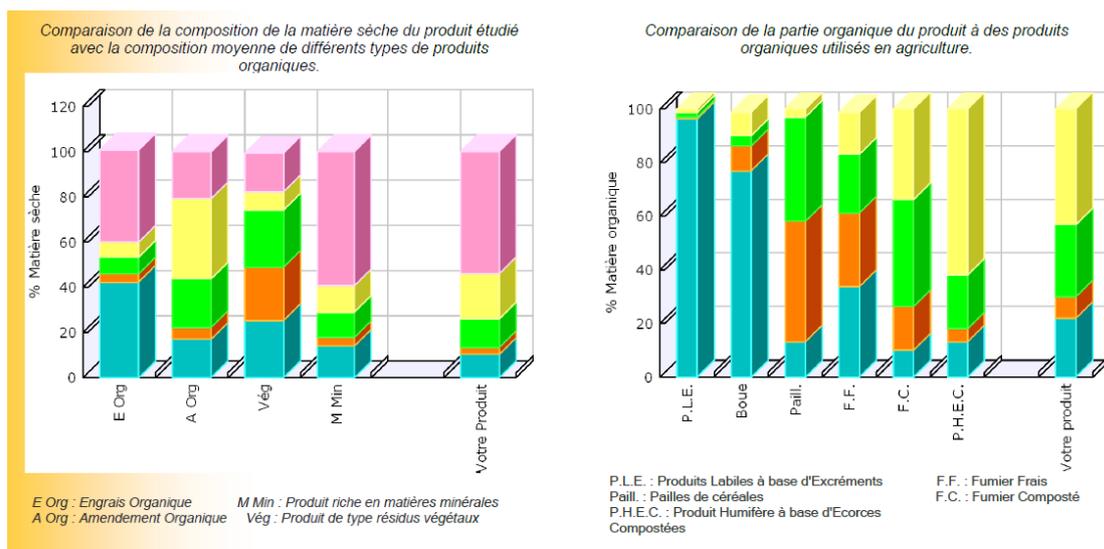
**Figure 132: Comparaison du compost RCVL02 à des produits organiques de référence (extrait de document d'analyse ISMO SADEF). Rose : fraction minérale ; jaune : lignine et cutine, vert : cellulose ; rouge : hémicellulose ; bleu : fraction soluble.**

Le compost RCVL05 se caractérise par des teneurs en matières minérales, en fraction soluble et en lignine et cutine élevées (respectivement 26,4, 12,6 et 12,9%) et par un pourcentage d'humidité faible (38,1% de la matière brute). La composition de sa matière sèche présente des similitudes avec celle d'un produit de référence riche en matières minérales. La composition de sa matière organique est à la fois évocatrice de celle d'un produit humifère à base d'écorces compostées et de celle d'un fumier composté.



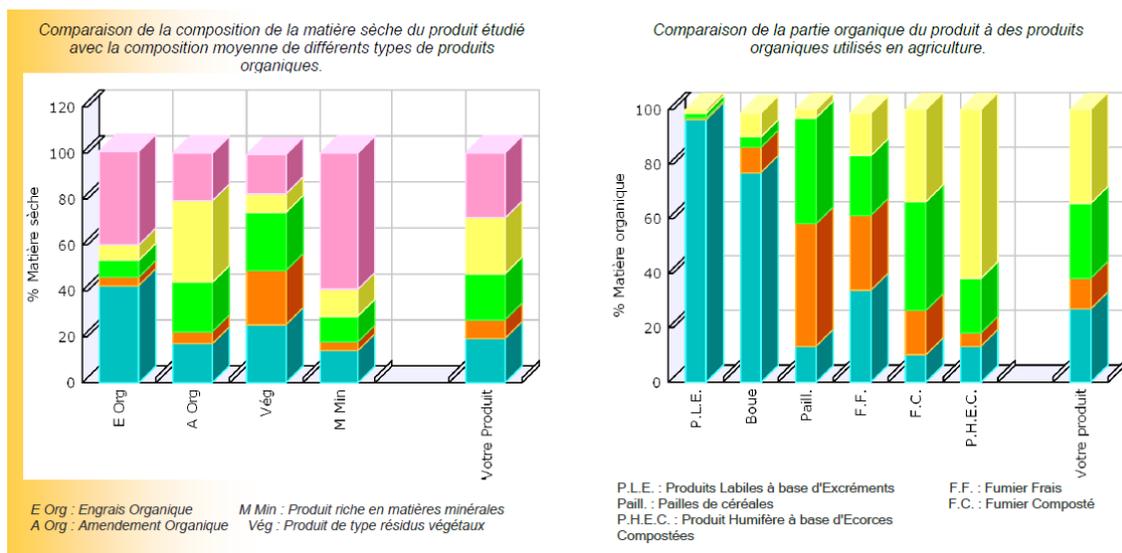
**Figure 133: Comparaison du compost RCVL05 à des produits organiques de référence (extrait de document d'analyse ISMO SADEF). Rose : fraction minérale ; jaune : lignine et cutine, vert : cellulose ; rouge : hémicellulose ; bleu : fraction soluble.**

Différemment, le compost RCVL06 a une teneur élevée en matières minérales (26,6%) et des teneurs en fraction soluble, en lignine et cutine et en hémicellulose faibles (respectivement 5, 9.8 et 1,8%). La composition de sa matière sèche présente des similitudes avec celle d'un produit de référence riche en matières minérales. La composition de sa matière organique est proche de celle d'un produit humifère à base d'écorces compostées.



**Figure 134: Comparaison du compost RCVL06 à des produits organiques de référence (extrait de document d'analyse ISMO SADEF). Rose : fraction minérale ; jaune : lignine et cutine, vert : cellulose ; rouge : hémicellulose ; bleu : fraction soluble.**

Enfin, le compost RCVL07 présente des teneurs élevées en cellulose (9,4%) et hémicellulose (3,7%) et des valeurs intermédiaires partout ailleurs. La composition de sa matière sèche présente des similitudes avec celle d'un amendement organique de référence. La composition de sa matière organique est à la fois proche de celle d'un produit humifère à base d'écorces compostées et de celle d'un fumier composté.



**Figure 135: Comparaison du compost RCVL07 à des produits organiques de référence (extrait de document d'analyse ISMO SADEF). Rose : fraction minérale ; jaune : lignine et cutine, vert : cellulose ; rouge : hémicellulose ; bleu : fraction soluble.**

Au total les composts RCVL02 et RCVL06 contiennent 0,9% d'azote organique, le compost RCVL07 en contient 1% et le compost RCVL05, 1,2%. L'azote organique est contenu dans les différentes fractions organiques (cellulose, hémicellulose, etc...) et ne doit donc pas être comptabilisé en plus de celles-ci dans la composition de la matière sèche et de la matière organique (communication personnelle SADEF).

### 3.6.7.1.3.6.2. Estimation du potentiel humique

Les indices ISMO et les potentiels de MO stables dans les composts bruts ou secs sont donnés dans le tableau suivant :

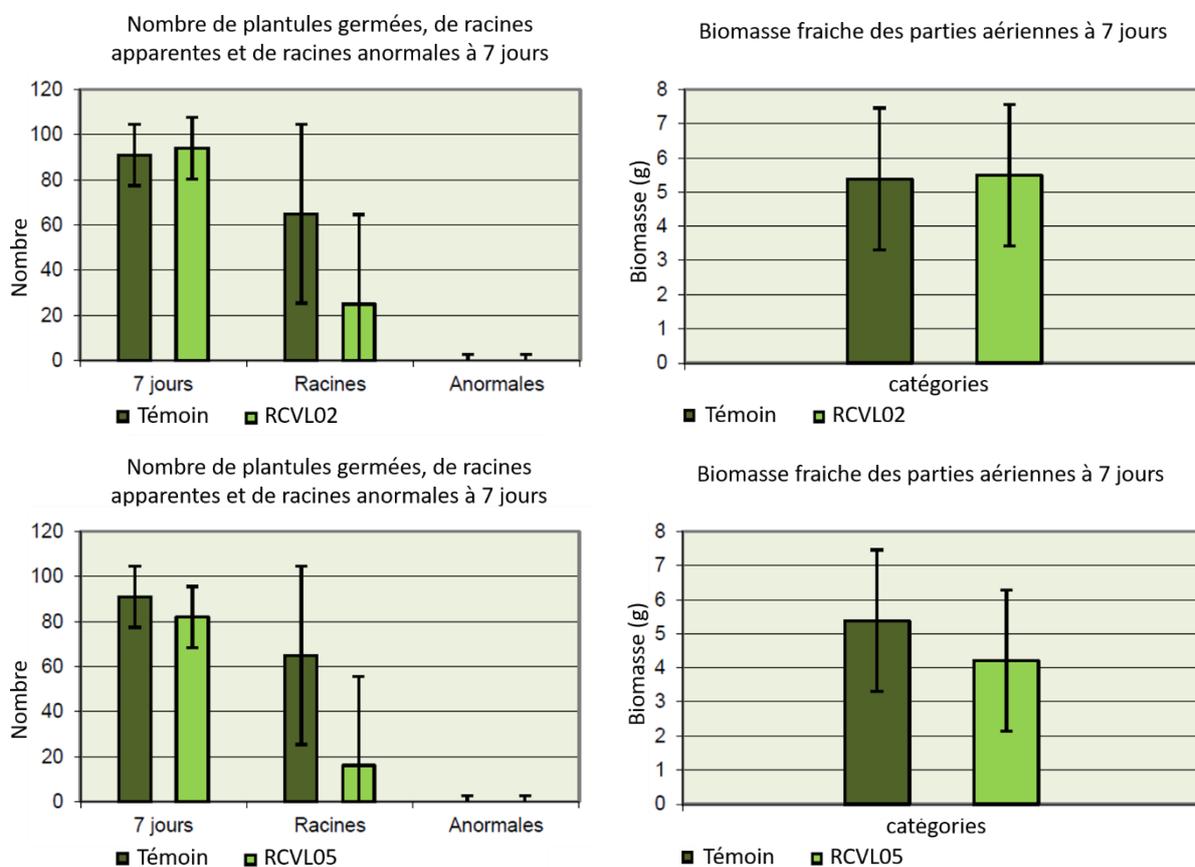
**Tableau 10: Indices ISMO et potentiels de MO stable.**

Paramètres calculés	RCVL02	RCVL05	RCVL06	RCVL07
Carbone organique minéralisé à 3 jours (% du carbone organique du produit)	2	3.2	2	3
Indice ISMO (% de la MO)	80,5	76,2	75,5	69,7
Potentiel de MO stable (kg/t matière brute)	183	271	171	238
Potentiel de MO stable (kg/t de matière sèche)	559	437	347	501

Le calcul de l'indice ISMO indique que 69,7 à 80,5% de la matière organique des composts analysés résisterait à la minéralisation à court terme. Ces composts constituent donc des amendements organiques relativement stables. L'incertitude sur le calcul de la valeur de chaque ISMO est toutefois de l'ordre de plus ou moins 15% (communication personnelle SADEF).

### 3.6.7.1.3.6.3. Test du cresson

Les résultats des tests du cresson menés sur les quatre échantillons de compost sont présentés dans les figures suivantes (adaptées du rapport d'analyse SADEF).



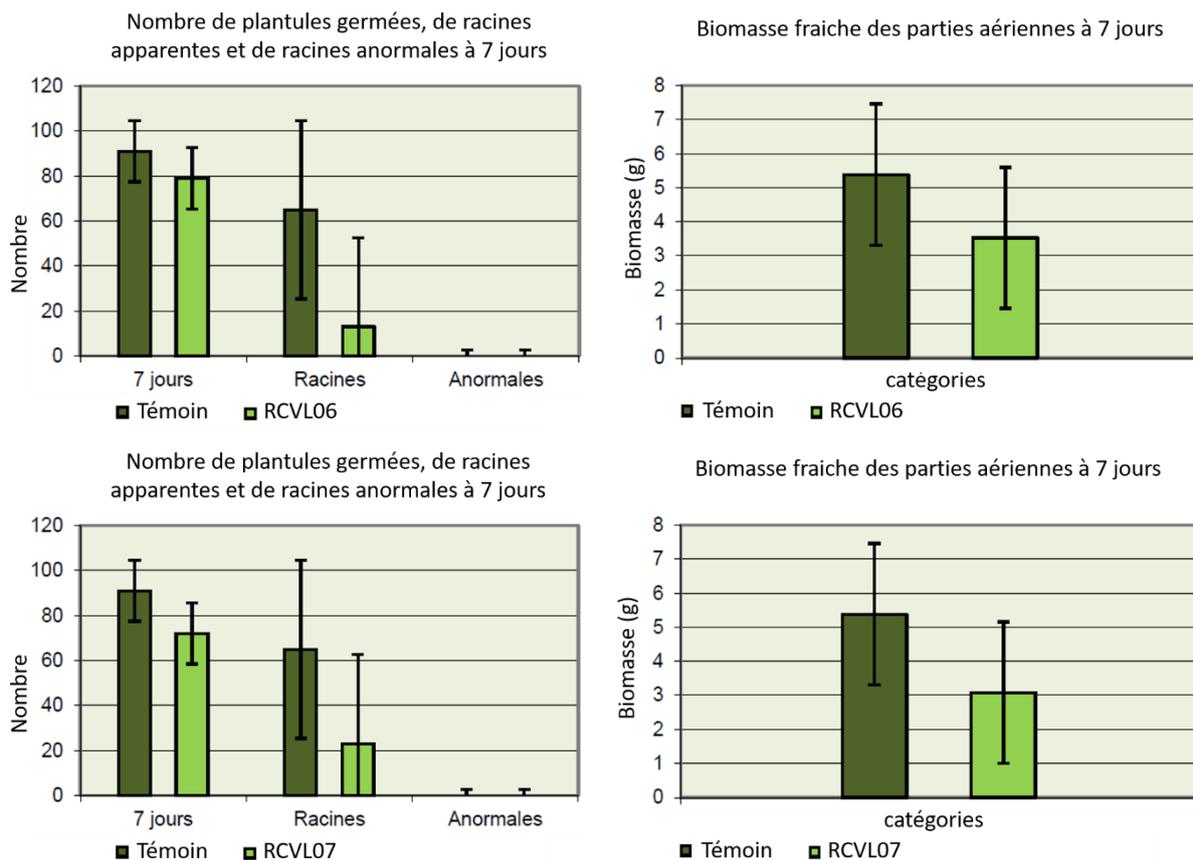


Figure 136: Résultats des tests du cresson menés sur les quatre composts analysés.

Aucun des composts analysés ne présentait de signes de phytotoxicité. Le développement radiculaire et la production de biomasse des plantules de cresson en contact avec le compost n'étaient pas significativement différents de celui des témoins, indiquant que la richesse en éléments minéraux de ces produits ne semblait pas suffisante pour que ces produits organiques soient qualifiés d'engrais. Il s'agit plutôt d'amendements modifiant la qualité du sol.

#### 3.6.7.1.3.6.4. Contamination par des adventices

En comparaison d'un échantillon témoin de tourbe blonde, de nombreuses adventices ont germé à partir de graines et propagules présentes dans les composts analysés. Le taux de salissure le plus élevé a été observé avec le compost RCVL05 (24 adventices à 15 jours).

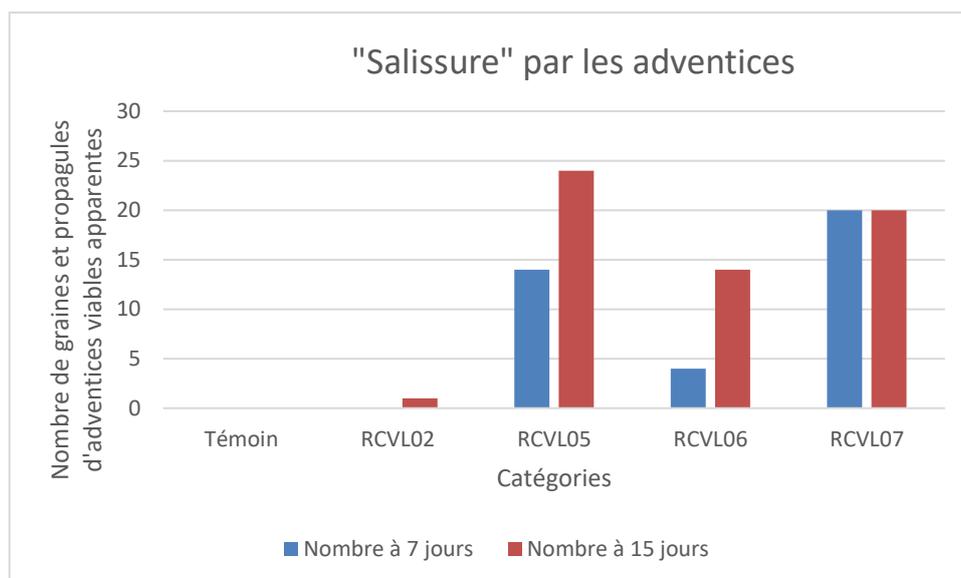


Figure 137: Nombres d'adventices viables observées à 7 jours et à 15 jours à partir des quatre composts analysés.

#### 3.6.7.1.4. Discussion

Trois composts issus de Compostous sur les quatre analysés de manière indépendante (RCVL02, RCVL05 et RCVL06), satisfont totalement aux exigences de la dénomination n°5 de la norme NF U 44-051, désignant des « composts de fermentescibles alimentaires et/ou ménagers ». **Ces composts sont donc de qualité au moins équivalente aux composts commerciaux.** Le respect des seuils d'innocuité permet même un usage en cultures maraîchères, plus exigeantes que les autres cultures. A titre de comparaison, une analyse portant sur dix-sept sites de compostage partagés parisiens classiques avait montré en 2017 que seuls 1/3 des composts analysés satisfaisaient à la norme NF U 44-051 (Bouin *et al.*, 2017). La composition de la matière sèche de nos composts analysés est évocatrice d'un produit riche en matières minérales. Celle de leur matière organique présente des similitudes, d'une part, avec un fumier composté (richesse en cellulose et hémicellulose) et d'autre part, avec un produit humifère à base d'écorces compostées (richesse en lignine et cutine). Amendements organiques stables (ISMO d'environ 76%), ces composts contiennent environ quatre fois moins d'azote minéralisé (azote ammoniacal, azote uréique et azote nitrique) immédiatement disponible pour les plantes qu'une tourbe blonde commerciale (Armefflor, 2001). Ceci peut expliquer pourquoi, sans être phytotoxiques, ces composts n'ont pas eu d'effet stimulant à 7 jours sur la croissance de plantules de cresson alénois, contrairement au témoin tourbe blonde, dans les conditions expérimentales de l'analyse

indépendante menée par SADEF. Ces résultats contrastent légèrement avec ceux que nous avons obtenus à l'issue de notre propre test du cresson, qui montraient que le compost RCVL06 avait un léger effet négatif sur la germination des graines de cresson à 3 jours. Cet effet négatif semble donc s'estomper après cette période. D'une manière générale, la composition de ces composts suggère qu'ils pourraient agir sur le long terme, en libérant progressivement dans le sol du carbone et de l'azote minéralisés à partir de leurs réserves de carbone et d'azote organiques. Ces produits ne sont pas appropriés pour un usage immédiat en tant que fertilisants. Pour cela, leur maturation devrait être prolongée de plusieurs mois avant utilisation, afin d'augmenter leur teneur en carbone et azote minéralisés.

**Une vraie satisfaction est de constater que les quatre composts analysés respectent les seuils d'innocuité imposés par la norme NF U 44-051. Il semble donc que le compostage de basse énergie (dit « froid ») soit autant capable d'hygiéniser des biodéchets que le compostage de haute énergie (dit « chaud ») traditionnel.** L'évaluation d'indicateurs de traitement vis-à-vis des entérocoques confirme l'efficacité du procédé pour les quatre composts analysés. De plus, son efficacité vis-à-vis d'*E. coli* a pu être confirmée pour deux des composts analysés (RCVL05 et RCVL02). Ce résultat positif a deux origines probables. Tout d'abord, il a été recommandé aux utilisateurs de ne pas composter de litières animales dans les Compostous, ce qui a dû réduire l'occurrence des micro-organismes fécaux dans les composts. Par ailleurs, la présence d'une microfaune diversifiée et d'une abondante microflore bactérienne libre ou associée aux animaux, a pu jouer un rôle important dans la régulation des micro-organismes pathogènes circulants. Au Japon et aux Pays-Bas, des expériences prometteuses de désinfection biologique des sols (BSD en anglais) ont été menées en conditions contrôlées au début des années 2000 (Momma *et al.*, 2013). Elles ont démontré qu'en apportant de la matière organique facilement décomposable (débris végétaux, éthanol dilué, fumier...), en irriguant le sol et en le recouvrant d'une couche imperméable (film plastique), il est possible de réduire significativement la présence de micro-organismes phytopathogènes dans le sol même à des températures inférieures à 40°C. Cette méthode est plus efficace que la simple solarisation (pose de films plastiques sur le sol et pasteurisation des couches superficielles en été) ou que l'irrigation seule. L'effet désinfectant repose sur l'activité biologique des micro-organismes anaérobies présents dans le sol et dans les amendements organiques rapportés. La température

n'influencerait en fait que la durée nécessaire à l'obtention d'une désinfection efficace ; une température de 41°C réduit à quelques semaines le temps nécessaire, contre plusieurs mois à 25-30°C. Il serait également possible d'obtenir une désinfection efficace en conditions aérobies, en choisissant avec soin la nature des amendements organiques (Bonanomi *et al.*, 2007). Une litière végétale décomposée et âgée de 6 mois a ainsi la propriété de réduire d'avantage la croissance de bactéries ou de champignons qu'une litière fraîche (Bonanomi *et al.*, 2017). Ces travaux nuancent deux notions fondamentales enseignées traditionnellement aux référents de site et aux Guides-Composteurs : le lien de causalité, supposé direct, entre température élevée et hygiénisation des biodéchets et la méfiance vis-à-vis de la décomposition anaérobie. Ainsi il est souvent recommandé aux personnes en formation de contrôler le taux d'humidité du compost et de le brasser profondément et fréquemment pour apporter de l'air en profondeur. Le but à atteindre par cette pratique est de détruire les organismes pathogènes par une élévation importante de température (idéalement à plus de 50°C) due à l'activité de micro-organismes aérobies. Il semblerait que dans certaines conditions, cet objectif sanitaire puisse aussi être atteint à moins de 30°C et sous une faible teneur en oxygène, grâce à certaines bactéries anaérobies. Dans ces conditions il est aussi possible d'obtenir une bonne décomposition de la matière organique tout en limitant les nuisances: au Canada, une technique de méthanisation en conditions micro-aérobies (faible teneur en oxygène) et à basse température (15-25°C, digestion dite « psychrophile ») a ainsi été développée pour optimiser la décomposition de matière organique tout en limitant la production de sulfure d'hydrogène (Boivin, 2010).

Les composts issus des Compostous sont particulièrement vivants. Nous avons pu constater la présence de nombreux invertébrés et leur persistance plusieurs semaines durant après le prélèvement. La composition, la structure et les fonctions de cette biodiversité feront prochainement l'objet de descriptions détaillées. Les composts analysés contenaient également de nombreuses graines et propagules d'adventices viables, provenant de dicotylédones comestibles pour la plupart (cucurbitacées, solanacées). En culture maraichère, la présence de cette « salissure » pourrait s'avérer gênante. Il existe toutefois des moyens de remédier à sa présence tels que la pratique du faux semis, qui consiste à épuiser le réservoir de graines viables du sol avant le semis proprement dit, ou la mise en place d'un paillis épais permanent au-dessus du compost épandu pour priver de lumière et d'arrosage les jeunes plantules. Une inactivation du

compost à la chaleur ou par irradiation gamma, préalablement à son épandage, peut détruire ces adventices mais augmentera la facture énergétique de la culture et réduira l'activité biologique du compost, nécessaire à la minéralisation du carbone et de l'azote organiques. En contexte d'usage en bas d'immeuble, nous avons constaté que la levée de ces semis spontanés était plutôt bien accueillie par les utilisateurs, ravis de voir pousser des courges, des pommes de terres et des tomates « gratuits », qui sont autant de signes tangibles de la fertilité du compost produit.

**Nous avons également constaté la quasi absence de polluants majeurs dans ces composts et notamment l'absence de micro-fragments de plastique, de verre, de métal ou d'hydrocarbures aromatiques polycycliques.** Ceci est le résultat direct des actions de préventions mises en œuvre auprès des utilisateurs des Compostous (signalétique, consignes verbales) interdisant ces matières et en particulier le dépôt de sacs en plastiques dits « biodégradables ». Jusqu'en 2020, ces sacs pourront encore contenir 60% de plastique issu de la pétrochimie, 50% entre 2020 et 2025 puis 40% après 2025<sup>41</sup>. Il serait utile qu'à l'avenir ils soient plus facilement repérables, éventuellement avec une couleur spécifique. En effet, s'il est justifié d'exclure ces sacs composites du compostage de proximité, ce principe de précaution exclue malheureusement aussi les sacs composés à 100% de matières végétales biodégradables (en amidon de maïs ou de pomme de terre par exemple). Notons que la communauté fongique du compost a aussi pu contribuer à la dépollution de ce milieu, d'autant plus facilement qu'elle a été épargnée par l'absence d'élévation importante de la température, qui leur est défavorable à plus de 30°C (Pépin, 2013). Plusieurs travaux scientifiques ont permis de révéler la capacité de champignons du sol appartenant aux ascomycètes (*Aspergillus sp.*), aux basidiomycètes (*Pleurotus ostreatus*) ou aux zygomycètes (*Absidia cylindrospora*) à dépolluer efficacement des sols contaminés par des éléments-traces métalliques (Albert *et al.*, 2018 et 2019 ; Khan *et al.*, 2019) ou des hydrocarbures (Robichaud *et al.*, 2019). L'intérêt de l'utilisation combinée de compost municipal, de pleurotes et d'une variété nord-américaine de saules (*Salix planifolia*) a très récemment été mise en évidence par Robichaud *et al.* (2019), pour la dépollution de sols canadiens contaminés au diesel. De manière intéressante, cet effet a été observé en conditions climatiques subarctiques, sous des températures extérieures variant de -27°C

---

<sup>41</sup> Décret n° 2016-379 du 30 mars 2016 relatif aux modalités de mise en œuvre de la limitation des sacs en matières plastiques à usage unique.

l'hiver à +28°C l'été, renforçant l'idée que des températures inférieures à 40°C peuvent offrir aux champignons des conditions optimums pour agir en tant que bioépurateurs. La mycoremédiation est l'une des solutions d'avenir envisagées pour décontaminer écologiquement les quelques 340 000 sites industriels européens pollués (Albert *et al.*, 2018). Elle pourrait offrir des exutoires importants aux composts de déchets ménagers, en les utilisant comme support de culture et d'acclimatation pour les champignons.

**Seul le compost RCVL07 a présenté des teneurs en chrome et en cuivre supérieures aux seuils admissibles pour le respect de la norme NF U 44-051.** Comme le rappellent Thierry LEBEAU, Elisabeth RÉMY et Marine CANAVESE dans leur cours sur les jardins urbains et la pollution des sols (Lebeau *et al.*, 2017) : « *Actuellement, il n'existe pas de valeur limite concernant la quantité maximale admissible pour une substance toxique dans le sol, alors que ces limites existent lorsqu'il s'agit de la pollution de l'air ou de la pollution de l'eau* ». En effet, l'Arrêté du 7 janvier 2002<sup>42</sup>, fixant ces valeurs limites, a été abrogé par l'Arrêté du 12 juillet 2011<sup>43</sup>. Il imposait pour le chrome et pour le cuivre une teneur limite de 1000 mg/kg de matière sèche pour les matières organiques à épandre et de 150 et 100 mg/kg dans les sols visés par ces épandages. Nous constatons que les valeurs de chrome et de cuivre détectées dans le compost RCVL07, bien que trop élevées pour le respect de la norme NF U 44-051, sont respectivement quatre fois et deux fois plus faibles que les teneurs limites tolérées jusqu'en 2011. Il est assez probable que cette contamination provienne du sol au-dessous de ce Compostou, dont la teneur en éléments-traces métalliques nous est inconnue. Il n'est toutefois pas exclu que la contamination ait pu venir des biodéchets apportés par les utilisateurs. Selon la nutritionniste Angélique Houlbert<sup>44</sup> et Léa Zubiria, Diététicienne-Nutritionniste<sup>45</sup>, certains aliments peuvent en effet contenir des teneurs en chrome et en cuivre élevées :

---

<sup>42</sup> Relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées soumises à déclaration sous la rubrique n° 2170 " engrais et supports de culture (fabrication des) à partir de matières organiques " et mettant en œuvre un procédé de transformation biologique aérobie (compostage) des matières organiques.

<sup>43</sup> Relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées de compostage soumises à déclaration sous la rubrique n° 2780

<sup>44</sup> [http://www.biolineaires.com/zoom\\_sur\\_le\\_chrome/](http://www.biolineaires.com/zoom_sur_le_chrome/)

<sup>45</sup> <https://www.passeportsante.net/fr/Nutrition/PalmaresNutriments/Fiche.aspx?doc=cuivre>

Tableau 11: Teneurs en chrome et en cuivre de différentes catégories d'aliments.

Principales sources de Chrome pour 100g (calcul en mg)		Principales sources de Cuivre pour 100g (en mg)	
Levure bière	220	Foie, veau, cuit	20,1
Moules	128	Foie, agneau, cuit	8,45
Noix du Brésil	100	Champignon, shiitaké, séché	5,17
Huitres	57	Abat, cuit (aliment moyen)	5,06
Foie de veau	43	Céréales complètes	4,98
Dattes séchées	29	Calmar ou calamar ou encornet	2,11
Poire	27	Noix de cajou	2
Crevettes	26	Crabe	1,99
Tomate	20	Chocolat noir	1,7
Brocoli	16	Sésame, graine	1,58
Champignons	17	Noisette	1,5
Orge complet	13	Tournesol, graine	1,5
Noisette	12	Huître	1,45
Mais	9	Noix, fraîche	1,34
Jaune d'œuf	6	Lin, graine	1,22

Or, le compostage est connu pour réduire la disponibilité des éléments-traces métalliques présents dans les biodéchets, qui s'accumulent en surface (Madrid *et al.*, 2007). Il serait intéressant de procéder à des analyses complémentaires, notamment du sol environnant et du compost produit à l'avenir. La survenue de ce problème indique qu'un réseau de composteurs urbains pourrait être utilisé pour renforcer la biosurveillance, définie par la collecte d'informations sur l'état des milieux anthropisés ainsi que sur l'incidence de la cumulation des polluants sur les organismes et les écosystèmes. Quoiqu'il en soit, ce résultat est probablement une anomalie isolée et n'est pas de nature à remettre en cause l'intérêt du Compostou pour le traitement de biodéchets par compostage de proximité ni sa capacité à produire un compost conforme à la norme NF U 44-051.

## 3.7. Divulgence d'informations scientifiques et techniques

### 3.7.1. Brevet

La requête en délivrance de brevet FR 17 70042 suit son cours depuis janvier 2017. Il faut en moyenne 3 ans et demi, voire 4 ans pour faire breveter une invention en France. Le dernier contact avec l'INPI (mi-octobre 2019) a accéléré la procédure, qui devrait aboutir dans les tous prochains mois. Le procédé de compostage Compostou a en effet été reconnu nouveau et industrialisable, ce qui doit logiquement permettre la délivrance prochaine du brevet d'invention, sous réserve d'argumenter sur le critère d'inventivité par rapport à l'existant.

L'obtention de ce brevet permettra à l'association de choisir ses partenaires pour le développement du Compostou en Région Centre Val de Loire et au-delà.

### 3.7.2. Articles de recherche

Deux articles de recherche sont actuellement en préparation, qui devraient être soumis courant 2020 à une revue spécialisée dans le traitement des déchets et à une revue spécialisée sur les initiatives territoriales en matière de développement durable.

### 3.7.3. Conférences et interventions publiques

Le projet Compostou a fait l'objet de plusieurs conférences et interventions publiques :

- **Conférence invitée par l'ADEME** lors de la Formation « Gestion de proximité des Biodéchets » du Réseau A3P Région Centre Val de Loire (02/10/2019, Bourges) ;
- **Présentation lors du séminaire des 10 ans du Réseau Compost Citoyen** (17 et 18/10/2019, Coutières) ;
- **Présentation à Jean-Michel Blanquer, Ministre de l'Education Nationale et à Yann Arthus-Bertrand** à l'école Paul-Louis Courier d'Amboise et lors de la réunion publique qui a suivi à Montlouis-sur-Loire (21/11/2019) ;
- **Intervention à la Rencontre régionale des animateurs des Conseils citoyens** en Région Centre Val de Loire (22/11/2019, Orléans) ;

- **Conférence invitée au Centre de Recherche Développement Nestlé** (22/11/2019, Notre-Dame d'Oyé) en visioconférence avec le siège du groupe ;
- **Présentation auprès d'une délégation du Réseau Compost Citoyen** de la Région Auvergne Rhône Alpes (28/11/2019, Blois)

#### 3.7.4. Retombées médiatiques du projet

La page <https://compostou.org/actualites> recense les différents articles de presse et émissions consacrées au Compostou. Depuis 2017, le projet COMPOSTOU a bénéficié de :

- 10 articles dans la presse quotidienne régionale (La Nouvelle République) ;
- 1 article dans la presse nationale (Libération) ;
- 1 émission de télévision (France 3 Centre Val de Loire) ;
- 7 articles dans la presse institutionnelle : Journal de la Délégation Centre Val de Loire du CNRS, journaux communaux (Nouâtre, Saint-Cyr-sur-Loire), journaux d'entreprises (Touraine Logement, Storengy, SNCF).

La fabrication du Compostou a également été abordée dans un mini documentaire, « Zéro Déchet à Tours » d'Emma Mari<sup>46</sup> et évoquée sur 4 radios locales (RCF Touraine, Radio Campus, Radio béton, France Bleue Touraine).

---

<sup>46</sup> Voir la séquence à partir de 8 minutes 30 du début : <https://www.zerodechettouraine.org/page/reportage-d-emma-mari-sur-les-initiatives-zero-dechet-locales>



Figure 138: Extrait du documentaire « Le Zéro Déchet à Tours » d'Emma Mari, montrant quelques étapes de la fabrication du Compostou chez E&S.

### 3.7.5. Communication

Grâce à Nicolas Béhier-Dévigne, webmaster bénévole pour Zéro Déchet Touraine, nous avons pu réaliser un site internet spécifiquement consacré à la présentation du Compostou et à la publication des actualités du projet. La plupart des articles de presse portant sur cette solution de compostage sont accessibles en ligne, ainsi que des photos de différents sites et des réponses à des questions techniques. Ce site est complété par la cartographie des composteurs partagés de Touraine (<https://www.zerodechettouraine.org/composteurs-partages-touraine>) qui permet aux internautes de localiser facilement un Compostou près de chez eux.

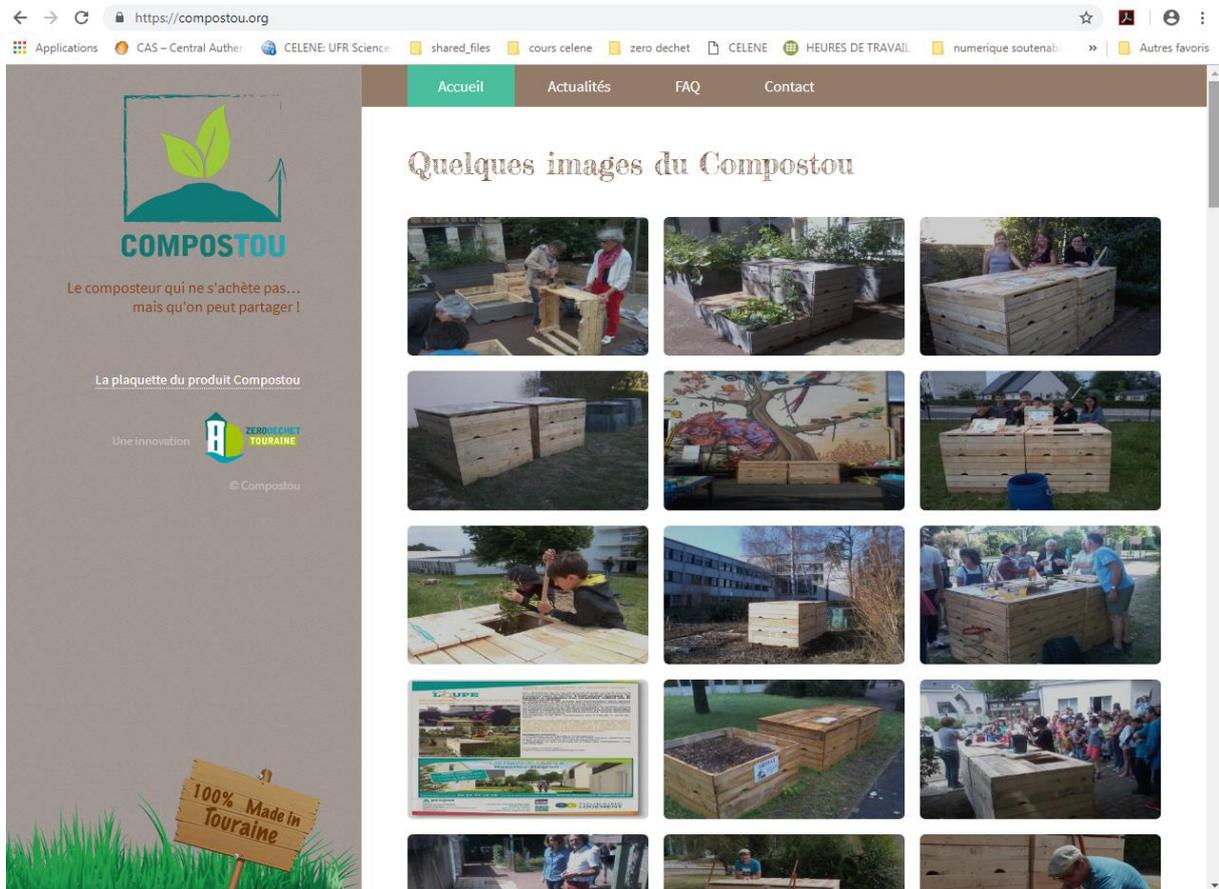


Figure 139 Site internet compostou.org.

Afin de donner plus de visibilité à nos opérations de maintenance sur les Compostou et pour réduire l’empreinte carbone de ce type d’activités, l’association Zéro Déchet Touraine a fait l’acquisition d’un vélo triporteur à assistance électrique. Celui-ci sera customisé aux couleurs de l’association dès que possible.



Figure 140: Vélo triporteur à assistance électrique Amsterdamair de l'association Zéro Déchet Touraine.

### 3.7.6. Retombées politiques

Le projet COMPOSTOU et les autres actions de l'association Zéro Déchet Touraine ont été salués par M. Philippe Chalumeau, Député de la 1<sup>ère</sup> Circonscription d'Indre-et-Loire dans un courrier officiel d'octobre 2019. De plus, la DASEN d'Indre-et-Loire s'est engagée, en présence du Ministre de l'Education Nationale, à faciliter l'installation de 40 Compostous sur 3 ans dans les écoles du département.

## 3.8. Utilisation du budget

### 3.8.1. Budget prévisionnel initial

Le budget prévisionnel initial du projet COMPOSTOU s'élevait initialement à **38243 euros TTC** :

Tableau 12: Dépenses prévisionnelles initialement prévues, par work package (WP).

Besoins de financement		Dépenses TTC
<b>Charges de personnel</b>	Maître composteur	7429,02
<b>fonctionnement</b>	WP1 (Pilotage)	1200
	WP2 (Production)	1188
	WP3 (Mobilisation citoyenne et communication)	720
	WP4 (Implantation)	720
	WP5 (Suivis)	720
	WP6 (Formation et accompagnement)	1200
<b>Prestations externes</b>	WP2 (Production)	1050
	WP5 (Suivis)	17726,4
<b>Dépenses d'investissement</b>	WP2 (Production)	1650
	WP3 (Mobilisation citoyenne et communication)	4640,208
	<b>TOTAL</b>	<b>38243,628</b>

Le budget s'équilibrait avec les contributions suivantes (hors autofinancement ZDT) :

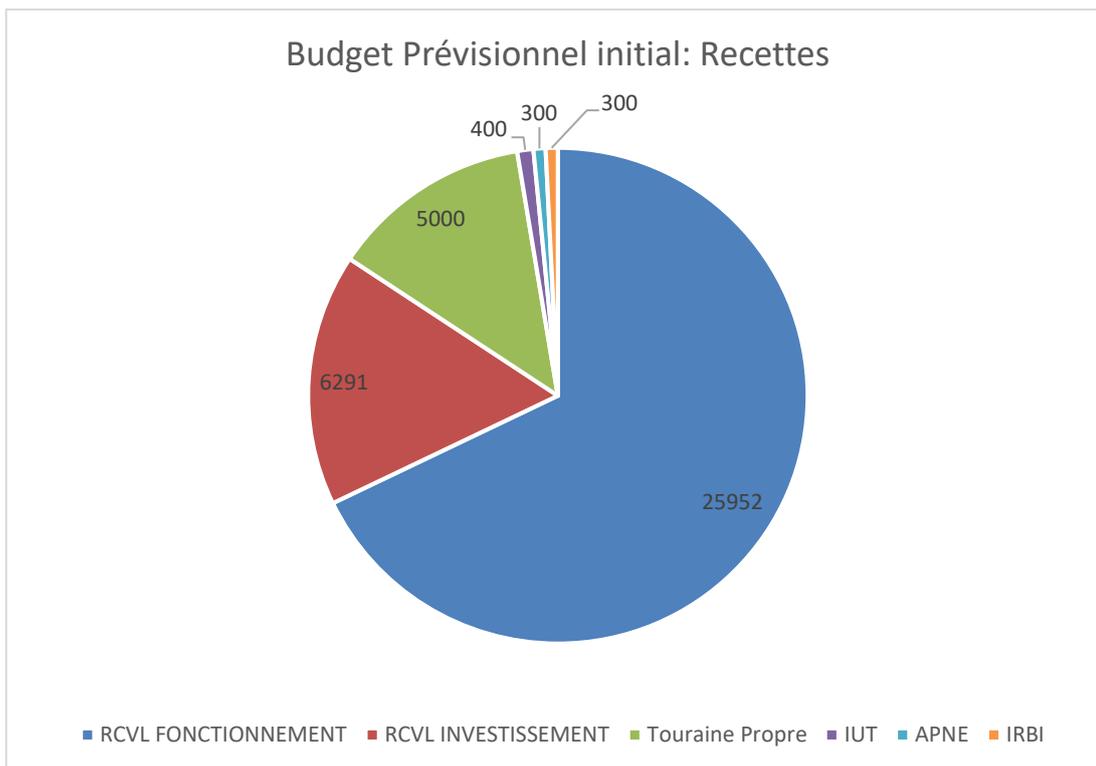
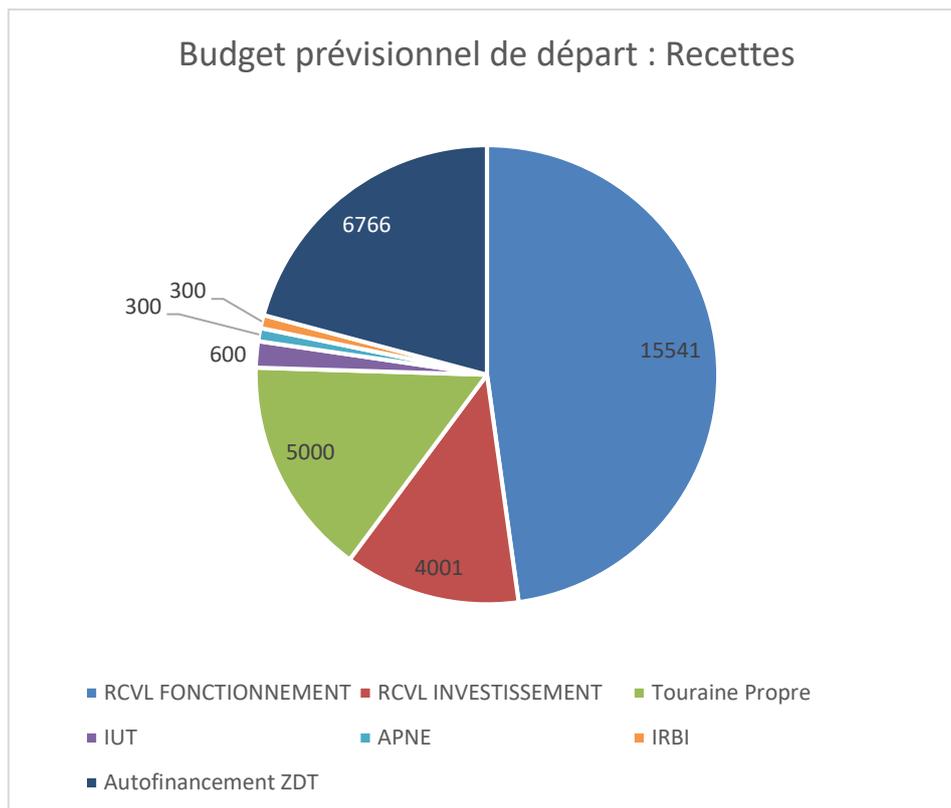


Figure 141: Recettes prévisionnelles initiales du projet COMPOSTOU.

### 3.8.2. Budget prévisionnel au lancement du projet

Grâce à l'obtention de deux appels à projets (AAP Economie Circulaire 2017 de la Région Centre Val de Loire et de l'ADEME et AAP 2017 Touraine Propre), le budget prévisionnel réel a pu être porté à **32508 euros TTC, dont 24542 euros maximum de subventions publiques (75,5%)**.



**Figure 142: Recettes prévisionnelles de départ du projet COMPOSTOU.**

Toutefois, ce budget de départ, plus réduit que le prévisionnel initial de 5735 euros, nous a obligé à renoncer à la partie du projet la plus scientifique (suivi écologique). De plus, afin de respecter le plafonnement des subventions publiques à 80% maximum du budget total du projet, nous avons calculé que l'association ZDT devait abonder le projet à hauteur de 6766 euros de fonds propres (20,8%), ce qui représentait plusieurs années de trésorerie. Les associations ayant le droit de comptabiliser les heures de bénévolat et les dons en nature dans leur part d'autofinancement, il a été décidé qu'un fort investissement en temps bénévole, des dons en nature et une réduction des dépenses devraient être consentis afin que le budget final du projet soit compatible avec les moyens financiers de l'association et les obligations administratives. Les dépenses prévisionnelles au départ du projet étaient les suivantes :

**Tableau 13: Dépenses prévisionnelles de départ du projet, par work package (WP).**

Besoins de financement		Dépenses TTC
Charges de personnel fonctionnement	Maître composteur	7429,02
	WP1 (Pilotage)	1200
	WP2 (Production)	1188

	WP3 (Mobilisation citoyenne et communication)	720
	WP4 (Implantation)	720
	WP5 (Suivis)	720
	WP6 (Formation et accompagnement)	1200
<b>Prestations externes</b>	WP2 (Production)	1050
	WP5 (Suivis)	<b>11990,77</b>
<b>Dépenses d'investissement</b>	WP2 (Production)	1650
	WP3 (Mobilisation citoyenne et communication)	4640,21
	<b>TOTAL</b>	<b>38243,628</b>

### 3.8.3. Budget réel

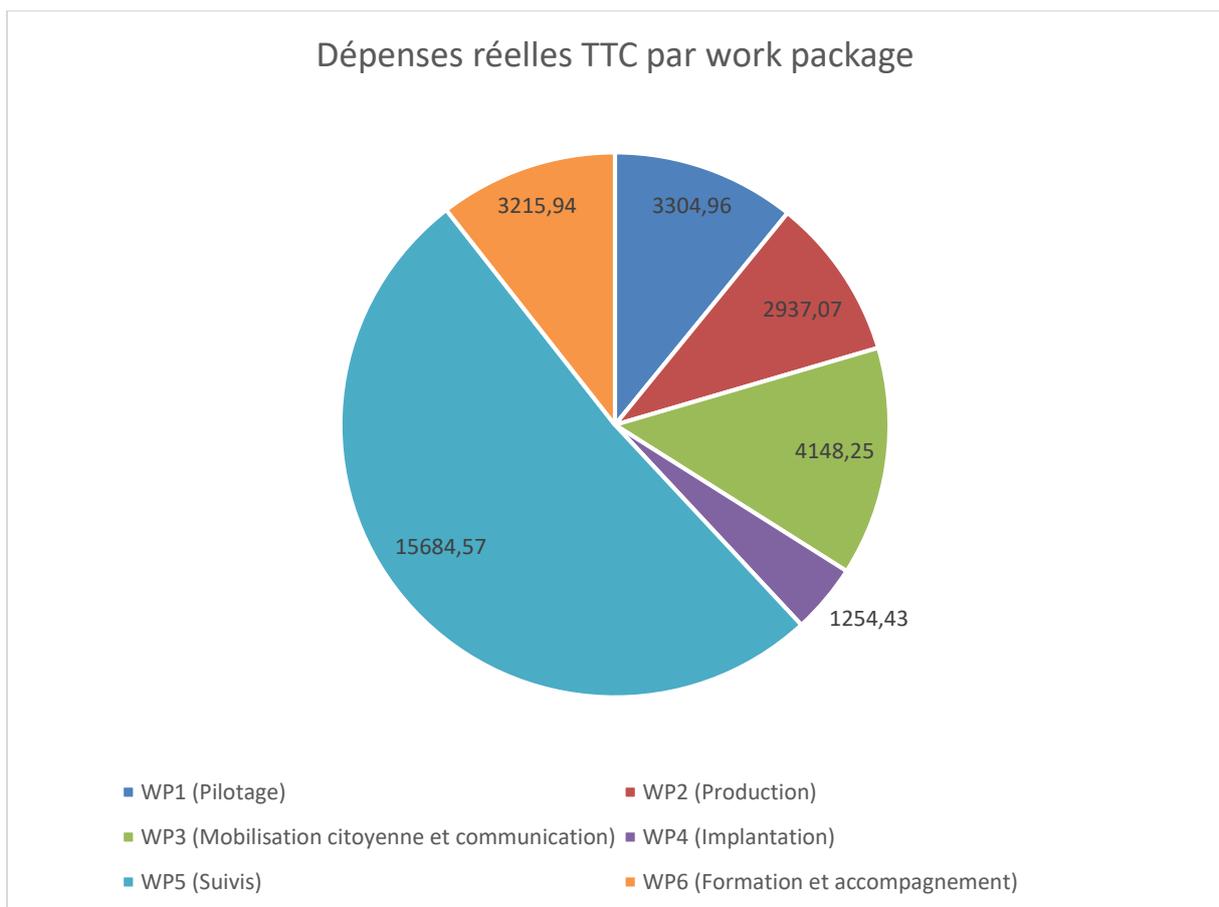
Grâce à nos efforts et à une gestion maîtrisée, les dépenses n'ont finalement été que de 30545,22 euros TTC, sur les 2 ans du projet (octobre 2017 - décembre 2019).

**Tableau 14 : Dépenses réelles du projet COMPOSTOU.**

<b>Besoins de financement</b>		<b>Dépenses TTC</b>
<b>Charges de personnel</b>	WP1 (Pilotage)	2931,16
	WP5 (Suivis)	5733,26
	WP6 (Formation et accompagnement)	1411,92
<b>Fonctionnement</b>	WP1 (Pilotage)	373,8
	WP3 (Mobilisation citoyenne et communication)	25,4
	WP4 (Implantation)	5,8
	WP5 (Suivis)	1500,01
	WP6 (Formation et accompagnement)	1571,33
<b>Prestations externes</b>	WP2 (Production)	1050
	WP5 (Suivis)	7801,55

	WP6 (Formation et accompagnement)	30
<b>Dépenses d'investissement</b>	WP2 (Production)	1887,07
	WP3 (Mobilisation citoyenne et communication)	4122,85
	WP4 (Implantation)	1248,63
	WP5 (Suivis)	649,75
	WP6 (Formation et accompagnement)	202,69
	<b>TOTAL</b>	<b>30545.22</b>

Par work package, les dépenses se sont réparties ainsi :



**Figure 143: Dépenses réelles TTC par work package.**

Les trois principaux postes de dépenses ont été :

- Le suivi des sites de compostage (WP5), incluant notamment les analyses de compost (prestations externes) et les services d'accompagnement des utilisateurs et de maintenance des Compostous (charges de personnel) ;
- La mobilisation citoyenne et la communication (WP3) avec notamment l'achat d'un triporteur à assistance électrique pour donner de la visibilité au projet (dépenses d'investissement) ;
- La mission de pilotage (WP1) avec un fort investissement en bénévolat mis au service du projet de la part du porteur de projet (254 heures répertoriées, sur les 600 heures de bénévolat nécessaires au projet).

### 3.8.3.1. *Charges de personnel*

Le projet prévoyait initialement de rémunérer un Maître-Composteur pour effectuer la formation des Guides-Composteurs, initier les utilisateurs, assurer le suivi technique des 10 sites expérimentaux et nous aider à communiquer auprès du grand public. Or le Maître-Composteur bénévole pressenti pour devenir salarié de l'association sur ce projet a dû quitter la région pour saisir une autre opportunité professionnelle. Aucun autre Maître-Composteur n'était disponible en Région Centre Val de Loire pour notre projet COMPOSTOU (la seule Maîtresse-Composteuse de la région étant Fanny Groussain, déjà en poste chez Val-Eco, à Blois). **Nous avons donc décidé d'utiliser cette ligne budgétaire pour :**

- Rémunérer un Maître-Composteur pour former 12 Guides-Composteurs bénévoles parmi les adhérents de l'association ZDT et 1 Guide-Composteur salarié (Jonathan Lecharpentier) (WP6) ;
- Rémunérer le Guide-Composteur salarié pour assurer les missions initialement dévolues au Maître-composteur (WP5).

Cette ligne comporte également la valorisation des heures de bénévolat effectuées par S. Moreau, pour le pilotage du projet (WP1).

Ce dispositif mixte salarié-bénévoles a permis d'assurer très efficacement l'installation, l'accompagnement et le suivi des 10 sites expérimentaux du projet COMPOSTOU pendant 2 ans, à un coût modeste (7145,18 euros) et de rester cohérent avec le plafond que nous nous étions fixés pour ce poste dans notre budget prévisionnel de départ (7429,02 euros).

### *3.8.3.2. Fonctionnement divers*

Les frais de fonctionnement pour le pilotage du projet (WP1) ont été réduits au maximum (373,8 euros seulement pour des frais de mission et l'impression de 6 rapports papiers pour Touraine Propre). De même, les frais de mobilisation citoyenne et de communication (WP3) ont été très réduits (25,4 euros) en privilégiant la dématérialisation des documents de travail et de communication. Nous avons comptabilisé très peu de frais pour la livraison et l'implantation des Compostous expérimentaux (WP4) car la plupart ont été transportés dans les véhicules de bénévoles, qui n'ont pas souhaité être remboursés pour cela. Les frais de fonctionnement de suivi (WP5) ont été limités à l'achat de quelques masques anti-poussières jetables, nécessaires pour se protéger lors des opérations de tamisage du compost, et d'autres matériels consommables pour 254,49 euros. Toutefois une somme de 1245,52 a été provisionnée par l'association sur ses fonds propres pour pérenniser le suivi et la maintenance des sites dans les années à venir.

Les frais de formation et d'accompagnement (WP6) regroupent les coûts de formation de :

- 5 référents de site, formés à l'IUT de Tours selon le référentiel GPROX de l'ADEME. Ces personnes n'étaient pas disponibles pour une formation plus longue ;
- Maître-Composteur bénévole pour le porteur du projet, Sébastien Moreau, afin de bénéficier dans l'association ZDT d'une personne techniquement compétente pour l'encadrement du Guide-Composteur salarié. Ses frais de formation incluent : transport, hébergement, frais d'inscription et repas pris au cours de 6 journées de formation Maître-Composteur à Rennes, en 2018 et en 2020.

### *3.8.3.3. Prestations externes*

Les frais de prestations externe ont couvert la fabrication du premier prototype du Compostou et des gabarits permettant sa fabrication en série par Entraide et Solidarités (WP2) pour un montant de 1050 euros TTC. Ils comprennent aussi une prestation d'impression d'un support de formation (bâches plastifiées au format A3 présentant les caractéristiques du Compostou) pour un montant de 30 euros TTC (WP6)

et les coûts des analyses effectuées par le laboratoire indépendant SADEF (7801,58 euros TTC).

Au total, les charges de personnel, les coûts de fonctionnement et les frais de prestations externes du projet atteignent 19503,07.

#### *3.8.3.4. Dépenses d'investissement*

Les dépenses de production (WP2) du projet correspondent à la fabrication de 10 Compostous, de 20 carrés potagers et à l'achat d'un kit de maintenance (diverses pièces détachées pour réparer des Compostous éventuellement abimés). Elles s'élèvent à 1887,07 euros TTC.

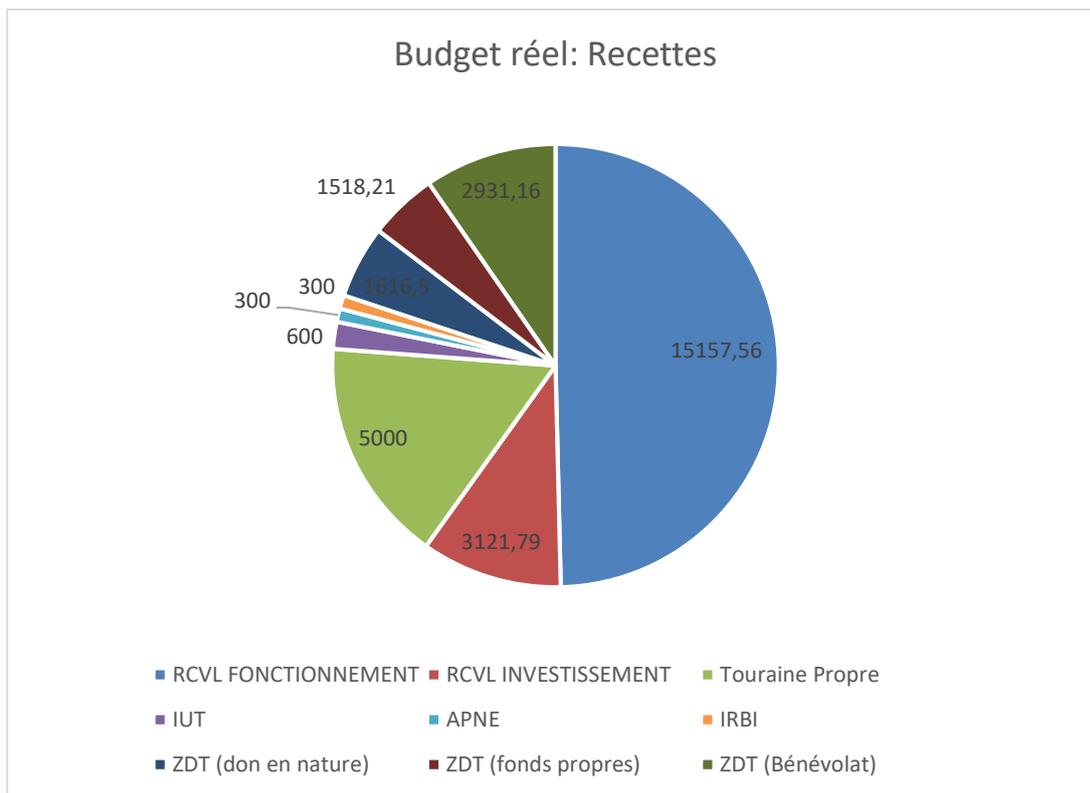
Les investissements pour la mobilisation citoyenne et la communication (WP3) concernent l'acquisition d'une plastifieuse pour la fabrication d'une signalétique plastifiée et l'achat d'un triporteur à assistance électrique. Ce véhicule donne de la visibilité au projet COMPOSTOU. Au total, ces investissements se montent à 4122,85 euros TTC.

Les dépenses d'investissement pour l'implantation des Compostous (WP4) recouvrent l'achat des équipements nécessaires aux Compostous pour fonctionner : outils de compostage, moyens de privatisation et de sécurisation, pour un total de 1248,63 euros TTC.

Pour le suivi des sites (WP5), 649,75 euros TTC ont été dépensés en matériel pour le tamisage du compost, le transport de broyat de branches, la maintenance des Compostous et le contrôle de la température par exemple.

Enfin, nous avons acheté des livres sur le compostage, un seau bokashi et du petit matériel de démonstration pour améliorer la formation des référents de site et Guides-Composteurs de l'association ZDT (WP6), pour un montant de 202,69 euros TTC.

#### *3.8.3.5. Recettes réelles*



**Figure 144: Recettes réelles du projet COMPOSTOU.**

Au final, le budget réel s'équilibre avec un montant des recettes de 30545,22 euros TTC, égal aux dépenses. La contribution de la Région Centre Val de Loire est revue à la baisse à la clôture du projet (18279,35 euros au lieu de 19542 euros prévus dans la convention). La totalité de la subvention de Touraine Propre (5000 euros TTC) est utilisée.

**Le pourcentage de subventions publiques n'excède pas 76,21% des recettes réelles (23279,35 euros TTC) et le projet a été autofinancé à 19,86% (6065,87 euros TTC), sans recourir à un emprunt ou à un financement participatif.**

## 4. Synthèse et perspectives

### 4.1. Synthèse

Le projet COMPOSTOU a permis de déployer en Indre-et-Loire 10 composteurs expérimentaux innovants et de suivre leur fonctionnement pendant 2 ans (2017-2019). Ces premiers Compostous ont été inventés par des membres de l'association Zéro Déchet Touraine (ZDT) et fabriqués par une association de réinsertion par le travail basée à Chambray-Lès-Tours (Entraide et Solidarités, ex Entraid'Ouvrières). Un suivi précis de l'ergonomie des premiers appareils installés a permis de faire évoluer techniquement le Compostou au cours du projet et de solutionner une à une toutes les difficultés rencontrées.

La solution testée a prouvé son innocuité et son efficacité : au moins 4,5 m<sup>3</sup> de compost ont été produits en 2 ans, à partir d'un gisement de biodéchets traités d'environ 6,33 m<sup>3</sup> par an (près de 2,7 tonnes de biodéchets/an). Du compost sain répondant parfaitement à la norme française NF U 44-051 a été produit sur 3 sites différents.

Utilisé à sa pleine capacité (15 utilisateurs adultes), le Compostou est une solution plus économique que la collecte et le traitement des biodéchets en mélange avec les Ordures Ménagères Résiduelles. Cette nouvelle méthode de compostage partagé est aussi plus vertueuse sur les plans environnementaux et sociaux, car elle respecte totalement la faune utile et permet de créer de nombreux liens entre les accompagnateurs bénévoles de l'association et les utilisateurs. Le Compostou est très apprécié de ses utilisateurs.

Le projet COMPOSTOU a bénéficié d'une très bonne couverture médiatique (1 documentaire, 18 articles et plusieurs émissions de télévision et de radio). Il a permis la création d'un emploi non délocalisable pour l'accompagnement des utilisateurs et la maintenance des appareils, et la formation de 100 personnes ressources au compostage de proximité, selon le référentiel de formation GPROX validé par l'ADEME et le Réseau Compost Citoyen. Plus de 600 heures de bénévolat ont été nécessaires à la réalisation de ce projet qui, malgré un budget réel de 22% inférieur au budget dont il avait initialement besoin, a pu atteindre et dépasser tous ses objectifs.

Le projet COMPOSTOU a été cofinancé par la Région Centre Val de Loire et l'ADEME (AAP Economie circulaire 2017), Touraine propre (AAP 2017), l'IUT de Tours, l'IRBI, l'association étudiante APNE et Zéro Déchet Touraine.

## 4.2. Perspectives

### 4.2.1. Vers une science du compostage ?

Par deux fois déjà, l'étude scientifique des Compostous et autres composteurs partagés a dû être reportée : Une première fois lorsque le budget réuni pour le Compostou s'est révélé inférieur à nos besoins et une seconde fois lorsque le projet de recherche d'Intérêt Régional « COMPOSCOPE » déposé par l'Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte en 2017 n'a pas été retenu par la Région Centre Val de Loire. Il existe pourtant de nombreux aspects fondamentaux à étudier afin d'optimiser et favoriser le compostage partagé en France.

Par exemple, il serait utile de caractériser finement les communautés d'organismes qui peuplent les composteurs de basse énergie (de type Compostou) et de comparer leur composition et leur abondance aux communautés des composteurs de haute énergie traditionnels. Ceci permettrait de définir un mix d'organismes auxiliaires du compostage qui pourraient ensuite être élevés en masse et commercialisés, en mélange ou individuellement. Des emplois pourraient être créés par cette activité.

Nous pourrions également tester l'intérêt de certains microorganismes pour réduire les nuisances, même en cas de dysfonctionnement, une situation qui survient souvent en compostage de haute énergie. En particulier la question de la complémentarité fonctionnelle des communautés de microorganismes libres et symbiotiques n'a jamais été étudiée dans un composteur et mérite de l'être.

En collaboration avec des laboratoires spécialisés en écotoxicologie, il nous semble important d'évaluer l'impact réel de la décomposition des bioplastiques sur la microfaune et la mésofaune du sol et/ou peuplant un composteur. Ces données fondamentales pourraient contribuer à relever les normes concernant les bioplastiques, dont la décomposition est écologiquement très préoccupante.

Il y a probablement aussi des progrès à faire en matière d'approvisionnements en broyat de branches, une ressource qu'il est parfois difficile à trouver en ville. La

possibilité de remplacer ce broyat par d'autres substrats carbonés et secs, dont la production pourrait être industrialisée et standardisée mérite l'attention. Dans l'idéal, il faudrait même que la matière première corresponde au sous-produit d'une autre activité industrielle, pour créer une économie circulaire. Des emplois peuvent aussi être créés par ce type d'activité.

Pour aller vers ces objectifs dans le cadre d'un programme de recherche-action de haut niveau, l'association ZDT entend poursuivre encore ses nombreuses collaborations avec le secteur académique et en particulier avec l'IRBI (UMR 7261 CNRS/Université de Tours), l'IUT de Tours, le Département Aménagement de Polytech Tours, le laboratoire CITERES (Cités, TERritoires, Environnement, Sociétés, UMR 7324 CNRS/Université de Tours) et le laboratoire EBI (Ecologie et Biologie des Interactions, UMR 7267 CNRS/Université de Poitiers).

#### 4.2.2. Pour une massification intelligente de la gestion de proximité des biodéchets

La France a inscrit dans sa Loi de 2015 relative à la Transition écologique pour la croissance verte un objectif ambitieux : celui que chaque français dispose d'une solution pour le tri à la source des biodéchets d'ici à 2025. Nous devons nous y préparer et travailler sur différentes options technologiques et organisationnelles complémentaires pour valoriser les biodéchets ici et ailleurs. Il y a par exemple 110 000 appartements en Indre-et-Loire. A raison d'un composteur partagé pour 10 foyers, il faudrait 11 000 composteurs partagés en bas d'immeuble d'ici à 5 ans. Or il n'y en a actuellement qu'une cinquantaine, dont une trentaine gérée par l'association ZDT !

S'il fallait collecter les 40 000 tonnes de biodéchets des ménages du département, il faudrait au minimum 3300 trajets annuels en camions-bennes de 12 tonnes de capacité chacun. Dans les faits, beaucoup plus car les collectes de biodéchets actuellement mise en place par les collectivités sont loin de remplir les bennes à chaque tournée.

Nous voyons donc qu'il est nécessaire de changer d'échelle dans les pratiques de gestion de proximité des biodéchets, tout en limitant autant que possible les solutions industrielles coûteuses et fortement dépendantes des énergies fossiles. Parce qu'ils sont

très hétérogènes, nos territoires ont besoin de solutions diversifiées et adaptées, y compris en habitat urbain dense.

Dès janvier 2020, l'association ZDT va créer, construire et tester en conditions réelles d'utilisation un point d'apport volontaire de biodéchets. L'idée de ce prototype est de pouvoir stabiliser et pré-composter des biodéchets dans une enceinte hermétique avant leur transfert en vélo vers une plateforme collective de compostage ou de lombricompostage. L'avantage de cette solution serait d'éviter d'avoir à collecter des biodéchets tous les 2 à 3 jours et de ne plus le faire que toutes les 4 à 5 semaines minimum. Par rapport au compostage partagé, cette solution permettrait de réduire l'accompagnement humain nécessaire (dépôts des biodéchets en totale autonomie), d'augmenter considérablement le nombre d'utilisateurs et d'optimiser la fréquence des collectes. Ainsi, à volume équivalent, un point d'apport volontaire de biodéchets pourrait collecter 6 fois plus de biodéchets qu'un composteur partagé.

Pour consolider à l'avenir la valorisation des biodéchets en Indre-et-Loire, Zéro Déchet Touraine développera cette idée dans le cadre du projet Urba-GPROX, soumis à Touraine Propre en novembre 2019 et qui sera proposé à l'ADEME Centre Val de Loire et à la Région Centre Val de Loire début 2020.

*Projet*

# URBA-GPROX

**Etude technique en faveur d'une diversification des modes de gestion de proximité des biodéchets en habitat urbain dense :**  
**Apports volontaires - Compostage de proximité - Valorisation des déchets verts**

**Figure 145: URBA-GPROX : une suite logique et ambitieuse au projet COMPOSTOU.**

Le projet Urba-GPROX est une proposition d'étude sur la gestion de proximité des biodéchets des ménages en milieu urbain, dans laquelle trois volets seraient abordés :

- Mise au point et test en conditions réelles d'un prototype de point d'apport volontaire de biodéchets ;

- Structuration d'une filière artisanale et industrielle locale pour la fabrication d'une nouvelle version du Compostou et réflexion sur la valorisation des sous-produits de cette activité ;
- Création d'une plateforme d'échange de broyat de branches sur Internet afin de sécuriser l'approvisionnement des sites de compostage de proximité en Indre-et-Loire et réduire la mise en déchèterie des déchets verts des particuliers et des professionnels ;

Urba-GPROX est porté par l'association Zéro Déchet Touraine (ZDT) et sera coordonné par son Président, Sébastien MOREAU. Toute aide financière ou mécénat techniques des collectivités intéressées par ce projet serait la bienvenue. Merci de contacter l'association via son site internet :



## Bibliographie

ADEME, 2008. Enquête nationale sur la gestion domestique des déchets organiques en France. ADEME Éditions.

ADEME, 2009. Campagne nationale de caractérisation des ordures ménagères, année 2007. ADEME Éditions.

ADEME, 2012. Guide méthodologique du compostage partagé (ou semi-collectif) : Compostage en pied d'immeuble, de quartier... Rapport final. ADEME Éditions.

ADEME, 2014. Evaluation des aides de l'ADEME à la promotion de la gestion de proximité des biodéchets (dont le compostage domestique). Synthèse. ADEME Éditions.  
[<https://www.ADEME.fr/sites/default/files/assets/documents/evaluation-aides-ADEME-promotion-gestion-proximite-biodechets-synthese.pdf>] consulté le 03/10/2019.

ADEME, 2015a. Le compostage. Fiche technique. ADEME Éditions.

ADEME, 2015b. Chiffres-clés Déchets Édition 2015. ADEME Éditions.

ADEME, 2015c. La sensibilité des Français à la prévention des déchets. Enquête IFOP pour l'ADEME. ADEME Éditions.  
[<http://bit.ly/29vCicr>] consulté le 03/10/2019.

ADEME, 2015d. Référentiel national des coûts du service public de gestion des déchets. Edition 2015. ADEME Éditions.

ADEME-SINOE (2019) Etats des lieux et gisements mobilisables à l'échelle de la Région Centre Val de Loire. Rencontres A3P Bio-Déchets, Bourges, 1<sup>er</sup> et 2 octobre 2019.

Albert Q, Baraud F, Leleyter L, Lemoine M, Heutte N, Rioult JP, Sage L, Garon D, 2019. Use of soil fungi in the biosorption of three trace metals (Cd, Cu, Pb): promising candidates for treatment technology? *Environ. Technol.*, 29:1-12.

Albert Q, Leleyter L, Lemoine M, Heutte N, Rioult JP, Sage L, Baraud F, Garon D. 2018. Comparison of tolerance and biosorption of three trace metals (Cd, Cu, Pb) by the soil fungus *Absidia cylindrospora*. *Chemosphere*, 196:386-392.

AMORCE, 2006. Le compostage de déchets verts. Série technique, DT10.

[[http://www.amorce.asso.fr/media/filer\\_public/8c/80/8c806754-b465-4f54-8920-bd79fc0c3906/dt10.pdf](http://www.amorce.asso.fr/media/filer_public/8c/80/8c806754-b465-4f54-8920-bd79fc0c3906/dt10.pdf)] consulté le 27/10/2019

Arendrup MC, O'Driscoll BR, Petersen E, Denning DW, 2006. Acute pulmonary aspergillosis in immunocompetent subjects after exposure to bark chippings. *Scand. J. Infect. Dis.*, 38 : 945-949.

[<https://pdfs.semanticscholar.org/56f8/ba48ed8319d5de17f7ae650663c4cbe20ced.pdf>] consulté le 02/09/2019

Armeflhor, 2001. Fiche technique tourbe (sac vapo). Bulletin d'information aux producteurs, Hors-Série Culture sous abris : 13-18.

[[https://armeflhor.pagesperso-orange.fr/sous\\_abri/Publication/bip/substrat/Fiche\\_tourbe.pdf](https://armeflhor.pagesperso-orange.fr/sous_abri/Publication/bip/substrat/Fiche_tourbe.pdf)] consulté le 19/09/2019.

Aylaj M, El Kbir L, 2008. Evaluation de la stabilité et la maturité des composts obtenus par biodégradation aérobie d'un mélange de déchets ménagers et de déchets de poulets. *Déchets Sciences et Techniques, Revue Francophone d'écologie industrielle*, 50 : 26-32.

Ayral F, 2015. Vers une surveillance des zoonoses associées aux rats (*Rattus norvegicus*). Thèse de Doctorat en Modèles, méthodes et algorithmes en biologie, santé et environnement, Université de Grenoble Alpes.

[<http://www.theses.fr/2015GREAS004>] consulté le 19/11/2019.

Bastien M, 2017. Contamination des terrains potagers par *Echinococcus multilocularis*, *Toxoplasma gondii* et *Toxocara* spp., parasites responsables de zoonoses transmises par l'alimentation. Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne.

[[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&ved=2ahUKEwjn0bXusrLkAhUEyYUKHVViCVgQFjAJegQIChAB&url=https%3A%2F%2Fwww.these.s.fr%2F2017REIMS005.pdf&usg=AOvVaw2s\\_P5TXWgxBtL4XLfxx5pw](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&ved=2ahUKEwjn0bXusrLkAhUEyYUKHVViCVgQFjAJegQIChAB&url=https%3A%2F%2Fwww.these.s.fr%2F2017REIMS005.pdf&usg=AOvVaw2s_P5TXWgxBtL4XLfxx5pw)] consulté le 02/09/2019.

Besson Y, 2011. Les fondateurs de l'agriculture biologique. Editions Sang de la Terre. 776 pp.

Bohacz J, Kornilłowicz-Kowalska T, 2009. Changes in enzymatic activity in compost containing chicken feathers. Bioresour. Technol., 100 : 3604–3612.

Boivin S, 2010. Oxydation biologique du sulfure d'hydrogène dans un bioréacteur de digestion anaérobie psychrophile soumis à des conditions micro-aérobies. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 48 pp.

[<https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/1631/MR83736.pdf?sequence=1>] consulté le 24/09/2019.

Bonanomi G, Antignani V, Pane C, Scala F, 2007. Suppression of oilborne fungal diseases with organic amendments. J Plant Pathol., 89:311-324.

Bonanomi G, Cesarano G, Lombardi N, Motti R, Scala F, Mazzoleni S, Incerti G, 2017. Litter chemistry explains contrasting feeding preferences of bacteria, fungi, and higher plants. Sci. Rep., 7:9208.

Bouin C, Couderc N, Gaffier C, 2017. Étude des quantités et de la qualité du compost de biodéchets ménagers issu de deux formes de compostage collectif à Paris et identification de leurs débouchés potentiels. Projet ingénieur de 3<sup>ème</sup> année DA IDEA 2016-2017. [<http://clcvparis.org/wp-content/uploads/2017/04/Etude-AgroParisTech-2016-2017.pdf>] consulté le 11/10/2019.

Bousquet M, 1920. Les silo zymothermiques du Dr Beccari et la question des ordures ménagères des villes. La Nature. 48, 139-143. [<http://cnum.cnam.fr/CGI/fpage.cgi?4KY28.99/143/100/636/5/628>] consulté le 07/12/2019.

Bromblet H, Somaroo G, 2015. Les techniques de compostage de déchets d'origine naturelle en Afrique et dans les Caraïbes. Présentation synthétique de l'état des lieux et des retours d'expériences. Plateforme-Re-Sources, 12 pp.

Brown RR, Elston TH, Evans L, Glaser C, Gullede ML, Jarboe L, Lappin MR, Marcus LC, 2005. Feline zoonoses guidelines from the American Association of Feline Practitioners. J. Feline Med. Surg. 7, 243-274.

Commissariat général au développement durable, 2015. Repères. Sols et environnement. Service de l'observation et des statistiques.

[<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-01/reperes-chiffres-cles-sols-et-environnement-edition-2015-novembre2016.pdf>]

DE 100 30 301 A1, 2001. Vorrichtung zur Kompostierung verrottbarer Stoffe. Brevet allemand déposé par Hohmann, A.

Deleporte S, 2001. Changes in the earthworm community of an acidophilous lowland beech forest during a stand rotation. Eur. J. Soil Biol., 37: 1-7.

Deleporte S, Tillier P, 1999. Long term effects of mineral amendments on soil fauna and humus in an acid beech forest floor. For. Ecol. Manage., 118: 245-252.

Duchaufour P, 1950. L'humus forestier et les facteurs de sa décomposition. Revue forestière française, 9 : 479-488.

Duchaufour P, 1953. La dégradation de la structure des sols forestiers. Revue forestière française, 10 : 657-665.

[[http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/26933/RFF\\_1953\\_10\\_657.pdf?sequence=1](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/26933/RFF_1953_10_657.pdf?sequence=1)] consulté le 28/10/2019.

EP 1 894 892 A2, 2008. Procédé de traitement de déchets organiques et dispositif pour sa mise en œuvre. Brevet européen déposé par Meusy G.

Faessler J, 2001. Gestion des déchets verts dans le canton de Genève : choix technologiques, aspects énergétiques et impacts environnementaux. Mémoire de Diplôme d'études supérieures en sciences naturelles de l'environnement. Université de Genève.

Favoino E, Hogg D, 2008. The potential role of compost in reducing greenhouse gases. *Waste Management & Research*, 26: 61-69.

Feller C, Blanchart E, Jabiol B, Grève MH, 2005. Quand l'humus est à l'origine de la pédologie. 1. Les travaux du forestier danois P.E. Müller (1840-1926). *Étude et Gestion des Sols*, 12:101-122.

Finstein M, Miller FC, Strom PF, 1986. Monitoring and evaluating composting process performance. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 58: 272-278.

FR 17 70042, 2017. Dispositif modulaire permettant de composter de manière continue des déchets biodégradables. Brevet français déposé par Moreau S, Cornillon MB, Violleau D, Huguen P.

GB 2 443 686 A, 2008. Domestic composting apparatus. Brevet britannique déposé par Strickland S.

Gendry M, 2018. La réserve utile des sols. *Solag, Bulletin Sol et Agronomie des Chambres d'agriculture des Pays de la Loire*, 4: 1-2.

[[https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/Pays de la Loire/022 Inst-Pays-de-la-loire/Listes-affichage-FE/RetD/Vegetal/Bulletins-](https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Pays_de_la_Loire/022_Inst-Pays-de-la-loire/Listes-affichage-FE/RetD/Vegetal/Bulletins-)

[SOLAG/Structure du sol/20180502 SOLAG Reserve utile des sols.pdf](#)] consulté le 06/11/2019.

Gloaguen JC, Touffet J, 1982. Evolution du rapport C/N dans les feuilles et au cours de la decomposition des litières sous climat atlantique. Le hêtre et quelques conifères. Ann. Sci. Forest. 39: 219-230.

Gregorich EG, Janzen H, Ellert BH, Helgason BL, Qian B, Zebarth BJ, Angers DA, Beyaert RP, Drury CF, Duguid SD, May WE, McConkey BG, Dyck MF. Litter decay controlled by temperature, not soil properties, affecting future soil carbon. Glob. Chang. Biol., 23:1725-1734.

Jabiol B, Brêthes A, Brun JJ, Jean-François P, Toutain F, Zanella A, Aubert M, Bureau F, 2009. Typologie des formes d'humus forestières (sous climats tempérés). In: Baize D, Girard M-C (Ed.), Référentiel pédologique 2008. Éditions Quæ, pp 327-355.

Jabiol B, Feller C, Grève MH, 2005. Quand l'humus est à l'origine de la pédologie. 2. Avant et après P.E. Müller : évolution des conceptions sur la description et la typologie « des humus ». Étude et Gestion des Sols, 12:123-134.

Karroum M, Guillet B, Laggoun-Défarge F, Disnar J-R, Lottier N, Villemin G, Toutain F, 2005. Evolution morphologique des litières de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et transformation des biopolymères, lignine et polysaccharides, dans un mull et un moder, sous climat tempéré (forêt de Fougères, Bretagne, France). Can. J. Soil Sci., 85: 405-416.

Khan I, Ali M, Aftab M, Shakir S, Qayyum S, Haleem KS, Tauseef I, 2019. Mycoremediation: a treatment for heavy metal-polluted soil using indigenous metallotolerant fungi. Environ. Monit. Assess., 191:622.

Langenbruch C, Helfrich M, Flessa H, 2012. Effects of beech (*Fagus sylvatica*), ash (*Fraxinus excelsior*) and lime (*Tilia spec.*) on soil chemical properties in a mixed deciduous forest. Plant Soil 352:389-403.

Leclerc B, 2017. Les clés d'un sol vivant. Terre vivante. 173 p.

Lebeau T, Rémy E, Canavese M, 2017. Jardins urbains et pollution des sols: Evaluation des risques et démarches d'experts. MOOC de l'Université Virtuelle Environnement et Développement Durable, Université de Nantes.

[[http://uved.univ-nantes.fr/SOLS/4/res/VTR\\_metaux%20vs\\_seuil\\_info\\_vs\\_alerte.pdf](http://uved.univ-nantes.fr/SOLS/4/res/VTR_metaux%20vs_seuil_info_vs_alerte.pdf)] consulté le 20/09/2019.

Loydi A, Lohse K, Otte A, Donath TW, Eckstein RL, 2014. Distribution and effects of tree leaf litter on vegetation composition and biomass in a forest-grassland ecotone. *J. Plant Ecol.*, 7: 264-275.

Madrid F, López R, Cabrera F 2007. Metal accumulation in soil after application of municipal solid waste compost under intensive farming conditions. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 119: 249-256.

Misra R.V., Roy R.N., Hiraoka H, 2005. Documents de travail sur les terres et les eaux. 2. Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole. Cahiers Techniques de la FAO. FAO, Rome, Italie, 35 pp.

Momma N, Kobara Y, Uematsu S, Kita N, Shinmura A, 2013. Development of biological soil disinfestations in Japan. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 97:3801-3809.

Moscovici S, 2002. Réenchanter la nature. Entretiens avec Pascal Dibie. Editions de l'Aube, La Tour d'Aigues, France, 66 p.

Moscovici S, 2015. Psychologie des minorités actives. *EcoRev'*, 42: 5-14.

[<https://www.cairn.info/revue-ecorev-2015-1-page-5.htm>] consulté le 06/10/2019.

Mouloubou OR, 2015. Développements spectroscopiques pour l'étude de la matière organique du sol dans des extraits liquides, avec étude de son impact sur le comportement des métaux : application à un sol agricole amendé par du compost. Thèse de Doctorat, Spécialité Science de l'Environnement Terrestre, Université Aix-Marseille.

[<http://www.theses.fr/2015AIXM4733/document>] consulté le 30/12/2019.

Nys C, 1981. Modifications des caractéristiques physico-chimiques d'un sol brun acide des Ardennes primaires par la monoculture d'Epicéa commun. Ann. Sci. Forest., 38: 237-258.

Olczak J, Jones BR, Pfeiffer DU, Squires RA, Morris RS, Markwell PJ, 2005. Multivariate analysis of risk factors for feline hyperthyroidism in New Zealand. N. Z. Vet. J. 53:53-58.

ONB, 2015. Évolution de la biomasse microbienne des sols en metropole. Taux d'évolution de la biomasse microbienne moyenne des sols en metropole.

[[http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/sites/default/files/fichiers/indicateurs/analyse-frb/snb-b06-12-bds1\\_biomasse\\_microbienne\\_sols\\_fiche1.pdf](http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/sites/default/files/fichiers/indicateurs/analyse-frb/snb-b06-12-bds1_biomasse_microbienne_sols_fiche1.pdf)] consulté le 10/11/2019.

Oudart D, 2013. Modélisation de la stabilisation de la matière organique et des émissions gazeuses au cours du compostage d'effluents d'élevage. Thèse de Doctorate, Génie des procédés et de l'environnement, INSA de Toulouse. [<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00935691v2/document>] consulté le 27/10/2019.

Pépin D, 2013. Composts et paillis. Pour un jardin sain, facile et productif. Terre vivante, Mens, France, 320 pp.

Poirier V, 2005. Mull, moder et mor: étude des formes d'humus et de leur classification. Mémoire de Master, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de Recherche et de Développement de Québec, Canada.

[[https://www.researchgate.net/profile/Vincent\\_Poirier/publication/283570453\\_Mull\\_moder\\_et\\_mor\\_etude\\_des\\_formes\\_d'humus\\_et\\_de\\_leur\\_classification/links/563fe31b08ae34e98c4e75d5/Mull-moder-et-mor-etude-des-formes-dhumus-et-de-leur-classification.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vincent_Poirier/publication/283570453_Mull_moder_et_mor_etude_des_formes_d'humus_et_de_leur_classification/links/563fe31b08ae34e98c4e75d5/Mull-moder-et-mor-etude-des-formes-dhumus-et-de-leur-classification.pdf)] consulté le 28/10/2019.

Prévost, A.-R. (1970). Humus. Biogenèse, biochimie, biologie. Éditions de la Tourelle, St Mandé, France, 342 p.

Rayner ADM, 1993. The tree as a fungal community. In : Read HJ (Ed.). Pollard and veteran tree management II. The Richmond publishing Co., London, 6-9.

Robichaud K, Girard C, Dagher D, Stewart K, Labrecque M, Hijri M, Amyot M, 2019. Local fungi, willow and municipal compost effectively remediate petroleum-contaminated soil in the Canadian North. *Chemosphere*, 220:47-55.

Rousseau LZ, 1960. De l'influence du type d'humus sur le développement des plantules de sapins dans les Vosges. *Annales de l'école nationale des eaux et forêts et de la station de recherches et expériences*, 17: 13-118.

Russell K, Broadbridge C, Murray S, Waghorn D, Mahoney A, 2008. Gardening can seriously damage your health. *Lancet*, 371:2056.

Savelli E, 2016. La biodiversité des sols Bretons. Dossier GIP Bretagne environnement.

Talan DA, Citron DM, Abrahamian FM, Moran GJ, Goldstein EJC, 1999. The Emergency Medicine Animal Bite Infection Study Group. Bacteriologic analysis of infected dog and cat bites. *N. Engl. J. Med.* 340, 85-92.

Toutain F, 1981. Les humus forestiers. Structures et modes de fonctionnement. *Rev. For. Fr.*, 33:449-477.

WO2016/010795 A1, 2016. Modular compositing garden contener, system, and method of use. Brevet international déposé par Cudmore C et Grant J.

# Annexes

AI1



## Rapport d'analyses COMPOSTS

### ZÉRO DÉCHET TOURAINE

Centre social Equinoxe  
Place du Maréchal Leclerc

37520 LA RICHE

#### Exploitation

ASSOCIATION ZÉRO DÉCHET

#### Echantillon

Type échantillon : Composts

Référence Commande :

Réf. échantillon :  
SA001.1.4 / RCVL02 / IRBI/ST PIERRE.

Dossier : LAB19-12854

Numéro Labo. : D-06930-19

Date de prélèvement : 16/06/2019

Date de réception : 17/06/2019

Date fin analyses : 02/09/2019

Date début analyses : 17/06/2019

Date d'édition : 11/10/2019

Ce rapport annule et remplace la précédente version (version n°1). Veuillez nous renvoyer ou détruire le précédent rapport. SADEF se dégage de toute responsabilité quant à l'usage du rapport initial.

Inertes	Résultats	Unités		Conformité	Valeur Limite
		C : Conforme	NC : Non Conforme		
* Films et PSE > 5 mm	NF U44-051	0.0	C %		0.3
* Plastiques durs > 5 mm	NF U44-051	0.0	C %		0.6
* Verres et Métaux > 2mm	NF U44-051	0.0	C %		2

Caractérisation Agronomique	Résultats	Unités		Conformité	Valeur minimale	Limite maximale
		C : Conforme	NC : Non Conforme			
* Matière sèche	NF U44-051	32.7	C %		30	100
* Azote Total (N) (/brut)	NF U44-051	9.00	C g/100			30
* Phosphore (P2O5) (/brut)	NF U44-051	1.85	C g/100			30
* Potassium (K2O) (/brut)	NF U44-051	5.41	C g/100			30
* Matière Organique par Perte au Feu (/brut)(1)	NF U44-051	226	C g/100		200	1000
Rapport C/N	NF U44-051	13	C -		8	200
* N + P2O5 + K2O (/brut)	NF U44-051	16.3	C g/100			70
* Azote organique (en % de l'azote total) (/brut)	NF U44-051	94	C %		66	100

Oligos et Eléments traces	Résultats	Unités		Conformité	Valeur Limite
		C : Conforme	NC : Non Conforme		
* Arsenic (As)	NF U44-051	2.32	C mg/Kg		18
* Cadmium (Cd)	NF U44-051	0.20	C mg/Kg		3
* Chrome (Cr)	NF U44-051	16.8	C mg/Kg		120
* Cuivre (Cu)	NF U44-051	26.4	C mg/Kg		300
* Mercure (Hg)	NF U44-051	< 0.2	C mg/Kg		2
* Nickel (Ni)	NF U44-051	11.2	C mg/Kg		60
* Plomb (Pb)	NF U44-051	11.2	C mg/Kg		180
* Sélénium (Se)	NF U44-051	< 1.5	C mg/Kg		12



Partie disponible sur  
www.cofrac.fr



Rue de la Station - F 68700 Aspach le Bas - www.sadef.fr  
Tel : +33 (0)3 89 62 72 30 - Fax : +33 (0)3 89 62 72 49 - Email : pole@sadef.fr

L'accréditation de la section Laboratoire du COFRAC atteste de la compétence technique des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation, essais identifiés par une étoile (\*). Ce rapport d'analyse concerne seulement l'échantillon soumis aux analyses. Ce rapport ne doit pas être reproduit sans l'approbation du laboratoire d'essai. La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Ce rapport comporte : 5 page(s)  
Rapport d'analyses n° : D-06930-19

Version n°2  
Page 4/5

## Exploitation

## Echantillon

ASSOCIATION ZÉRO DÉCHET

Type échantillon : Composts

Référence Commande :

Réf. échantillon :

5A001.1.4 / RCVL02 / IRBI/ST PIERRE .

Dossier : LAB19-12854

Numéro Labo. : D-06930-19

Date de prélèvement : 16/06/2019

Date de réception : 17/06/2019

Date fin analyses : 02/09/2019

Date début analyses : 17/06/2019

Date d'édition : 11/10/2019

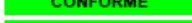
Ce rapport annule et remplace la précédente version (version n°1). Veuillez nous renvoyer ou détruire le précédent rapport. SADEF se dégage de toute responsabilité quant à l'usage du rapport initial.

\* Zinc (Zn) NF U44-051 91.9 C mg/Kg  600

### Composés traces Organiques

	Résultats	Unités	Conformité	Valeur Limite
	C : Conforme	NC : Non Conforme		
* Benzo(a) pyrène (HAP)	NF U44-051 0.14 C	mg/Kg		1.5
* Benzo(b) fluoranthène (HAP)	NF U44-051 0.13 C	mg/Kg		2.5
* Fluoranthène (HAP)	NF U44-051 0.2 C	mg/Kg		4

### Micro-Organismes Pathogènes

	Résultats	Unités	Conformité	Valeur Limite
	C : Conforme	NC : Non Conforme		
* Escherichia coli (Dénombr.)	NF U44-051 < 100 C	UFC / g		100
Entérocoques (Dénombr.)	NF U44-051 3200 C	dans 1g		10000
Oeufs d'Helminthes viables (Dénombr.)	NF U44-051 Absence C	/ 1.5 g MB		
* salmonella spp (Recherche)	NF U44-051 Absence C	dans 25g		

Texte ayant servi de base à la déclaration de conformité : NF U44-051 relatif aux composts - modalité GENERAL

(1) Valable seulement pour les dénominations 1 à 5 et 9, 10 de la norme NFU 44051. Pour les dénominations 6 (mono-produit végétal), 7 (matières végétales en mélange) et 8 (mélange de matières végétales et de matières animales), la matière organique doit être supérieure ou égale à 25% de la matière brute.

La conformité, donnée sans prise en compte des incertitudes sur les résultats, ne porte que sur les analyses demandées.

L'accréditation ne couvre que les déclarations de conformité concernant un essai ou un ensemble d'essais eux-mêmes couverts par l'accréditation.

En cas d'avis et d'interprétations, ceux-ci sont hors champ d'accréditation.

\*: Analyses SADEF réalisées sous accréditation.



ACCREDITATION COFRAC  
NF1-0751

Portée disponible sur  
www.cofrac.fr

## SADEF

Rue de la Station - F 68700 Aspach le Bas - www.sadef.fr  
Tel : +33 (0)3 89 62 72 30 - Fax : +33 (0)3 89 62 72 49 - Email : pole@sadef.fr

L'accréditation de la section Laboratoire du COFRAC atteste de la compétence technique des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation, essais identifiés par une étoile (\*). Ce rapport d'analyse concerne seulement l'échantillon soumis aux analyses. Ce rapport ne doit pas être reproduit sans l'approbation du laboratoire d'essai. La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Ce rapport comporte : 5 page(s)  
Rapport d'analyses n° : D-06930-19

Version n°2  
Page 5/5



## Rapport d'analyses COMPOSTS

ASSOCIATION ZÉRO DÉCHET TOURAINE

Centre social Equinoxe  
Place du Maréchal Leclerc

37520 LA RICHE

### Exploitation

ASSOCIATION ZÉRO DÉCHET

### Echantillon

Type échantillon : Composts

Référence Commande :

Réf. échantillon :

SA001.1.3 / RCVL05 / IRBI/ST PIERRE .

Dossier : LAB19-12853

Numéro Labo. : D-06929-19

Date de prélèvement : 15/05/2019

Date de réception : 17/05/2019

Date fin analyses : 02/09/2019

Date début analyses : 17/05/2019

Date d'édition : 02/09/2019

Ce rapport annule et remplace le rapport papier édité le 02/09/19

Inertes	Résultats	Unités		Conformité	Valeur Limite
		C : Conforme	NC : Non Conforme		
* Films et PSE > 5 mm	NF U44-051	0.0	C %		0.3
* Plastiques durs > 5 mm	NF U44-051	0.0	C %		0.8
* Verres et Métaux > 2mm	NF U44-051	0.0	C %		2

Caractérisation Agronomique	Résultats	Unités		Conformité	Valeur minimale	Limite maximale
		C : Conforme	NC : Non Conforme			
* Matière Sèche	NF U44-051	61.9	C %		30	100
* Azote Total (N) (/brut)	NF U44-051	13.4	C o/oo			30
* Phosphore (P2O5) (/brut)	NF U44-051	4.82	C o/oo			30
* Potassium (K2O) (/brut)	NF U44-051	10.0	C o/oo			30
* Matière Organique par Perte au Feu (/brut)(1)	NF U44-051	355	C o/oo		200	1000
Rapport C/N	NF U44-051	13	C -		8	200
* N + P2O5 + K2O (/brut)	NF U44-051	28.2	C o/oo			70
* Azote organique (en % de l'azote total) (/brut)	NF U44-051	90	C %		66	100

Oligos et Eléments traces	Résultats	Unités		Conformité	Valeur Limite
		C : Conforme	NC : Non Conforme		
* Arsenic (As)	NF U44-051	5.09	C mg/Kg		18
* Cadmium (Cd)	NF U44-051	0.39	C mg/Kg		3
* Chrome (Cr)	NF U44-051	32.0	C mg/Kg		120
* Cuivre (Cu)	NF U44-051	30.0	C mg/Kg		300
* Mercure (Hg)	NF U44-051	< 0.2	C mg/Kg		2
* Nickel (Ni)	NF U44-051	18.0	C mg/Kg		60
* Plomb (Pb)	NF U44-051	17.4	C mg/Kg		160
* Sélénium (Se)	NF U44-051	< 1.5	C mg/Kg		12



ACCREDITATION COFRAC  
I-P1-0751

Portée disponible sur  
www.cofrac.fr

## SADEF

Rue de la Station - F 68700 Aspach le Bas - www.sadef.fr  
Tel : +33 (0)3 89 62 72 30 - Fax : +33 (0)3 89 62 72 49 - Email : pole@sadef.fr

L'accréditation de la section Laboratoire du COFRAC atteste de la compétence technique des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation, essais identifiés par une étoile (\*). Ce rapport d'analyse concerne seulement l'échantillon soumis aux analyses. Ce rapport ne doit pas être reproduit sans l'approbation du laboratoire d'essai. La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Ce rapport comporte : 5 page(s)  
Rapport d'analyses n° : D-06929-19

Version n°1  
Page 4/5

## Exploitation

## Echantillon

ASSOCIATION ZÉRO DÉCHET		Type échantillon : Composts
Dossier : LAB19-12853		Référence Commande : Réf. échantillon : SA001.1.3 / RCVL05 / IRBI/ST PIERRE .
Numéro Labo. : D-06929-19		

Date de prélèvement : 16/06/2019  
 Date de réception : 17/06/2019  
 Date fin analyses : 02/09/2019  
 Date début analyses : 17/06/2019  
 Date d'édition : 02/09/2019  
 Ce rapport annule et remplace le rapport partiel édité le 02/09/19

* Zinc (Zn)	NF U44-051	102	C	mg/Kg		600
-------------	------------	-----	---	-------	--	-----

Composés traces Organiques	Résultats	Unités	Conformité	Valeur Limite		
	C : Conforme	NC : Non Conforme				
* Benzo(a) pyrène (HAP)	NF U44-051	0.41	C	mg/Kg		1.5
* Benzo(b) fluoranthène (HAP)	NF U44-051	0.3	C	mg/Kg		2.5
* Fluoranthène (HAP)	NF U44-051	0.58	C	mg/Kg		4

Micro-Organismes Pathogènes	Résultats	Unités	Conformité	Valeur Limite		
	C : Conforme	NC : Non Conforme				
* Escherichia coli (Dénombr.)	NF U44-051	< 100	C	UFC / g		700
Entérocoques (Dénombr.)	NF U44-051	290	C	dans 1g		10000
Oeufs d'Helminthes viables (Dénombr.)	NF U44-051	Absence	C	/ 1.5 g MB		CONFORME
* Salmonella spp (Recherche)	NF U44-051	Absence	C	dans 25g		CONFORME

Texte ayant servi de base à la déclaration de conformité : NF U44-051 relatif aux composts - modalité GENERAL.

(1) Valable seulement pour les dénominations 1 à 5 et 9, 10 de la norme NFU 44051. Pour les dénominations 6 (mono-produit végétal), 7 (matières végétales en mélange) et 8 (mélange de matières végétales et de matières animales), la matière organique doit être supérieure ou égale à 25% de la matière brute.

La conformité, donnée sans prise en compte des incertitudes sur les résultats, ne porte que sur les analyses demandées.

L'accréditation ne couvre que les déclarations de conformité concernant un essai ou un ensemble d'essais eux-mêmes couverts par l'accréditation.

En cas d'avis et d'interprétations, ceux-ci sont hors champ d'accréditation.

\*: Analyses SADEF réalisées sous accréditation.



# SADEF

Rue de la Station - F 68700 Aspach le Bas - www.sadef.fr  
 Tel : +33 (0)3 89 62 72 30 - Fax : +33 (0)3 89 62 72 49 - Email : pole@sadef.fr

L'accréditation de la section Laboratoire du COFRAC atteste de la compétence technique des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation, essais identifiés par une étoile (\*). Ce rapport d'analyse concerne seulement l'échantillon soumis aux analyses. Ce rapport ne doit pas être reproduit sans l'approbation du laboratoire d'essai. La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Ce rapport comporte : 5 page(s)  
 Rapport d'analyses n° : D-06929-19

Version n°1  
 Page 5/5



## Rapport d'analyses COMPOSTS

### ASSOCIATION ZÉRO DÉCHET TOURAIN

Centre social Equinoxe  
Place du Maréchal Leclerc

37520 LA RICHE

#### Exploitation

ASSOCIATION ZÉRO DÉCHET

#### Echantillon

Type échantillon : Composts

Référence Commande :

Réf. échantillon :

SA001.1.1 / RCVL06 / IRBI/ST PIERRE

Dossier : LAB19-12851

Numéro Labo. : D-06927-19

Date de prélèvement : 15/06/2019

Date de réception : 17/06/2019

Date fin analyses : 02/09/2019

Date début analyses : 17/06/2019

Date d'édition : 02/09/2019

Ce rapport annule et remplace le rapport partie-édité le 02/09/19

Inertes	Résultats		Unités		Conformité	Valeur Limite
	C : Conforme	NC : Non Conforme				
* Films et PSE > 5 mm	NF U44-051	0.0	C	%		0.3
* Plastiques durs > 5 mm	NF U44-051	0.0	C	%		0.8
* Verres et Métaux > 2mm	NF U44-051	0.0	C	%		2

Caractérisation Agronomique	Résultats		Unités		Conformité	Valeur minimale	Limite maximale
	C : Conforme	NC : Non Conforme					
* Matière Sèche	NF U44-051	49.2	C	%		30	100
* Azote Total (N) (/brut)	NF U44-051	9.36	C	g/100			30
* Phosphore (P2O5) (/brut)	NF U44-051	3.15	C	g/100			30
* Potassium (K2O) (/brut)	NF U44-051	6.82	C	g/100			30
* Matière Organique par Perte au Feu (/brut)(1)	NF U44-051	226	C	g/100		200	1000
Rapport C/N	NF U44-051	14	C	-		10	200
* N + P2O5 + K2O (/brut)	NF U44-051	19.3	C	g/100			70
* Azote organique (en % de l'azote total) (/brut)	NF U44-051	93	C	%		66	100

Oligos et Eléments traces	Résultats		Unités		Conformité	Valeur Limite
	C : Conforme	NC : Non Conforme				
* Arsenic (As)	NF U44-051	3.75	C	mg/Kg		18
* Cadmium (Cd)	NF U44-051	0.21	C	mg/Kg		3
* Chrome (Cr)	NF U44-051	18.3	C	mg/Kg		120
* Cuivre (Cu)	NF U44-051	18.6	C	mg/Kg		300
* Mercure (Hg)	NF U44-051	< 0.2	C	mg/Kg		2
* Nickel (Ni)	NF U44-051	13.5	C	mg/Kg		60
* Plomb (Pb)	NF U44-051	13.4	C	mg/Kg		180
* Sélénium (Se)	NF U44-051	< 1.5	C	mg/Kg		12



ACCREDITATION COFRAC  
N°1-0751

Portée disponible sur  
www.cofrac.fr

## SADEF

Rue de la Station - F 68700 Aspach le Bas - www.sadef.fr  
Tel : +33 (0)3 89 62 72 30 - Fax : +33 (0)3 89 62 72 49 - Email : pole@sadef.fr

L'accréditation de la section Laboratoire du COFRAC atteste de la compétence technique des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation, essais identifiés par une étoile (\*). Ce rapport d'analyse concerne seulement l'échantillon soumis aux analyses. Ce rapport ne doit pas être reproduit sans l'approbation du laboratoire d'essai. La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Ce rapport comporte : 5 page(s)  
Rapport d'analyses n° : D-06927-19

Version n°1  
Page 4/5

## Exploitation

## Echantillon

ASSOCIATION ZÉRO DÉCHET		Type échantillon : Composts
Dossier : LAB19-12851		Réf. Commande : SA001.1.1 / RCVL06 / IRBI/ST PIERRE
Numéro Labo. : D-06927-19		Réf. échantillon : SA001.1.1 / RCVL06 / IRBI/ST PIERRE

Date de prélèvement : 15/08/2019  
 Date de réception : 17/08/2019  
 Date de début analyses : 17/06/2019  
 Date fin analyses : 02/09/2019  
 Date d'édition : 02/09/2019

Ce rapport annule et remplace le rapport partie édité le 02/09/19

* Zinc (Zn)	NF U44-051	95.0	C	mg/Kg		600
-------------	------------	------	---	-------	--	-----

### Composés traces Organiques

	Résultats	Unités	Conformité	Valeur Limite	
* Benzo(a) pyrène (HAP)	NF U44-051	0.09	C	mg/Kg	1.5
* Benzo(b) fluoranthène (HAP)	NF U44-051	<0.05	C	mg/Kg	2.5
* Fluoranthène (HAP)	NF U44-051	0.12	C	mg/Kg	4

### Micro-Organismes Pathogènes

	Résultats	Unités	Conformité	Valeur Limite	
* Escherichia coli (Dénombr.)	NF U44-051	< 1000	C	UFC / g	Non interprétable (valeur limite :100).
* Entérocoques (Dénombr.)	NF U44-051	570	C	dans 1g	10000
* Oeufs d'Helminthes viables (Dénombr.)	NF U44-051	Absence	C	/ 1.5 g MB	CONFORME
* salmonella spp (Recherche)	NF U44-051	Absence	C	dans 25g	CONFORME

Texte ayant servi de base à la déclaration de conformité : NF U44-051 relatif aux composts - modalité GENERAL

(1) Valable seulement pour les dénominations 1 à 5 et 9, 10 de la norme NFU 44051. Pour les dénominations 6 (mono-produit végétal), 7 (matières végétales en mélange) et 8 (mélange de matières végétales et de matières animales), la matière organique doit être supérieure ou égale à 25% de la matière brute.

La conformité, donnée sans prise en compte des incertitudes sur les résultats, ne porte que sur les analyses demandées.

L'accréditation ne couvre que les déclarations de conformité concernant un essai ou un ensemble d'essais eux-mêmes couverts par l'accréditation.

En cas d'avis et d'interprétations, ceux-ci sont hors champ d'accréditation.

\* : Analyses SADEF réalisées sous accréditation.



# SADEF

Rue de la Station - F 68700 Aspach le Bas - www.sadef.fr  
 Tel : +33 (0)3 89 62 72 30 - Fax : +33 (0)3 89 62 72 49 - Email : pole@sadef.fr

L'accréditation de la section Laboratoire du COFRAC atteste de la compétence technique des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation, essais identifiés par une étoile (\*). Ce rapport d'analyse concerne seulement l'échantillon soumis aux analyses. Ce rapport ne doit pas être reproduit sans l'approbation du laboratoire d'essai. La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Ce rapport comporte : 5 page(s)  
 Rapport d'analyses n° : D-06927-19

Version n°1  
 Page 5/5



## Rapport d'analyses COMPOSTS

ASSOCIATION ZÉRO DÉCHET TOURAINE

Centre social Equinoxe  
Place du Maréchal Leclerc

37520 LA RICHE

### Exploitation

ASSOCIATION ZÉRO DÉCHET

### Echantillon

Type échantillon : Composts

Référence Commande :

Réf. échantillon :

SA001.1.2 / RCVL07 / IRBI/ST PIERRE .

Dossier : LAB19-12852

Numéro Labo. : D-06928-19

Date de prélèvement : 15/08/2019

Date de réception : 17/08/2019

Date fin analyses : 02/09/2019

Date début analyses : 17/04/2019

Date d'édition : 02/09/2019

Ce rapport annule et remplace le rapport papier édité le 02/09/19

Inertes	Résultats		Unités		Conformité	Valeur Limite
	C : Conforme	NC : Non Conforme				
* Films et PSE > 5 mm	NF U44-051	0.0	C	%		0.3
* Plastiques durs > 5 mm	NF U44-051	0.0	C	%		0.8
* Verres et Métaux > 2mm	NF U44-051	0.0	C	%		2

Caractérisation Agronomique	Résultats		Unités		Conformité	Valeur minimale	Limite maximale
	C : Conforme	NC : Non Conforme					
* Matière sèche	NF U44-051	47.5	C	%		30	100
* Azote Total (N) (/brut)	NF U44-051	10.6	C	o/oo			30
* Phosphore (P2O5) (/brut)	NF U44-051	4.63	C	o/oo			30
* Potassium (K2O) (/brut)	NF U44-051	12.6	C	o/oo			30
* Matière Organique par Perte au Feu (/brut)(1)	NF U44-051	341	C	o/oo		200	1000
Rapport C/N	NF U44-051	17	C	-			200
* N + P2O5 + K2O (/brut)	NF U44-051	27.8	C	o/oo			70
* Azote organique (en % de l'azote total) (/brut)	NF U44-051	96	C	%		66	100

Oligos et Eléments traces	Résultats		Unités		Conformité	Valeur Limite
	C : Conforme	NC : Non Conforme				
* Arsenic (As)	NF U44-051	1.66	C	mg/Kg		18
* Cadmium (Cd)	NF U44-051	0.44	C	mg/Kg		3
* Chrome (Cr)	NF U44-051	249	NC	mg/Kg		120
* Cuivre (Cu)	NF U44-051	500	NC	mg/Kg		300
* Mercure (Hg)	NF U44-051	< 0.2	C	mg/Kg		2
* Nickel (Ni)	NF U44-051	7.53	C	mg/Kg		60
* Plomb (Pb)	NF U44-051	3.77	C	mg/Kg		180
* Sélénium (Se)	NF U44-051	< 1.5	C	mg/Kg		12



Partie disponible sur  
www.cofrac.fr

## SADEF

Rue de la Station - F 68700 Aspach le Bas - www.sadef.fr  
Tel : +33 (0)3 89 62 72 30 - Fax : +33 (0)3 89 62 72 49 - Email : pole@sadef.fr

L'accréditation de la section Laboratoire du COFRAC atteste de la compétence technique des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation, essais identifiés par une étoile (\*). Ce rapport d'analyse concerne seulement l'échantillon soumis aux analyses. Ce rapport ne doit pas être reproduit sans l'approbation du laboratoire d'essai. La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Ce rapport comporte : 5 page(s)  
Rapport d'analyses n° : D-06928-19

Version n°1  
Page 4/5

## Exploitation

## Echantillon

ASSOCIATION ZÉRO DÉCHET		Type échantillon : Composts
Dossier : LAB19-12852		Numéro Labo. : D-06928-19
Date de prélèvement : 16/08/2019		Référence Commande : SA001.1.2 / RCVL07 / IRBI/ST PIERRE .
Date de réception : 17/08/2019		Réf. échantillon :
Date fin analyses : 02/09/2019		
Date début analyses : 17/06/2019		
Date d'édition : 02/09/2019		

Ce rapport annule et remplace le rapport papier édité le 02/09/19

* Zinc (Zn)	NF U44-051	106	C	mg/Kg		600
-------------	------------	-----	---	-------	--	-----

Composés traces Organiques	Résultats	Unités	Conformité	Valeur Limite		
	C : Conforme	NC : Non Conforme				
* Benzo(a) pyrène (HAP)	NF U44-051	<0.05	C	mg/Kg		1.5
* Benzo(b) fluoranthène (HAP)	NF U44-051	<0.05	C	mg/Kg		2.5
* Fluoranthène (HAP)	NF U44-051	<0.05	C	mg/Kg		4

Micro-Organismes Pathogènes	Résultats	Unités	Conformité	Valeur Limite		
	C : Conforme	NC : Non Conforme				
* Escherichia coli (Dénombr.)	NF U44-051	< 10000	C	UFC / g	Non interprétable (valeur limite :100).	
Entérocoques (Dénombr.)	NF U44-051	1200	C	dans 1g		10000
Oeufs d'Helminthes viables (Dénombr.)	NF U44-051	Absence	C	/ 1,5 g MB	CONFORME	
* Salmonella spp (Recherche)	NF U44-051	Absence	C	dans 25g	CONFORME	

Texte ayant servi de base à la déclaration de conformité : NF U44-051 relatif aux composts - modalité GENERAL.

(1) Valable seulement pour les dénominations 1 à 5 et 9, 10 de la norme NFU 44051. Pour les dénominations 6 (mono-produit végétal), 7 (matières végétales en mélange) et 8 (mélange de matières végétales et de matières animales), la matière organique doit être supérieure ou égale à 25% de la matière brute.

La conformité, donnée sans prise en compte des incertitudes sur les résultats, ne porte que sur les analyses demandées.

L'accréditation ne couvre que les déclarations de conformité concernant un essai ou un ensemble d'essais eux-mêmes couverts par l'accréditation.

En cas d'avis et d'interprétations, ceux-ci sont hors champ d'accréditation.

\*: Analyses SADEF réalisées sous accréditation.

## More Univariate cont stat 1

### Parameters

Attributes : 3

Examples : 50

### Results

Attribute	Stats		Histogram				
Temp. Ext.	Statistics		Values	Count	Percent	Histogram	
	Average	20,9100	x <_ 12,6000	9	18,00%		
	Median	19,5000	12,6000_=<_x_<_15,2000	4	8,00%		
	Std dev. [Coef of variation]	7,2736 [0,3479]	15,2000_=<_x_<_17,8000	7	14,00%		
	MAD [MAD/STDDEV]	6,2192 [0,8550]	17,8000_=<_x_<_20,4000	8	16,00%		
	Min * Max [Full range]	10,00 * 36,00 [26,00]	20,4000_=<_x_<_23,0000	2	4,00%		
	1st * 3rd quartile [Range]	15,00 * 26,00 [11,00]	23,0000_=<_x_<_25,6000	5	10,00%		
	Skewness (std-dev)	0,2827 (0,3366)	25,6000_=<_x_<_28,2000	4	8,00%		
	Kurtosis (std-dev)	-1,0225 (0,6619)	28,2000_=<_x_<_30,8000	7	14,00%		
			30,8000_=<_x_<_33,4000	2	4,00%		
			x >=_ 33,4000	2	4,00%		
	Temp. 10 cm	Statistics		Values	Count	Percent	Histogram
		Average	31,5900	x <_ 16,8000	1	2,00%	
		Median	30,0000	16,8000_=<_x_<_20,6000	6	12,00%	
Std dev. [Coef of variation]		9,3600 [0,2963]	20,6000_=<_x_<_24,4000	2	4,00%		
MAD [MAD/STDDEV]		7,4608 [0,7971]	24,4000_=<_x_<_28,2000	10	20,00%		
Min * Max [Full range]		13,00 * 51,00 [38,00]	28,2000_=<_x_<_32,0000	9	18,00%		
1st * 3rd quartile		26,00 * 36,00					

	[Range]	[10,00]	32,0000_=<_x_<_35,8000	9	18,00%	
	Skewness (std-dev)	0,3799 (0,3366)	35,8000_=<_x_<_39,6000	2	4,00%	
	Kurtosis (std-dev)	-0,3857 (0,6619)	39,6000_=<_x_<_43,4000	5	10,00%	
			43,4000_=<_x_<_47,2000	1	2,00%	
			x>=_47,2000	5	10,00%	
Temp. 20 cm	<b>Statistics</b>		<b>Values</b>	<b>Count</b>	<b>Percent</b>	<b>Histogram</b>
	Average	30,9500	x_<_16,9000	2	4,00%	
	Median	30,0000	16,9000_=<_x_<_20,8000	5	10,00%	
	Std dev. [Coef of variation]	9,1569 [0,2959]	20,8000_=<_x_<_24,7000	2	4,00%	
	MAD [MAD/STDDEV]	6,9680 [0,7610]	24,7000_=<_x_<_28,6000	10	20,00%	
	Min * Max [Full range]	13,00 * 52,00 [39,00]	28,6000_=<_x_<_32,5000	13	26,00%	
	1st * 3rd quartile [Range]	25,00 * 35,00 [10,00]	32,5000_=<_x_<_36,4000	8	16,00%	
	Skewness (std-dev)	0,4864 (0,3366)	36,4000_=<_x_<_40,3000	4	8,00%	
	Kurtosis (std-dev)	0,0037 (0,6619)	40,3000_=<_x_<_44,2000	0	0,00%	
			44,2000_=<_x_<_48,1000	2	4,00%	
			x>=_48,1000	4	8,00%	

Computation time : 0 ms.

Created at 02/12/2019 18:07:19

## Normality Test 1

### Parameters

Attributes : 3

Examples : 50

### Results

Attribute	Mu ; Sigma	Shapiro-Wilk	Lilliefors D = max[D-, D+] (p-value)	Anderson-Darling	d'Agostino (p-value)
-----------	------------	--------------	--------------------------------------	------------------	----------------------

		(p-value)		(p-value)	
Temp. Ext.	20,9100 ; 7,2736	0,947353 (0,0266)	0,1143 = max[0,1143,0,1098] (0.05 =< p < 0.10)	0,827117 (0.025 =< p < 0.05)	$0,8717^2 + -2,5014^2 =$ 7,0170 (0,0299)
Temp. 10 cm	31,5900 ; 9,3600	0,965278 (0,1478)	0,1074 = max[0,0670,0,1074] (0.15 =< p < 0.20)	0,562142 ( p >= 0.10)	$1,1603^2 + -0,5096^2 =$ 1,6060 (0,4480)
Temp. 20 cm	30,9500 ; 9,1569	0,963320 (0,1225)	0,0944 = max[0,0779,0,0944] ( p >= 0.20)	0,612270 ( p >= 0.10)	$1,4665^2 + 0,2247^2 =$ 2,2012 (0,3327)

Computation time : 0 ms.

Created at 02/12/2019 18:07:43

RT2

## FYTH 1-way ANOVA 1

### Parameters

Parameters

Sort results no

### Results

Attribute_Y	Attribute_X	Description					Statistical test	
Temp. Ext.	Categories	<b>Value</b>	<b>Examples</b>	<b>Average</b>	<b>Scores sum</b>	<b>Scores mean</b>	<b>Two-Sample Test</b>	
		S						-3,55964
		Compostou	35	21,6429	3,5596	0,1017	E(S)	0,00000
		Composteur haute energie	15	19,2000	-3,5596	-0,2373	V(S)	10,02514
		All	50	20,9100	0,0	0,0000	Z	1,12425
							p-value	0,26091
							<b>One-way Analysis</b>	
							Chi-Square	1,26393
							d.f.	1
							p-value	0,26091
Temp. 10 cm	Categories	<b>Value</b>	<b>Examples</b>	<b>Average</b>	<b>Scores sum</b>	<b>Scores mean</b>	<b>Two-Sample Test</b>	
		S						5,89323
		Compostou	35	29,7286	-5,8932	-0,1684		

		Composteur haute energie	15	35,9333	5,8932	0,3929	E(S)	0,00000
		All	50	31,5900	0,0	0,0000	V(S)	10,04869
							Z	1,85908
							p-value	0,06302
							<b>One-way Analysis</b>	
							Chi-Square	3,45619
							d.f.	1
							p-value	0,06302
Temp. 20 cm	Categories	Value	Examples	Average	Scores sum	Scores mean	<b>Two-Sample Test</b>	
		Compostou	35	28,9000	-6,5663	-0,1876	S	6,56629
		Composteur haute energie	15	35,7333	6,5663	0,4378	E(S)	0,00000
		All	50	30,9500	0,0	0,0000	V(S)	10,08462
							Z	2,06771
							p-value	0,03867
							<b>One-way Analysis</b>	
							Chi-Square	4,27544
							d.f.	1
							p-value	0,03867

Computation time : 0 ms.

Created at 02/12/2019 18:20:44

RT3

### Kruskal-Wallis 1-way ANOVA 1

#### Parameters

Parameters

Sort results no

#### Results

Attribute_Y	Attribute_X	Description					Statistical test		
		Value	Examples	Average	Rank sum	Rank mean	Statistics	Value	Proba
Temp. Ext.	Categories						Kruskal-	1,282801	0,257379

		Compostou	35	21,6429	946,0	27,0286	Wallis		
		Composteur haute energie	15	19,2000	329,0	21,9333	KW (corr.ties)	1,288866	0,256257
		All	50	20,9100	1275,0	25,5000			
Temp. 10 cm	Categories	Value	Examples	Average	Rank sum	Rank mean	Statistics	Value	Proba
		Compostou	35	29,7286	815,0	23,2857	Kruskal-Wallis	2,691877	0,100861
		Composteur haute energie	15	35,9333	460,0	30,6667	KW (corr.ties)	2,705387	0,100010
		All	50	31,5900	1275,0	25,5000			
Temp. 20 cm	Categories	Value	Examples	Average	Rank sum	Rank mean	Statistics	Value	Proba
		Compostou	35	28,9000	815,0	23,2857	Kruskal-Wallis	2,691877	0,100861
		Composteur haute energie	15	35,7333	460,0	30,6667	KW (corr.ties)	2,700175	0,100337
		All	50	30,9500	1275,0	25,5000			

Computation time : 0 ms.

Created at 02/12/2019 18:17:07

RT4

## Van der Waerden 1-way ANOVA 1

### Parameters

Parameters

Sort results no

### Results

Attribute_Y	Attribute_X	Description					Statistical test	
Temp. Ext.	Categories	Value	Examples	Average	Scores sum	Scores mean	Two-Sample Test	
		Compostou	35	21,6429	3,4187	0,0977	S	-3,41868
		Composteur haute energie	15	19,2000	-3,4187	-0,2279	E(S)	0,00000
		All	50	20,9100	0,0	0,0000	V(S)	9,24748
							Z	1,12421
					p-value	0,26092		
						One-way Analysis		

							Chi-Square	1,26385	
							d.f.	1	
							p-value	0,26092	
Temp. 10 cm	Categories		<b>Value</b>	<b>Examples</b>	<b>Average</b>	<b>Scores sum</b>	<b>Scores mean</b>	<b>Two-Sample Test</b>	
			Compostou	35	29,7286	-5,6290	-0,1608	S	5,62898
			Composteur haute energie	15	35,9333	5,6290	0,3753	E(S)	0,00000
			All	50	31,5900	0,0	0,0000	V(S)	9,26890
								Z	1,84891
								p-value	0,06447
								<b>One-way Analysis</b>	
								Chi-Square	3,41847
								d.f.	1
								p-value	0,06447
Temp. 20 cm	Categories		<b>Value</b>	<b>Examples</b>	<b>Average</b>	<b>Scores sum</b>	<b>Scores mean</b>	<b>Two-Sample Test</b>	
			Compostou	35	28,9000	-6,1937	-0,1770	S	6,19373
			Composteur haute energie	15	35,7333	6,1937	0,4129	E(S)	0,00000
			All	50	30,9500	0,0	0,0000	V(S)	9,29608
								Z	2,03143
								p-value	0,04221
								<b>One-way Analysis</b>	
								Chi-Square	4,12672
								d.f.	1
								p-value	0,04221

Computation time : 16 ms.

Created at 02/12/2019 18:19:58

TC1

## Normality Test 1

## Parameters

Attributes : 1

Examples : 91

## Results

Attribute	Mu ; Sigma	Shapiro- Wilk (p-value)	Lilliefors D = max[D- ,D+] (p-value)	Anderson- Darling (p-value)	d'Agostino (p-value)
Longueur de la racine de germes de cresson	4,7945 ; 1,3908	0,941819 (0,0005)	0,1147 = max[0,1147,0,0682] (p < 0.01)	1,687244 (p < 0.01)	$-3,2151^2 + 2,1747^2 = 15,0659$ (0,0005)

Computation time : 0 ms.

Created at 12/06/2019 12:50:51

TC2

## One-way ANOVA 1

### Parameters

Parameters

Sort results no

## Results

Attribute_Y	Attribute_X	Description				Statistical test				
Longueur de la racine de germes de cresson	Categories	Value	Examples	Average	Std-dev	Variance decomposition				
		Temoin 06/06	46	4,0511	1,3295	Source	Sum of square	d.f.		
		Temoin 07/06	45	5,5544	0,9901	BSS	51,4107	1		
		All	91	4,7945	1,3908	WSS	122,6766	89		
						TSS	174,0873	90		
		Significance level						Statistics	Value	Proba
								Fisher's F	37,297689	0,000000

Computation time : 0 ms.

Created at 12/06/2019 12:54:18

TC3

## Kruskal-Wallis 1-way ANOVA 1

### Parameters

Parameters
Sort results no

### Results

Attribute_Y	Attribute_X	Description					Statistical test		
Longueur de la racine de germes de cresson	Categories	Value	Examples	Average	Rank sum	Rank mean	Statistics	Value	Proba
		Kruskal-Wallis	32,348598	0,000000					
		KW (corr.ties)	32,369734	0,000000					
		All	91	4,7945	4186,0	46,0000			

Computation time : 0 ms.  
Created at 12/06/2019 12:56:09

TC4

## Normality Test 1

### Parameters

Attributes : 1  
Examples : 10

### Results

Attribute	Mu ; Sigma	Shapiro-Wilk (p-value)	Lilliefors D = max[D-,D+] (p-value)	Anderson-Darling (p-value)	d'Agostino (p-value)
Pourcentage moyen de graines germees	91,0000 ; 9,9443	0,828974 (0,0325)	0,2599 = max[0,2599,0,1827] (0,01 =< p < 0,05)	0,739641 (0,05 =< p < 0,10)	-1,5888 ^ 2 + 0,8385 ^ 2 = 3,2273 (0,1992)

Computation time : 0 ms.  
 Created at 12/06/2019 13:37:50

## TC5

One-way ANOVA 1										
Parameters										
Parameters										
Sort results no										
Results										
Attribute_Y	Attribute_X	Description				Statistical test				
Pourcentage moyen de graines germees	Categories	Value	Examples	Average	Std-dev	Variance decomposition				
		Temoin 06/06	5	92,0000	8,3666	Source	Sum of square	d.f.		
		Temoin 07/06	5	90,0000	12,2474	BSS	10,0000	1		
						WSS	880,0000	8		
		All	10	91,0000	9,9443	TSS	890,0000	9		
								Significance level		
								Statistics	Value	Proba
								Fisher's F	0,090909	0,770713

Computation time : 0 ms.  
 Created at 12/06/2019 13:38:49

## TC6

Normality Test 1					
Parameters					
Attributes : 1					
Examples : 224					
Results					
Attribute	Mu ; Sigma	Shapiro-	Lilliefors D = max[D-	Anderson-	d'Agostino

		Wilk (p-value)	,D+] (p-value)	Darling (p-value)	(p-value)
Longueur du germe de cresson	3,9004 ; 1,0014	0,978797 (0,0019)	0,0850 = max[0,0850,0,0391] (p < 0.01)	1,296413 (p < 0.01)	-3,3543 ^ 2 + 1,6367 ^ 2 = 13,9300 (0,0009)

Computation time : 0 ms.

Created at 12/06/2019 15:52:53

TC7

## One-way ANOVA 1

### Parameters

Parameters
Sort results no

### Results

Attribute_Y	Attribute_X	Description				Statistical test		
Longueur du germe de cresson	Categorie	Value	Examples	Average	Std-dev	Variance decomposition		
		Temoin 06/06	46	4,0511	1,3295	Source	Sum of square	d.f.
		RCVL06.C50	42	3,5345	0,6905	BSS	22,3708	4
		RCVL06.C75	49	3,5173	0,9739	WSS	201,2691	219
		RCVL05.C50	44	4,2102	0,8375	TSS	223,6400	223
		RCVL05.C75	43	4,2163	0,7943	Significance level		
		All	224	3,9004	1,0014	Statistics	Value	Proba
						Fisher's F	6,085394	0,000116

Computation time : 0 ms.

Created at 12/06/2019 15:55:08

TC8

## Normality Test 2

### Parameters

Attributes : 1  
 Examples : 226

Results					
Attribute	Mu ; Sigma	Shapiro-Wilk (p-value)	Lilliefors D = max[D-, D+] (p-value)	Anderson-Darling (p-value)	d'Agostino (p-value)
Longueur du germe de cresson	6,3345 ; 1,7384	0,975211 (0,0005)	0,0713 = max[0,0713,0,0362] (p < 0.01)	1,177919 (p < 0.01)	$-2,6768^2 + 2,5785^2 = 13,8137$ (0,0010)

Computation time : 0 ms.  
 Created at 12/06/2019 17:46:02

TC9

## One-way ANOVA 1

### Parameters

Parameters
Sort results no

### Results

Attribute_Y	Attribute_X	Description				Statistical test		
Longueur du germe de cresson	Categorie	Value	Examples	Average	Std-dev	Variance decomposition		
		Temoin 07/06	45	5,5544	0,9901	Source	Sum of square	d.f.
		RCVL02.C50	46	5,9109	1,3319	BSS	92,8127	4
		RCVL02.C75	42	6,2321	1,0417	WSS	587,1381	221
		RCVL07.C50	44	6,4852	2,4293	TSS	679,9508	225
		RCVL07.C75	49	7,4010	1,8592	Significance level		
		All	226	6,3345	1,7384	Statistics	Value	Proba
						Fisher's F	8,733719	0,000001

Computation time : 0 ms.  
 Created at 12/06/2019 17:48:41

## TC10

### Normality Test 1

#### Parameters

Attributes : 1

Examples : 25

#### Results

Attribute	Mu ; Sigma	Shapiro-Wilk (p-value)	Lilliefors D = max[D-,D+] (p-value)	Anderson-Darling (p-value)	d'Agostino (p-value)
Pourcentage moyen de graines germees	89,6000 ; 12,0692	0,809562 (0,0003)	0,2856 = max[0,2856,0,1944] (p < 0.01)	1,942015 (p < 0.01)	-1,8154 ^ 2 + -0,0927 ^ 2 = 3,3043 (0,1916)

Computation time : 0 ms.

Created at 12/06/2019 18:47:33

## TC11

### One-way ANOVA 1

#### Parameters

Parameters

Sort results no

#### Results

Attribute_Y	Attribute_X	Description				Statistical test		
Pourcentage moyen de graines germees	Categories	Value	Examples	Average	Std-dev	Variance decomposition		
		Temoin 06/06	5	92,0000	8,3666	Source	Sum of square	d.f.
		RCVL06.C50	5	84,0000	16,7332	BSS	616,0000	4
		RCVL06.C75	5	98,0000	4,4721	WSS	2880,0000	20
		RCVL05.C50	5	88,0000	10,9545	TSS	3496,0000	24
		RCVL05.C75	5	86,0000	15,1658	Significance level		
		All	25	89,6000	12,0692	Statistics	Value	Proba

Fisher's F	1,069444	0,397591
------------	----------	----------

Computation time : 0 ms.

Created at 12/06/2019 18:49:59

## TC12

### Normality Test 1

#### Parameters

Attributes : 1

Examples : 25

#### Results

Attribute	Mu ; Sigma	Shapiro-Wilk (p-value)	Lilliefors D = max[D-, D+] (p-value)	Anderson-Darling (p-value)	d'Agostino (p-value)
Pourcentage moyen de graines germees	90,4000 ; 11,7189	0,746411 (0,0000)	0,2737 = max[0,2737,0,2063] (p < 0.01)	2,557158 (p < 0.01)	-1,9699 ^ 2 + -0,7040 ^ 2 = 4,3762 (0,1121)

Computation time : 0 ms.

Created at 12/06/2019 19:07:07

## TC13

### One-way ANOVA 1

#### Parameters

Parameters

Sort results no

#### Results

Attribute_Y	Attribute_X	Description				Statistical test		
Pourcentage moyen de graines germees	Categories	Value	Examples	Average	Std-dev	Variance decomposition		
		Temoin 07/06	5	90,0000	12,2474	Source	Sum of square	d.f.

		RCVL02.C50	5	92,0000	13,0384	BSS	536,0000	4
		RCVL02.C75	5	84,0000	13,4164	WSS	2760,0000	20
		RCVL07.C50	5	88,0000	13,0384	TSS	3296,0000	24
		RCVL07.C75	5	98,0000	4,4721	<b>Significance level</b>		
		All	25	90,4000	11,7189	<b>Statistics</b>	<b>Value</b>	<b>Proba</b>
						Fisher's F	0,971014	0,445194

Computation time : 0 ms.

Created at 12/06/2019 19:08:38

## TC14

Linear correlation 1						
Parameters						
Cross-tab parameters						
Sort results	non					
Input list	Target (Y) and input (X)					
Results						
Y	X	r	R <sup>2</sup>	t	Pr(>  t )	
Taux d'humidité estimé	IGm	-0,4536	0,2058	-0,7198	0,5464	

Computation time : 0 ms.

Created at 12/06/2019 19:46:41

## TC15

Linear correlation 1						
Parameters						
Cross-tab parameters						
Sort results	non					
Input list	Target (Y) and input (X)					
Results						
Y	X	r	R <sup>2</sup>	t	Pr(>  t )	

Igm	Durée des apports	0,0402	0,0016	0,0570	0,9598
-----	-------------------	--------	--------	--------	--------

Computation time : 0 ms.

Created at 12/06/2019 20:41:33

## TC16

### Linear correlation 1

#### Parameters

Cross-tab parameters	
Sort results	non
Input list	Target (Y) and input (X)

#### Results

Y	X	r	R <sup>2</sup>	t	Pr(>  t )
Igm	Duree de la maturation	-0,3801	0,1445	-0,5812	0,6199

Computation time : 0 ms.

Created at 12/06/2019 20:45:09

## TC17

### Linear correlation 1

#### Parameters

Cross-tab parameters	
Sort results	non
Input list	Target (Y) and input (X)

#### Results

Y	X	r	R <sup>2</sup>	t	Pr(>  t )
Igm	Duree totale de formation du compost	-0,1278	0,0163	-0,1823	0,8722

Computation time : 0 ms.

Created at 12/06/2019 20:49:15

TC18

## Linear correlation 1

### Parameters

Cross-tab parameters	
Sort results	non
Input list	Target (Y) and input (X)

### Results

Y	X	r	R <sup>2</sup>	t	Pr(> t )
Taux d'humidité estimé	Durée totale de formation du compost	0,9251	0,8558	3,4452	0,0749

Computation time : 0 ms.

Created at 12/06/2019 20:53:44

VC1

## More Univariate cont stat 1

### Parameters

Attributes : 1

Examples : 12

### Results

Attribut e	Stats		Histogram			
			Values	Coun t	Percen t	Histogram
Volume de compost	Statistics					
	Average	295,833 3	x_<_255,0000	1	8,33%	<div style="width: 8.33%; height: 15px;"></div>
	Median	300,000 0	255,0000_=<_x_<_260,00 00	0	0,00%	-
	Std dev. [Coef of variation]	14,4338 [0,0488]	260,0000_=<_x_<_265,00 00	0	0,00%	-
			265,0000_=<_x_<_270,00	0	0,00%	-

MAD [MAD/STDDEV ]	7,6389 [0,5292]	00 270,0000_=<_x_<_275,00 00	0	0,00%	-
Min * Max [Full range]	250,00 * 300,00 [50,00]	275,0000_=<_x_<_280,00 00	0	0,00%	-
1st * 3rd quartile [Range]	300,00 * 300,00 [0,00]	280,0000_=<_x_<_285,00 00	0	0,00%	-
Skewness (std-dev)	-3,4641 (0,6373)	285,0000_=<_x_<_290,00 00	0	0,00%	-
Kurtosis (std- dev)	12,0000 (1,2322)	290,0000_=<_x_<_295,00 00	0	0,00%	-
		x>=_295,0000	11	91,67%	

Computation time : 0 ms.

Created at 04/12/2019 15:37:59

## Normality Test 1

### Parameters

Attributes : 1

Examples : 12

### Results

Attribute	Mu ; Sigma	Shapiro- Wilk (p-value)	Lilliefors D = max[D- ,D+] (p-value)	Anderson- Darling (p-value)	d'Agostino (p-value)
Volume de compost	295,8333 ; 14,4338	0,326928 (0,0000)	0,5303 = max[0,5303,0,3864] (p < 0.01)	4,009473 (p < 0.01)	-4,3244 ^ 2 + 3,8661 ^ 2 = 33,6476 (0,0000)

Computation time : 0 ms.

Created at 04/12/2019 15:38:07

VC2

## Kruskal-Wallis 1-way ANOVA 1

## Parameters

Parameters
Sort results no

## Results

Attribute_Y	Attribute_X	Description					Statistical test		
Volume de compost	Categories	Value	Examples	Average	Rank sum	Rank mean	Statistics	Value	Proba
		Avant maturation	6	300,0000	42,0	7,0000	Kruskal-Wallis	0,230769	0,630954
		Apres maturation	6	291,6667	36,0	6,0000	KW (corr.ties)	1,000000	0,317311
		All	12	295,8333	78,0	6,5000			

Computation time : 0 ms.

Created at 04/12/2019 15:39:04