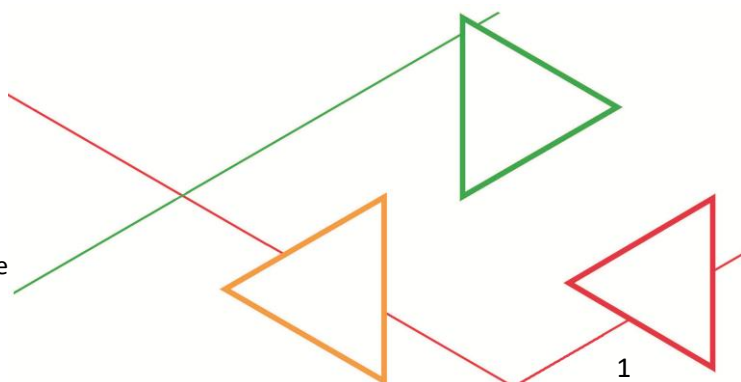


Étude sur la dégradation des sacs en plastique biosourcé

—
RAPPORT FINAL

Octobre 2024

Rapport final n°... (numéro RAP du portal) – Acronyme
Institut Scientifique de Service Public – www.issep.be



Étude sur la dégradation des sacs en plastique biosourcé

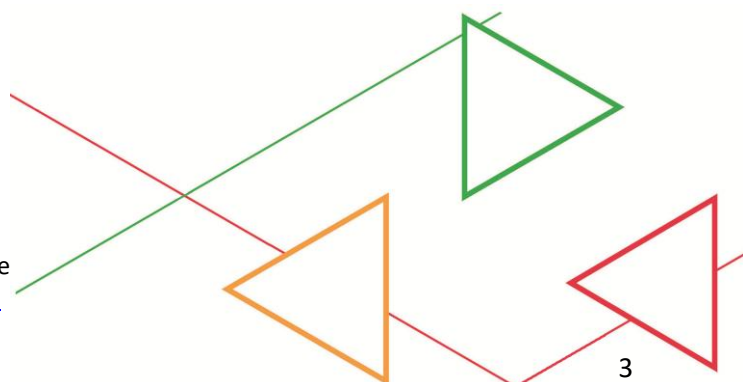
Durée du projet	Du 01/10/2022 au 30/09/2024
Auteur(s)	Florian Liénard (Unité « Recherche & Développement »)
Autres membres d'équipe du projet	Laurence Haouche (Direction des Laboratoires) Marvin Dufranne (Unité « Matières Solides »)
Personne de contact	Florian Liénard – fl.lienard@issep.be
Vérificateur(s)	Laurence Haouche (Direction des Laboratoires) Anne-Florence Taminiaux (SPW ARNE) Anne Gendebien (SPW ARNE)
Observateurs	Vincent Brahy (Cabinet de la Ministre de l'Environnement, de la Nature, de la Forêt, de la Ruralité et du Bien-être animal) Nicolas Duez (HYGÉA) Gaëtan Dufey (BEP) Sandrine Desmons (COPIDEC) Erik Vanderlinden (The Compost Bag Company) Philippe Dewolfs (TUV-A) Jules LOBRY-DEBLYCK (Action Europe)

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'ISSeP, dans le cadre du développement à la recherche. La responsabilité de l'ISSeP ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées. L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'ISSeP ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'ISSeP d'actualiser ce document après cette date. Au vu des missions qui lui incombent, l'ISSeP n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'ISSeP dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'ISSeP ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Ce rapport ne peut être reproduit sinon en entier. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'ISSeP dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Référencement : ISSeP (2024), Titre, n° de rapport

Rapport final n°... (numéro RAP du portal) – Acronyme
Institut Scientifique de Service Public – www.issep.be



Résumé

Cette étude a été menée par l'ISSeP et en partenariat avec le Département Sols et Déchets (DSD) du Service Public de Wallonie (SPW ARNE). L'objectif principal était d'évaluer en conditions réelles la dégradation effective de sacs en plastique commercialisés comme compostables en Wallonie à travers trois types de compostage : individuel, collectif et industriel.

Les sacs étudiés se répartissaient entre trois sacs de 5 litres (A, B et C) pour le compostage individuel et collectif, et trois sacs de 15-20 litres (D, E et F) pour le compostage industriel. Une analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a révélé que le sac C était composé de polyéthylène, c'est-à-dire un plastique non assimilable par le vivant.

L'expérience de compostage individuel, démarrée en avril 2023 et s'étendant sur 12 mois, a été réalisée avec des fûts de compostage entretenus par des guides composteurs de l'intercommunale HYGÉA, contenant les sacs A, B et C en triplicats, ainsi que des fûts témoins sans sacs. Le compostage collectif, débuté également en avril 2023, a impliqué l'introduction des mêmes types de sac dans trois composts de quartier distincts de la Ville de Mons, avec un compost témoin sans sac. La troisième expérience de compostage industriel, menée de juillet à novembre 2023, a eu lieu dans le centre de compostage de l'intercommunale BEP situé à Naninne, où les sacs D, E et F ont été suivis dans des sections spécifiques du compost, en plus d'une section témoin sans sacs.

En termes de suivi, le pH, l'humidité et la température ont été surveillées tout au long des expériences en compostage individuel et collectif. Dans les deux cas, une observation visuelle de la dégradation du plastique à six mois a été effectuée, ainsi qu'une évaluation finale à douze mois selon la norme NBN EN 13432, qui décrit les exigences relatives aux emballages valorisables par compostage et biodégradation. En compostage industriel, seul un suivi du pH et de l'humidité a pu être assuré pour des raisons pratiques. Comme dans le cadre des deux autres expériences, des évaluations visuelles de la dégradation du plastique ont été effectuées avant l'étape de maturation de la matière, et des analyses, toujours selon la norme NBN EN 13432, ont été réalisées en fin de processus. De plus, la qualité physico-chimique du compost mature obtenu lors des différentes opérations de compostage a aussi été mesurée selon la réglementation relative au compost industriel en vigueur.

En compostage individuel, les sacs A et B ne se sont pas suffisamment dégradés en regard de la norme considérée : des fragments de plastique de taille centimétrique ont été retrouvés dans la matière minéralisée, rendant le compost non valorisable. En compostage collectif, la dégradation variait selon le sac : si le sac A s'est dégradé efficacement, le sac B a persisté à l'état de fragments centimétriques dans le compost mature. Dans ces deux modalités de compostage, le sac C ne se dégradait pas puisque composé de plastique persistant. En revanche, en compostage industriel, la dégradation des sacs D, E et F était conforme à la norme utilisée.

En conclusion, l'étude a révélé que les sacs en plastique étudiés ne se dégradent pas de manière uniforme dans les différents types de compostage. En effet, alors que le compostage industriel assure une dégradation presque complète des plastiques, le compostage individuel et collectif présente des résultats plus variables, avec des fragments de plastique non-conformes à la réglementation subsistant dans certains cas.

Abstract

This study was conducted by ISSeP in partnership with the Soil and Waste Department (DSD) of the Public Service of Wallonia (SPW ARNE). The primary objective was to evaluate the actual degradation of plastic bags marketed as compostable in Wallonia under real conditions across three types of composting: individual, collective, and industrial.

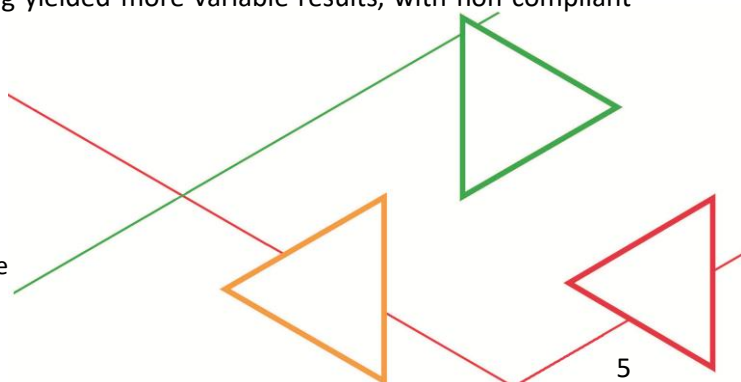
The bags studied included three 5-liter bags (A, B, and C) for individual and collective composting, and three 15-20 liter bags (D, E, and F) for industrial composting. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) analysis revealed that bag C was made of polyethylene, a plastic that is not biodegradable.

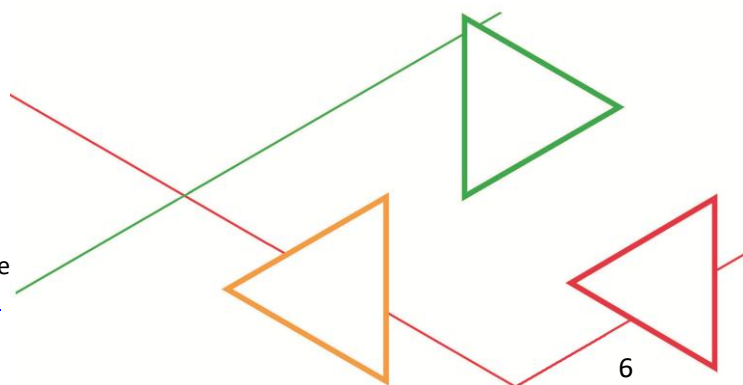
The individual composting experiment, which began in April 2023 and spanned 12 months, was conducted with composting bins maintained by composting guides from the HYGÉA intermunicipal authority. These bins contained triplicates of bags A, B, and C, as well as control bins without bags. The collective composting, also started in April 2023, involved the introduction of the same types of bags into three distinct neighborhood composts in the City of Mons, with one compost acting as a control without bags.

In terms of monitoring, pH, moisture, and temperature were measured throughout the individual and collective composting experiments. In both cases, a visual observation of plastic degradation was conducted at six months, followed by a final evaluation at twelve months according to the NBN EN 13432 standard, which sets requirements for packaging that can be recovered through composting and biodegradation. For industrial composting, only pH and moisture monitoring was possible due to practical reasons. As with the other experiments, visual assessments of plastic degradation were conducted before the material maturation stage, and analyses were performed at the end of the process, again following the NBN EN 13432 standard. Additionally, the physicochemical quality of the mature compost obtained from the different composting operations was measured according to the applicable regulations for industrial compost.

In individual composting, bags A and B did not degrade sufficiently to meet the standard: centimetre-sized plastic fragments were found in the mineralized material, making the compost unsuitable for use. In collective composting, the degradation varied depending on the bag: while bag A degraded effectively, bag B persisted as centimetre-sized fragments in the mature compost. In both composting methods, bag C did not degrade, as it was made of non-biodegradable plastic. However, in industrial composting, the degradation of bags D, E, and F was compliant with the standard.

In conclusion, the study revealed that the plastic bags studied did not degrade uniformly across the different composting methods. While industrial composting ensured almost complete degradation of the plastics, individual and collective composting yielded more variable results, with non-compliant plastic fragments remaining in some cases.





SYNTHESE DU PROJET

SUBVENTION OCTROYÉE PAR LE CABINET DE LA MINISTRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE LA NATURE, DE LA FORÊT, DE LA RURALITÉ ET DU BIEN-ÊTRE ANIMAL.

TITRE DU PROJET : Étude sur la dégradation des sacs en plastique biosourcé

BUDGET : 237.000 €

CHEF DE PROJET : Florian Liénard

PARTENAIRES :

- SPW ARNE, Département du Sol et des Déchets – Direction des Infrastructures de Gestion et de la Politique des Déchets : Anne-Florence Taminiaux
- SPW ARNE, Département du Sol et des Déchets – Direction de la Protection des Sols : Anne Gendebien
- Cabinet de la Ministre de l'Environnement, de la Nature, de la Forêt, de la Ruralité et du Bien-être animal : Vincent Brahy

LECTEURS EXTERNES : ANNE-FLORENCE TAMINIAUX (SPW ARNE), ANNE GENDEBIEN (SPW ARNE), VINCENT BRAHY (CABINET DE LA MINISTRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE LA NATURE, DE LA FORÊT, DE LA RURALITÉ ET DU BIEN-ÊTRE ANIMAL)

OBSERVATEURS : NICOLAS DUEZ (HYGÉA), GAËTAN DUFÉY (BEP), SANDRINE DESMONS (COPIDEC), ERIK VANDERLINDEN (THE COMPOST BAG COMPANY), PHILIPPE DEWOLFS (TUV-A), JULES LOBRY-DEBLYCK (ACTION EUROPE)

DURÉE DU PROJET : 24 MOIS

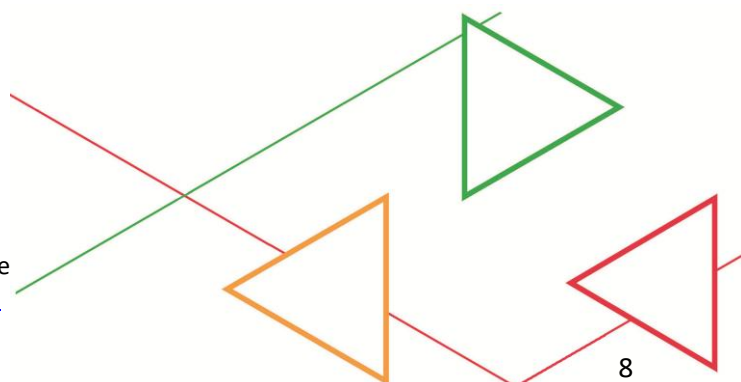
DATE DE DÉMARRAGE DU PROJET : 01/10/2022

REMERCIEMENTS :

Nous tenons à remercier le réseau de guides composteurs des intercommunales HYGÉA et IPALLE, dont certains ont accepté de participer à l'expérimentation en compostage individuel en entretenant des fûts à domicile. Nous remercions particulièrement M. Nicolas Duez qui, en tant qu'interlocuteur d'HYGÉA, nous a partagé son expertise technique tout au long de l'étude. Nous exprimons également notre gratitude à la Ville de Mons pour avoir mis à disposition ses composts de quartier pour l'expérience de compostage collectif, ainsi qu'aux référents de site pour leur implication. Un grand merci au centre de compostage de Naninne, représenté par M. Gaëtan Dufey, ainsi qu'à son personnel pour leurs compétences et leur assistance lors de la mise en œuvre de l'expérience de compostage industriel. Nous exprimons également notre reconnaissance à la COPIDEC pour son soutien continu et sa participation au comité de pilotage. Nos remerciements vont également à l'association Belgian

Rapport final n°... (numéro RAP du portal) – Acronyme
Institut Scientifique de Service Public – www.issep.be

Biopackaging et à M. Philip Dewolfs, représentant de TUV-A, qui ont enrichi les réunions du comité de pilotage par leurs éclaircissements techniques et leur expertise sur les plastiques biodégradables. Enfin, nous remercions chaleureusement le Cabinet de la Ministre de l'Environnement pour le financement de cette étude, sans lequel ce travail n'aurait pas été possible.



Contenu

1	Introduction.....	13
2	Expérimentations en compostage individuel et collectif	15
2.1	Matériel et méthode	16
2.1.1	Choix des sacs expérimentaux.....	16
2.1.2	Dispositif expérimental	17
2.1.3	Alimentation et entretien des dispositifs expérimentaux.....	20
2.1.4	Échantillonnage	21
2.1.5	Suivi physico-chimique	24
2.1.6	Évaluation de la dégradation des sacs en plastique.....	26
2.1.7	Analyse statistique	29
2.2	Résultats & Discussion.....	29
2.2.1	Suivi physico-chimique	30
2.2.2	Évaluation de la dégradation des sacs en plastique.....	39
2.3	Conclusion	47
3	Expérimentation en compostage industriel.....	49
3.1	Matériel et méthode	49
3.1.1	Choix des sacs expérimentaux.....	49
3.1.2	Dispositif expérimental	49
3.1.3	Introduction des sacs expérimentaux dans la matière et entretien du compost	50
3.1.4	Échantillonnage	53
3.1.5	Suivi physico-chimique	54
3.1.6	Évaluation de la dégradation des sacs en plastique.....	54
3.1.7	Analyse statistique	54
3.2	Résultats et Discussion	55
3.2.1	Suivi physico-chimique	55
3.2.2	Dégradation des sacs en plastique	57
3.3	Conclusions.....	60
4	Conclusions et Perspectives	62
5	Bibliographie.....	64

Glossaire & Liste des abréviations

Adhérent : Riverain participant à la démarche de compostage collectif. Il alimente le compost en matières azotées et, s'il s'investit, peut assister le référent de site dans son rôle.

BBP : Acronyme désignant l'association *Belgian Biopackaging* qui promeut les matériaux compostables et biodégradables d'origine renouvelable et initie des projets de sensibilisation à leur utilisation.

Biodégradable : Caractérise tout produit ou matériau pouvant se décomposer naturellement sous l'action de micro-organismes (bactéries, champignons, etc.) et se transformer en substances inoffensives pour l'environnement comme l'eau, le CO₂ ou la biomasse.

Biosourcé : Caractérise tout produit ou matériau entièrement ou partiellement fabriqué à partir de matières d'origine biologique.

Brass-compost : Outil en forme de ressort fourni par l'intercommunale HYGÉA permettant de mélanger un compost individuel ou collectif.

Compostable : Caractérise tout produit ou matériau pouvant se dégrader dans des conditions spécifiques de compostage, et en produisant un compost valorisable. Un produit compostable doit respecter des normes, comme la norme EN 13432, garantissant une dégradation rapide et la production de compost sans résidus toxiques.

Compostage : Processus biologique comprenant plusieurs phases de dégradation et de transformation de déchets organiques, permettant d'obtenir un produit valorisable appelé compost.

Guide composteur : Citoyen bénévole formé au compostage et qui partage ses connaissances et son expérience pour encadrer ceux qui souhaitent démarrer un compost voire les aider à résoudre les problèmes liés à cette pratique. Ils sont généralement affiliés au réseau d'une intercommunale.

IC : Acronyme désignant une intercommunale, soit une association de plusieurs communes qui collaborent pour gérer des services d'intérêt communal tels que la gestion des déchets, la distribution d'électricité ou encore la gestion d'hôpitaux.

Matières azotées : Déchets organiques verts, mous et humides. Ils ont tendance à être riches en azote et facilement assimilables par les organismes décomposeurs.

Matières carbonées : Déchets organiques bruns, durs et secs. Ils ont tendance à être plus riches en carbone qu'en azote, ce qui les rend difficilement assimilables par les organismes décomposeurs. Conservant leur structure sur une longue durée, leur présence dans un compost favorise son aération et assure donc des conditions aérobies au sein de celui-ci.

Microplastique : Objet individuel de taille inférieure à 5 mm, solide, insoluble dans l'eau et composé partiellement ou entièrement de polymères synthétiques ou de polymères naturels modifiés chimiquement. Dans le cadre de cette étude, au niveau métrologique, un microplastique est

spécifiquement défini comme une particule traversant un tamis de 2 mm mais restant visible à l'œil nu (taille minimale de 0,1 mm environ).

Nanoplastique : Objet individuel dont la plus grande dimension externe est au moins nanométrique et au plus micrométrique, solide, insoluble dans l'eau et composé partiellement ou entièrement de polymères synthétiques ou de polymères naturels modifiés chimiquement.

Référent de site : Riverain adhérent à un compost collectif se chargeant de la coordination, la logistique et la communication entre les différents acteurs concernés par un système de compostage collectif (administration urbaine, maison de quartier et adhérents). Formé à la pratique du compostage collectif, il assure également la maintenance du système selon les règles de bonnes pratiques.

Rotation : Intervention consistant à transférer l'intégralité de la matière contenue dans un bac vers un autre bac d'un système de compostage collectif.

1 Introduction

Depuis l'adoption de l'arrêté du Gouvernement wallon du 06 juillet 2017 interdisant l'utilisation de sacs en plastique à usage unique, quel que soit leur composition ou leur caractère biodégradable, une question demeure quant au devenir des sacs en plastique biosourcé réputés compostables. En vertu de l'article 2§3 de cet arrêté, l'Administration est chargée de présenter un rapport au Gouvernement, d'abord deux ans après l'entrée en vigueur de l'arrêté, puis avant le 31 décembre 2025, évaluant la mise en œuvre des dispositions ainsi que les alternatives existantes aux sacs en plastique. Le secteur des bioplastiques, considérant que ses sacs constituent une alternative, souhaitait exclure ces produits du champ d'application de l'arrêté susmentionné. Dans ce cadre, le cabinet de la Ministre de l'Environnement a initié une étude pour évaluer la capacité de ces sacs à se dégrader dans trois types de compostage courants en Wallonie : individuel, collectif et industriel. En se concentrant sur des conditions d'utilisation réelles, cette étude contribue directement à la préparation du rapport en question et vise à fournir des données pour orienter les futures politiques de gestion des plastiques compostables en Wallonie.

Réalisée par l'Institut Scientifique de Service Public (ISSeP), et en partenariat avec le Service Public de Wallonie Agriculture, Ressources Naturelles et Environnement (SPW ARNE), l'étude a débuté en octobre 2022. Plusieurs actions préparatoires au travail expérimental en tant que tel ont été entreprises : une revue de la littérature scientifique, la sollicitation du réseau d'intercommunales wallonnes et des échanges avec des professionnels du compostage ainsi qu'avec des membres de BBP pour leur lien avec la thématique des plastiques biodégradables.

Ces interactions, appuyées par le travail bibliographique, ont permis de mieux appréhender la problématique de l'étude. D'abord, une clarification a pu être apportée sur le fait que le caractère biosourcé d'un produit est indépendant de sa biodégradabilité, et qu'un plastique désigné comme biodégradable n'est pas nécessairement compostable. L'étude de Vaverkova *et al.* (2014) a par exemple démontré que certains sacs plastiques compostables se dégradent dans le compost, tandis que d'autres, étiquetés biodégradables, restent intacts. Il existe également des plastiques dégradables par des processus physico-chimiques, différents des plastiques compostables, qui peuvent ralentir le compostage et diminuer la qualité du compost mature (Unmar & Mohee, 2008).

Les conditions environnementales influencent également la biodégradation des plastiques (Emadian *et al.*, 2016). Par exemple, l'étude de Sintim *et al.* (2020) a indiqué qu'ils se dégradent plus rapidement dans des climats chauds, en raison d'une température élevée qui accroît l'activité microbienne. La même étude a aussi conclu que le plastique biodégradable se décomposait plus efficacement dans du compost que dans un sol, ce dernier offrant des conditions moins favorables au processus de dégradation. De plus, la gestion du compost est un facteur important à considérer car, comme le souligne une étude de l'ADEME publiée en 2019, des sacs en plastique se désintègrent plus vite lorsqu'un compost est brassé et maintenu à des températures optimales. Les conditions aérobies sont également nécessaires pour favoriser le développement des champignons impliqués dans la dégradation des plastiques (Al Hosni *et al.*, 2019; Dolci *et al.*, 2021; Gadaleta *et al.*, 2022).

L'étude a également pris en compte l'usage prévu des sacs en plastique dans son plan expérimental, en cherchant à reproduire les conditions d'utilisation réelles. Certains plastiques biodégradables se décomposent en effet mieux que d'autres (Al Hosni *et al.*, 2019 ; Battista *et al.*, 2021), selon des critères définis par la norme NBN EN 13432 (2000) qui spécifie les exigences relatives aux emballages valorisables par compostage et biodégradation. Cependant, des recherches récentes montrent que, malgré une simulation en laboratoire des conditions de dégradation optimales, la minéralisation de ces plastiques reste incomplète et persiste donc dans le compost des fragments dont l'impact écologique à long terme reste incertain (Ruggero *et al.*, 2021; Bandini *et al.*, 2022; Gadaleta *et al.*, 2022). Ces résultats sont par ailleurs corroborés par Orhan *et al.* (2004) ou Unmar & Mohee (2006) qui avaient mis en évidence une vitesse de dégradation limitée de ce genre de plastique. En outre, Nakasaki *et al.* (2000) ont souligné que l'introduction de certains plastiques dans un processus de compostage pouvait modifier les propriétés chimiques du compost, notamment en abaissant le pH en raison de la libération de composés acides.

Tous ces éléments montrent que la dégradation optimale des sacs plastiques compostables dépend de nombreux facteurs, tels que la gestion du compost, les conditions climatiques ou encore les interactions biologiques. Ces paramètres ont donc été pris en compte pour définir le plan expérimental de l'étude. Ainsi, chaque modalité de compostage (individuel, collectif, industriel) a été testée avec trois types de sacs commercialisés comme compostables, dans des conditions aussi proches que possible des pratiques de compostage existantes en Région wallonne. Les paramètres clés, identifiés à partir de la littérature scientifique et des échanges avec des professionnels, ont été suivis tandis qu'une caractérisation complète du compost mature obtenu pour chaque modalité a été effectuée. Enfin, la dégradation du plastique a été évaluée au cours du temps et, sur base de la norme NBN EN 13432 (2000), la présence de microplastiques en fin de processus de compostage a été déterminée.

2 Expérimentations en compostage individuel et collectif

Les compostages individuel et collectif sont deux formes de compostage très proches l'une de l'autre, ce qui a permis de conduire, avec le concours des IC HYGÉA et IPALLE ainsi que la Ville de Mons, des expérimentations analogues pour ces deux modalités. Une attention particulière a été portée sur le fait que les règles de bonnes pratiques de ces deux modalités soient respectées du début à la fin du processus de compostage de sorte qu'il soit représentatif des pratiques de compostage préconisées en Wallonie.

Les règles de bonnes pratiques du compostage individuel sont notamment les suivantes :

- Les apports en matières azotées sont équivalents aux apports en matières carbonées (composition consultable dans le Tableau 1) ;
- Le taux d'humidité est maintenu entre 40 et 60 % environ ;
- Le contenu du fût est mélangé et aéré à l'aide d'un brass-compost à une fréquence de 3 à 4 fois par mois.

TABLEAU 1 : COMPOSITION DE LA MATIÈRE AZOTÉE ET CARBONÉE SELON LES RÈGLES DE BONNES PRATIQUES DU COMPOSTAGE INDIVIDUEL

Matières azotées	Matières carbonées
Épluchures de légumes et de fruits (sauf agrumes)	Papier essuie-tout & cartons souillés
Restes de repas	Branchages de feuillus broyés
Marc de café & sachets de thé	Feuilles mortes
Tontes de pelouse (en période de sécheresse)	Paille, copeaux, sciure
Feuilles vertes	Coquilles de noix concassées
Fleurs fanées (sauf si provenant d'un commerce)	Tailles de haies et de plantes

Les informations relatives au compostage individuel sont rassemblées dans la brochure « Mon pote, le compost ! » accessibles *via* les différentes IC wallonnes¹ ainsi que dans le « Guide des bonnes pratiques pour la transformation des déchets de cuisine et de jardin » disponible sur le Portail environnement de Wallonie².

Les règles de bonnes pratiques du compostage collectif sont les suivantes :

Un référent de site assure le maintien du compost selon les règles de bonnes pratiques que sont :

- Les apports en matières azotées sont équivalents aux apports en matières carbonées (composition consultable dans le Tableau 2) ;
- Les déchets sont découpés en petits morceaux ;

¹ <https://www.hygea.be/mediatheque/brochure-mon-pote-le-compost>

² http://environnement.wallonie.be/publi/education/guide_compostage.pdf

- Le taux d'humidité est maintenu entre 40 et 60 % environ.

TABEAU 2 : COMPOSITION DE LA MATIÈRE AZOTÉE ET CARBONÉE SELON LES RÈGLES DE BONNES PRATIQUES DU COMPOSTAGE COLLECTIF

Matières azotées	Matières carbonées
Restes de fruits et légumes (sauf agrumes)	Mouchoirs et essuie-tout usagés
Feuilles et sachets de thé	Paille, litières d'animaux herbivores/granivores
Marc de café avec filtre en papier	Carton non-plastifié et découpé
Fleurs de balcon fanées (sans terre)	Coquilles d'œufs séchées et broyées

Il est nécessaire de veiller à ce que les sachets de thé incorporés soient effectivement compostables et que les cartons pelliculés ou alvéolés ne comportent respectivement aucun revêtement plastique ou agrégat de colle.

Ces informations sont regroupées dans le « Guide des bonnes pratiques du compostage collectif » publié sur le Portail environnement de la Wallonie³.

2.1 Matériel et méthode

2.1.1 Choix des sacs expérimentaux

Dans le cadre de ces deux expérimentations, trois sacs, identifiés par les lettres A, B et C (Figure 1), d'une contenance de 5L ont été sélectionnés car, d'après l'expérience de l'IC HYGÉA, leur volume correspond à la quantité moyenne supposée de déchets azotés susceptibles d'être hebdomadairement ajoutée à un compost individuel ou collectif par un citoyen wallon.



FIGURE 1 : SACS EXPÉRIMENTAUX CONSIDÉRÉS DANS LES EXPÉRIMENTATIONS EN COMPOSTAGE INDIVIDUEL ET COLLECTIF (DE GAUCHE À DROITE : SAC A, SAC B, SAC C)

³<https://ediwall.wallonie.be/les-guides-de-l-ecocitoyen-composter-ensemble-les-dechets-organiques-menagers-guide-des-bonnes-pratiques-du-compostage-collectif-2021-numerique-083035>

Les sacs suivants ont alors été considérés par l'étude :

- Sac A : sac certifié compostable en conditions domestiques, servant à l'emballage de fruits et légumes et fourni par BBP pour répondre aux besoins de l'expérience ;
- Sac B : sac certifié compostable en conditions domestiques, acheté en grande surface ;
- Sac C : sac non certifié mais commercialisé comme biosourcé et compostable en conditions domestiques, acheté en grande surface.

L'organisme de certification TUV-A s'est chargé d'analyser la composition chimique de ces trois sacs par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) de manière à vérifier leur caractère compostable.

L'éthique professionnelle de TUV-A a interdit la divulgation de la composition des sacs concernés. Si les sacs A et B sont bien certifiés comme étant compostables, il s'est toutefois avéré que le sac C était composé de polyéthylène, un plastique persistant qui n'est par définition pas biodégradable (Ruggiero *et al.*, 2021; Sintim *et al.*, 2019; Suleman *et al.*, 2022; Vaverkova *et al.*, 2014), bien qu'il soit renseigné comme biosourcé et compostable.

2.1.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental pour les expériences en compostage individuel et collectif a été élaboré sur base des recommandations de l'IC HYGÉA de manière à se rapprocher au mieux de conditions réelles.

2.1.2.1 Compostage individuel

Douze guides composteurs volontaires répartis dans les communes affiliées à l'IC HYGÉA (11 participants) et à l'IC IPALLE (1 participant) ont participé à l'expérience de compostage individuel. Chacun d'entre eux s'est vu fournir un fût de compostage expérimental noir de 290L de la marque Milko, commercialisé par SULO Belgium S.A., composé de polyéthylène haute-densité (PEHD) recyclé et garanti sans métaux lourds (Figure 2). Ces fûts, vendus par l'IC HYGÉA aux citoyens désireux de pratiquer le compostage chez eux, sont donc représentatifs du type de fûts utilisé par la population wallonne. Bien que le fût soit en plastique et puisse, en théorie, libérer des microplastiques au cours de l'expérience, il est peu probable que cela biaise les résultats, car seules les particules visibles sont

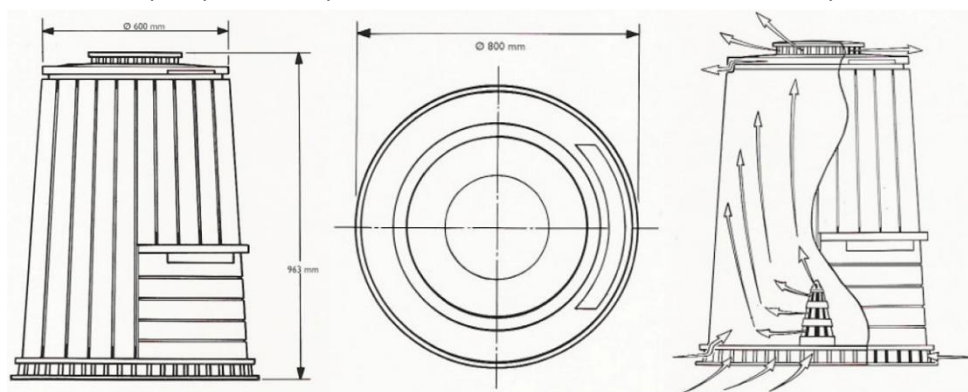


FIGURE 2 : DESCRIPTION D'UN FÛT EXPÉRIMENTAL

prises en compte. Si des particules de cette taille provenant du fût étaient retrouvées dans la matière compostée, elles seraient facilement identifiables, étant noires et en plastique rigide, distinctes de celles des sacs testés.

L'un des participants, déjà en possession d'un fût du même modèle, l'a mis à disposition de l'expérimentation, permettant ainsi de prendre en compte un total de treize fûts expérimentaux. Il a alors été convenu que :

- 3 fûts expérimentaux recevraient le sac A ;
- 4 fûts expérimentaux recevraient le sac B ;
- 3 fûts expérimentaux recevraient le sac C ;
- 3 fûts expérimentaux témoin ne recevraient aucun sac.

Le rôle de chaque fût expérimental a été attribué de façon aléatoire. Les fûts ont été installés les 6 et 7 avril 2023 par les participants selon les recommandations de l'IC HYGÉA, également reprises dans la brochure « Mon pote, le compost ! », pour permettre un processus de compostage optimal :

- Positionnement mi-ombre sur 9 dalles en béton de 30x30x4 cm espacées d'1 cm (Figure 3) ;
- Fond du fût tapissé par une couche d'une dizaine de centimètres de matières structurantes (fin branchage) de manière à permettre une aération constante du contenu malgré d'éventuels tassements ou écoulements au sein du système ;
- Remplissage du fût au tiers de son volume avec de la matière provenant des 40 premiers centimètres prélevés à la surface du fût personnel de chaque participant de façon à ce que cette matrice initiale comporte des macro- et micro-organismes actifs et soit donc le siège d'un processus de compostage déjà en cours. Cette matrice, bien que différente d'un participant à l'autre, aura préalablement été entretenue selon les règles de bonnes pratiques du compostage individuel.

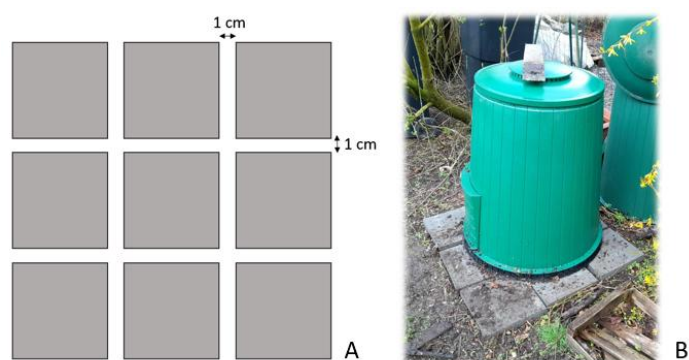


FIGURE 3 : SCHÉMA DE L'AGENCEMENT DES DALLES EN BÉTON (A) ET POSITIONNEMENT DU FÛT EXPÉRIMENTAL (B)

En outre, les participants ont aussi été livrés avec 480L de broyat de branches de feuillus de la même provenance afin d'alimenter le fût expérimental en matières carbonées tout au long de l'expérience.

2.1.2.2 Compostage collectif

La Ville de Mons a mis à disposition de l'étude ses quatre systèmes de compostage collectif qui, pour les besoins de l'étude, ont été numérotés de 1 à 4. Ils sont localisés aux endroits suivants :

- Système n°1 : Parc du Parvis de Messines ;

- Système n°2 : Jardin Fernand Dumont ;
- Système n°3 : Parc Gustave Jacobs ;
- Système n°4 : Allée des Oiseaux.

Ces systèmes, de la marque Eco-oh !, sont composés de palettes en plastique recyclé (mélange de polyéthylène et de polypropylène), bénéficient d'un bon ensoleillement et sont posés à même le sol de manière à permettre une communication entre ce dernier et leur contenu. Chaque système se présente sous la forme de 4 bacs d'un volume avoisinant le mètre cube (Figure 4). Le processus de compostage s'effectue dans les bacs n°1, 2 et 3 tandis que le dernier contient des matières carbonées (feuilles séchées, branchages, tailles de haies, ...) qui peut être mélangée en cas de besoin aux matières azotées introduites par les adhérents afin de respecter les règles de bonnes pratiques du compostage collectif.

Le plastique des systèmes pourrait aussi être une source des microplastiques durant l'expérience mais, encore une fois, il est peu probable qu'il induise un biais dans les résultats puisque seules les particules visibles sont considérées. Si des particules de cette taille provenant du système étaient retrouvées dans la matière compostée, elles seraient facilement identifiables, étant noires et en plastique rigide, distinctes de celles des sacs testés.

Le fonctionnement du système, décrit dans le « Guide des bonnes pratiques du compostage collectif », est le suivant : les adhérents déposent leurs déchets azotés dans le bac n°1 qui, une fois rempli, voit son contenu transféré (rotation) dans le bac n°2 où résident souvent des macro-organismes qui aident à fragmenter la matière en décomposition. Cette rotation libère dès lors le bac n°1 que les adhérents peuvent continuer à alimenter et, lorsqu'il est de nouveau plein, une rotation de cette matière est une fois encore effectuée vers le bac n°2 tandis que celle du bac n°2 est transférée dans le bac n°3 pour une dernière étape de maturation.

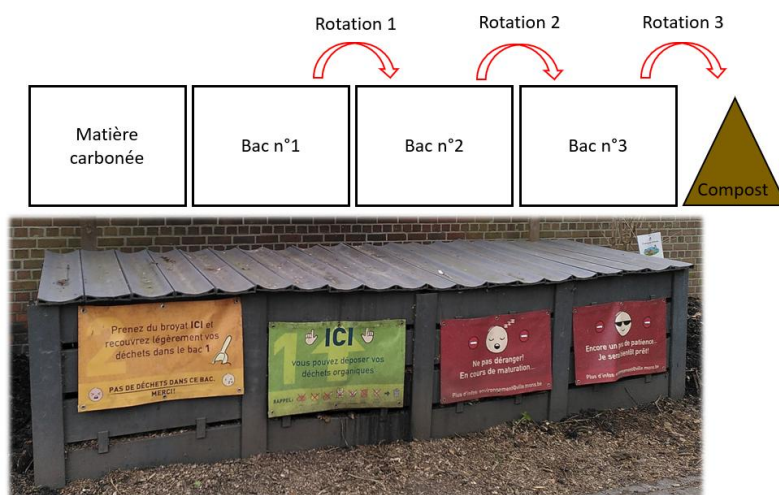


FIGURE 4 : SCHÉMA DU FONCTIONNEMENT D'UN SYSTÈME DE COMPOSTAGE COLLECTIF

La matière obtenue après son séjour dans le bac n°3 forme le compost mature, qui est donc valorisable. Une durée moyenne de 9 mois est nécessaire pour l'obtenir mais cette durée peut significativement varier en fonction de la vitesse à laquelle le bac n°1 est alimenté. Lorsqu'un système de ce type est

abondamment alimenté par les adhérents, la durée minimale du processus avoisine les 6 mois pour obtenir un compost mature valorisable.

Au démarrage de l'expérience, un tiers environ du bac n°1 de chaque système était préalablement rempli d'une matrice initiale composée de matières azotées et de matières carbonées en proportions équivalentes comme l'exigent les règles de bonnes pratiques de cette modalité de compostage. Ces conditions de départ sont donc analogues à celles de l'expérimentation en compostage individuel.

Le rôle des différents systèmes a été attribué de la manière suivante : les systèmes n°1, 2 et 3 recevraient respectivement les sacs A, B et C tandis que le système n°4 ne recevrait aucun sac.

2.1.3 Alimentation et entretien des dispositifs expérimentaux

En raison de la durée limitée de l'étude, il a été convenu d'étendre l'expérimentation en compostage individuel sur une année complète. L'IC HYGÉA a par ailleurs soutenu ce choix, affirmant qu'un processus de compostage domestique de 12 mois était en pratique amplement suffisant pour obtenir un compost mature en conditions domestiques.

La durée de l'expérimentation en compostage collectif a par contre dépendu du temps inhérent à chaque système pour effectuer sa dernière rotation, le délai pouvant significativement varier d'un système à l'autre.

2.1.3.1 Compostage individuel

Le 7 avril 2023, un marqueur (corde de jute) a été placé dans le fût expérimental de chaque participant pour délimiter visuellement le début de l'alimentation en matière par-dessus la matrice initiale, en le positionnant à la périphérie du fût tout en évitant la trappe qu'il comporte sur sa face avant (Figure 3b). À partir de cette date, les participant utilisant un type de sac (A, B ou C) ont commencé à le remplir avec des matières azotées issues de leur ménage, conformément à la composition indiquée dans le Tableau 1. Le 14 avril 2023, une semaine plus tard, les participants ont déposé dans leur fût le sac contenant les matières azotées accumulées tout au long de la semaine en veillant à le laisser ouvert. Les participants en charge des fûts témoins y ont quant à eux déposé un volume équivalent de matières azotées. L'intégralité des participants a également ajouté 5 litres de matières carbonées dans le fût.

Cette procédure a été répétée chaque semaine pendant 12 mois, pour un total de 52 apports de matières, avec le dernier apport réalisé le 5 avril 2024. Ce rythme, déterminé en concertation avec l'IC HYGÉA, a été réfléchi de sorte à être adapté à une alimentation raisonnée du fût expérimental utilisé, qui correspond aussi aux pratiques de compostage habituelles à domicile.

Tous les participants ont suivi les bonnes pratiques du compostage individuel pour l'entretien de leur fût expérimental.

2.1.3.2 Compostage collectif

Le 23 juin 2023, les référents des systèmes 1, 2 et 3 ont reçu 100 sacs (types A, B et C respectivement) à introduire dans le bac n°1 du compost collectif dont ils sont responsables, ce bac étant alimenté par les adhérents. Les 100 sacs ont été progressivement incorporés à la matrice initiale selon le rythme de remplissage du bac, et ce jusqu'à la première rotation (transfert de matières du bac n°1 au bac n°2).

Chaque sac a été rempli de matières azotées déposées par les adhérents, en veillant à ce qu'elles respectent la composition indiquée dans le Tableau 2. Les sacs, laissés ouverts, ont ensuite été recouverts d'une couche de matière carbonée pour les dissimuler et éviter que les adhérents ne les retirent, ce qui aurait pu perturber l'expérimentation.

Les référents se sont assurés du respect des bonnes pratiques du compostage collectif tout au long du processus qui s'est déroulé tel que décrit dans la section 2.1.2.2. Le système n°4, utilisé comme témoin, a simplement suivi les mêmes règles, sans introduction de sacs, afin de représenter fidèlement cette modalité de compostage.

2.1.4 Échantillonnage

Des prélèvements de la matrice expérimentale ont été réalisés à différentes étapes du processus de compostage, selon les deux modalités étudiées. Pour le compostage individuel comme pour le compostage collectif, un prélèvement initial a été effectué sur la matrice de départ, ainsi qu'un prélèvement final une fois le compost mature. Les prélèvements intermédiaires ont cependant différé en fonction du type de compostage : en compostage individuel, un prélèvement à mi-parcours a été réalisé après 6 mois, tandis qu'en compostage collectif, des prélèvements ont été effectués à chaque rotation du compost, à des intervalles variables.

2.1.4.1 Compostage individuel

Comme le montre le Tableau 3, le volume et le type de matière prélevé ont variés durant la campagne d'échantillonnage.

TABLEAU 3 : PRÉLÈVEMENTS DE COMPOST INDIVIDUEL

Échantillonnage	Date	Volume/fût	Matière
Initial (T ₀)	07/04/2023	1L	Matrice initiale
Intermédiaire (T _{6mois})	06/10/2023	1L	Matrice expérimentale
Final (T _{12mois})	11 & 12/04/2024	1L + 2x10L	Compost mature

Pour l'échantillonnage initial et intermédiaire, les prélèvements ont été effectués en triplicats au centre du fût expérimental à l'aide d'un brass-compost (Figure 5), jusqu'à une profondeur d'environ 50 cm. Les trois prélèvements ont été mélangés pour obtenir un échantillon composite représentatif de la matrice considérée. De cet échantillon, 1L de matière a été récupéré dans un flacon en verre brun. La matrice initiale correspond à la matière déposée par chaque participant dans le fût expérimental avant le début de l'expérience (voir section 2.1.2), tandis que la matrice expérimentale désigne la matière issue des apports hebdomadaires (voir section 2.1.3.1).



FIGURE 5 : BRASS-COMPOST SERVANT À EFFECTUER UN CAROTTAGE DANS LA MATRICE EXPÉRIMENTALE

Pour le prélèvement final, le fût a été enlevé, et les couches supérieures de la matrice expérimentale ont été retirées jusqu'au compost mature, identifiable par l'absence de vers de terre, signe d'une minéralisation effective. Seule la matière située au-dessus du marqueur en corde de jute, désignant la limite entre la matrice initiale et la matrice expérimentale, a été homogénéisée et échantillonnée (Figure 6). Comme pour les échantillonnages précédents, 1L de matière a été prélevé dans un flacon en verre brun, et deux seaux de 10L ont été remplis de compost mature pour une caractérisation ultérieure en laboratoire.

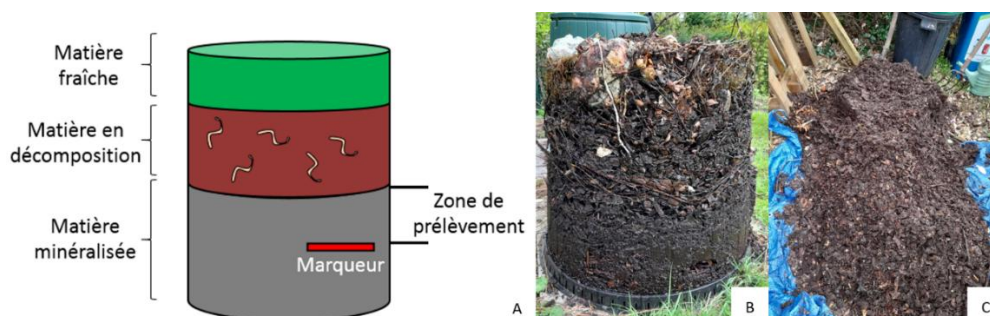


FIGURE 6 : SCHÉMA DE PRÉLÈVEMENT DE COMPOST MATURE (A); MATRICE EXPÉRIMENTALE SANS FÛT (B); MATIÈRE MINÉRALISÉE HOMOGÉNISÉE AVANT ÉCHANTILLONNAGE FINAL (C)

Il convient toutefois de préciser que, pour la plupart des fûts expérimentaux, un assèchement de la matière a été observé au niveau de la trappe située sur la face avant (Figure 3b). Cette trappe n'étant pas hermétique, il est probable que l'évaporation de l'eau contenue dans la matrice ait été accrue à ce niveau tout au long de l'expérience. Aucune matière provenant de cette zone sèche n'a dès lors été échantillonnée lors du prélèvement final.

2.1.4.2 Compostage collectif

Pour le compostage collectif, si le prélèvement initial (T_0) a été effectué à la même date pour tous les systèmes, les prélèvements lors des rotations ($T_{rotation1}$, $T_{rotation2}$ et $T_{rotation3}$) ont varié selon la vitesse du processus de compostage propre à chaque système. Comme l'indique le Tableau 4, les systèmes n°1 et n°2 sont les seuls à avoir complété le cycle de compostage pendant la durée de l'étude.

TABEAU 4 : PRÉLÈVEMENTS DE COMPOST COLLECTIF

Rotation	Date de la rotation	Date d'échantillonnage	Volume/système	Matière
Système 1				
Initial (T ₀)	/	23/06/2023	3x1L	Matrice initiale
Rotation 1	16/09/2023	04/09/2023	3x1L	Matrice expérimentale
Rotation 2	25/11/2023	06/12/2023	3x1L	Matrice expérimentale
Rotation 3	24/02/2024	20/02/2024	3x1L + 2x10L	Compost mature
Système 2				
Initial (T ₀)	/	23/06/2023	3x1L	Matrice initiale
Rotation 1	25/10/2023	06/10/2023	3x1L	Matrice expérimentale
Rotation 2	08/03/2024	15/03/2024	3x1L	Matrice expérimentale
Rotation 3	13/07/2024	05/07/2024	3x1L + 2x10L	Compost mature
Système 3				
Initial (T ₀)	/	23/06/2023	3x1L	Matrice initiale
Rotation 1	23/10/2023	24/08/2023	3x1L	Matrice expérimentale
Système 4				
Initial (T ₀)	/	23/06/2023	3x1L	Matrice initiale
Rotation 1	02/12/2023	06/11/2023	3x1L	Matrice expérimentale

Lors de chaque échantillonnage, des prélèvements ont été effectués en trois points distincts autour du centre du bac pour chaque système, constituant ainsi des triplicats (Figure 7). Cette opération a été réalisée à l'aide d'une tarière manuelle, jusqu'à une profondeur d'environ 30 cm, et les échantillons ont été collectés dans des flacons en verre brun de 1L. La matrice initiale désigne la matière présente dans le système avant le début de l'expérience (voir section 2.1.2.2), tandis que la matrice expérimentale inclut cette matière et les ajouts effectués jusqu'à la première rotation (voir section 2.1.3.2).



FIGURE 7 : PRÉLÈVEMENT DE TRIPPLICATS DE MATRICE EXPÉRIMENTALE

Pour le prélèvement correspondant à la rotation 3, deux seaux de 10L de compost mature ont également été prélevés aléatoirement dans le bac à l'aide d'une pelle pour une caractérisation ultérieure au laboratoire.

2.1.5 Suivi physico-chimique

Plusieurs paramètres ont été considérés tout au long de l'expérimentation, que ce soit pour assurer le suivi du processus de compostage ou caractériser le compost mature. Le suivi s'est focalisé sur la température, l'humidité et le pH qui sont essentiels dans le cadre du suivi d'un processus de compostage (Emadian *et al.*, 2016).

2.1.5.1 Température

La température étant un facteur fortement corrélé à la dégradation de la matière organique (Sintim *et al.*, 2020), elle a été mesurée au T_0 et suivie tout au long du processus par les participants et référents de sites. Pour ce faire, ils ont été équipés d'un thermomètre à compost analogique de la marque Dostmann (Figure 8).



FIGURE 8 : THERMOMÈTRE À COMPOST FOURNI AUX PARTICIPANTS ET RÉFÉRENTS DE SITE

En compostage individuel, la sonde de température a été enfoncée de moitié, à mi-distance entre le bord du fût et son centre où se situe une aération (Figure 2). La mesure a été effectuée hebdomadairement, au moment de l'ajout de matière dans le fût expérimental.

En compostage collectif, la sonde de température a aussi été enfoncée de moitié, au centre du bac dans lequel séjournait la matrice expérimentale. Les mesures ont été effectuées à chaque visite du référent de site, une fois par semaine environ, pour entretenir le système sous sa responsabilité.

Quelle que soit la modalité de compostage considérée, la mesure a été consignée après une durée d'environ 10 minutes et accompagnée d'un relevé de la température ambiante externe ainsi que d'une description qualitative de la météo car les conditions atmosphériques peuvent aussi avoir une influence significative sur le processus de compostage.

2.1.5.2 Humidité

L'humidité étant à surveiller selon les règles de bonnes pratiques du compostage, qu'il soit individuel ou collectif, ce paramètre a été vérifié tout au long des deux expérimentations par les participants ou les référents de site au travers du « test de la poignée » qui est appliqué par l'IC HYGÉA. Ce dernier consiste en une pression de la matière entre les doigts et, tant que de l'eau s'en échappe, cela signifie que son taux d'humidité est optimal et est estimé entre 40 et 60% environ. Dans le cas contraire, le

compost doit être humidifié. Mais si réhumidifier un compost individuel est une tâche simple, l'opération peut néanmoins s'avérer fastidieuse pour un compost collectif à cause des volumes impliqués. Ainsi, en compostage collectif, il n'a pas toujours été possible de s'assurer que le taux d'humidité reste supérieur à 40% en toute circonstance.

Sur base de la norme NBN EN 15934 (2012), l'humidité a été mesurée en laboratoire sur tous les échantillons d'un litre prélevés au cours des expérimentations. Pour ce faire, une masse initiale de 8 à 10 g a été extraite de chaque échantillon, puis séchée à 40°C jusqu'à l'obtention d'une masse finale constante. La différence entre les masses initiale et finale, représentant la teneur en eau, a permis de calculer le taux d'humidité. Cette procédure a été réalisée en triplicat, et l'humidité de l'échantillon a été déterminée sur base de la moyenne des taux d'humidité des répliqués.

2.1.5.3 pH

Ce paramètre a également été mesuré sur ces échantillons car il aura tendance à rester neutre en conditions aérobies tandis qu'une valeur de pH inférieure à 7 (conditions acides) ou supérieure à 7 (conditions alcalines) pourrait indiquer une dégradation des matières organiques en anaérobiose. Comme l'a aussi démontré Nakasaki *et al.* (2000), certains plastiques ont tendance à modifier la valeur du pH du compost où ils se situent durant leur dégradation. Pour le vérifier, une méthode basée sur la norme ISO 10390 a été utilisée : 20 g de matières ont été prélevés dans chaque échantillon, puis agités pendant une heure dans de l'eau déminéralisée avec un rapport volumétrique égal à 1 pour 5. Pour minimiser les biais dus à l'hétérogénéité, la mesure a été répétée deux fois, et la moyenne des résultats obtenus a été utilisée pour déterminer le pH de l'échantillon.

2.1.5.4 Caractérisation du compost mature

Faute de législation spécifique pour le compost individuel et collectif, la caractérisation du compost mature obtenu a été réalisée en suivant la réglementation wallonne applicable au compostage industriel. Les analyses des paramètres indiqués dans le Tableau 5 ont été effectuées soit directement au laboratoire de l'ISSEP, soit par un sous-traitant, le Bureau Environnement et Analyses (BEAGx) de Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège. L'ISSEP a analysé le premier échantillon de 10L de compost mature, tandis que le BEAGx a travaillé sur un second échantillon, conservé à 4°C pendant un maximum de 3 jours avant sa livraison.

TABLEAU 5 : LISTE DES ANALYSES RÉALISÉES PAR L'ISSEP ET LE BEAGx SUR LES ÉCHANTILLONS DE COMPOST MATURE

Laboratoire d'analyse	Paramètres	Méthodes
ISSEP	Matières sèches	CWEA – S-I-3
ISSEP	Conductivité	CWEA – S-II-7
ISSEP	pH (eau)	CWEA – S-II-6.1
ISSEP	Matières organiques	CWEA – S-III-8.2
BEAGx	Carbone organique total	CWEA – S-III-8.2
BEAGx	Valeur neutralisante	CWEA – S-IV-5
BEAGx	Azote total :	Calcul
	- Azote Kjeldahl	CWEA – S-II-9.3
	- Azote organique	

	- Azote nitreux	CWEA – S-II-9.2 /
	- Azote nitrique	CWEA – S-II-9.3
	- Azote ammoniacal	CWEA – S-II-10 /
		CWEA – S-II-11
		CWEA – S-II-10 /
		CWEA – S-II-11
		CWEA – S-II-10 /
		CWEA – S-II-11
BEAGx	Rapport Ctot/Ntot	Calcul
BEAGx	K exprimé en K ₂ O	CWEA – S-II-1 /
		CWEA – S-II-2
BEAGx	Mg exprimé en MgO	CWEA – S-II-1 /
		CWEA – S-II-2
BEAGx	Ca exprimé en CaO	CWEA – S-II-1 /
		CWEA – S-II-2
BEAGx	P exprimé en P ₂ O ₅	Colorimétrie
BEAGx	Granulométrie (tamis de 40 mm)	CWEA – S-IV-1
BEAGx	Pierres (refus au tamis de 5 mm)	CWEA – S-IV-1
BEAGx	Impuretés (refus au tamis de 2 mm)	CWEA – S-IV-1
BEAGx	Maturité (degré d'autoéchauffement)	CWEA – S-IV-3
BEAGx	Pouvoir germinatif	CWEA – S-IV-2
ISSeP	Métaux :	CWEA – D-II-6.1
	- Arsenic (As)	CWEA – D-II-7.1
	- Cadmium (Cd)	CWEA – D-II-7.1
	- Chrome (Cr)	CWEA – D-II-7.1
	- Cuivre (Cu)	CWEA – D-II-7.1
	- Mercure (Hg)	CWEA – D-II-7.1
	- Nickel (Ni)	CWEA – D-II-7.1
	- Plomb (Pb)	CWEA – D-II-7.1
	- Zinc (Zn)	CWEA – D-II-7.1
	- Chrome VI (Cr VI)	CWEA – S-II-4
ISSeP	Indice hydrocarbure (C10-C40)	CWEA – S-III-5
	fractionné :	
	- C10-C12	
	- C12-C16	
	- C16-C20	
	- C20-C40	
	- Origine (pétrogénique – biogénique)	
ISSeP	PCB (7 de Ballschmieter) ; individuels et totaux	NF ISO 10382
ISSeP	HAP ; 6 de Borneff et Totaux	CWEA – S-III-3.1
BEAGx	Screening GC-MS (qualitatif)	CWEA – S-III-3.1

2.1.6 Évaluation de la dégradation des sacs en plastique

La dégradation des sacs en plastique a été évaluée en tenant compte de la norme NBN EN 13432 (2000), dont un résumé est consultable en annexe (Annexe 4). Cette norme définit les exigences pour les emballages valorisables par compostage et biodégradation afin de garantir qu'ils ne laissent pas de résidus indésirables dans le compost final. Selon cette norme, pour qu'un matériau puisse être considéré comme compostable, il doit :

- Être dégradé à au moins 90% en poids en 6 mois dans un environnement riche en dioxyde de carbone ;
- Réduire 90% de sa masse en fragments de moins de 2 mm s'il est en contact avec des matières organiques pendant une période de 3 mois ;
- Ne pas avoir d'effets négatifs sur le processus de compostage ;
- Ne pas dépasser les limites spécifiées de métaux lourds présents dans le compost.

Dans cette étude, bien que les sacs A et B soient certifiés compostables et dès lors conformes à cette norme dans des conditions standards, l'évaluation de leur dégradation consiste à vérifier qu'ils respectent, en conditions réelles d'utilisation, le critère de taille de fragments de plastique résiduel dans le compost mature.

À cette fin, deux analyses ont été réalisées :

1. Contrôle visuel : Pour les échantillons d'un litre prélevés à $T_{6\text{mois}}$ et $T_{12\text{mois}}$ en compostage individuel et à $T_{\text{Rotation1}}$, $T_{\text{Rotation2}}$ et $T_{\text{Rotation3}}$ en compostage collectif, un séchage à 40°C a été réalisé dans des récipients en aluminium jusqu'à obtention d'une masse constante. L'échantillon a alors été tamisé à 2 mm et un contrôle visuel des fragments de plastiques présents dans le refus a été réalisé.
Cette première opération a pour but d'évaluer la dégradation effective des sacs testés aux différentes étapes du processus de compostage.
2. Extraction et quantification : Une analyse plus approfondie a été réalisée sur les échantillons de compost mature, prélevés à $T_{12\text{mois}}$ en compostage individuel et à $T_{\text{Rotation3}}$ en compostage collectif, en s'inspirant des méthodologies d'extraction de microplastiques décrites par Edo *et al.* (2021), Han *et al.* (2019), Li *et al.* (2019), Maisto *et al.* (2022), Nabi *et al.* (2022) et Schütze *et al.* (2022). L'objectif de cette seconde manipulation est, comme mentionné ci-dessus, de vérifier que les résidus de plastique présents dans le compost mature sont d'une taille inférieure à 2 mm, conformément aux critères de la norme NBN EN 13432 (2000), et ce, même en conditions réelles de compostage.

La méthodologie d'extraction qui a été développée repose sur une étape de séparation par différence de densité, une étape de digestion chimique⁴ et une étape de quantification :

- a. Séparation par différence de densité :

Après tamisage, 50 g de la fraction inférieure à 2 mm ont été isolés à partir de chaque échantillon de compost mature sec obtenu lors de l'étape de contrôle visuel. Une solution saline de NaCl (36 g/100

⁴ Avant d'appliquer cette méthodologie aux échantillons de compost mature, elle a été testée sur des microplastiques générés à partir de composts artificiels maintenus en laboratoire. Cela a permis de vérifier que les réactions d'oxydation lors de la digestion de la matière organique n'entraînaient pas la dégradation des microplastiques, ce qui pourrait sinon mener à une sous-estimation de leur quantité dans l'échantillon. Les résultats ont montré qu'il n'y avait pas d'effet significatif sur les microplastiques, des conclusions également soutenues par les études de Edo *et al.* (2021) et Schütze *et al.* (2022).

ml, densité de $1,18 \text{ g/cm}^3$), plus dense que tous les types de plastiques étudiés, a été préparée et filtrée avec un filtre Whatman de 125 mm de diamètre et de porosité $8 \mu\text{m}$ pour éliminer les impuretés. Dans un bécher de 1 litre, 400 ml de cette solution ont été ajoutés, suivis de l'échantillon de compost. Le mélange a été agité pendant 5 minutes avec un barreau magnétique en verre, puis soumis à une sonication pendant 15 minutes. Après une décantation de 24 heures, le surnageant a été récupéré et transféré dans un second bécher de 1 litre.

b. Digestion chimique :

Dans ce bécher, la matière organique a ensuite été digérée par l'ajout de 200 ml de H_2O_2 à 30 % et 100 ml de réactif de Fenton (13,90 g de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dissous dans 10 ml de H_2SO_4 par litre de solution). L'échantillon a été agité pendant 72 heures à température ambiante sous un verre de montre. L'ajout du H_2O_2 a été réalisé progressivement pour contrôler la réaction d'oxydation. Après digestion, une filtration sous vide a été effectuée à l'aide d'un filtre Whatman de porosité $8 \mu\text{m}$. La matière résiduelle sur le filtre a été récupérée avec une spatule en acier inoxydable, puis soumise à une nouvelle digestion avec 100 ml de H_2O_2 à 30 % et 50 ml de réactif de Fenton. Après 24 heures d'agitation à température ambiante, une deuxième filtration sous vide a été réalisée.

c. Quantification :

Les microplastiques visibles à l'œil nu présents sur le filtre ont été collectés avec une pince en acier inoxydable et photographiés. Les images ont été analysées selon une méthode basée sur celle utilisée par Sintim *et al.* (2019), avec le logiciel ImageJ ver. 1.44 pour digitaliser les photographies et ensuite mesurer le nombre, la surface des particules ainsi que leur plus grand diamètre. À partir de ces résultats, les quantités moyennes de microplastiques par kilogramme de compost mature ont été extrapolées par calcul.

Enfin, lors du contrôle visuel et de l'analyse de quantification des microplastiques, il était essentiel de distinguer les fragments de plastique provenant des sacs testés de toute éventuelle contamination par des plastiques externes à l'étude. Étant donné que les microplastiques observés étaient visibles à l'œil nu, les mêmes critères que pour les fragments supérieurs à 2 mm ont pu être appliqués : les plastiques issus de la dégradation des sacs se distinguaient par leur couleur, leur texture, leur apparence et leur souplesse caractéristiques (Figure 9a). Certains fragments plus grands, comportant des inscriptions, les conservaient au moins partiellement quelle que soit l'étape de compostage (Figure 9b). En outre, des matières azotées en décomposition étaient encore localisées dans les replis des plus gros fragments.



FIGURE 9 : IDENTIFICATION D'UN MICROPLASTIQUE EXTERNE À L'ÉTUDE PARMI DES MICROPLASTIQUES ISSU DE L'UN DES SACS TESTÉS (A) ; LAMBEAUX DE SACS COMPORTANT DES INSCRIPTIONS PRÉSENTS DANS DU COMPOST MATURE (B)

Par ailleurs, pour l'analyse de quantification en compostage individuel, l'utilisation d'échantillons témoins a permis d'établir un niveau de base de contamination en plastique dans le compost. Ce seuil a servi d'indicateur pour identifier que les fragments dépassant cette quantité provenaient probablement des sacs en plastique testés.

2.1.7 Analyse statistique

Les différents paramètres étudiés ont été traités statistiquement au travers de tests d'hypothèse avec un seuil $\alpha = 5\%$.

Ainsi, un t-test de Student a été appliqué lorsqu'il était question de comparer deux traitements différents. En tant que test paramétrique, le t-test ne pouvait être appliqué qu'après vérification de la normalité et de l'égalité des variances des données, deux critères qui ont respectivement été préalablement vérifiés à l'aide de tests de Shapiro et Brown-Forsythe. Lorsque ces conditions d'application n'étaient pas respectées, un test non-paramétrique de Mann-Whitney a par contre été effectué. Dans le cas où seule l'égalité des variances n'était pas respectée, un t-test de Welch a plutôt été conduit.

Un test ANOVA (Analysis Of Variance) a été appliqué sur les jeux de données comparant au moins trois traitements différents. S'agissant également d'un test paramétrique, il a donc été précédé des tests de Shapiro et Brown-Forsythe avant d'être effectué, lui aussi. Un test de comparaison multiple de Holm-Sidak était ensuite mené à la suite du test ANOVA en cas de différence significative entre les traitements. Lorsque les conditions d'application de l'ANOVA n'étaient pas remplies ou bien qu'elles n'atteignaient pas une puissance minimale de 80%, un test non-paramétrique de Kruskal-Wallis a été appliqué, suivi d'un test de comparaison multiple de Tukey.

L'ensemble de l'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel SigmaPlot (Systat Software Inc., ver. 14).

2.2 Résultats & Discussion

Cette section présente et analyse les résultats obtenus lors des expérimentations en compostage individuel et collectif. Il convient de noter que, comme mentionné précédemment dans la section 2.1.4.2, seuls les systèmes de compostage collectif n°1 et n°2 ont complété les trois rotations prévues

au cours de la durée de l'étude. En conséquence, les résultats obtenus pour l'expérimentation en compostage collectif sont incomplets à ce stade⁵ et devront donc être interprétés avec prudence car ils ne permettent pas de tirer des conclusions définitives sur l'ensemble des processus étudiés.

2.2.1 Suivi physico-chimique

2.2.1.1 Température

La moyenne des températures extérieures relevées chaque semaine par les participants pendant 12 mois a été calculée et comparée statistiquement entre les différents traitements (sac A, sac B, sac C, et témoin). Les résultats indiquent que ces moyennes sont équivalentes ($p > 0,05$), ce qui signifie qu'aucun traitement n'a été exposé à des conditions thermiques significativement différentes (Figure 10).

Comparaison des moyennes de la température externe

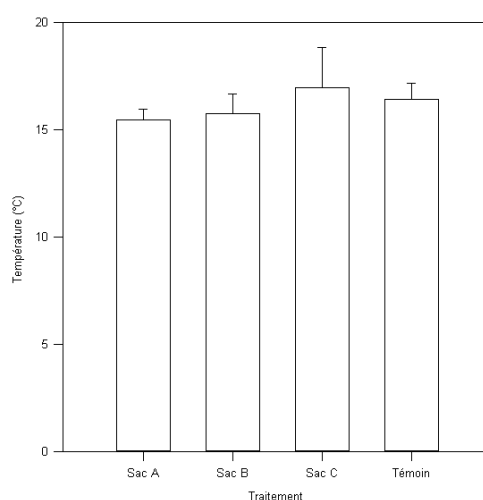


FIGURE 10 : COMPARATIF DE LA TEMPÉRATURE EXTERNE AU FÛT EXPÉRIMENTAL ENTRE LES TRAITEMENTS

Une analyse similaire a été réalisée pour les températures mesurées dans les fûts expérimentaux et, dans ce cas aussi, les moyennes sont équivalentes entre les traitements car il n'y a pas de différences significatives ($p > 0,05$), comme l'illustre la Figure 11.

⁵ Même si la présente étude est clôturée, l'expérience en cours dans les systèmes n°3 et n°4 continue de se poursuivre en prévision d'analyses futures.

Comparaison des moyennes de la température du fût expérimental

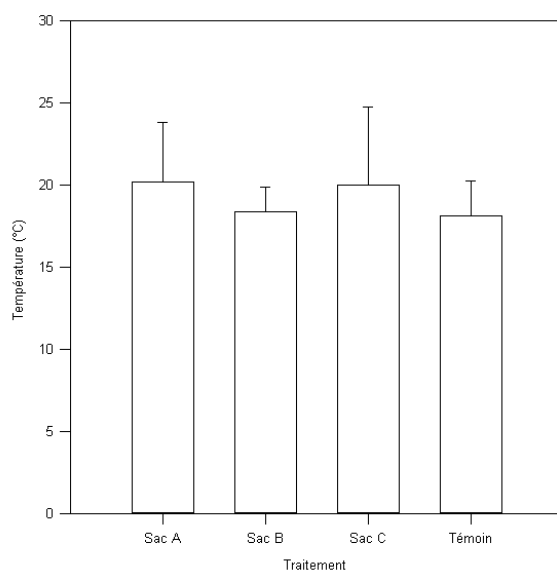


FIGURE 11 : COMPARATIF DE LA TEMPÉRATURE DANS LES FÛTS EXPÉRIMENTAUX ENTRE LES TRAITEMENTS

Ces résultats suggèrent que l'influence de la température externe est uniforme sur tous les traitements et que la présence de sacs en plastique n'a pas eu d'impact significatif sur la température interne des fûts expérimentaux. Les courbes de température dessinées sur base des relevés effectués par les participants montrent par ailleurs que l'écart de température entre l'intérieur des fûts et l'environnement extérieur est en moyenne inférieur à 10°C, quel que soit le traitement considéré (Figures 12, 13, 14 & 15).

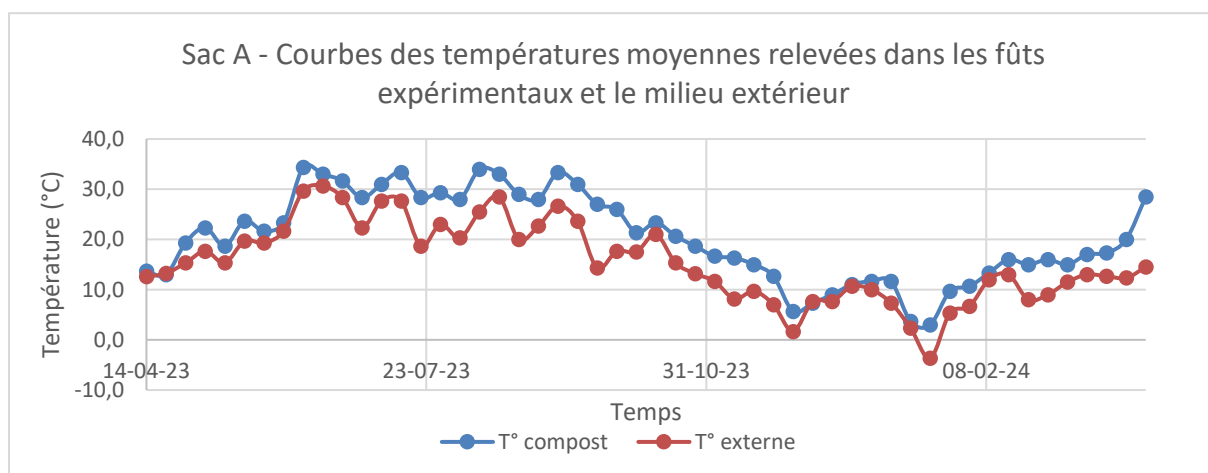


FIGURE 12 : COURBES DES TEMPÉRATURES MOYENNES RELEVÉES DANS LES FÛTS EXPÉRIMENTAUX ET LE MILIEU EXTÉRIEUR (SAC A)

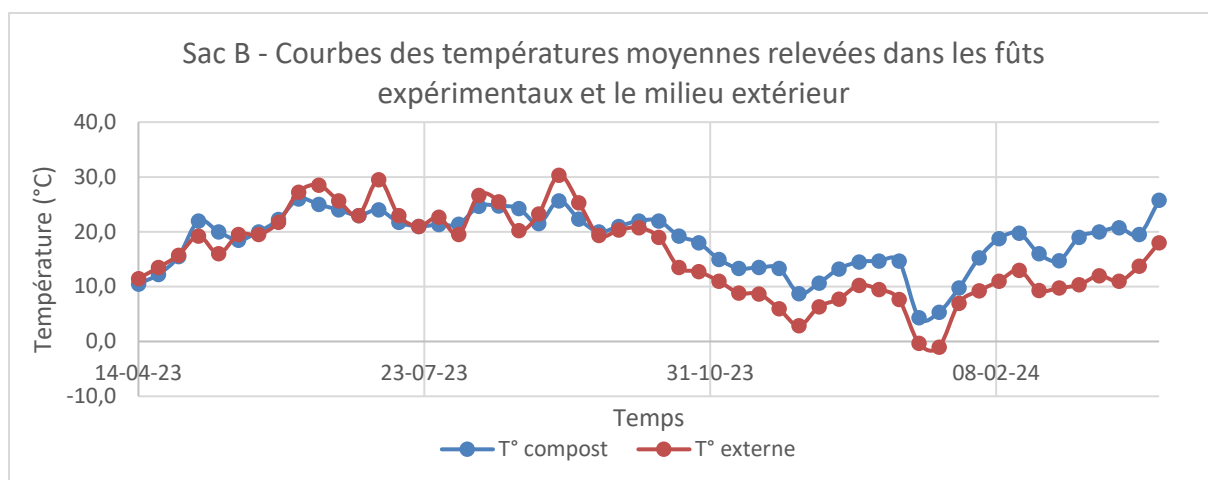


FIGURE 13 : COURBES DES TEMPÉRATURES MOYENNES RELEVÉES DANS LES FûTS EXPÉRIMENTAUX ET LE MILIEU EXTÉRIEUR (SAC B)

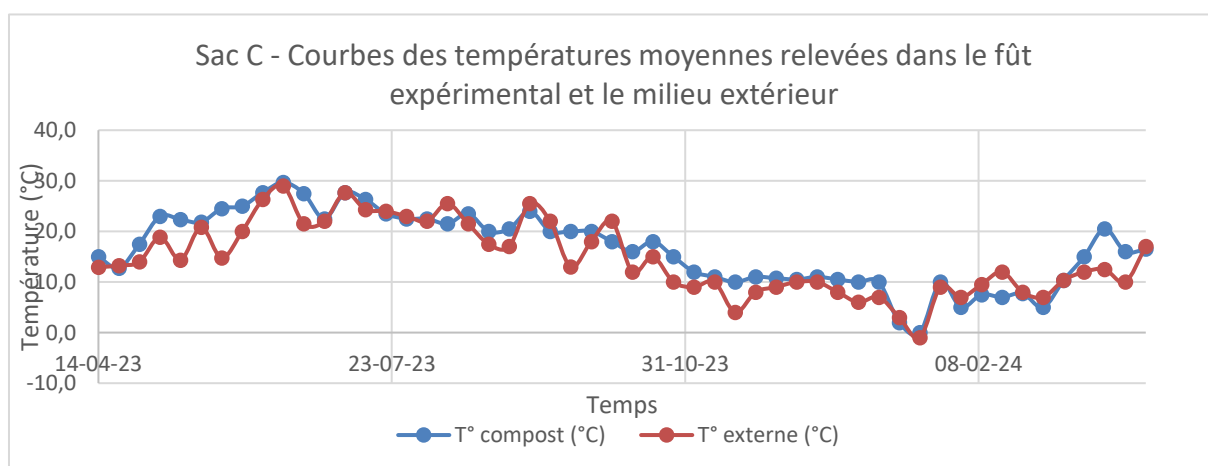


FIGURE 14 : COURBES DES TEMPÉRATURES MOYENNES RELEVÉES DANS LES FûTS EXPÉRIMENTAUX ET LE MILIEU EXTÉRIEUR (SAC C)

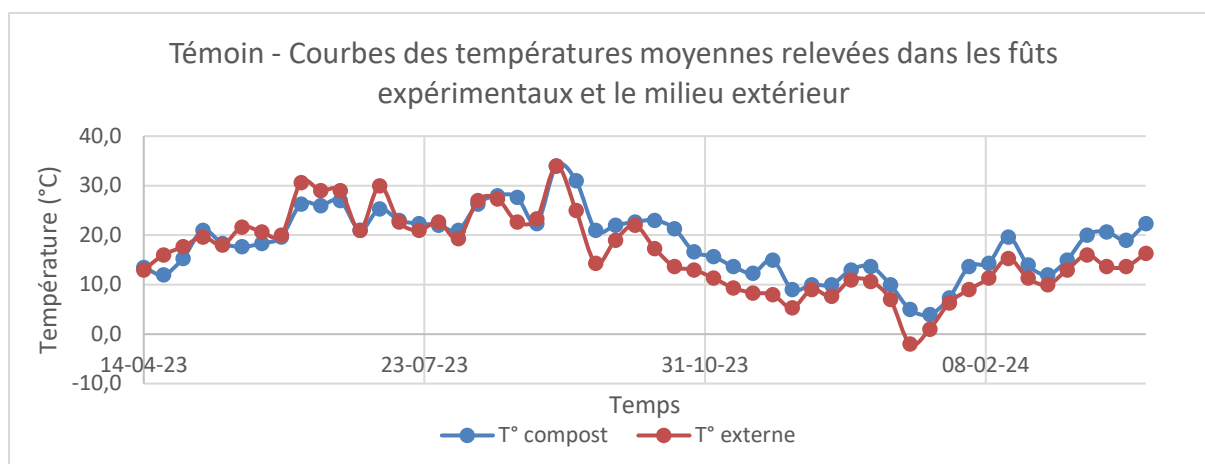


FIGURE 15 : COURBES DES TEMPÉRATURES MOYENNES RELEVÉES DANS LES FÛT EXPÉRIMENTAUX ET LE MILIEU EXTÉRIEUR (TÉMOIN)

Il n'existe d'ailleurs aucune différence statistique significative ($p < 0,05$) entre la température moyenne relevée à l'intérieur des fûts et la température externe, sauf pour les fûts contenant le sac B (Figure 16). Et si cette différence peut être expliquée par de nombreux paramètres comme le fait que les fûts contenant les sacs B bénéficiaient d'un meilleur ensoleillement que les autres, les températures atteintes ne sont toutefois pas suffisantes pour assurer une hygiénisation. Ainsi, il apparaît globalement que la température moyenne dans les fûts expérimentaux était similaire à la température de l'environnement extérieur. Cette tendance n'est pas surprenante, compte tenu du volume restreint des fûts qui peut être fortement influencé par l'environnement extérieur.

Comparaison des moyennes de la température mesurée dans le fût expérimental et dans l'environnement extérieur (Sac B)

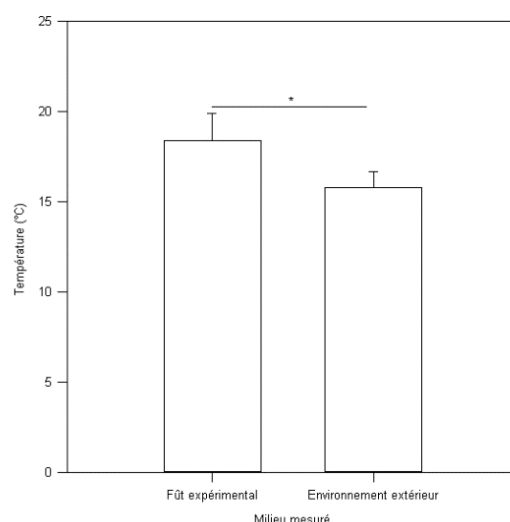


FIGURE 16 : COMPARATIF DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE MESURÉE DANS LE FÛT EXPÉRIMENTAL INCORPORANT LE SAC B ET DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE MESURÉE DANS SON ENVIRONNEMENT EXTÉRIEUR

En revanche, les courbes de température mesurées en compostage collectif révèlent des dynamiques différentes puisque, d'un volume équivalent au mètre cube, ces systèmes sont moins sensibles aux conditions extérieures que les fûts domestiques. De fait, les températures internes dans les systèmes n°1 et n°2 sont nettement supérieures à la température extérieure. Le système n°1 présente une température moyenne de 49,13°C, soit 32,56°C au-dessus de la température du milieu externe, tandis que la température moyenne dans le système n°2 est à 38,67°C, ce qui représente un écart de 21,14°C par rapport à la température externe (Figures 17 & 18).

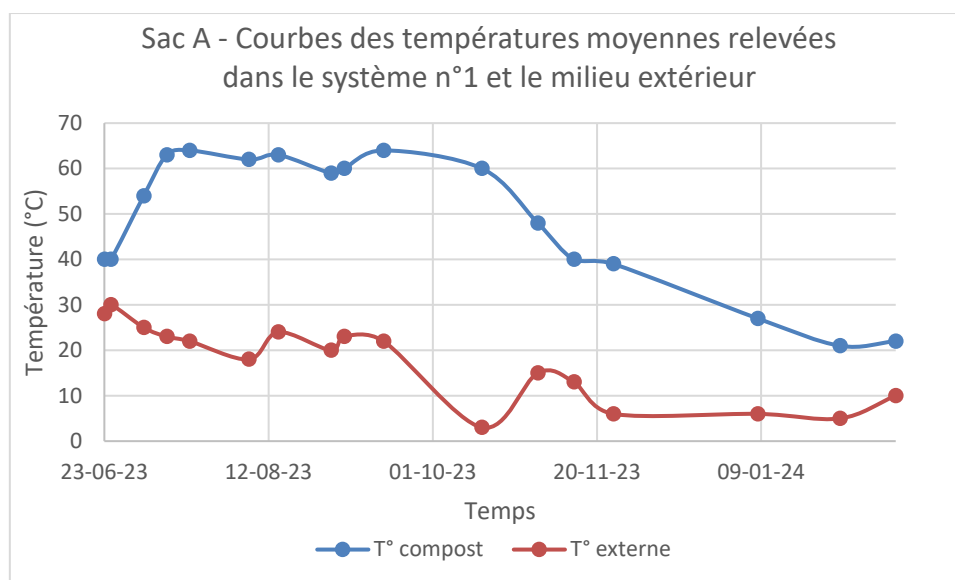


FIGURE 17 : COURBES DES TEMPÉRATURES MOYENNES RELEVÉES DANS LE SYSTÈME N°1 ET LE MILIEU EXTÉRIEUR

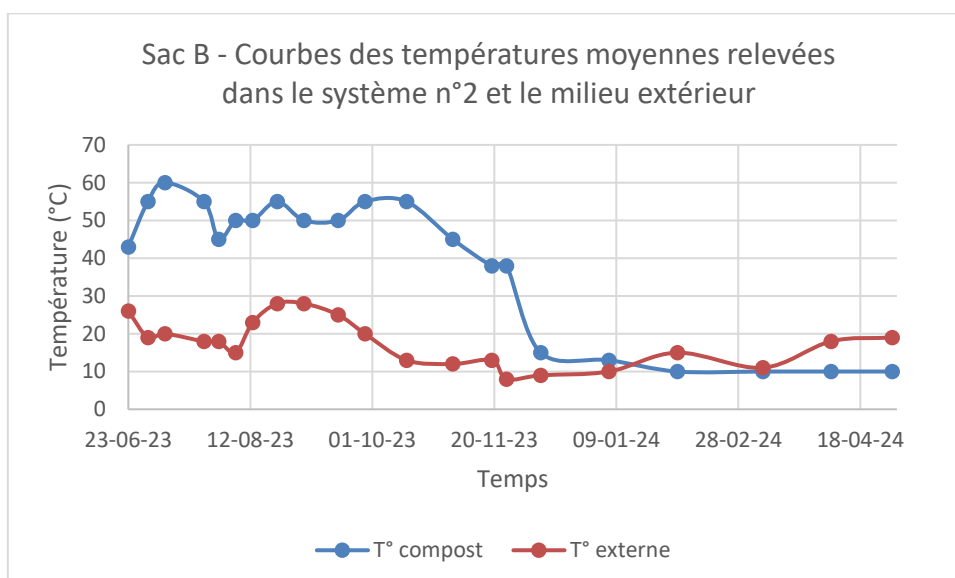


FIGURE 18 : COURBES DES TEMPÉRATURES MOYENNES RELEVÉES DANS LE SYSTÈME N°2 ET LE MILIEU EXTÉRIEUR

Cette différence entre les deux systèmes peut notamment s'expliquer par la durée nécessaire pour effectuer leurs trois rotations : le système n°2 a pris plus de temps que le système n°1, bien que leurs périodes de montée en température aient été similaires (de juin à octobre). Le système n°1 a également atteint des températures légèrement plus élevées, probablement en raison d'un apport de matières plus conséquent par les adhérents ou de variations environnementales locales, étant donné que les deux systèmes sont situés à des endroits différents de la Ville de Mons.

Enfin, les données de température des systèmes n°3 et n°4 ne sont pas disponibles du fait que leurs processus de compostage respectifs ne sont pas encore terminés. Des données partielles relatives au système n°3 sont néanmoins consultables en annexe 2 et indiquent une situation analogue à celle observée dans les systèmes n°1 et n°2, avec une température interne environ deux fois supérieure à la température de l'environnement extérieur.

2.2.1.2 Humidité

En compostage individuel, le traitement statistique du taux d'humidité mesuré dans les différents fûts expérimentaux a indiqué des résultats équivalents ($p > 0,05$) entre les différents traitements (sac A, sac B, sac C et témoin) pour les échantillons prélevés aux T_0 , $T_{6\text{mois}}$ et $T_{12\text{mois}}$. Ces résultats suggèrent que l'humidité a évolué de manière similaire entre les traitements tout au long de l'expérimentation, indiquant ainsi que les conditions étaient analogues dans les fûts expérimentaux.

De manière générale, l'humidité a tendance à augmenter au fil du temps : elle était en moyenne de 61,09 % au T_0 , de 69,91 % au $T_{6\text{mois}}$, et de 77,63 % au $T_{12\text{mois}}$ (Annexe 1). Bien que ces taux soient supérieurs aux conditions d'humidité optimales pour le compostage individuel, il est aussi possible qu'un biais ait eu lieu lors du dernier prélèvement. En effet, ce dernier a été effectué dans le compost mature, situé au fond des fûts, c'est-à-dire là où l'eau peut s'être accumulée par gravité.

Concernant le compostage collectif, l'analyse statistique du taux d'humidité a également montré des résultats équivalents ($p > 0,05$) entre les différents traitements au T_0 et à la première rotation ($T_{\text{Rotation1}}$). Ces résultats soutiennent l'idée que l'humidité a évolué de manière uniforme jusqu'à cette étape du processus de compostage, et que des conditions analogues existaient donc entre les systèmes.

À partir de la deuxième rotation ($T_{\text{Rotation2}}$), seuls les systèmes n°1 et n°2 sont considérés par l'analyse puisque les systèmes n°3 et n°4 n'ont pas encore atteint cette étape dans leur processus de compostage. Le traitement statistique du taux d'humidité à $T_{\text{Rotation2}}$ révèle une différence significative ($p < 0,05$) entre les systèmes n°1 et n°2 (Figure 19), avec une humidité moyenne de 51,15 % dans le système n°1 contre 66,19 % dans le système n°2 (Annexe 2). En revanche, le traitement statistique de l'humidité à $T_{\text{Rotation3}}$ n'indique quant à lui aucune différence significative ($p > 0,05$) entre les systèmes n°1 et n°2.

Comparaison du taux d'humidité à la rotation 2

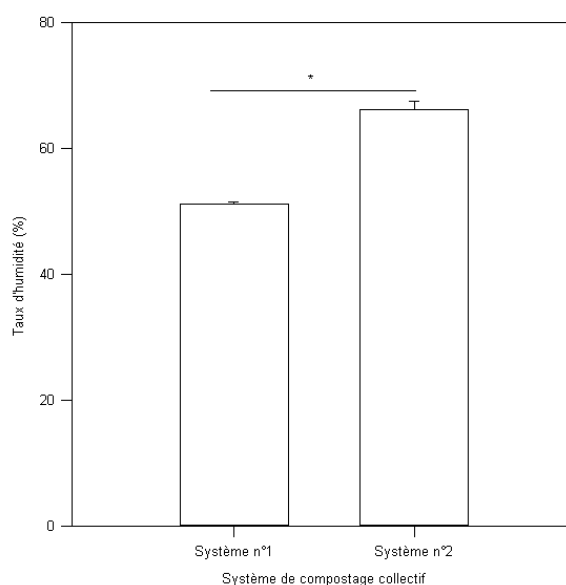


FIGURE 19 : COMPARATIF DE L'HUMIDITÉ DANS LES SYSTÈMES N°1 ET N°2 (ROTATION 2)

Ainsi, les données disponibles pour le compostage collectif montrent que, même si une différence d'humidité a été observée à $T_{\text{Rotation2}}$ entre les systèmes n°1 et n°2, les conditions d'humidité des composts collectifs étaient globalement proches des exigences des bonnes pratiques tout au long du suivi (40-60% environ).

2.2.1.3 pH

Les données recueillies dans le cadre du suivi du pH pour les expériences en compostage individuel et collectif indiquent que matrices étudiées sont neutres à légèrement basique (Annexes 1 & 2). En compostage individuel, l'analyse statistique des mesures de pH a révélé que les valeurs étaient équivalentes ($p > 0,05$) entre les différents traitements (sac A, sac B, sac C et témoin) pour les échantillons prélevés aux T_0 , $T_{6\text{mois}}$ et $T_{12\text{mois}}$. Cela suggère que les conditions de pH étaient similaires entre les traitements tout au long de l'étude.

Pour le compostage collectif, le traitement statistique des données de pH a également indiqué une équivalence entre tous les systèmes ($p > 0,05$) au T_0 et à la première rotation ($T_{\text{Rotation1}}$). Étant donné que les systèmes n°3 et n°4 n'ont pas encore effectué les rotations n°2 et n°3, les données de pH pour ces étapes concernent uniquement les systèmes n°1 et n°2. Les résultats montrent qu'il n'y avait pas de différence significative de pH à $T_{\text{Rotation2}}$. Cependant, comme l'indique la Figure 20, une différence a été observée à $T_{\text{Rotation3}}$, au cours de laquelle le pH du système n°2 était légèrement plus élevé que celui du système n°1, présentant un écart moyen de seulement 0,35 unité de pH.

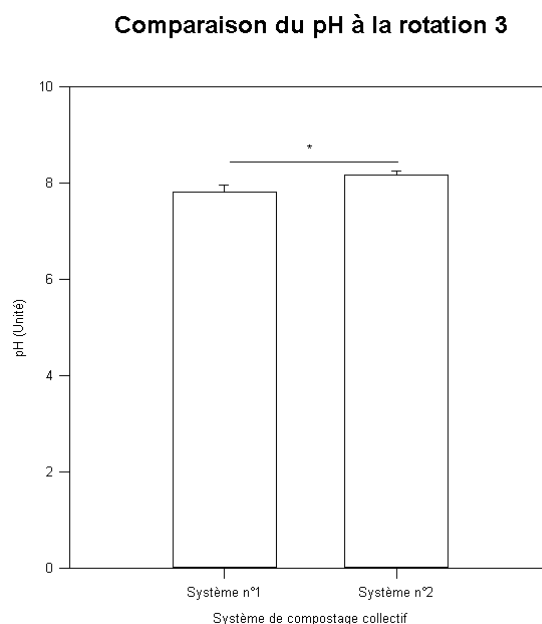


FIGURE 20 : COMPARATIF DU pH DANS LES SYSTÈMES N°1 ET N°2 (ROTATION 3)

Cette différence, bien que statistiquement significative ($p < 0,05$), est minime et révèle surtout la sensibilité de l'analyse effectuée. En effet, le pH moyen dans le système n°2 à $T_{\text{Rotation3}}$ était de 8,17, soit une valeur qui a déjà été dépassée à plusieurs reprises dans le lot de données obtenues lors des rotations 1 et 2, ainsi que lors de certaines mesures effectuées en compostage individuel au $T_{12\text{mois}}$.

Il semble dès lors que, pour les données disponibles, le pH ait été, hormis quelques variations mineures, globalement équivalent entre les différents systèmes tout au long de l'expérimentation en compostage collectif.

2.2.1.4 Caractérisation du compost mature

Comme expliqué dans la section 2.1.5.4, la réglementation relative au compost industriel a été utilisée comme référence pour la caractérisation des échantillons prélevés à l'issue des expériences de compostage individuel et collectif. Les résultats obtenus pour les deux expérimentations sont consultables dans les annexes 1 & 2.

En compostage individuel, le taux de matières sèches du compost s'est révélé trop faible par rapport aux normes en vigueur. Ce résultat était toutefois attendu car étroitement corrélé au taux d'humidité élevé qui a été discuté dans la section 2.2.1.2. En raison de cette teneur élevée en eau, la maturité du compost n'a pas toujours pu être mesurée dans des conditions optimales, mais un test de respirométrie complémentaire a confirmé que la matière était stable et peu active.

Le taux de matières organiques dans le compost individuel, statistiquement équivalent ($P > 0,05$) entre tous les traitements (sac A, sac B, sac C et témoin), s'est quant à lui révélé élevé par rapport aux seuils renseignés dans la réglementation. Cette observation est probablement liée aux conditions spécifiques

du compostage individuel, et notamment à la température trop basse qui ne permet pas une activité biologique optimale et une minéralisation très efficace.

Cette caractéristique du compostage individuel a également révélé la présence de graines et de propagules d'adventices dans les échantillons, un phénomène qui ne s'observe normalement pas dans un compost industriel car les températures qui règnent durant le processus contribuent à les détruire.

Concernant la contamination en éléments traces métalliques (ETM) et en composés organiques, aucun dépassement n'a été observé en regard des normes imposées.

Au niveau des échantillons issus du compostage collectif, il est apparu que le taux de matières sèches était insuffisant pour le système n°2, un constat également en lien avec les résultats de la section dédiée à l'humidité (2.2.1.2), qui indiquaient que le compost mature produit par le système n°2 était significativement plus humide que celui généré par le système n°1. De ce fait, son taux de matières organiques s'est également révélé élevé, probablement en raison de températures internes moins élevées que celles du système n°1 (section 2.2.1.1).

Par corollaire, comme dans le cas des composts individuels, des graines et propagules d'adventices ont été identifiés dans l'échantillon provenant du système n°2. Ce n'était en revanche pas le cas pour le système n°1, signifiant que les températures atteintes ont suffi pour provoquer une hygiénisation.

En matière de contamination, aucun dépassement en composés organiques n'a été relevé dans les deux systèmes de compostage considérés. Cependant, concernant les métaux, bien que le système n°2 soit resté en deçà des seuils réglementaires, une anomalie a été observée pour le plomb dans le système n°1. Avec une concentration de 120 mg/kg de matière sèche, le compost mature de ce système ne peut être considéré comme valorisable. Il est peu probable que le sac ajouté au compost soit à l'origine de cette pollution, car aucun dépassement en plomb n'a été constaté dans les composts issus des trois fûts individuels contenant le même type de sac. La source probable de cette pollution est plutôt liée à la localisation en centre-ville de ce système. Selon le référent de site, il est fréquent que des riverains non-adhérents y déposent des déchets de manière inappropriée, malgré ses efforts pour les retirer. Cette incivilité pourrait être suffisante pour causer une contamination élevée en plomb. Une autre source possible pourrait résider dans une éventuelle bioaccumulation de plomb dans les matières carbonées utilisées.

En bref, les analyses de caractérisation ont révélé quelques écarts par rapport à la réglementation, notamment un taux de plomb anormalement élevé dans un des systèmes de compostage collectif. Ces dépassements semblent toutefois explicables par les conditions de suivi et l'environnement du compost considéré. Il apparaît donc que la présence de plastique n'a pas d'influence significative sur le processus de compostage, qu'il soit individuel ou collectif, du moins pour ce qui concerne les paramètres normés qui ont été testés. Bien que des données supplémentaires provenant des systèmes n°3 et n°4 auraient permis de confirmer cette assertion avec davantage de rigueur, les résultats des systèmes n°1 et n°2 suggèrent au moins que l'ajout de sacs certifiés n'impacte pas significativement le processus de compostage en conditions collectives.

2.2.2 Évaluation de la dégradation des sacs en plastique

Comme détaillé dans la section 2.1.6, un contrôle visuel de la dégradation des sacs en plastique a été réalisé sur les refus de tamisage à 2 mm, à partir de chaque échantillon d'un litre prélevé après le début de l'expérience (T_0) dans les fûts et les systèmes expérimentaux. À titre indicatif, l'aspect des trois sacs expérimentaux (A, B et C) tels qu'ils ont été introduits dans les différents dispositifs pour les expérimentations en compostage individuel et collectif est illustré en Figure 21.



FIGURE 21 : ASPECT DES SACS EXPÉRIMENTAUX UNE FOIS REMPLIS DE MATIÈRES AZOTÉES (DE GAUCHE À DROITE : SAC A, SAC B, SAC C)

Pour le $T_{12\text{mois}}$ et le $T_{\text{Rotation3}}$, une partie de la fraction de l'échantillon ayant franchi la maille de 2 mm a fait l'objet d'une analyse visant à extraire et quantifier les microplastiques visibles à l'œil nu afin de vérifier la conformité à la norme NBN EN 13432 (2000) en conditions réelles.

2.2.2.1 Compostage individuel

2.2.2.1.1 Contrôle visuel

2.2.2.1.2 Prélèvement intermédiaire ($T_{6\text{mois}}$)

Après six mois de compostage individuel, le caractère compostable du sac A a été confirmé par sa décomposition : le sac s'est fragmenté et réduit en lambeaux dans chacun des trois fûts expérimentaux où il avait été ajouté (Figure 22), indiquant une probable minéralisation sous les conditions du compostage. Aucun plastique externe à l'étude n'a été détecté dans ces échantillons.



FIGURE 22 : PHOTOGRAPHIES DU PLASTIQUE PRÉSENT DANS LE REFUS À 2 MM DES TROIS ÉCHANTILLONS DE MATRICE EXPÉRIMENTALE PRÉLEVÉS DANS LES FÛTS AYANT INCORPORÉ LE SAC A DANS LEURS AJOUTS HEBDOMADAIRES

Une observation similaire a été faite pour le sac B dans les quatre fûts expérimentaux auxquels il avait été incorporé (Figure 23), bien que sa fragmentation semble moins avancée que celle du sac A, confirmant néanmoins sa capacité à être biodégradé. Là encore, aucun plastique externe à l'étude n'a été trouvé dans les échantillons.



FIGURE 23 : PHOTOGRAPHIES DU PLASTIQUE PRÉSENT DANS LE REFUS À 2 MM DES QUATRE ÉCHANTILLONS DE MATRICE EXPÉRIMENTALE PRÉLEVÉS DANS LES FûTS AYANT INCORPORÉ LE SAC B DANS LEURS AJOUTS HEBDOMADAIRES

Contrairement aux sacs A et B, le sac C, composé de polyéthylène, n'a montré aucun signe visible de dégradation dans les trois fûts où il avait été ajouté. Les sacs sont restés intacts, bien que certains aient été déchirés par l'entretien manuel des fûts. Des morceaux déchirés du sac C ont ainsi été retrouvés dans l'un des échantillons (Figure 24). Comme pour les autres sacs, aucun plastique externe à l'étude n'a été détecté.



FIGURE 24 : PHOTOGRAPHIE DE MORCEAUX DÉCHIRÉS DU SAC C PRÉSENTS DANS LE REFUS À 2 MM DE L'UN DES TROIS ÉCHANTILLONS DE MATRICE EXPÉRIMENTALE PRÉLEVÉE DANS LES FûTS AUXQUELS IL A ÉTÉ AJOUTÉ HEBDOMADAIREMENT

En ce qui concerne les échantillons provenant des fûts témoins, aucun d'eux ne comportait de plastique externe à l'étude non plus.

2.2.2.1.3 Prélèvement de compost mature ($T_{12\text{mois}}$)

Lors du prélèvement en fin d'expérience, aucune contamination en plastique externe à l'étude n'était à noter dans les échantillons issus des fûts avec le sac A. En revanche, des fragments et lambeaux de ce dernier, de taille similaire à ceux observés à $T_{6\text{mois}}$, étaient encore présents dans le compost mature

des trois fûts concernés (Figure 25). Une accumulation de matières azotées peu dégradées au point d'être encore identifiables a été observée dans les replis des plus gros lambeaux.



FIGURE 25 : PHOTOGRAPHIES DU PLASTIQUE PRÉSENT DANS LE REFUS À 2 MM DES TROIS ÉCHANTILLONS DE COMPOST MATURE PRÉLEVÉ DANS LES FûTS EXPÉRIMENTAUX AYANT INCORPORÉ LE SAC A DANS LEURS AJOUTS HEBDOMADAIRES

Une situation comparable a été notée pour le sac B (Figure 26), dont la fragmentation, tout comme à T_{6mois}, reste moins avancée que celle du sac A. Des matières azotées peu décomposées étaient aussi présentes dans les plus gros lambeaux de sac B. Aucun échantillon de compost mature ne montrait de traces de plastique externe à l'étude.



FIGURE 26 : PHOTOGRAPHIES DU PLASTIQUE PRÉSENT DANS LE REFUS À 2 MM ISSU DES QUATRE ÉCHANTILLONS DE COMPOST MATURE PRÉLEVÉ DANS LES FûTS EXPÉRIMENTAUX AYANT INCORPORÉ LE SAC B DANS LEURS AJOUTS HEBDOMADAIRES

N'étant pas biodégradable, le sac C n'a continué de subir que des altérations mécaniques jusqu'à la fin de l'expérimentation, et le plastique présent dans le compost mature contenait aussi des matières organiques peu dégradées. Aucune contamination en plastiques externes à l'étude n'a été observée dans les fûts contenant le sac C, ni dans les fûts témoins.

La persistance de matières azotées peu décomposées à l'intérieur du sac C était attendue car le polyéthylène crée une barrière physique qui ralentit la décomposition des matières organiques qu'il encapsule. Pour les sacs A et B, leur dégradation semble également insuffisante pour permettre une minéralisation complète des matières azotées contenues à l'intérieur, mais dans une moindre mesure comparée au sac C. Il est aussi possible qu'un certain nombre de fragments des sacs A et B retrouvés dans le compost mature aient migré depuis les couches supérieures de la matrice expérimentale à la

suite du brassage des matières qui fait partie intégrante des règles de bonnes pratiques du compostage individuel, voire de l'activité biologique inhérente au processus de compostage.

2.2.2.1.4 Extraction des microplastiques

L'extraction des microplastiques (MP) ayant franchi la maille de 2 mm, réalisée selon la méthode décrite en section 2.1.6, a permis d'évaluer leur nombre estimé par kilogramme de compost mature sec, leur taille et leur surface pour chaque traitement étudié (sacs A, B, C et témoin). Les données obtenues sont consultables dans l'Annexe 1 et résumées dans le Tableau 6.

TABLEAU 6 : MOYENNES DU NOMBRE (PAR KG DE MATIÈRE SÈCHE), DE LA TAILLE ET DE LA SURFACE DE MICROPLASTIQUES (MPs) DANS LE COMPOST MATURE APRÈS TAMISAGE À 2 MM DES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS (SAC A, SAC B, SAC C ET TÉMOIN)

Traitement	Nombre MPs/kg MS	Nombre MPs externes/kg MS	Taille MPs (mm)	Surface MPs (mm ²)
Sac A	433,33	40,00	3,47	4,12
Sac B	415,00	0,00	3,46	4,24
Sac C	133,33	20,00	4,23	6,39
Témoin	40,00	40,00	1,65	2,11

Les résultats montrent que des microplastiques (MPs) ont été quantifiés dans les quatre traitements analysés (sacs A, B, et C, ainsi que le témoin). Les composts contenant les sacs A et B présentent des taux de MPs similaires, légèrement au-dessus de 400 MPs/kg de matière sèche (MS), soit environ quatre fois plus que ceux observés pour le sac C. Ce résultat semble logique, car les sacs A et B, certifiés compostables, se minéralisent progressivement en libérant de nombreux petits fragments. En revanche, les MPs générés par le sac C, composé de plastique persistant, sont probablement dus aux contraintes mécaniques subies lors du brassage des matières dans le fût, plutôt qu'à une dégradation réelle.

Une contamination externe par des MPs a également été détectée dans les échantillons issus des composts ayant contenu les sacs A et C, ainsi que dans les témoins. En revanche, les composts contenant le sac B n'ont montré aucun signe de MPs externes : tous les MPs présents partageaient les mêmes caractéristiques visuelles que les fragments du sac B. La contamination externe observée est relativement uniforme entre les traitements, avec un maximum de 40 MPs/kg MS, qui peut donc être considéré comme un niveau basal de contamination. Comparée aux quantités élevées de MPs relevées dans les composts contenant des sacs, cette contamination basale représente une fraction restreinte des MPs totaux, ce qui confirme que les sacs eux-mêmes sont bien la principale source de MPs dans le compost mature.

Il convient toutefois de noter que cette analyse de quantification des MPs n'a permis de détecter que les plastiques ayant une densité inférieure ou égale à 1,18 g/cm³. Par conséquent, les valeurs observées peuvent sous-estimer la contamination totale, car les MPs plus denses n'ont pas pu être extraits ni mesurés.

Bien que les échantillons aient été tamisés à 2 mm, la taille moyenne des MPs issus des sacs A, B, et C est respectivement de 3,47 mm, 3,46 mm et 4,23 mm. Ce résultat s'explique par la souplesse du

matériau, qui a pu franchir la maille en s'enroulant ou en s'agglomérant autour de la matière organique du compost.

En résumé, même si les sacs A et B respectent la norme NBN EN 13432 (2000), les fragments qu'ils laissent dans le compost mature sont encore plus grands que 2 mm après 12 mois de compostage en conditions réelles. Ces observations suggèrent que, même en étant certifiés compostables en conditions domestiques, les sacs en plastique ne sont pas adaptés aux spécificités du compostage individuel.

2.2.2.2 Compostage collectif

2.2.2.2.1 Contrôle visuel

2.2.2.2.2 Rotation n°1 ($T_{\text{Rotation1}}$)

Lors de la première rotation ($T_{\text{Rotation1}}$), les trois prélèvements du système n°1 ont révélé que le sac A s'était décomposé en petits fragments, sans aucun lambeau présent dans la matrice expérimentale, et sans aucune contamination par du plastique externe à l'étude (Figure 27).



FIGURE 27 : PHOTOGRAPHIES DU PLASTIQUE PRÉSENT DANS LE REFUS À 2 MM DES TROIS ÉCHANTILLONS DE MATRICE EXPÉRIMENTALE PRÉLEVÉS DANS LE SYSTÈME N°1 AU MOMENT DE LA ROTATION N°1

Pour les systèmes n°2, n°3 et n°4, un seul échantillon sur les trois prélevés contenait du plastique visible (Figure 28). Dans le système n°2, deux fragments de plastique issus du sac B ont été retrouvés, également sans lambeaux et sans plastique externe à l'étude. Comme observé dans le cas du compostage individuel, le sac C ne montrait aucun signe de dégradation, se déchirant uniquement sous l'effet des contraintes mécaniques. Un morceau de ce sac a été retrouvé, et il a été noté par le référent de site du système n°3 que la présence du sac C semblait perturber le processus de compostage en asséchant la matière située en-dessous, probablement en bloquant la percolation de l'eau et en réduisant l'activité biologique. Dans le système n°4, deux morceaux de plastique externes à l'étude ont été détectés, indiquant une contamination.



FIGURE 28 : PHOTOGRAPHIES DU PLASTIQUE PRÉSENT DANS LE REFUS À 2 MM D'UN ÉCHANTILLON DE MATRICE EXPÉRIMENTALE PRÉLEVÉS DANS LES SYSTÈMES N°2, N°3 ET N°4 AU MOMENT DE LA ROTATION N°1 (DE GAUCHE À DROITE : ÉCHANTILLON DU SYSTÈME N°2, ÉCHANTILLON DU SYSTÈME N°3, ÉCHANTILLON DU SYSTÈME N°4)

2.2.2.2.3 Rotation n°2 ($T_{\text{Rotation2}}$)

À partir de la deuxième rotation ($T_{\text{Rotation2}}$), seuls les systèmes n°1 et n°2 ont été analysés, étant les seuls à avoir atteint ce stade de compostage.

Dans le système n°1, des fragments du sac A ont été retrouvés dans deux des trois échantillons, d'une taille analogue à ceux retrouvés à $T_{\text{Rotation1}}$. Ces fragments étaient accompagnés de quelques plastiques externes à l'étude (encadré en rouge sur la Figure 29).



FIGURE 29 : PHOTOGRAPHIES DU PLASTIQUE PRÉSENT DANS LE REFUS À 2 MM DE DEUX ÉCHANTILLONS DE MATRICE EXPÉRIMENTALE PRÉLEVÉS DANS LE SYSTÈME N°1 AU MOMENT DE LA ROTATION N°2

Dans le système n°2, des fragments du sac B ont été identifiés dans tous les échantillons, dont un sous la forme d'un lambeau (Figure 30). D'après le référent de site du système n°2, ce lambeau proviendrait de matières qui, avant la rotation, étaient sans doute situées au périmètre du bac, c'est-à-dire là où la température est la plus basse et où la dégradation est donc plus faible. Un morceau de plastique externe à l'étude, encadré en rouge, a également été identifié dans le même échantillon.



FIGURE 30 : PHOTOGRAPHIES DU PLASTIQUE PRÉSENT DANS LE REFUS À 2 MM DES TROIS ÉCHANTILLONS DE MATRICE EXPÉRIMENTALE PRÉLEVÉS DANS LE SYSTÈME N°2 AU MOMENT DE LA ROTATION N°2

2.2.2.2.4 Rotation n°3 ($T_{\text{Rotation3}}$)

Lors de la troisième rotation ($T_{\text{Rotation3}}$), des fragments de plastique ont été retrouvés dans deux des trois échantillons du compost mature du système n°1. Le premier contenait un unique fragment du sac A tandis que le second ne contenait qu'un morceau de plastique externe à l'étude, encadré en rouge sur la Figure 31.



FIGURE 31 : PHOTOGRAPHIE DU PLASTIQUE PRÉSENT DANS LE REFUS À 2 MM DE DEUX ÉCHANTILLONS DE COMPOST MATURE PRÉLEVÉS DANS LE SYSTÈME N°1 AU MOMENT DE LA ROTATION N°3

Pour le sac B, des fragments ont de nouveau été retrouvés dans les trois échantillons du système n°2, avec des morceaux de plastique externe à l'étude (encadrés en rouge sur la Figure 32) dans deux d'entre eux. Encore une fois, un lambeau de sac B a été trouvé dans un échantillon.



FIGURE 32 : PHOTOGRAPHIES DU PLASTIQUE PRÉSENT DANS LE REFUS À 2 MM DES TROIS ÉCHANTILLONS DE COMPOST MATURE PRÉLEVÉS DANS LE SYSTÈME N°2 AU MOMENT DE LA ROTATION N°3

Les résultats montrent que les sacs A et B se dégradent mieux en compostage collectif qu'en compostage individuel, probablement en raison des températures plus élevées enregistrées dans les systèmes n°1 et n°2 (voir section 2.2.1.1). Aucun ralentissement du processus de décomposition n'a été observé, bien que le compost mature contienne encore des fragments de taille centimétrique, voire des lambeaux plus grands, en particulier pour le sac B.

Pour le sac C, même en l'absence de données jusqu'à $T_{Rotation3}$, le commentaire du référent de site semble indiquer qu'il interfère avec le processus de compostage, causant notamment une hétérogénéité dans la répartition de l'humidité. Il est par ailleurs fort probable que, comme en compostage individuel, ce sac ralentisse la décomposition de la matière qu'il contient en empêchant son contact avec le reste de la matrice.

Enfin, malgré le manque de données supplémentaires relatives au système n°4, qui aurait pu fournir une indication de la contamination basale en plastique dans un compost mature standard, la présence de plastiques externes à l'étude était relativement limitée dans les échantillons. Ainsi, la majorité des plastiques identifiés provenaient des sacs étudiés.

2.2.2.2.5 Extraction des microplastiques

L'extraction des microplastiques (MP) ayant franchi la maille de 2 mm, réalisée selon la méthode décrite en section 2.1.6, a permis d'évaluer leur nombre estimé par kilogramme de compost mature sec, leur taille et leur surface pour les systèmes n°1 et n°2. Les données obtenues sont consultables dans l'Annexe 2 et résumées dans le Tableau 7.

TABEAU 7 : MOYENNES DU NOMBRE (PAR KG DE MATIÈRE SÈCHE), DE LA TAILLE ET DE LA SURFACE DE MICROPLASTIQUES (MPs) DANS LE COMPOST MATURE APRÈS TAMISAGE À 2 MM DES SYSTÈMES N°1 ET N°2

Système	Nombre MPs/kg MS	Taille MPs (mm)	Surface MPs (mm ²)
Système n°1	100,00	2,13	1,88
Système n°2	146,67	2,29	1,68

Les résultats indiquent une absence de contamination par des microplastiques externes à l'étude, ce qui est assez cohérent avec les résultats de l'analyse visuelle qui indiquait que l'essentiel des plastiques dans les échantillons étaient issus des sacs étudiés. Comme dans le cadre de l'expérimentation en compostage individuel, il est toutefois important de noter que ces résultats ne reflètent pas forcément toute la contamination puisque l'analyse ne permet pas d'extraire des plastiques dont la densité est supérieure à 1,18 g/cm³.

Le fait qu'il y ait moins de microplastiques provenant du sac A que du sac B corrobore également le fait que le sac B semble se dégrader moins rapidement que le sac A. Quoi qu'il en soit, la taille moyenne des microplastiques issus des deux types de sacs est supérieure à 2 mm. Cette taille supérieure à celle de la maille du tamis s'explique par la souplesse du matériau lui ayant permis de s'enrouler sur lui-même voire de s'agglomérer autour de particules de matière organique.

Dès lors, malgré une dégradation accrue par rapport au compostage individuel, il apparaît cette fois encore que les sacs A et B, certifiés compostables et respectant donc la norme NBN EN 13432 (2000), laissent des fragments d'une taille supérieures à 2 mm à l'issue du processus de compostage collectif considéré. Ces observations suggèrent que l'utilisation de sacs en plastique, même certifiés compostables en conditions domestiques, n'est pas adaptée aux spécificités du compostage collectif.

2.3 Conclusion

Les résultats de ces expérimentations montrent que les conditions de compostage individuel et collectif influencent différemment le processus de dégradation des plastiques et la maturation du compost.

En compostage individuel, la température des fûts expérimentaux était trop basse pour assurer une hygiénisation parce que proche de celle de l'environnement extérieur tout au long de l'expérimentation, reflétant la sensibilité du volume restreint des fûts aux conditions environnementales. L'humidité mesurée était supérieure aux bonnes pratiques, probablement à la suite d'un biais lié à la localisation des prélèvements, et le pH est resté stable entre les traitements tout au long du compostage. En compostage collectif, les températures de la matrice étaient plus élevées, pouvant parfois conduire à une hygiénisation mais rendant surtout les systèmes moins sensibles aux conditions extérieures, et l'humidité restait proche des règles de bonnes pratiques, avec un pH également stable.

En termes de caractérisation du compost mature, si des écarts ont parfois pu être observés par rapport à la réglementation, il apparaît que ceux-ci ne sont pas liés à la présence des sacs expérimentaux. Ainsi, le plastique n'a pas semblé influencer significativement le processus de compostage dans les deux modalités considérées, du moins pour ce qui concerne les paramètres normés qui ont été testés.

Concernant la dégradation des plastiques, l'étude a d'abord souligné les risques possibles de fraude ou d'étiquetage erroné. En effet, le sac C, non certifié et pourtant vendu comme compostable en conditions domestiques, est composé de polyéthylène qui, n'étant pas biodégradable, n'a *a priori* été altéré que par des altérations mécaniques, en compostage individuel collectif. Cette hypothèse est notamment soutenue par la littérature scientifique car le polyéthylène est souvent utilisé comme témoin négatif lorsqu'une étude cherche à étudier les propriétés de biodégradation d'un autre plastique (Ruggero *et al.*, 2021; Sintim *et al.*, 2019; Vaverkova *et al.*, 2014).

Pour les sacs A et B, un processus de minéralisation a bien été observé en compostage individuel et collectif. Toutefois, en compostage individuel, des fragments de taille centimétrique ont été identifiés dans le compost mature. Bien que certains d'entre eux puissent provenir des couches supérieures du fût et ne soient donc pas représentatifs du plastique censé résider dans le compost mature, leur présence reflète néanmoins les conditions réelles de compostage étudiées dans le cadre de cette expérimentation. Par ailleurs, les microplastiques retrouvés dans le compost mature individuel ont une taille moyenne supérieure à 2 mm, ce qui confirme que la dégradation demeure incomplète. En compostage collectif, les températures plus élevées facilitent une meilleure dégradation des sacs A et B, mais des fragments excédant 2 mm sont également observés dans le compost mature.

Ainsi, malgré leur conformité aux exigences de la norme NBN EN 13432, il apparaît que les sacs A et B ne se dégradent pas suffisamment, dans les conditions réelles des compostages individuel et collectif, pour se fragmenter en particules de moins de 2 mm. Par conséquent, ces résultats suggèrent donc que l'utilisation de sacs en plastique, même certifiés compostables en conditions domestiques, n'est pas adaptée aux spécificités des compostages domestique et collectif tels qu'appliqués en Wallonie. Des conclusions analogues ont par ailleurs été détaillées dans le rapport d'expertise collective sur l'usage de matières plastiques biosourcées, biodégradables et compostables publié par l'ANSES en 2022.

3 Expérimentation en compostage industriel

L'expérimentation en compostage industriel a été réalisée au centre de traitement de déchets verts de Naninne, géré par l'intercommunale BEP, afin de minimiser le risque de contamination par des plastiques externes à l'étude.

3.1 Matériel et méthode

3.1.1 Choix des sacs expérimentaux

Pour cette expérimentation en compostage industriel, trois sacs, identifiés par les lettres D, E et F (Figure 33), ont été sélectionnés. Leur contenance était d'au moins 20L de façon à ce que leur volume corresponde à l'usage d'un citoyen wallon déposant son sac de déchets organiques pour qu'il soit collecté en porte-à-porte.

Les sacs suivants ont été considérés par l'étude :

- Sac D : sac de 25L certifié compostable en conditions industrielles et mis à disposition du citoyen par l'intercommunale BEP pour la collecte de déchets putrescibles ;
- Sac E : sac de 20L certifié compostable en conditions domestiques ;
- Sac F : sac de 20L certifié compostable en conditions industrielles.

Comme dans le cadre des expérimentations en compostage individuel et collectif, l'organisme de certification TUV-A a analysé la composition chimique de ces trois sacs par FTIR afin de vérifier leur caractère compostable. Encore une fois, l'éthique professionnelle de TUV-A a interdit toute divulgation de la composition des sacs étudiés mais il s'est avéré qu'ils étaient tous certifiés compostables.



FIGURE 33 : SACS EXPÉRIMENTAUX CONSIDÉRÉS DANS L'EXPÉRIMENTATION EN COMPOSTAGE INDUSTRIEL (DE GAUCHE À DROITE : SAC D, SAC E, SAC F)

3.1.2 Dispositif expérimental

L'expérience a débuté le 12 juillet 2023, date à laquelle les déchets verts traités par le centre sont représentatifs de la période estivale. Il s'agit du moment de l'année où le centre traite le plus de

volumes de matières. Ils étaient composés de tontes de pelouses, de taillis de haies, de branches d'arbres et de feuilles (feuillus et résineux), de souches, de troncs, d'herbacées, de fruits, de fleurs ornementales, de sapins et de lianes (Figure 34). La présence de quelques canettes en aluminium et de films, sacs et bouteilles en plastique a pu être observée mais cette contamination était anecdotique au vu des volumes de matières impliqués.



FIGURE 34 : PHOTOGRAPHIE DES DÉCHETS VERTS PRÉSENTS DANS LE CENTRE DE COMPOSTAGE AU DÉMARRAGE DE L'EXPÉRIMENTATION

Ces déchets ont ensuite suivi le processus de compostage tel qu'il est appliqué dans le centre :

Dès leur arrivée, les déchets verts sont broyés pour homogénéiser la matière et la structurer en vue d'optimiser le processus de compostage. Le broyat est ensuite humidifié si nécessaire et entassé dans des cellules de compostage pendant six semaines. Ces cellules sont équipées de tuyaux perforés qui injectent régulièrement de l'air pour maintenir des conditions aérobies. Après cette phase, la matière est rassemblée en andains pour une maturation de 10 à 12 semaines, période durant laquelle ils sont retournés environ trois fois.

Une fois la maturation achevée, le compost est acheminé par tapis roulant dans un trommel dont les mailles, de 10 ou 20 mm, permettent de séparer le compost mature de la fraction résiduelle. Le compost mature, franchissant la maille, est brièvement stocké avant d'être analysé et commercialisé. Les refus, quant à eux, sont éliminés ou réutilisés comme structurant au début du processus.

Toutes les étapes décrites ci-avant sont effectuées en extérieur.

3.1.3 Introduction des sacs expérimentaux dans la matière et entretien du compost

Le centre s'est organisé de façon à ce que les sacs puissent être insérés dans un tas de broyats en train d'être constitué au sein d'une cellule de compostage. Ainsi, la cellule a commencé à être remplie deux jours avant le démarrage de l'expérience et les employés du centre ont aménagé une plateforme de broyats afin que les sacs puissent y être déposés avant d'être recouverts de matière. Trente sacs de chaque type (D, E et F) ont alors été remplis de broyat et refermés avant d'être entassés dans la cellule de compostage (Figure 35).



FIGURE 35 : BROyat UTILISÉ POUR CRÉER LE TAS EXPÉRIMENTAL (A), REMPLISSAGE DES SACS À L'AIDE DU BROyat (B) ET DISPOSITION DES SACS SUR LE TAS EXPÉRIMENTAL (C)

Les sacs ont ensuite été recouverts d'environ un mètre de broyat par les employés du centre et trois piquets servant de marqueurs visuels ont été plantés dans la matière à leur emplacement de façon à pouvoir suivre leur position (Figure 36). Un quatrième marqueur visuel a également été mis en place afin d'identifier une zone de broyat sans sacs en plastique qui a joué le rôle de témoin.

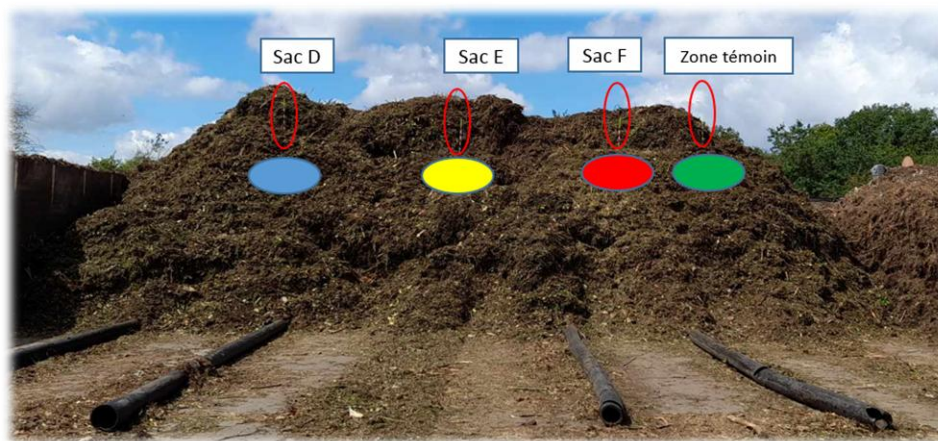


FIGURE 36 : MARQUEURS VISUELS (CERCLÉS DE ROUGE) ET POSITION DES SACS ET DE LA ZONE TÉMOIN ENSEVELIS SOUS LE BROyat

Le broyat dans la cellule ainsi que les quatre sections expérimentales, c'est-à-dire les zones où se situent les sacs D, E et F ainsi que la matière témoin, ont ensuite suivi le processus de compostage en application dans l'infrastructure. En conséquence, après son séjour dans la cellule pendant 6 semaines environ, le tas a été défait de façon à former des andains. Les sections expérimentales ont été isolées du reste de la matière et intégrées à l'andain (Figure 37) à une profondeur identique à celle à laquelle elles se trouvaient dans la cellule de compostage (1 m environ). Les marqueurs visuels ont continué d'être utilisés pour assurer le suivi de leur position, y compris à chaque fois que l'andain concerné a subi des retournements.

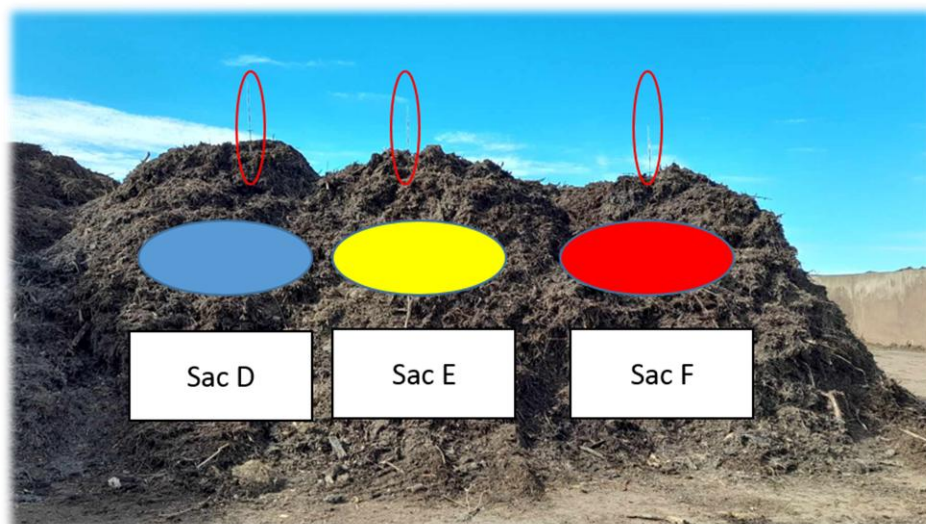


FIGURE 37 : MARQUEURS VISUELS (CERCLÉS DE ROUGE) ET POSITION DES SECTIONS EXPÉRIMENTALES COMPORTANT LES SACS D, E ET F AU SEIN DE L'ANDAIN (ZONE TÉMOIN NON VISIBLE MAIS ÉGALEMENT INTÉGRÉE À L'ANDAIN)

Après maturation au sein de l'andain, les différentes sections expérimentales ont été isolées du reste de la matière pour éviter qu'elles ne se mélangent à de la matière n'ayant pas contenu de sacs avant d'être tamisées au travers du trommel. Le maillage de 20 mm a été utilisé de manière à vérifier si des résidus de plastique sont encore visibles dans la fraction fine (0-20 mm) ou dans la fraction grossière (> 20 mm).

Les sections expérimentales ont alors été conservées séparément sur une dalle sous la forme de huit tas (Figure 38) :

- Section expérimentale « Sac D » (compost mature et refus)
- Section expérimentale « Sac E » (compost mature et refus)
- Section expérimentale « Sac F » (compost mature et refus)
- Section expérimentale « Témoin » (compost mature et refus)



FIGURE 38 : SECTIONS EXPÉRIMENTALES APRÈS TAMISAGE

3.1.4 Échantillonnage

Comme indiqué dans le Tableau 8, trois prélèvements ont été réalisés tout au long du processus de compostage industriel. Le premier prélèvement (T_0) a été effectué au début de l'expérience pour caractériser la matrice initiale de broyat. Un second prélèvement ($T_{\text{Maturation}}$) a eu lieu avant la formation des andains pour l'étape de maturation, et un dernier prélèvement (T_{Final}) a été réalisé sur le compost mature en fin d'expérience.

TABLEAU 8 : ÉCHANTILLONNAGE DU COMPOST INDUSTRIEL

Échantillonnage	Date	Volume/section expérimentale	Matière
Initial (T_0)	12/07/2023	3x1L	Matrice initiale (broyat)
Pré-maturation ($T_{\text{Maturation}}$)	22/08/2023	3x1L	Matrice expérimentale
Final (T_{Final})	07/11/2023	3x1L + 2x10L	Compost mature

À T_0 , les échantillons ont été prélevés en triplicat à l'aide d'une tarière manuelle autour des sacs positionnés sur le tas de broyat (Figure 35c). Les prélèvements, réalisés à une profondeur d'environ 30 cm, ont été collectés dans des flacons en verre brun de 1L.

Pour $T_{\text{Maturation}}$, les sections expérimentales ont été extraites du tas (Figure 39). Les échantillons ont alors été prélevés manuellement dans chacune d'entre elles, toujours en triplicat, et récupérés dans des flacons en verre brun de 1L.



FIGURE 39 : EXTRACTION DE LA SECTION EXPÉRIMENTALE COMPORTANT LE SAC E DU TAS DE COMPOST

Enfin, pour T_{Final} , des échantillons de compost mature ont été prélevés après tamisage des sections expérimentales (Figure 40). Trois échantillons de 1L ont été collectés à une profondeur de 30 cm, chacun en un point distinct de chaque tas. De plus, deux seaux de 10L ont été remplis avec un échantillon composite, composé de 30 prélèvements effectués en 5 points distincts de chaque tas, également à une profondeur de 30 cm. Ces échantillons composites ont été homogénéisés à la main dans chaque seau.



FIGURE 40 : PRÉLÈVEMENT FINAL DE COMPOST INDUSTRIEL MATURE

3.1.5 Suivi physico-chimique

Un suivi du processus de compostage ainsi qu'une caractérisation du compost mature obtenu ont été effectués. Les mêmes paramètres que ceux mentionnés pour les expériences en compostage individuel et collectif ont été considérés à l'exception de la température qui était surveillée en routine au sein du centre à l'aide d'une sonde insérée dans les tas ou l'andain contenant les sections expérimentales. Les données relatives à cette mesure n'ont pas été enregistrées mais, d'après le personnel de l'infrastructure, aucune anomalie n'a été observée à ce sujet, la température ne descendant jamais sous les 70°C.

3.1.5.1 Humidité

L'humidité a été déterminée et calculée pour tous les échantillons d'un litre prélevés au cours de l'expérimentation selon la même méthodologie que celle présentée en section 2.1.5.2.

3.1.5.2 pH

Le pH a été mesuré pour tous les échantillons d'un litre prélevés au cours de l'expérimentation selon la même méthodologie que celle présentée en section 2.1.5.3.

3.1.5.3 Caractérisation du compost mature

Le compost mature a été analysé en fonction de la réglementation wallonne en application pour le compost industriel. Les analyses des paramètres indiqués dans le Tableau 5 ont été réparties entre le laboratoire et un sous-traitant (BEAGx) tel que précisé en section 2.1.5.4.

3.1.6 Évaluation de la dégradation des sacs en plastique

Comme dans le cadre des expérimentations en compostage individuel et collectif, la dégradation des sacs en plastique a été évaluée sur base de la norme NBN EN 13432 (2000). Les échantillons d'un litre prélevés au $T_{\text{Maturation}}$ et au T_{Final} ont été contrôlés visuellement après tamisage à 2 mm. Le compost mature prélevé au T_{Final} a quant à lui également fait l'objet d'une analyse d'extraction et de quantification des microplastiques. La méthodologie qui a été appliquée est décrite en section 2.1.6.

3.1.7 Analyse statistique

L'analyse statistique des données a été effectuée selon la procédure décrite en section 2.1.7.

3.2 Résultats et Discussion

Cette section présente et analyse les résultats obtenus lors de l'expérimentation en compostage industriel.

3.2.1 Suivi physico-chimique

3.2.1.1 Humidité

L'analyse statistique du taux d'humidité mesuré dans les différentes sections expérimentales a révélé des résultats équivalents ($P > 0,05$) entre les traitements avec sacs (sac D, sac E, sac F) et le témoin, tant au démarrage de l'expérience (T_0) qu'avant la phase de maturation ($T_{\text{Maturation}}$). Cela suggère que l'humidité a évolué de manière uniforme jusqu'à cette étape, indiquant des conditions similaires entre les différentes sections.

Cependant, le prélèvement effectué en fin de processus (T_{Final}) a révélé que l'humidité du compost mature était significativement plus élevée ($p < 0,05$) dans la section témoin par rapport aux sections comprenant les sacs D et E (Figure 41).

Comparatif du taux d'humidité dans le compost mature

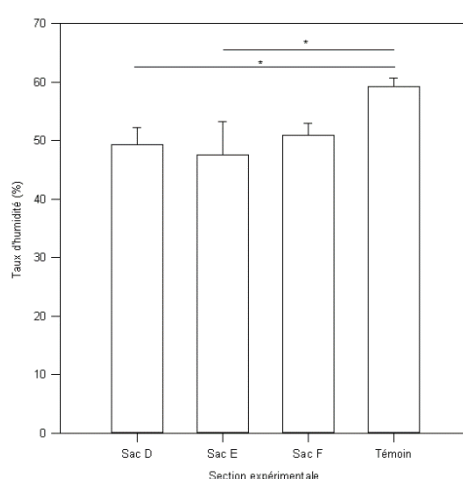


FIGURE 41 : COMPARATIF DE L'HUMIDITÉ DANS LE COMPOST INDUSTRIEL MATURE

Malgré cette différence, le taux d'humidité moyen mesuré dans le compost mature témoin, qui avoisinait les 60%, était du même ordre de grandeur que celui observé dans certaines sections expérimentales tout au long du processus (Annexe 3). En effet, les sections avec les sacs D et F avaient dépassé ce taux à $T_{\text{Maturation}}$. Ainsi, cet écart statistique traduit l'existence de fluctuations de ce paramètre entre les sections expérimentales mais ne signifie pas pour autant qu'il a adopté une valeur problématique durant le suivi, étant par ailleurs resté dans une gamme proche des 40 à 60% dans toutes les sections (Annexe 3).

3.2.1.2 pH

Le suivi du pH a montré une tendance à l'augmentation de ce paramètre au fil du temps, avec une matrice initiale présentant un pH moyen de 5,72 et un compost mature atteignant un pH moyen de

8,13, toutes sections expérimentales confondues (Annexe 3). Par ailleurs, l'analyse statistique a révélé que les valeurs de pH étaient équivalentes ($P > 0,05$) entre tous les traitements (sacs D, E, F et témoin) au début de l'expérience (T_0) et avant la phase de maturation ($T_{\text{Maturation}}$). Ces résultats suggèrent que les conditions de pH sont restées comparables entre les sections expérimentales jusqu'à ce stade du processus. À l'issue du compostage (T_{Final}), comme l'indique la Figure 42, des variations significatives de pH ont été observées ($P < 0,05$), sauf entre les sections contenant les sacs E et F ($P > 0,05$).

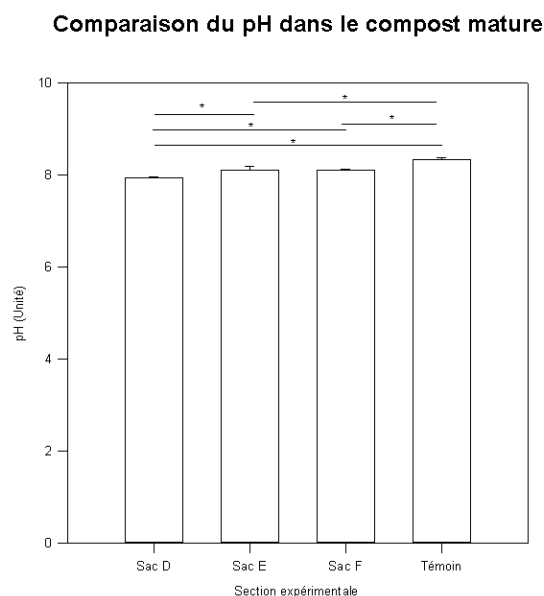


FIGURE 42 : COMPARATIF DU pH DANS LE COMPOST INDUSTRIEL MATURE

Cependant, les écarts de pH entre la section la plus acide (sac D, pH = 7,94) et la plus basique (témoin, pH = 8,34) restaient faibles, ne dépassant pas 0,23 unité (Annexe 3). Ces différences, bien que statistiquement significatives, sont mineures et reflètent la sensibilité de l'analyse, suggérant une stabilité générale du pH entre les sections tout au long du processus.

3.2.1.3 Caractérisation du compost mature

La caractérisation du compost mature en fin d'expérimentation a montré que les résultats étaient globalement conformes aux normes et à la réglementation en vigueur pour le compostage industriel (Annexe 3). Si le taux de matière sèche, corrélé à l'humidité, ainsi que le pH les respectaient, certains écarts ont toutefois été observés.

D'abord, en termes de granulométrie, il a été constaté que la proportion de refus au tamis de 5 mm était supérieure à celle prévue par la réglementation dans toutes les sections expérimentales (Annexe 3). La section témoin étant aussi concernée, ce résultat semble être davantage lié aux conditions de compostage voire à la qualité des intrants qu'à la présence de sacs en plastique.

Ensuite, la température, traduisant la maturité du compost, était plus élevée que celle recommandée par la réglementation dans toutes les sections, sauf dans la section témoin. Ce résultat est sans doute lié à certaines caractéristiques de la matière analysée, comme un taux d'humidité relativement élevé

dans le compost mature témoin (discuté dans la section 3.2.1.2). Toutefois, un test de respirométrie a confirmé que le compost mature était stable et peu actif, indiquant qu'il avait achevé son processus de décomposition.

Enfin, aucun dépassement n'a été observé en termes de contamination, qu'elle soit métallique ou organique.

En résumé, hormis un écart au niveau du paramètre granulométrie, le compost mature de chaque section expérimentale est conforme à la réglementation relative aux composts industriels. Ces résultats suggèrent que la présence de plastique n'affecte pas le processus de compostage industriel, du moins ce qui concerne les paramètres normés qui ont été testés.

3.2.2 Dégradation des sacs en plastique

Comme détaillé dans la section 2.1.6, un contrôle visuel de la dégradation des sacs en plastique expérimentaux a été effectué au niveau du refus après tamisage à 2 mm de chaque échantillon d'un litre prélevé aux $T_{\text{Maturation}}$ et T_{Final} . À titre indicatif, l'aspect des trois sacs expérimentaux (D, E et F) tels qu'ils ont été introduits dans le tas de broyat est illustré en Figure 43.



FIGURE 43 : ASPECT DES SACS EXPÉRIMENTAUX UNE FOIS REMPLIS DE MATIÈRES AZOTÉES (DE GAUCHE À DROITE : SAC D, SAC E, SAC F)

Pour le T_{Final} , une partie de la fraction de l'échantillon ayant franchi la maille 2 mm a fait l'objet d'une analyse visant à extraire les microplastiques visibles à l'œil nu afin de vérifier la conformité à la norme NBN EN 13432 (2000) en conditions réelles.

3.2.2.1 Contrôle visuel

3.2.2.1.1 Prélèvement pré-maturation ($T_{\text{Maturation}}$)

Aucun fragment de plastique n'a été retrouvé dans les échantillons prélevés lors de l'extraction des sections expérimentales avant la phase de maturation, indiquant que les sacs en plastique s'étaient suffisamment dégradés pour passer à travers la maille de 2 mm. De plus, l'absence de plastique externe à l'étude lors de cette étape suggère que la contamination par d'autres plastiques dans les déchets verts constituant la matrice initiale de l'expérimentation était relativement faible.

3.2.2.1.2 Prélèvement de compost mature (T_{Final})

À T_{Final} , quelques morceaux de plastique externe à l'étude ont cette fois été trouvés dans les échantillons de compost mature des sections comportant les sacs D, E, et F, mais aucun fragment provenant des sacs eux-mêmes n'a été observé. Pour le sac D, des plastiques externes à l'étude ont été retrouvés dans les trois échantillons de compost mature (Figure 44).



FIGURE 44 : PHOTOGRAPHIES DU PLASTIQUE PRÉSENT DANS LE REFUS À 2 MM DES TROIS ÉCHANTILLONS DE COMPOST MATURE PRÉLEVÉS DANS LA SECTION EXPÉRIMENTALE COMPORTANT LE SAC D

Concernant les sacs E et F, deux échantillons sur trois uniquement contenaient des plastiques externes à l'étude (Figures 45 & 46).



FIGURE 45 : PHOTOGRAPHIES DU PLASTIQUE PRÉSENT DANS LE REFUS À 2 MM DE DEUX ÉCHANTILLONS DE COMPOST MATURE PRÉLEVÉS DANS LA SECTION EXPÉRIMENTALE COMPORTANT LE SAC E

Les échantillons de la section témoin étaient quant à eux exempts de tout plastique visible, confirmant l'absence de contamination dans cette section.

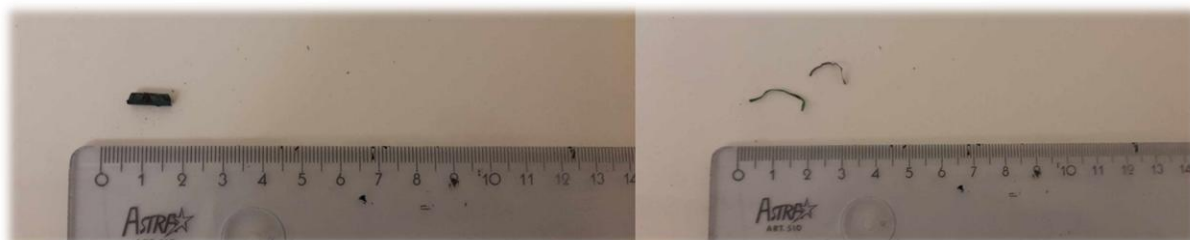


FIGURE 46 : PHOTOGRAPHIES DU PLASTIQUE PRÉSENT DANS LE REFUS À 2 MM DE DEUX ÉCHANTILLONS DE COMPOST MATURE PRÉLEVÉS DANS LA SECTION EXPÉRIMENTALE COMPORTANT LE SAC F

L'absence de fragments de plastique visibles provenant des sacs D, E, et F dans les échantillons à T_{Final} valide l'observation qui avait déjà été faite à $T_{\text{Maturation}}$: les sacs expérimentaux se sont suffisamment dégradés pour qu'aucun résidu ne dépasse une taille de 2 mm. Bien que du plastique externe à l'étude ait été détecté dans certaines sections expérimentales, la contamination reste néanmoins limitée, confirmant l'idée que la matrice initiale était peu contaminée.

3.2.2.2 Extraction des microplastiques

En ce qui concerne l'extraction des microplastiques (MP) du compost industriel mature, aucun fragment n'a été détecté dans les échantillons issus de la section expérimentale comportant le sac D, indiquant une dégradation *a priori* complète de ce sac, dans le cadre des limites méthodologiques et analytiques de l'étude (voir section 2.1.6).

Pour le sac E, un seul microplastique a été identifié dans l'un des trois échantillons analysés, mesurant 2,61 mm pour une surface de 2,56 mm². Ce résultat correspond à 6,67 MPs/kg de compost mature sec. Aucun plastique externe à l'étude n'a été détecté dans les échantillons associés au sac E.

Au niveau du sac F, aucune contamination par des plastiques externes n'a été observée non plus. Par contre, quatre microplastiques issus de la dégradation du sac ont été extraits d'un des trois échantillons analysés (Tableau 9), ce qui équivaut à 26,67 MPs/kg de compost mature sec. Ils avaient une taille et une surface moyennes de 1,52 mm et 1,41 mm², respectivement.

TABLEAU 9 : TAILLE ET SURFACE DES MICROPLASTIQUES (MPs) IDENTIFIÉS DANS LES ÉCHANTILLONS DE COMPOST MATURE COMPORTANT LE SAC F APRÈS TAMISAGE À 2 MM

N° MP	Taille MPs (mm)	Surface MPs (mm ²)
1	1,11	0,75
2	2,09	2,09
3	2,26	2,59
4	0,64	0,23

Pour le témoin, trois microplastiques ont été identifiés dans un des trois échantillons (Tableau 10). D'une taille moyenne de 3,35 mm et une surface de 5,51 mm², ils ne proviennent bien sûr pas des sacs expérimentaux et représentent une densité de 20 MPs/kg de compost mature sec.

TABLEAU 10 : TAILLE ET SURFACE DES MICROPLASTIQUES (MPs) IDENTIFIÉS DANS LES ÉCHANTILLONS DE COMPOST MATURE TÉMOIN APRÈS TAMISAGE À 2 MM

N° MP	Taille MPs (mm)	Surface MPs (mm ²)
1	4,40	9,37
2	3,51	4,53
3	2,13	2,63

Les résultats de l'étude, malgré ses limitations méthodologiques et analytiques, suggèrent que les sacs testés sont compostables en conditions industrielles. La majorité d'entre eux s'est en effet complètement dégradée ou ne subsiste plus que sous la forme de quelques résidus dans le compost mature. Le sac D, en particulier, s'est en apparence totalement dégradé, aucun fragment n'ayant été retrouvé dans les échantillons analysés. Le sac E a généré un microplastique légèrement supérieur à 2

mm, mais la très faible quantité de fragments observée confirme une dégradation presque complète. Quant au sac F, bien que le nombre de microplastiques retrouvés soit légèrement plus élevé, leur taille moyenne restait inférieure à 2 mm.

Les microplastiques provenant des sacs expérimentaux étaient rares et de taille inférieure à celle des fragments externes à l'étude qui ont été identifiés dans l'échantillon témoin. Ces résidus, d'une taille plus grande que la maille de tamis, est à attribuer au fait que la matière qui les compose était souple et donc à même de s'enrouler sur elle-même pour la franchir. Il est également essentiel de rappeler que l'analyse ne détecte que les microplastiques d'une densité inférieure à $1,18 \text{ g/cm}^3$, ce qui peut ne pas refléter la contamination totale réelle.

Ainsi, les résultats montrent que les conditions de compostage industriel sont davantage adaptées pour la dégradation des sacs certifiés compostables, qu'ils soient conçus pour des conditions industrielles (sac D) ou domestiques (sacs E et F).

3.3 Conclusions

L'expérience a démontré que les sacs en plastique expérimentaux n'ont *a priori* pas eu d'impact significatif sur le processus de compostage industriel au regard des différents paramètres qui ont été testés et mesurés lors de l'étude. Les résultats indiquent en effet que, malgré l'observation de quelques variations statistiques mineures au niveau de certains paramètres mesurés sur le compost mature, les caractéristiques suivies sont restées stables entre les sections expérimentales. De même, la caractérisation du compost mature a révélé que, mis à part un écart de granulométrie, tous les échantillons respectaient les valeurs limites imposées en Wallonie au compost industriel.

De plus, les observations visuelles et l'analyse des microplastiques ont confirmé que les sacs expérimentaux se sont efficacement dégradés, avec peu ou pas de fragments résiduels supérieurs à 2 mm. Quant aux quelques fragments de microplastiques retrouvés, ils étaient de taille inférieure à celle des fragments de plastique externe à l'étude observés dans l'échantillon témoin.

En somme, ces résultats suggèrent que les sacs certifiés compostables en conditions domestiques ou industrielles sont compatibles avec le processus de compostage industriel tel qu'il est appliqué en Wallonie car ils se dégradent en respectant les normes en vigueur et sans impact négatif décelable sur le processus global, au regard des paramètres mesurés dans cette étude.

Il est cependant nécessaire de préciser l'existence de deux biais expérimentaux dans le dispositif. D'abord, les sacs ont tous été enfouis au sein de la matrice initiale pour bénéficier de conditions optimales et représentatives du compostage industriel. Les résultats obtenus ne donnent dès lors pas d'indication sur le processus de compostage et la dégradation de plastiques qui se trouveraient en surface de la matière. Ensuite, les sacs ont été intégrés intacts à l'intérieur de la matrice initiale et ne sont pas passés par l'étape de broyage effectuée préalablement à la formation de tas dans une cellule de compostage. Celle-ci entraînerait probablement la formation de nombreux lambeaux de plastique qui se dégraderaient sans doute plus rapidement que des sacs entiers mais seraient aussi plus enclins

à s'envoler hors du centre de compostage et contaminer l'environnement, comme observé par l'étude de l'ADEME (2019).

4 Conclusions et Perspectives

Les résultats de cette étude mettent en lumière des différences significatives dans le processus de dégradation des plastiques compostables en fonction (i) de la composition des sacs étudiés et (ii) des conditions et du type de compostage envisagé. La température, comme déjà soulevé par Emadian *et al.* (2016) ou Sintim *et al.* (2019), est un paramètre qui joue un rôle crucial dans la dégradation des plastiques étudiés. En compostage individuel, du fait du volume restreint de matière compostée, la température au sein des fûts expérimentaux est restée proche de celle du milieu extérieur, ce qui a conduit à une activité biologique limitée et à une dégradation insuffisante des sacs en plastique pour obtenir des fragments d'une taille inférieure à 2 mm. En revanche, le compostage collectif, bénéficiant d'un dispositif avec des volumes de compostage plus importants et de températures internes plus élevées, a permis une meilleure dégradation des plastiques, mais toujours insuffisante pour générer des fragments d'une taille inférieure à 2 mm. Le compostage industriel, où les conditions d'aération et de température sont optimales, a en revanche montré une dégradation presque complète des sacs en plastique, au regard des paramètres considérés et des limites analytiques de l'étude.

Les autres paramètres mesurés, tels que l'humidité et le pH, ont évolué de manière similaire au niveau des différentes modalités de compostage, suggérant que les conditions existant au sein des différents modes de traitement étudiés étaient globalement équivalentes. De plus, la caractérisation du compost mature a révélé que, malgré l'existence de quelques écarts à la réglementation, la présence de plastiques ne semble pas avoir significativement influencé le processus de compostage dans aucune des modalités testées, du moins en ce qui concerne les paramètres testés.

L'étude souligne également l'importance de la vérification de l'étiquetage relatif à la certification des sacs compostables au travers des résultats obtenus pour le sac C. En effet, bien que vendu comme compostable, ce sac est composé de polyéthylène, un plastique qui n'est pas considéré comme biodégradable (Ruggero *et al.*, 2021 ; Sintim *et al.*, 2019 ; Suleman *et al.*, 2022 ; Vaverkova *et al.*, 2014) mais qui subit par contre de la fragmentation mécanique, contribuant à la formation de microplastiques persistants.

En outre, les analyses de suivi de la dégradation montrent que même les plastiques certifiés compostables en conditions domestiques peuvent produire des fragments de tailles variées. Cela pose un risque de contamination de l'environnement lorsqu'ils sont intégrés dans des processus de compostage. En compostage individuel, ce dernier s'étend généralement sur une année, période suffisante pour que les ménages puissent utiliser leur compost dans la pratique courante. En compostage collectif, il dure en moyenne de 6 à 9 mois, délai requis pour obtenir un compost mature.

Ces préoccupations sont notamment partagées par les études de Ruggero *et al.*, 2021; Bandini *et al.*, 2022 et Gadaleta *et al.*, 2022. Ces résultats suggèrent que les sacs en plastique dits compostables à domicile ne sont finalement pas adaptés au compostage domestique. *In fine*, cette étude démontre que ce type de sacs, qu'ils soient certifiés pour des conditions domestiques ou industrielles, ne se dégrade effectivement qu'en compostage industriel, résultats en accord avec les observations de l'ANSES (2022).

Le cadre de l'étude interdit toutefois d'affirmer que la dégradation et la minéralisation des sacs étudiés est complète en compostage industriel, et ce même si elle apparaît très efficace. Les limitations méthodologiques et analytiques n'ayant permis que l'analyse des microplastiques visibles à l'œil nu, elle ne renseigne donc pas sur les éventuels micro- ou nanoplastiques qui auraient pu être générés durant celle-ci alors que la dispersion de ce type de contaminant dans l'environnement demeure une problématique majeure pour la santé humaine et celle des écosystèmes.

Les résultats de cette étude mettent en évidence la persistance des plastiques certifiés compostables sous forme de fragments dans le compost mature, en particulier dans les contextes courants de compostage individuel et collectif. Bien que les analyses se soient concentrées sur des microplastiques visibles à l'œil nu, ces contaminants sont susceptibles de se fragmenter davantage et de libérer des particules de plus en plus fines, posant des risques environnementaux et sanitaires (ANSES, 2022). En effet, comme l'a démontré l'étude de Braun *et al.* (2021), l'application de compost contenant des résidus plastiques peut introduire des contaminants dans les sols agricoles et horticoles ; et les recherches d'Accinelli *et al.* (2020) ont souligné les effets potentiellement toxiques de ces particules, notamment leur capacité à stimuler la production de toxines par une espèce fongique répandue. L'impact de ces plastiques, considérés comme des polluants émergents, sur la biodiversité et les fonctions des écosystèmes demeure méconnu, tout comme leur toxicité potentielle à long terme (Ruggero *et al.*, 2021; Gadaleta *et al.*, 2022).

Pour combler ces lacunes, des recherches complémentaires sont nécessaires pour évaluer les effets aigus et chroniques de ces polluants émergents. Bien que les analyses directes des particules les plus fines soient encore difficiles en raison de leur taille et de la complexité de certaines matrices, des essais écotoxicologiques peuvent, en revanche, permettre d'identifier leurs impacts indirects mais significatifs. Les parties prenantes de terrain qui ont participé à cette étude — référents de sites de compostage collectif, guides composteurs, intercommunales et administrations — expriment également le besoin de poursuivre les investigations, afin de mieux appréhender les risques potentiels que représentent ces contaminants.

Maintenir un rythme soutenu dans les avancées scientifiques sur ce sujet est ainsi prioritaire pour mieux comprendre les effets à long terme des microplastiques, biodégradables ou non, sur les organismes vivants et leur biotope. L'accumulation de ces particules dans les sols, et potentiellement dans la chaîne alimentaire, soulève par ailleurs des questions de sécurité sanitaire qu'il est urgent d'étudier. Ainsi, un approfondissement des connaissances sur leur toxicité et leurs mécanismes de dégradation après valorisation du compost est indispensable pour développer des stratégies de gestion des déchets adaptées, limiter les impacts environnementaux et ainsi protéger efficacement la santé publique.

5 Bibliographie

Accinelli, Cesare, Hamed K. Abbas, Veronica Bruno, Lorenzo Nissen, Alberto Vicari, Nacer Bellaloui, Nathan S. Little, et W. Thomas Shier. « Persistence in Soil of Microplastic Films from Ultra-Thin Compostable Plastic Bags and Implications on Soil *Aspergillus Flavus* Population ». *Waste Management* 113 (juillet 2020): 312-18. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.011>.

ADEME, OrgaNeo, RITMO Agroenvironnement, Microhumus, 2019/06. Compostage domestique et industriel des sacs plastiques compostables domestiquement et des sacs en papier – Synthèse. 13 pages.

Al Hosni, Asma S., Jon K. Pittman, et Geoffrey D. Robson. « Microbial Degradation of Four Biodegradable Polymers in Soil and Compost Demonstrating Polycaprolactone as an Ideal Compostable Plastic ». *Waste Management* 97 (1 septembre 2019): 105-14. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.042>.

Anses - Rapport d'expertise collective – Usage de matières plastiques biosourcées, biodégradables et compostables. Saisine « n° 2021-SA-0202 - AGEC 84 ». Version finale page 2 / 71. Juillet 2022.

Bandini, Francesca, Eren Taskin, Filippo Vaccari, Mariangela Soldano, Sergio Piccinini, Alberto Frache, Sara Remelli, Cristina Menta, Pier Sandro Cocconcelli, et Edoardo Puglisi. « Anaerobic Digestion and Aerobic Composting of Rigid Biopolymers in Bio-Waste Treatment: Fate and Effects on the Final Compost ». *Bioresource Technology* 351 (mai 2022): 126934. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126934>.

Battista, Federico, Nicola Frison, et David Bolzonella. « Can Bioplastics Be Treated in Conventional Anaerobic Digesters for Food Waste Treatment? » *Environmental Technology & Innovation* 22 (mai 2021): 101393. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101393>.

Braun, Melanie, Matthias Mail, Rene Heyse, et Wulf Amelung. « Plastic in Compost: Prevalence and Potential Input into Agricultural and Horticultural Soils ». *Science of The Total Environment* 760 (mars 2021): 143335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143335>.

Brochure « Mon pote, le compost ! », <https://www.hygea.be/mediatheque/brochure-mon-pote-le-compost>

Castro-Aguirre, E., R. Auras, S. Selke, M. Rubino, et T. Marsh. « Insights on the Aerobic Biodegradation of Polymers by Analysis of Evolved Carbon Dioxide in Simulated Composting Conditions ». *Polymer Degradation and Stability* 137 (mars 2017): 251-71. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.01.017>.

Dolci, Giovanni, Arianna Catenacci, Francesca Malpei, et Mario Grosso. « Effect of Paper vs. Bioplastic Bags on Food Waste Collection and Processing ». *Waste and Biomass Valorization* 12, n° 11 (novembre 2021): 6293-6307. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01448-4>.

Rapport final n°... (numéro RAP du portail) – Acronyme
Institut Scientifique de Service Public – www.issep.be

Edo, Carlos, Francisca Fernández-Piñas, et Roberto Rosal. « Microplastics Identification and Quantification in the Composted Organic Fraction of Municipal Solid Waste ». *Science of The Total Environment* 813 (mars 2022): 151902. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151902>.

Emadian, S. Mehdi, Turgut T. Onay, et Burak Demirel. « Biodegradation of Bioplastics in Natural Environments ». *Waste Management* 59 (janvier 2017): 526-36. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.006>.

Gadaleta, Giovanni, Sabino De Gisi, Caterina Picuno, Joern Heerenklage, Livia Cafiero, Maria Oliviero, Michele Notarnicola, Kerstin Kuchta, et Andrea Sorrentino. « The Influence of Bio-Plastics for Food Packaging on Combined Anaerobic Digestion and Composting Treatment of Organic Municipal Waste ». *Waste Management* 144 (mai 2022): 87-97. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.03.014>.

Greene, Joseph. « Biodegradation of Compostable Plastics in Green Yard-Waste Compost Environment ». *Journal of Polymers and the Environment* 15, n° 4 (1 octobre 2007): 269-73. <https://doi.org/10.1007/s10924-007-0068-1>.

Gui, Jiayi, Yue Sun, Jingli Wang, Xu Chen, Shuchi Zhang, et Donglei Wu. « Microplastics in Composting of Rural Domestic Waste: Abundance, Characteristics, and Release from the Surface of Macroplastics ». *Environmental Pollution* 274 (avril 2021): 116553. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116553>.

Albert, Zegels. « Guide des bonnes pratiques pour la transformation des déchets de cuisine et de jardin », http://environnement.wallonie.be/publi/education/guide_compostage.pdf

Jean-Marie, Savino, et Hélène, Goethals. Guide des bonnes pratiques du compostage collectif, <https://ediwall.wallonie.be/les-guides-de-l-ecocitoyen-composter-ensemble-les-dechets-organiques-menagers-guide-des-bonnes-pratiques-du-compostage-collectif-2021-numerique-083035>

Han, Xiaoxin, Xueqiang Lu, et Rolf D. Vogt. « An Optimized Density-Based Approach for Extracting Microplastics from Soil and Sediment Samples ». *Environmental Pollution* 254 (novembre 2019): 113009. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113009>.

Li, Qinglan, Jiangtong Wu, Xiaopeng Zhao, Xueyuan Gu, et Rong Ji. « Separation and Identification of Microplastics from Soil and Sewage Sludge ». *Environmental Pollution* 254 (novembre 2019): 113076. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113076>.

Maisto, Maria, Maria Antonietta Ranauda, Daniela Zuzolo, Maria Tartaglia, Alessia Postiglione, Antonello Prigioniero, Alessandra Falzarano, Pierpaolo Scarano, Rosaria Sciarillo, et Carmine Guarino. « Influence of Sediment Texture on HDPE Microplastics Recovery by Density Separation ». *Journal of Environmental Management* 317 (septembre 2022): 115363. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115363>.

Mohee, R., et G. Unmar. « Determining Biodegradability of Plastic Materials under Controlled and Natural Composting Environments ». *Waste Management* 27, n° 11 (janvier 2007): 1486-93. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.023>.

Nabi, Iqra, Aziz-Ur-Rahim Bacha, et Liwu Zhang. « A Review on Microplastics Separation Techniques from Environmental Media ». *Journal of Cleaner Production* 337 (février 2022): 130458. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130458>.

Nakasaki, K, A Ohtaki, et H Takano. « Biodegradable Plastic Reduces Ammonia Emission during Composting ». *Polymer Degradation and Stability* 70, n° 2 (janvier 2000): 185-88. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(00\)00104-X](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(00)00104-X).

NBN EN ISO 10390 (2022) – Sols, biodéchets traités et boues – Détermination du pH

NBN EN 13432 (2000) – Emballage – Exigences relatives aux emballages valorisables par compostage et biodégradation

NBN EN 15934 (2012) – Boues, biodéchets, sols et déchets – Calcul de la teneur en matière sèche par détermination du résidu sec et de la teneur en eau.

Orhan, Yüksel, Jasna Hrenović, et Hanife Büyükgüngör. « Biodegradation of Plastic Compost Bags under Controlled Soil Conditions ». *Acta Chimica Slovenica* 51, n° 3 (2004): 579.

Ruggero, Federica. « Degradation of Film and Rigid Bioplastics During the Thermophilic Phase and the Maturation Phase of Simulated Composting ». *Journal of Polymers and the Environment*, 2021, 14.

Schütze, Berit, Daniela Thomas, Martin Kraft, Joachim Brunotte, et Robert Kreuzig. « Comparison of Different Salt Solutions for Density Separation of Conventional and Biodegradable Microplastic from Solid Sample Matrices ». *Environmental Science and Pollution Research* 29, n° 54 (novembre 2022): 81452-67. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21474-6>.

Sintim, Henry Y., Andy I. Bary, Douglas G. Hayes, Marie E. English, Sean M. Schaeffer, Carol A. Miles, Alla Zelenyuk, Kaitlyn Suski, et Markus Flury. « Release of Micro- and Nanoparticles from Biodegradable Plastic during in Situ Composting ». *Science of The Total Environment* 675 (juillet 2019): 686-93. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.179>.

Sintim, Henry Y., Andy I. Bary, Douglas G. Hayes, Larry C. Wadsworth, Marife B. Anunciado, Marie E. English, Sreejata Bandopadhyay, et al. « In Situ Degradation of Biodegradable Plastic Mulch Films in Compost and Agricultural Soils ». *Science of The Total Environment* 727 (juillet 2020): 138668. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138668>.

Suleman, Raheel, Adnan Amjad, Amir Ismail, Sameem Javed, Umber Ghafoor, et Shah Fahad. « Impact of Plastic Bags Usage in Food Commodities: An Irreversible Loss to Environment ». *Environmental Science and Pollution Research* 29, n° 33 (juillet 2022): 49483-89. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21091-3>.

Unmar, G., et R. Mohee. « Assessing the Effect of Biodegradable and Degradable Plastics on the Composting of Green Wastes and Compost Quality ». *Bioresource Technology* 99, n° 15 (octobre 2008): 6738-44. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.016>.

Vaverková, Magdalena, Dana Adamcová, Jana Kotovicová, et František Toman. « Evaluation of biodegradability of plastics bags in composting conditions ». *Ecological Chemistry and Engineering. S = Chemia i Inżynieria Ekologiczna. S* 21 (1 mars 2014): 45-57. <https://doi.org/10.2478/eces-2014-0004>



Rue du Chéra 200
4000 LIÈGE

Zoning Schweitzer
Rue de la Platinerie, 14
7340 COLFONTAINE

Rapport final n°... (numéro du portal) – Acronyme
Institut Scientifique de Service Public – www.issep.be

