

Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains : influence de la nature des déchets et du procédé de compostage

Cet article¹, proposé par Cédric Francou, Sabine Houot, Maelenn Poitrenaud, et Blaise Leclerc, reprend une partie des conclusions de la thèse de Cédric Francou, soutenue le 18 décembre 2003 à l'Institut National Agronomique Paris-Grignon (Bourse ADEME/INRA ; partenaire technique et financier : CRéED).
Contact : Cédric Francou, cedric.francou@free.fr

Introduction

Au cours du compostage la matière organique des composts évolue d'une matière riche en composés facilement biodégradables vers une matière offrant une plus grande résistance face à la dégradation microbienne. C'est la stabilisation du compost. La vitesse et l'amplitude de la stabilisation dépendent de la nature des déchets compostés (tableau 1) et du procédé de compostage. La stabilité des composts constitue un point clef du compostage. Elle est conditionnée par l'origine du compost (nature du déchet, procédé de compostage, durée de compostage) et détermine la valeur agronomique du compost (biodisponibilité potentielle de l'azote, aptitude à enrichir le stock de matière organique du sol,...).

Tableau 1 : Principaux constituants susceptibles d'être présents dans les déchets d'origine urbaine en fonction de la nature des déchets, et devenir au cours du compostage.

	Sucres simples	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Protéines	Lipides
Déchets verts	Présents	Très présente	Très présente	Très présente	Présentes	Très présents
Biodéchets	Très présents	Très présente	Très présente	Présente	Très présentes	Très présents
Papiers-cartons		Très présente	Présente	Peu présente	Absentes	Absents
Boues résiduaires	Très présents	Très présente	Présente	Peu présente	Présentes	Très présents
Résistance face à la biodégradabilité	Très faible	Faible	Faible	Forte	Faible	Variable
Devenir au cours du compostage	Dégradés et synthétisés (*)	Fortement dégradée	Fortement dégradée	Lentement dégradée	Dégradées et synthétisées	Dégradées et synthétisées

(*) les sucres d'origine microbienne sont plus résistants à la biodégradation

Matériel et méthode

Nous avons voulu réaliser une typologie de composts urbains mettant en évidence l'influence des déchets compostés, des procédés de compostage, et de la durée de compostage sur les caractéristiques de la matière organique des composts.

Pour distinguer l'effet *nature du déchet* composté de l'effet *procédé de compostage*, l'étude s'est déroulée en deux phases. La première portait sur des composts industriels issus de différents sites et analysés durant la phase supposée de maturation (entre 3 et 6 mois)(tableaux 2 et 3). La seconde portait sur l'étude de composts élaborés dans des réacteurs de laboratoire, à partir d'un procédé de compostage unique et des mélanges initiaux composés de différentes proportions de déchets verts, papiers-cartons et biodéchets, et analysés tout au long du compostage pendant 3 mois (tableau 4).

Le degré de stabilité a été estimé par le suivi de la minéralisation du carbone des composts incorporés dans du sol en conditions contrôlées. Cinq classes de stabilité ont été distinguées, dont les seuils sont donnés par la proportion de carbone organique total (% COT) du compost minéralisée après 28 jours d'incubation, appelée coefficient de biodégradabilité à 28 jours et noté CB_{28} : composts très instables ($CB_{28} > 23$), composts instables ($15 < CB_{28} < 23$), composts moyennement stables ($10 < CB_{28} < 15$), composts stables ($6 < CB_{28} < 10$) et composts très stables ($CB_{28} < 6$). Des fractionnements chimiques (extraction des acides humiques et fulviques) et biochimiques (fractionnement Van Soest séparant les substances solubles, la cellulose, l'hémicellulose et la lignine), ainsi que des analyses en infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) ont permis d'approcher de manière plus précise les caractéristiques des matières organiques des composts étudiés.

¹ Cet article porte sur la stabilisation de la matière organique au cours du compostage des déchets urbains étudiés dans le cadre de la thèse de Cédric Francou. Il ne s'agit ni du résumé (nous l'avons publié dans Echo-MO n° 44), ni d'une synthèse de cette thèse. D'autres aspects ont été développés dans celle-ci, que nous ne reprenons pas ici, concernant la biodisponibilité potentielle de l'azote d'une part, la pertinence et la fiabilité d'indicateurs de maturité d'autre part. Ces deux derniers points font l'objet d'un article paru dans le n° 35 d'Echo-MO.

Tableau 2 : Caractérisation initiale en entrée d'usine des déchets compostés sur les plates-formes industrielles

Notations	Type de compost	Déchets verts	Déchets cuisine	Papiers-cartons	Caractérisation initiale (en % de la masse brute)				Boues
					inertes				
					Verre	Plastiques	Métaux	autres	
DV1	Déchets Verts de jardins	100							
DV2	publics	100							
DV2re	et privés	100							
BIO1	Biodéchets	37	54	9	0	0	0	0	
BIO2	(putrescibles) collectés	59	19	14	2	5	0	1	
BIO3	sélectivement	58	14	21	2	0	0	5	
BIO3st	plus déchets verts	58	14	21	2	0	0	5	
OM1	Ordures Ménagères	30	12	18	6	21	3	10	
OM2	sans les recyclables	30	12	18	6	21	3	10	
OM3	(papier, plastiques,...)	17	25	25	14	6	1	12	
OM3st	collectés sélectivement	17	25	25	14	6	1	12	
DVB1	Boues de STEP	70							30
DVB2	plus Déchets Verts	71							29

Tableau 3 : Principales caractéristiques des procédés de fabrication des composts industriels étudiés

Notations	Durée de l'aération forcée (semaines)	Nombre de retournements			Criblage		Stockage	Début de compostage
		de 0 à 3 mois	de 3 à 4 mois	de 4 à 6 mois	Date	Maille (mm)		
DV1	5	8	2	4	1 mois	20	abri	mars
DV2	non	2	1	0	3 mois	20	abri	juin
DV2re	non	6	1	0	3 mois	20	abri	juin
BIO1	12	0	2	3	Pas de criblage		extérieur	janvier
BIO2	3	0	0	0	5 mois	25	extérieur	avril
BIO3	4	7	1	2	1 mois	15	abri	avril
BIO3st	4	5	0	0	1 mois	15	abri	avril
OM1	non	12	1	2	6 jours	20	extérieur	avril
OM2	6	5	1	2	2 mois	20	extérieur	avril
OM3	3	7	1	1	10 jours	10	abri	mai
OM3st	3	4	0	0	10 jours	10	abri	mai
DVB1	non	4	0	0	2 mois	20	extérieur	juillet
DVB2	9	0	0	0	Pas de criblage		extérieur	octobre

Tableau 4 : Contenus initiaux des réacteurs

Réacteur	Masse totale dans réacteur (kg de MB)	Déchets Verts	Biodéchets ⁽¹⁾ (% de la MB)	Papiers cartons ⁽²⁾ (% de la MB)	Eau ajoutée	Humidité (% de la MB)
R1	79	69	31	0	0	66
R2	61	55	31	8	6	67
R3	50	44	31	15	10	65
R4	39	33	31	22	14	61
R5	43	18	54	21	7	70
R6	57	55	31	8	6	67
R7	57	36	54	10	0	68
R8	52	27	54	15	3	68

(1) salades (20% en MB), carottes (20% en MB), courgettes (20% en MB), oranges (20% en MB), pommes (20% en MB)

(2) cartons (67%) et journaux (33%)

Principaux résultats

Une représentation synthétique des résultats obtenus et les conclusions concernant l'effet de la nature des déchets compostés et du procédé de compostage sur la stabilisation de la matière organique au cours du compostage, sont données dans le tableau 5.

L'évolution générale de la matière organique au cours du compostage est identique, quels que soient la nature du déchet composté et le procédé de compostage (en conditions satisfaisantes d'oxygénation). Tous les composts étudiés ont montré une évolution dans le même sens, avec des caractéristiques de plus en plus proches au fil du compostage, devenant indépendantes des caractéristiques des déchets compostés. Par contre, la vitesse et l'amplitude de la stabilisation de la matière organique dépendent de la nature des déchets et du procédé de compostage.

Tableau 5 : Influence des déchets compostés et du procédé de compostage sur la stabilisation de la matière organique des composts étudiés.

	Appellation du type de compost			
	Déchets verts	Biodéchets	Ordures Ménagères	Déchets Verts + Boues
Influence des déchets	<ul style="list-style-type: none"> Présence importante de lignine des déchets verts conduisant à une certaine stabilité dès le début du compostage 	<ul style="list-style-type: none"> Présence modérée de papiers-cartons conduisant à une stabilisation rapide Pas d'effet visible des déchets fermentescibles (déchets de cuisine) 	<ul style="list-style-type: none"> Présence très importante de papiers-cartons (égale ou supérieure à la proportion de déchets verts) ralentissant la stabilisation de la matière organique Pas d'effet visible des déchets fermentescibles (déchets cuisine) 	<ul style="list-style-type: none"> augmente humidité du produit pouvant ralentir la stabilisation Présence importante des déchets vert conduisant à une stabilisation très rapide de la matière organique.
Influence du procédé	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'influence notable observée 	<ul style="list-style-type: none"> Retournements fréquents plus efficaces qu'une simple aération forcée 	<ul style="list-style-type: none"> Retournements fréquents plus efficaces qu'une simple aération forcée Criblage précoce et fin ralentit la stabilisation Retournements (et arrosage) nécessaires durant la phase de maturation 	<ul style="list-style-type: none"> Nécessité d'une aération importante
Composts correspondants étudiés				
<i>laboratoire</i>	R1	R2, R3, R6, R7,R8	R4,R5,R8	
<i>industriels</i>	DV1, DV2	BIO1, BIO2,BIO3	OM1, OM2,OM3	DVB1, DVB2

La **stabilisation de la matière organique au cours du compostage** résulte de la diminution de la part de composés facilement biodégradables, de l'augmentation de la part de biomolécules résistantes, de la synthèse microbienne de composés simples résistants, et de l'humification de la matière organique (tableau 6).

Tableau 6 : Corrélation entre la proportion de COT (carbone organique total) minéralisé à 28 jours (CB₂₈) et les résultats donnés par les fractionnements biochimique, chimique, et l'analyse en infrarouge. Corrélation faite sur 39 individus pour l'IRTF et sur 73 individus pour les autres résultats (*, **, et *** indiquent une significativité à 1, 0.5 et 0.1 %).

		CB ₂₈
Fractionnement biochimique	SOLU (soluble)	-0,329**
	HEMI (hémicellulose)	0,138
	CELL (cellulose)	0,591***
	LIGN (lignine)	-0,612***
	LIGN/(CELL+HEM)	-0,603***
Fractionnement chimique	C _{AF} (acides fulviques)	0,533***
	C _{AH} (acides humiques)	-0,494***
	C _{AH} /C _{AF}	-0,688***
IRTF (1)	1650 cm ⁻¹ / 2930 cm ⁻¹	-0.635***

(1) infrarouge à transformée de Fourier

Les fractionnements et l'analyse infrarouge ont montré que le compostage s'accompagne d'une forte dégradation de la cellulose. La lignine commence à être dégradée dès le début du compostage, montrant l'efficacité de microorganismes mésophiles et thermophiles. Mais son caractère plus réfractaire à la biodégradation provoque sa concentration dans la

matière organique des composts, conduisant à une augmentation du rapport LIGN/(CELL+HEM). Après une dégradation importante en début de compostage, les composés solubles sont présents en quantité constante mettant en évidence de probables transferts de compartiments et la synthèse microbienne de composés solubles plus réfractaires à la biodégradation. L'absence de purification des fractions humiques et fulviques extraites ne nous permet pas de quantifier la part réelle de substances humiques. L'augmentation du rapport d'humification RH (C_{AH}/C_{AF}) correspond vraisemblablement à la fois à une réelle humification de la matière organique et à une dégradation plus importante au cours du compostage des biomolécules les plus facilement extractibles. Rappelons également que la théorie actuelle concernant l'humification consiste à dire que les molécules humiques n'ont pas de réalité physique, mais qu'il s'agit d'agglomérats de biomolécules, ayant des propriétés chimiques identiques. L'utilisation du rapport d'intensité des bandes à 1650 cm⁻¹ (aromatiques) et 2930 cm⁻¹ (aliphatiques) en analyse IRTF a mis en évidence une augmentation du degré d'aromaticité au cours du compostage. Des analyses plus fines sur les substances extraites lors des fractionnements fourniraient certainement des informations complémentaires intéressantes sur la nature des composés extraits.

Nos résultats ont montré que la vitesse de stabilisation de la matière organique des composts est **très dépendante de la nature des déchets compostés**, et plus particulièrement des proportions de papiers-cartons et déchets verts. La

prédominance de déchets verts dans les mélanges initiaux permet aux composts d'être stables voire très stables rapidement. Ceci s'explique par la présence importante de lignine dans ce type de matériau (30 % de la MOT des déchets verts), qui se concentre dans la matière organique au cours du compostage. C'est le cas des composts issus directement de la collecte de déchets verts, des composts industriels appelés composts de biodéchets, qui contiennent plus de 50 % (en masse sèche) de déchets verts, et des co-composts de boues avec déchets verts.

A l'opposé, nous avons observé qu'une proportion de papiers-cartons similaire ou supérieure à la proportion de déchets verts dans les mélanges initiaux, ralentissait la vitesse de stabilisation de la matière organique des composts. La dégradation du stock de cellulose initialement contenue dans les papiers-cartons (70 % de la MOT) nécessite un temps de compostage assez long. De plus la forte proportion de carbone dans les papiers-cartons provoque une carence en azote, limitant ainsi l'activité dégradante de la microflore. C'est le cas des composts de laboratoire R4 et R5 pour lesquels la matière organique continue à se stabiliser entre 8 et 12 semaines de compostage. C'est le cas de tous les composts industriels d'ordures ménagères, riches en papiers-cartons, qui sont très instables à 3 mois, et dont la matière organique continue à se stabiliser jusqu'à 6 mois au moins.

Le rôle des biodéchets (déchets de cuisine) sur les caractéristiques de la matière organique des composts n'apparaît qu'en début de compostage dans le cas de composts de laboratoire. Les biodéchets considérés (fruits et légumes) sont très riches en sucres simples et autres composés très solubles (estimés à 84 % de la MOT des biodéchets) qui sont très rapidement consommés durant la phase d'intense activité microbienne (deux premières semaines de compostage). Il est possible que l'azote apporté par ces biodéchets permette la dégradation de la cellulose des papiers-cartons. Ceci pourrait expliquer qu'après 3 mois de compostage, les composts industriels BIO1, BIO2 et BIO3 se comportent comme les composts de déchets verts. Un échantillonnage plus tôt au cours du compostage nous aurait permis d'avoir plus d'informations à ce sujet. Néanmoins l'influence des biodéchets très riches en eau apparaît assez faible, du fait de la gamme étroite de variation de la proportion de biodéchets exprimée en matière sèche. L'étude de composts élaborés à partir de mélanges plus riches en biodéchets pourrait permettre de mieux apprécier l'effet des biodéchets mais nécessiterait un léger séchage préalable.

L'influence du procédé de compostage sur la vitesse de stabilisation de la matière organique a été mise en évidence avec les composts d'ordures ménagères. Le compost OM1 s'est stabilisé plus rapidement que le compost OM2, produit à partir du même gisement de déchets mais qui a subi un nombre inférieur de retournements, remplacés par une aération forcée. A 6 mois de compostage, ces deux composts étaient

stabilisés et présentaient des caractéristiques de leur matière organique similaires. Les résultats obtenus sur le compost OM3 ont montré qu'un criblage fin et précoce, et qu'un manque d'humidité, ralentissaient fortement l'évolution de la matière organique durant la phase dite de maturation. Le compost OM3st à 6 mois était encore fortement instable. Cette instabilité a été attribuée à un manque de retournements après la phase de dégradation intensive, conduisant au développement de conditions anaérobies au sein du compost. Ces conditions ont entraîné une dégradation de la cellulose avec stockage de composés organiques simples. L'incorporation dans le sol de ce compost riche en composés simples a provoqué une forte minéralisation de ce compost, traduisant sa forte biodégradabilité résiduelle. Des retournements fréquents sont donc nécessaires afin d'obtenir une stabilisation rapide de la matière organique des composts, en particulier des composts d'ordures ménagères.

La **valeur amendante**, définie comme l'aptitude des composts à entretenir le stock de matière organique du sol, a été évaluée en utilisant l'Indice de Stabilité Biologique (ISB) reposant sur le fractionnement biochimique de la matière organique. La simple connaissance de la teneur en matière organique des composts est insuffisante, et il est important de connaître son niveau de stabilité. Les valeurs d'ISB trouvées sur les composts industriels sont en accord avec les degrés de stabilité estimés lors des incubations. La gamme de valeur amendante trouvée ($ISB \cdot MOT$) est apparue plus étroite que la gamme d'ISB, car la stabilisation de la matière organique au cours du compostage (augmentation de l'ISB) s'accompagne de sa minéralisation (diminution de la MOT). Seuls les composts évoluant beaucoup entre 3 et 6 mois de compostage ont eu un gain significatif de leur valeur amendante. A l'opposé, les composts déjà très stables à 3 mois ont pu voir leur valeur amendante diminuer à cause d'une minéralisation de leur matière organique, non compensée par sa stabilisation. Les simulations grossières que nous avons réalisées ont montré que, quel que soit le compost, la teneur généralement importante en matière organique des composts étudiés leur confère un attrait en matière d'entretien ou d'enrichissement de la matière organique du sol, tant d'un point de vue de l'amélioration des qualités du sol que dans le contexte du stockage du carbone pour lutter contre l'effet de serre additionnel. Cependant l'intégration de variables pertinentes pour des produits comme les composts (celluloses, lignines, rapport $C_{AH}/C_{AF}, \dots$) dans des modèles pluri-compartmentaux serait nécessaire pour une approche plus juste. Ajoutons aussi que le rôle potentiel des composts dans le contexte de l'effet de serre additionnel ne peut être évalué qu'en considérant l'ensemble des paramètres susceptibles d'être impliqués : prise en compte de l'ensemble des GES¹, bilan intégrant l'ensemble de la filière de traitement, du gisement de déchets au champ. Beaucoup reste à faire en ce domaine.

¹ gaz à effet de serre