

Le compostage des déchets collectés séparément : le procédé Végéterre

Annie Resse et Daniel Rivière

La gestion des déchets ménagers est en pleine mutation et évolue du fait du renforcement des prescriptions réglementaires. La saturation des unités de traitement et l'augmentation des coûts d'élimination conduisent les collectivités à essayer de nouveaux modes de collecte et d'élimination de leurs déchets.

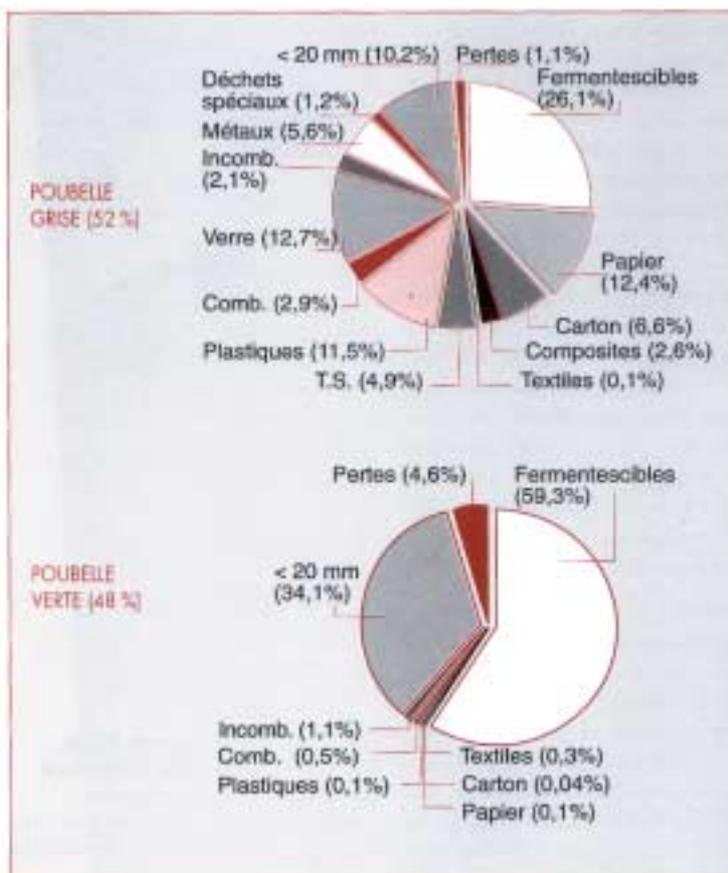
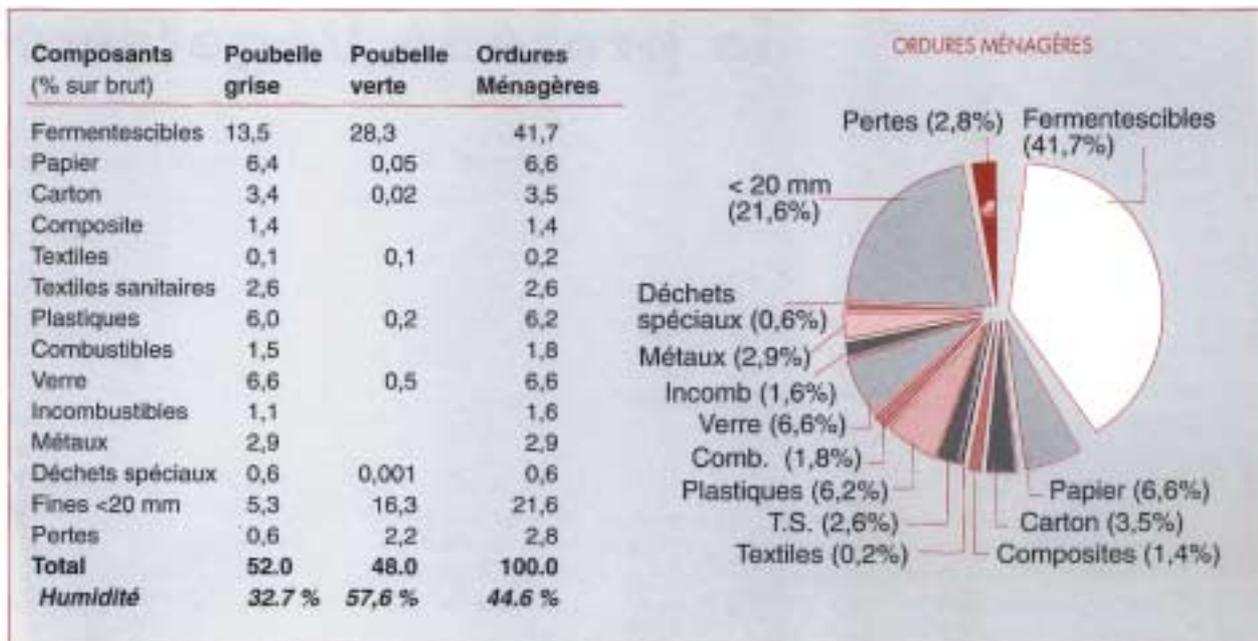
Les résidus organiques fermentescibles dans les ordures ménagères peuvent atteindre 60 % en poids humide avec un taux d'humidité proche de 50 %. Si l'évolution des modes de consommation a probablement réduit la part des épiluchures et autres restes de repas, le flux des fibres cellulosiques a lui au contraire, beaucoup augmenté. Les imprimés de presse et de publicité, les magazines, les emballages papiers et cartons et les couches-culottes représentent aujourd'hui 30 % en poids des ordures ménagères. L'extension périphérique des agglomérations sous forme essentiellement pavillonnaire font que les Français sont de plus en plus nombreux à posséder une habitation assortie d'un espace vert. En conséquence les tontes de pelouse, feuilles mortes ou résidus de taille et d'élagage sont des déchets couramment placés à la collecte. Ces déchets humides, volumineux et saisonniers perturbent le ramassage des ordures ménagères et encombrant les centres de traitement souvent saturés.

Aussi, plusieurs collectivités ont-elles lancé des opérations de collecte à domicile de déchets fermentescibles constitués de déchets de jardin et de cuisine, éventuellement de papiers-cartons et de couches-culottes. On peut citer par exemple les villes de Bapaume (62) qui a été la première en 1991, de Niort (79), de Béziers (34), de Cergy-Pontoise (95) ou de Lons Le Saunier (39).

Mais la mise en place de telles collectes est récente et le gisement qu'elles produisent est nouveau. Si des premières études montrent que la collecte est efficace et les produits collectés de qualité (Resse, 1993) il faut constater que les modes de traitement de ce gisement nouveau ne sont pas encore fixés. Quelques expérimentations ont été réalisées sur le produit de la collecte séparée de Bapaume. La première en 1992 reposait sur un compostage lent avec retournement régulier des tas (andains) durant trois semaines. La deuxième était un essai de lombricompostage (procédé Naturba en 1993). Il n'existe donc pas à l'heure actuelle de procédé éprouvé pour traiter ces déchets en phase industrielle. Parallèlement, un procédé rustique mis au point par l'Ademe, appelé Végéterre, est utilisé pour le compostage des déchets verts collectés en déchetterie. Ce procédé Végéterre consiste en un compostage lent sur aire après broyage des déchets. Selon l'Ademe, pourrait convenir à ce nouveau gisement. L'objectif de cet article est de présenter les résultats d'une étude menée sur le compostage par le procédé Végéterre de l'Ademe. Conduite dans la commune de Niort, elle a consisté à comparer l'efficacité du procédé en partant de différentes compositions de déchets fermentescibles.

En effet, la ville de Niort a accueilli une équipe du Cemagref de Rennes (sur son site) pour la réalisation de l'étude, avec le soutien de l'Ademe. Dans cette collectivité, les usagers disposent de deux récipients pour la collecte des déchets ménagers. Un récipient spécial appelé *composteneur* ou *poubelle verte* sert à collecter les déchets fermentescibles c'est-à-dire les déchets de cuisine et les déchets de jardin. L'autre récipient (poubelle grise) col-

**Annie Resse,
Daniel Rivière**
Cemagref
17, avenue de Cucillé
35044 Rennes Cedex



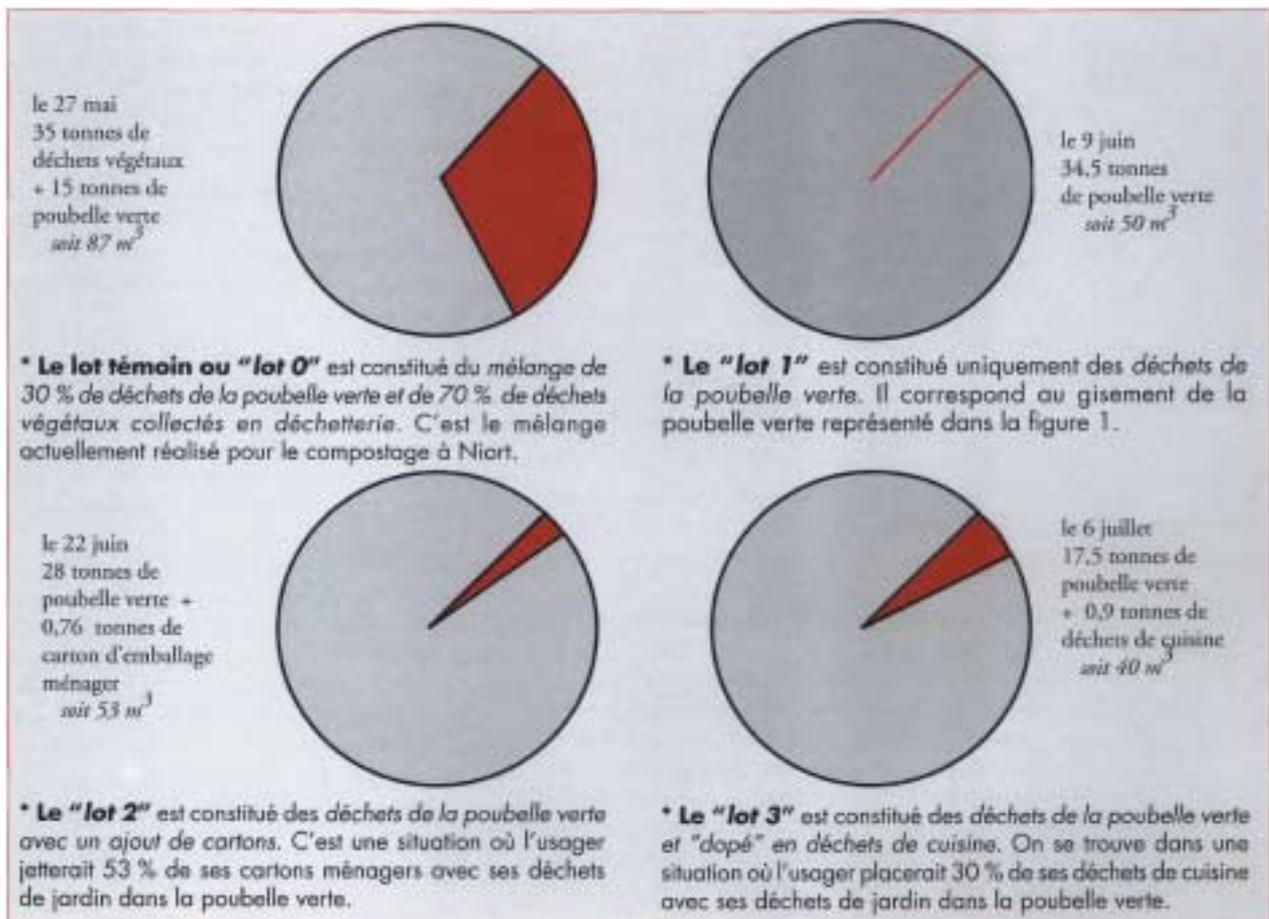
▲ Figure 1. - Composition des déchets issus de la collecte séparative (9 juin 1994). Source : Cemagref Division déchets solides Rennes

lectre tous les autres déchets produits par les ménages. A partir des déchets contenus dans les composteneurs, l'objectif est d'élaborer un produit de qualité par le procédé Végéterre. L'incidence d'une variation de composition des déchets sur le compostage a été étudiée. Plusieurs essais de compostage ont donc été mis en place sur la plateforme de Niort entre mai et juin 1994.

La qualité du tri par les usagers à Niort

Ces expérimentations de compostage réalisées à Niort par le Cemagref commencent tout d'abord par une caractérisation des déchets issus de la collecte séparative. Cette caractérisation permet de contrôler la qualité du tri effectué par les usagers et d'apprécier l'aptitude de la poubelle verte à offrir un exutoire privilégié pour les déchets ménagers fermentescibles (figure 1).

La poubelle verte collecte presque la moitié du tonnage collecté, mais le gisement global des déchets se trouve augmenté de 14 %. La plus grosse partie des déchets contenus dans la poubelle verte provient du jardin. On y trouve qu'une très faible (13 %)



partie des déchets de cuisine. Cette poubelle est perçue plus comme une collecte à domicile des déchets de jardin que comme une collecte séparative des fermentescibles (jardin et cuisine).

Cette caractérisation n'est représentative que pour la période de mai à juin. La constitution de la poubelle verte et les quantités collectées fluctuent en effet avec l'influence saisonnière des déchets de jardin.

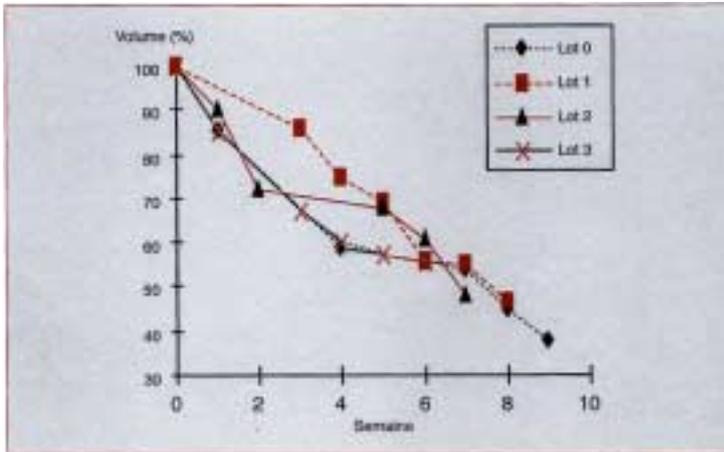
Mise en place des essais de compostage

L'objectif est de tester l'influence de la composition des déchets sur le compostage. Quatre lots différents sont constitués, ce qui correspond ainsi à la simulation de quatre types de gisements de fermentescibles (figure 2) représentatifs des poubelles vertes collectées sur d'autres collectivités.

Conduite du compostage expérimental à partir du procédé Végéterre

- Broyage, réduction granulométrique : tous les déchets mis en compostage sont broyés par le broyeur à marteaux WILLIBALD du site de Niort.
- Retournements, aération : un retournement hebdomadaire est effectué les six premières semaines, puis un retournement à la huitième et à la dixième semaine. Le matériel utilisé est le retourneur d'andains WILLIBALD. Cet appareil comporte un tambour de fraissage de trois mètres de haut équipé d'outils agressifs ;
- Arrosage, maintien de l'activité biologique : un arrosage hebdomadaire, tenant compte de la masse de l'andain, est réalisé les trois premières semaines afin de maintenir l'humidité du lot au dessus de 50 % ;

▲ Figure 2. Présentation des lots



▲ Figure 3. - Evolution du volume des andains en % du volume initial

• Affinage, fabrication d'un produit fin et homogène : en fin de maturation, un crible rotatif, équipé d'une maille carrée de 20 mm, sépare le compost des refus.

■ Evolution des lots au cours du compostage

Pour connaître l'évolution du compostage (fermentation, puis maturation), il est nécessaire de suivre les différents paramètres qui conditionnent la décomposition biologique. Les mesures physiques (volume, masse, humidité, température, granulométrie) et les analyses chimiques (matière organique, C/N) sur des échantillons prélevés régulièrement, généralement au moment des retournements, permettent de mesurer cette évolution.

■ Diminution du volume, granulométrie, masse et humidité des andains

Le volume de chaque andain est estimé avant chaque retournement. Ces mesures de volume indiquent que la place occupée par un andain diminue fortement au cours du compostage. Cette donnée est importante pour établir les dimensions de la plate-forme de compostage (figure 3).

Les analyses granulométriques, par tamisage, permettent de caractériser l'évolution de la taille des particules avant le tri final et de juger du fractionnement des particules consécutif à la fermentation et à l'effet mécanique des retournements. Les courbes granulométriques mettent surtout en évidence la différence de vitesse de dégradation entre le lot 0 composé du mélange poubelle verte et déchets verts provenant des déchetteries et les autres lots. En effet, quatre semaines supplémentaires sont

nécessaires pour que le lot 0 atteigne la granulométrie obtenue par les autres lots au bout de six semaines. La granulométrie des déchets passe de 45 à 55 % d'éléments < à 6,3 mm au départ à 73 à 79 % en fin de compostage (figures 4 et 5).

La perte de masse est déterminée par une pesée en début et en fin de compostage pour chacun des lots expérimentaux. La perte en matière sèche se situe entre 30 et 35 %. Il n'y a pas de différence significative entre les quatre lots.

L'humidité est un paramètre difficile à maîtriser. Sa valeur optimale se situe autour de 60 % pendant les premières semaines de fermentation pour maintenir l'activité biologique, mais elle doit être entre 30 et 35 % en fin de maturation pour effectuer un affinage dans de bonnes conditions. Au départ, les humidités de chaque andain sont inférieures à ce pourcentage d'où la nécessité d'un arrosage les trois premières semaines. La structure plus ligneuse et grossière de l'andain 0 semble mieux retenir l'eau que les autres andains. En fin de maturation les humidités étaient comprises entre 29 et 37 % suivant les lots. Au moment de l'affinage, l'humidité des lots 2 et 3 est de 43 % à cause de la pluie reçue par ces deux andains.

Une bonne gestion des quantités d'eau est donc conditionnée par un suivi régulier de l'humidité et par la protection des andains pour s'affranchir des aléas climatiques.

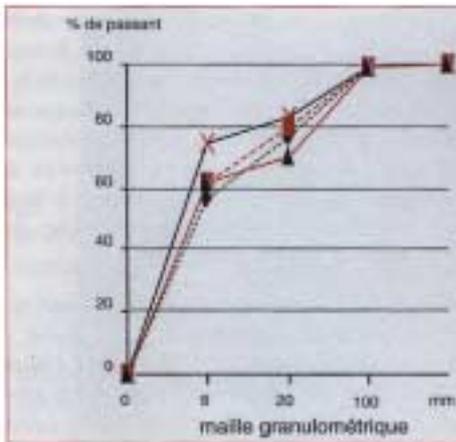
■ Evolution de la température des andains comparés

La température dans les andains témoigne de l'activité biologique au cours de la fermentation. Elle est mesurée avec des sondes thermocouples placées à différentes hauteurs à l'intérieur du tas.

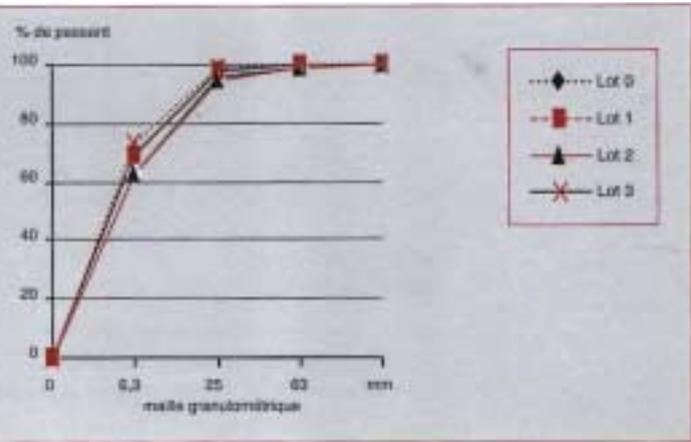
Le retournement des lots provoque une aération du tas qui relance ensuite l'activité microbienne avec une remontée importante des températures. Pour tous les lots étudiés, les courbes de températures (figure 6) montrent clairement que les retournements hebdomadaires sont nécessaires durant les cinq premières semaines.

• Température de l'andain 0 : déchets verts + déchets de la poubelle verte

A 50 cm du sol les températures sont inférieures à celles des autres thermocouples. Par contre, on constate une augmentation progressive de la tem-



▲ Figure 4. - Granulométrie avant maturation



▲ Figure 5. - Granulométrie après maturation

pérature à 50 cm du sol entre la troisième et la septième semaine. L'assèchement de l'andain libère des espaces facilitant une circulation de l'air au fond du tas et permet ainsi une activité biologique plus intense. Après huit semaines de compostage, les retournements provoquent toujours une remontée importante de la température. La dilacération opérée par le retourneur d'andain défibre la matière ligneuse et libère la matière organique plus facilement dégradable, entretenant ainsi des températures élevées.

• **Température de l'andain 1 : déchets de la poubelle verte**

Le premier retournement a pour effet de diminuer les températures puis celles-ci remontent ensuite fortement avec des pics approchant les 80°C à 1 m et 1,5 m du sol. On constate l'effet lié à l'arrosage pendant les trois premières semaines car il est responsable d'un étouffement dans la base de l'andain. Lorsque l'humidité baisse à partir de la troisième semaine, la température remonte à plus de 60°C dans les zones profondes. A partir de la dixième semaine ; la température évolue sensiblement à la baisse, traduisant la stabilisation de la dégradation de la matière organique.

• **Température de l'andain 2 : déchets de la poubelle verte + cartons**

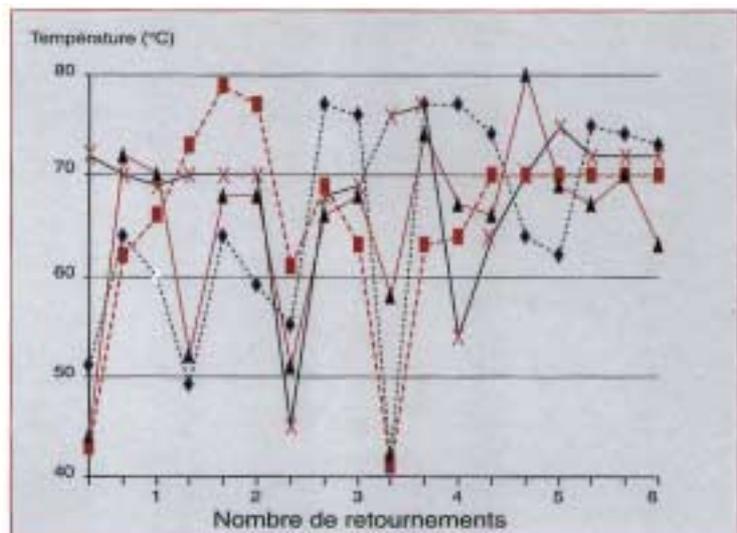
Les températures à l'intérieur de l'andain dans les zones profondes pendant les trois premières semaines restent constantes à cause des arrosages. Il n'y a pas de baisse de ces températures contrairement à ce qui se passait pour l'andain 1. On peut

considérer que l'étouffement est limité dans ce cas par la présence des cartons. Ceux-ci jouent en effet un rôle de structurant à l'intérieur de l'andain et absorbent aisément l'humidité, ce qui facilite la circulation de l'air dans les espaces lacunaires. Après la cinquième semaine, on observe une diminution très progressive des températures.

• **Température de l'andain 3 : déchets de la poubelle verte + déchets de cuisine**

L'activité biologique est importante du fait de la présence des déchets de cuisine facilement dégradables. La montée en température est rapide dès les premiers jours même dans les zones profondes contrairement aux autres lots. Elle peut s'ex-

Figure 6. Température dans les andains à 1 m du sol ▼



plier également par la faible densité de l'andain 3 au départ (0,44), donc une meilleure aération du tas. La disparité des densités provient d'un changement de composition de la poubelle verte, avec plus de tailles d'arbustes, entre les moments où l'on a constitué le lot 1 (9 juin) et le lot 3 (6 juillet). Comme pour les lots précédents, l'arrosage les trois premières semaines perturbe les températures. Puis les valeurs des températures restent stables avant de chuter après la huitième semaine.

En conclusion, les retournements hebdomadaires pendant les six premières semaines se justifient pour apporter l'oxygène nécessaire à l'activité biologique. Ceux-ci favorisent également une bonne homogénéisation du lot qui permet le maintien d'une température de plus de 60°C pendant quatre jours assurant ainsi une « hygiénisation » par la destruction des germes pathogènes et des graines de mauvaises herbes.

■ La matière organique totale (MOT)

Les dégradations qui ont lieu au cours du compostage entraînent une baisse du taux de matières organiques.

La présence de produit ligneux dans l'andain 0 explique le pourcentage plus fort en matières organiques totales (63,3 %) dans ce lot au départ. La présence des cartons dans le lot 2 (54,2 % de MOT) et des déchets de cuisine dans le lot 3 (58,2 % de MOT) sont à l'origine des taux plus élevés par rapport au lot 1 (50 % de MOT). La dégradation de la matière organique est très lente pour le lot 1 lors des trois premières semaines, puis s'accélère brutalement pour

venir se stabiliser vers environ 38 % à partir de la sixième semaine. Par contre, le pourcentage de matière organique du lot 2 diminue dès le début et devient inférieur à celui du lot 1 après une semaine de fermentation. La dégradation se ralentit sensiblement après la deuxième semaine et la matière organique se stabilise vers 37 %. Les cartons présents dans le lot 2 influent et facilitent la dégradation biologique, du moins en début de fermentation.

L'évolution du lot 0 montre une dégradation régulière de la matière organique, qui se stabilise à partir de la huitième semaine vers 45 %. Ce taux reste donc élevé par rapport à ceux observés avec les lots 1, 2 et 3 (entre 28 et 37 % à la quatorzième semaine) et montre la présence d'éléments difficiles à dégrader (figure 7).

■ Le rapport carbone sur azote (C/N)

Le rapport entre ces deux nutriments est un moyen d'estimer la maturité du compost et son aptitude à être incorporé dans le sol sans nuire à la croissance des végétaux. Si ce rapport est trop fort, les micro-organismes consomment l'azote nécessaire aux plantes (figure 8).

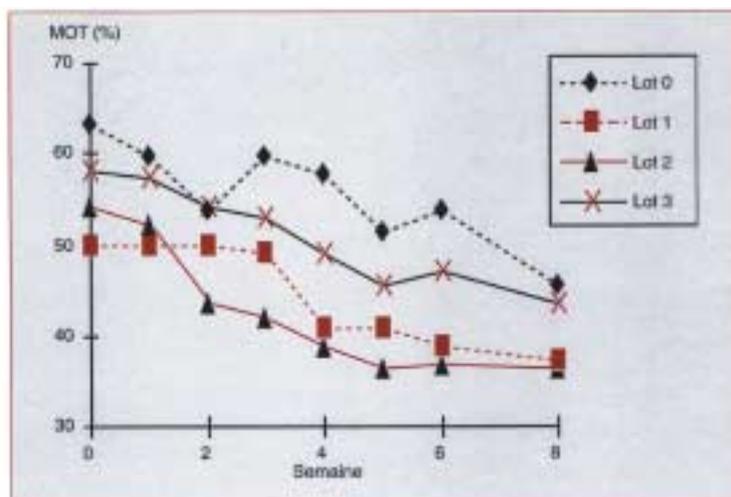
Le C/N initial du lot 0 est le plus élevé. La diminution du C/N est rapide au départ de la fermentation pour le lot 0 puis se ralentit pour atteindre une valeur de 15,3 à la sixième semaine.

Dans le lot 1, au contraire, on observe une stagnation de ce rapport lors des trois premières semaines. Cette évolution est comparable à ce que nous avons observé pour la matière organique. La dégradation du carbone semble limitée dans le lot 1 pendant les phases d'arrosage. Après la troisième semaine (fin des arrosages), on observe une diminution lente puis brutale du C/N pour atteindre une valeur de 12,7 à la sixième semaine.

Le C/N du lot 2, plus élevé au départ que celui des lots 1 et 3, baisse considérablement dès la deuxième semaine, passant d'une valeur de 20 à 16,8 à la quatrième semaine. Ce lot semble donc moins sensible aux effets de l'arrosage, probablement grâce aux cartons qui ont la capacité d'absorber l'eau et limiter ainsi dans l'andain les zones d'anoxie.

Le C/N des lots 1, 2 et 3 se stabilise à partir de la dixième semaine (entre 10 et 12) alors que le lot 0 montre un C/N encore élevé à ce moment, cependant il atteindra une valeur de 12 après 16 semaines de compostage. Cette maturité est con-

Figure 7. - Evolution de la matière organique (MOT) ▼



firmée pour tous les lots par le test de germination. Ce test repose sur la propriété qu'ont les composts immatures d'inhiber la germination et la croissance des végétaux par la présence de diverses substances phytotoxiques.

La qualité du produit composté et du compost : des résultats comparables !

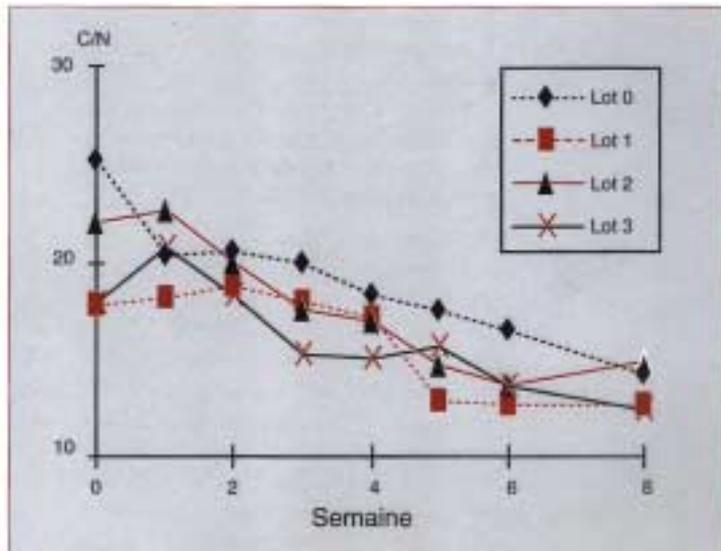
Les lots 1, 2 et 3 sont passés au crible à 14 semaines et le lot 0 à 16 semaines. Le rendement en compost par rapport au lot mûré dépend principalement du taux d'humidité et de la vitesse d'alimentation de la chaîne d'affinage. Ce rendement varie de 53 à 65 % en matière sèche.

Les textes réglementaires pour la mise sur le marché et le contrôle des composts sont ceux qui régissent l'ensemble des matières fertilisantes et des supports de culture ; notamment la norme NF 44 051 complétée par la marque NF-Compost Urbain.

La qualité des composts obtenus est indiscutable et conforme à la réglementation :

- échauffement naturel de la masse à une température de 60°C ou plus pendant une durée au moins égale à quatre jours pour l'ensemble des lots expérimentés ;
- les composts sont considérés comme mûrs puisque le rapport MO/N reste inférieur à 50 pour tous les lots. Le rapport C/N est dans tous les cas inférieur à 12 ;
- le taux de matière organique totale varie entre 28 % pour le lot 2 à 40 % pour le lot 0. Tous les lots dépassent donc le pourcentage minimal de 20 % de matière organique totale ;
- le taux d'azote, pour tous les lots, reste inférieur au taux maximal de 2 % ;
- pour chaque lot, le compost obtenu est un compost urbain fin car 99 % du produit passe à la maille carrée de 12,5 mm ;
- la concentration en métaux lourds est faible et inférieure aux seuils indiqués dans la marque NF-compost urbain.

D'autres paramètres permettent aussi d'évaluer la qualité du compost. Il s'agit de la concentration en éléments fertilisants, de l'absence de résidus de pesticides ou de germes pathogènes, ainsi que des inhibiteurs pour la croissance des végétaux. On ne constate pas de différence significative entre les différents mélanges réalisés.



Le carton améliore le compostage des « poubelles vertes »

▲ Figure 8. - Evolution du rapport carbone sur azote (C/N)

Le compostage lent sur aire par le procédé Végéterre appliqué par la collectivité de Niort est bien adapté au traitement des différents lots expérimentaux suivis par le Cemagref. Quelques principaux résultats ont été obtenus.

- *Le compostage des déchets issus de la poubelle verte* permet d'obtenir en dix semaines un produit mûr avec un C/N < 12. Les tests de germination confirment cette stabilité dès la huitième semaine.
- *Le gisement complété avec des cartons* se dégrade dans de meilleures conditions que celui constitué uniquement avec les déchets de la poubelle verte. La présence de cartons améliore en effet la structure du tas en créant des zones de circulation pour l'air et en absorbant l'humidité. Ceci limite la présence de zones anaérobies pendant les périodes d'arrosage. Après six semaines de compostage, on ne distingue plus visuellement les cartons. La présence des cartons ne modifie pas les teneurs en métaux lourds qui restent très faibles et bien en dessous des normes de qualité du compost (Norme NF-Compost Urbain).
- *L'ajout de déchets de cuisine dans le gisement de la poubelle verte* ne semble pas modifier significativement l'évolution du compostage. Il n'y a pas eu de dégagement d'odeurs nauséabondes lié à la présence de ces déchets denses et humides. Il faut noter d'une part que leur quantité est faible (8 % sur

sec) et qu'ils se trouvent ainsi « noyés » dans la masse. D'autre part, les résultats de cet essai peuvent être également biaisés par la composition différente des déchets de la poubelle verte. Celle-ci a une densité plus faible du fait d'une granulométrie plus grossière. L'incidence des déchets de cuisine sur le compostage est donc difficile à établir.

• Si on *mélange le gisement de la poubelle verte avec des déchets verts* provenant des centres de déchetterie, la fermentation est plus longue. En effet, ces derniers sont plus riches en éléments grossiers et ligneux dont la dégradation est très lente. Le produit composté après dix semaines présente un C/N de 14. Le test de germination après huit semaines indique une maturité quatre fois inférieure à celle du produit issu du gisement de la poubelle verte seule. Les résidus ligneux ont par contre l'avantage de jouer un rôle structurant qui facilite le passage de l'air à l'intérieur de l'andain.

Le compost extrait par simple criblage à la maille carrée de 20 mm est d'une qualité supérieure à celui obtenu à partir des ordures ménagères globales. Son coefficient de maturation C/N se situe autour de 10 après 16 semaines de fermentation pour le lot 0 et 14 semaines pour les trois autres lots.

Les rendements de criblage, donc les quantités de refus, sont directement fonction du taux d'humidité et de la vitesse de criblage. Néanmoins le refus obtenu après le criblage du lot constitué avec la poubelle verte et les déchets verts de déchetterie contient beaucoup plus de bois que les autres lots. Par contre, il a moins de produits plastique et réemployer ce refus sera plus facile.

Un procédé intéressant pour tous les mélanges testés

Cette expérimentation montre que la durée de compostage de la poubelle verte seule est plus rapide que celui du mélange des déchets de la poubelle verte avec des déchets verts issus des déchetteries. C'est un facteur important pour la gestion d'une plate-forme où la libération de l'espace au sol est précieuse. Toutefois, les quantités de déchets collectés actuellement par la collecte séparative de la poubelle verte sont encore insuffisantes pour exiger un traitement séparé compte tenu de toutes les contraintes de gestion d'une plate-forme de compostage.

L'application du procédé Végéterre sur différents mélanges dans les proportions de ces expérimentations a permis d'obtenir un produit de qualité pour les quatre lots étudiés sans problèmes particuliers. La méthodologie expérimentale utilisée, c'est-à-dire un retournement par semaine pendant six semaines avec un arrosage pendant les trois premières semaines, est efficace, mais sans doute difficile à appliquer sur une plate-forme de compostage industrielle. En effet, les délais entre deux manipulations semblent trop courts. Par contre, il est impératif de prévoir un minimum de retournements avec un maintien de l'humidité à 50 % pendant la moitié du temps de fermentation puis de couvrir les andains afin de les protéger des pluies et ainsi d'optimiser l'affinage. La maturation sera effective et la commercialisation possible lorsque le compost aura une température basse.

Les essais n'ont été effectués qu'au printemps, c'est-à-dire pour la saison où les déchets de jardin sont les plus abondants et dominés par la présence de tontes de pelouse et de tailles. Cette étude doit donc être complétée par des essais réalisés à d'autres périodes de l'année, ce qui permettra de prévoir les conditions de compostage à adapter en fonction de la variabilité saisonnière de la poubelle verte.

Remerciements

Cette étude a pu se réaliser grâce à la collaboration de plusieurs partenaires. Je remercie tout particulièrement l'Ademe d'Angers pour son cofinancement, obtenu dans le cadre de son programme de recherche et de développement « déchets municipaux » géré par Nicolas Noyon, ainsi que l'Ademe de Poitou Charente. Je remercie également les responsables de la Ville de Niort, plus particulièrement Monsieur Hernandez pour son soutien et le personnel de la station de compostage pour son aide lors des expérimentations. □

Résumé

Pour suivre la réglementation, les collectivités organisent des collectes à domicile des déchets fermentescibles (déchets de jardin, de cuisine, papier, carton et couches-culottes) sans définir les modalités du traitement. A Niort, entre mai et juin 1994, le procédé de compostage « Végéterre » est testé sur quatre lots différents : 1 - déchets fermentescibles issus de la collecte séparative de Niort. 2-3-4 compositions des déchets fermentescibles à traiter. L'évolution du compostage est suivie par des analyses chimiques et physiques. Les résultats d'analyses sont comparés en tenant compte des textes réglementaires concernant les matières fertilisantes et les supports de culture.

Abstract

Stricter regulations have forced local authorities to organise home collections for biowastes comprising garden refuse, kitchen and sometimes paper, cardboard and nappies. The processing methods are not defined. In Niort, between May and June 1994, the «végéterre» compost method was tested on four different batches. One of the tests applied to biowastes from the selective collection in Niort. The other tests varied the composition of biowastes to be treated. Regular physical and chemical analyses monitored the stages of decomposition of the batches studied. The comparison of the batches was based on the analysis results obtained and on the regulations concerning fertilisers and culture media.

Bibliographie

ADEME, 1993, MODECOM, 55 p.

CHEVALLIER, D., 1990. Le broyage compostage des déchets végétaux des collectivités, L'eau, l'industrie, les nuisances, n°137, p. 52-54.

HURET, F., 1985. Contribution à l'étude de substances humiques provenant de matériaux fermentescibles, Compost Information, *ANRED*, n°19, p. 9-17.

MAYER, A., 1993. Le compostage moderne, Fascicule édité par Willibald S.A. Z.I. B.P.6 67520 Marlenheim.

MUSTIN, M., 1987. Le compost : gestion de la matière organique, Edition Dubusc, 954 p.

RESSE, A., 1993. Poubelle verte, Poubelle grise Qui sont-elles ? *Informations Techniques* du Cemagref, n°92 note 3.

RESSE, A., 1993. Etude de la collecte séparative des déchets fermentescibles, Cemagref, Groupement de Rennes, division Déchets Solides, 83 p.

ROBER, T.-J., 1994. Bapaume mise sur le compost « zéro défaut », *Décision environnement*, n° 28, p 50-51.

SCHNEIDER, P., 1994. Le compostage des déchets végétaux : caractérisation des apports et expérimentation, *Mémoire de fin d'études ENGEES*, 129 p.