



UNIVERSITE SENGHOR

*Université International de Langue Française au Service du
Développement Africain à Alexandrie (Egypte)*

Mémoire

De Diplôme d'études Professionnelles Approfondies (DEPA)

Option : Gestion de l'Environnement

Présenté par :

Patrice – Firmin BOULALA

Sur le thème :

VALORISATION DES DECHETS PAR COMPOSTAGE :
Etat des lieux des niveaux de maturité de différents composts

Directrice de stage : Maelenn POITRENAUD : *Chef de Pôle Traitements biologiques et valorisation agricole au CReeD – Veolia Environnement, Limay (France).*

Jury :

Président : Michel DAMIAN, *Directeur de Département, Université Senghor - Egypte*

Membres : Michel A. BOUCHARD, *Université du Québec à Montréal (UQUAM) - Canada*

Guy MATEJKA, *Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Limoges (ENSIL) - France.*

Alexandrie – EGYPTE

Avril 2005

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à :

- *La mémoire de ma sœur aînée Désirée Séraphine BOULALA, disparue tragiquement le 17 janvier 2005 pendant que je poursuivais encore la rédaction;*
 - *Mes frères et sœurs en témoignage de mon affection ;*
 - *Ma bien aimée Esther – Paulette KELEMBHO dont le séjour à Alexandrie a été pour moi un réconfort pendant les dures périodes d'études et de climat ;*
- *Mon collègue et ami Eric Bienvenu Armand FOTO pour son soutien lors de mes démarches de mise en route pour Alexandrie.*

REMERCIEMENTS

A l'issu de ma formation, je voudrais à travers ces quelques mots adresser mes sincères remerciements à ceux ou celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je remercie :

*L'Organisation Internationale de la Francophonie (OIF), son Secrétaire Général **SE Abdou DIOUF** pour le soutien financier et l'engagement à la formation des cadres des pays en développement.*

*Les hautes autorités de la République Centrafricaine, **Son Excellence Monsieur le Ministre de l'Éducation Nationale et de la Recherche Scientifique** et Monsieur le **Recteur de l'Université de Bangui** pour m'avoir donné l'autorisation de sortie pour cette formation.*

*Les autorités de l'Université Senghor d'Alexandrie (Égypte), le **Recteur Fernand TEXIER**, Monsieur **Michel DAMIAN** Directeur de Département, Madame **Omnéya SHAKER** Directrice du secteur TIC et les Assistantes Iman FAWZI et Jeanne AZER qui ont œuvré pour la formation.*

*La Direction et tout le personnel du **CReeD** particulièrement **Monsieur Dominique HELAINE**, **Flora NAYAGAM**, **Ludovine DUBOIS**, **Julien GOEURY**, **Christophe ARAN** et **Khoukha SLIMANI** pour l'accueil et leurs contributions de toutes formes à la réalisation de mon stage de mise en situation professionnelle.*

***Maelenn POITRENAUD** Chef de Pôle Traitements biologiques et valorisation agronomique au **CReeD**, qui malgré ses multiples occupations a encadré avec efficacité mon stage.*

***Sabine HOUOT** pour sa contribution très efficace à la réalisation de ce travail.*

***Cédric FRANCOU** pour sa disponibilité et son sens très poussé de collaboration.*

***Boris EFFREMEMENKO** pour son accueil et son amour pour mon pays.*

Tous les exploitants des plates formes de compostage du groupe ONYX – Véolia Environnement pour avoir mis à ma disposition des échantillons de composts pour analyses

*L'équipe EGC – SOL de l'INRA Paris - Grignon **Enrique BARUIO**, **Jean Noël RAMPON**, **Michel BETTACHE** pour m'avoir accepté dans leurs locaux pour les analyses.*

***Messieurs Michel A. BOUCHARD** de l'UQUAM (Canada) et **Guy MATEJKA** de l'ENSIL (France) pour avoir accepté de juger ce travail.*

***Les camarades de la promotion 2003 – 2005**, en particulier les auditeurs et auditrices du Département Gestion de l'Environnement de l'Université Senghor pour le climat de fraternité et de collaboration qui a régné entre nous durant les deux années d'études passées ensemble.*

AVANT PROPOS

Le présent mémoire est le résultat des recherches effectuées dans le cadre du stage professionnel pour l'obtention du **Diplôme d'Etudes Professionnelles Approfondies (DEPA)** de **l'Université Senghor** d'Alexandrie (Egypte), Opérateur Direct de **l'Organisation Internationale de la Francophonie (OIF)**.

Les recherches dont le thème est « *Valorisation des déchets par compostage : état des lieux des niveaux de maturité de différents composts* » ont été effectuées dans un premier temps au sein du pôle **Traitements Biologiques et Valorisation agricole** du **Centre de Recherche pour l'Environnement, l'Energie et le Déchet (CReeD)** du groupe **Véolia Environnement** et dans les laboratoires de **l'Institut National Agronomique de Paris – Grignon (INA – PG)** dans le cadre du programme « Qualiagro » de valorisation agronomique des composts. Ce programme est un exemple de partenariat public – privé entre le CReeD un Groupement d'Intérêt Economique (GIE) et l'INRA une Institution Publique Française de Recherche.

Dans le processus du développement durable, de nombreuses collectivités se sont engagées dans la modernisation de la gestion de leurs déchets. Du fait des incitations financières, c'est sur les opérations de collecte et de tri que se sont d'abord focaliser les premiers efforts. Le développement des filières de valorisation permet de résoudre les problèmes d'accumulation des déchets dans les décharges publiques. Le mode de valorisation préconisé ici est la valorisation organique. Cette filière est tout à fait indiquée pour les pays en Développement comme la République Centrafricaine (RCA), dont les déchets produits sont constitués en grande partie de matières fermentescibles donc biodégradables. La mise en place et la pérennité d'une filière de traitement et de valorisation organique doit cependant répondre aux enjeux politiques, techniques et financiers de chaque pays.

La perte de la matière organique du sol suite à divers facteurs tels que l'agriculture intensive, l'érosion, la sécheresse, etc., peut être compensée par un apport de compost. En effet il est en général reconnu que le compost contribue à entretenir le stock en matière organique du sol améliorant ainsi les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. L'utilisation du compost en agriculture permet aussi de lutter contre l'effet de serre renforcé par la séquestration du carbone dans les sols. En plus des avantages agronomique et environnementaux liés à l'usage des composts s'ajoutent des aspects sociaux et économiques. La plupart des pays étant confrontés au problème de traitement de leurs déchets dont les coûts ne cessent d'augmenter par rapport à la quantité des déchets, de plus l'acceptabilité des produits issus du traitement peut être un problème de société.

RESUME

Le compostage est un procédé de traitement et de valorisation par voie biologique des déchets. Il produit du compost utilisable en agriculture comme amendement organique. Cette utilisation a pour but essentiel l'augmentation ou l'entretien du stock de matière organique du sol. Pour cela un certain degré de maturité du compost et donc de stabilité de la matière organique est requis. L'objectif de ce projet est d'étudier le niveau de maturité de différents composts à partir de la caractérisation physico – chimique, des tests de maturité (Solvita et Rottegrad) et de la minéralisation du carbone organique. Il ressort de cette étude que les composts de déchets verts présentent les teneurs les plus fortes en carbone organique (COT) variant de 20,4 à 31,7%. Ces teneurs vont de 16,2 à 35,7% pour les composts ordures ménagères et de 26,2 à 27,7% pour les composts de boue. Avec des teneurs en carbone organique total élevées les composts de déchets verts présentent cependant une proportion faible de carbone minéralisée au cours des incubations de 7,5 à 11,9% contre 21,8 à 30,7% pour les composts d'ordures ménagères et de 10,5 à 12,% pour les composts de boue. Les composts de déchets verts sont donc ceux qui ont la matière organique la plus stabilisée. Cette stabilité est atteinte après une période compostage relativement courte. Une phase de maturation un peu plus longue avec des retournements et des criblages à mailles supérieurs à 10 mm sont requis pour le compostage des ordures ménagères. Enfin un compost issu d'un mélange de boue avec des déchets verts a un degré de stabilité élevé par rapport à un mélange de biodéchets et de déchets verts.

Mots clés : Compost ; Matière organique ; Maturité ; Incubations ; Minéralisation ; Stabilisation.

INTRODUCTION

La gestion, le traitement et la valorisation des déchets organiques sont des problèmes importants qui se posent aux municipalités. Les modes de traitement biologique de déchets qui peuvent déboucher sur une valorisation organique sont le compostage et la méthanisation (biométhanisation). L'utilisation de ces modes de traitement biologique nécessite cependant une bonne connaissance des conséquences environnementales et agronomiques. Dans le cas du compostage, la valorisation agronomique des composts est confrontée à la méfiance de certains agriculteurs suite à des pratiques passées d'épandage de composts de qualité médiocre.

La valorisation agronomique des déchets organiques consiste au retour au sol des matières organiques des déchets après traitement. Ce retour au sol est encadré par la loi française qui définit deux options fondamentales distinctes :

- La transformation du déchet en matière fertilisante : application du cadre « Production de matière fertilisante dérivée de déchet »
- Conservation du statut de déchet : application du cadre « Epandage contrôlé »

La loi française N°79-595 du 13 juillet 1979 classe le compost parmi les matières fertilisantes qui sont définies comme des produits dont l'emploi est destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Les composts sont considérés comme des amendements organiques et sont régis par les normes NF U 44-051 et NF U 44-095.

Sur 47 millions de tonnes de déchets collectés et traités en France, 24 millions de tonnes sont des déchets organiques et seulement 7% sont traités par compostage (ADEME 2001). Le développement des filières de traitements organiques des déchets est aussi une préoccupation pour les pays du sud qui produisent des déchets à forte proportion de fractions fermentescibles (Asomani-Boateng et Haight, 1999).

Pour pouvoir prévoir les effets des composts sur les propriétés du sol amendé et la culture, il est important de connaître son degré de maturité que nous considérons ici comme un degré de stabilité de la matière organique permettant des conseils d'utilisation. Si beaucoup de travaux ont été effectués sur la maturité des composts, il n'existe cependant pas d'étude fixant les valeurs seuils du degré de maturité des composts.

Les caractéristiques de la matière organique d'un compost dépendent essentiellement de la maîtrise du procédé de compostage. Ainsi le degré de maturité d'un compost sera lié aux types de déchets entrants, à l'âge du compost et à la technique utilisée (retournements, durée de maturation, ...).

Notre étude vise à établir un lien entre le degré de maturité, le procédé de compostage et les types de déchets compostés. Pour cela nous avons procédé à :

- Un échantillonnage des composts commercialisés sur différentes plates formes,
- La caractérisation physico-chimique des différents échantillons,
- La mesure du degré de maturité à l'aide de tests simples (Indices Solvita et Rottegrad),
- L'évaluation de la stabilité de la matière organique à partir du suivi de la minéralisation du carbone au cours d'incubations de mélanges sol-composts en conditions contrôlées.

Ce mémoire est divisé en quatre parties principales :

1. Une présentation générale du groupe Véolia Environnement cadre de notre étude
2. Une étude bibliographique sur le compostage qui prendra fin avec une conclusion présentant les objectifs de l'étude.
3. Une présentation des matériels et méthodes utilisés au cours de cette étude.
4. Une présentation des résultats obtenus et de la discussion de ceux ci.

Une conclusion générale présentant les attentes et les perspectives mettra fin à notre mémoire.

I. LE GROUPE VEOLIA ENVIRONNEMENT

Historique

Le groupe Véolia Environnement est l'un des premiers groupes mondiaux de services. Initialement spécialisé dans la distribution de l'eau par la Compagnie Générale des eaux créée en 1853, il a élargi rapidement son activité dans le domaine du traitement des eaux usées.

Durant les années 1960, la Compagnie Générale des Eaux a élargi le domaine de ses interventions aux services de l'environnement. En 1967, elle exploite ses premières usines d'incinération et de compostage des déchets ménagers.

Son champ d'action s'élargit au début des années 1980 par l'acquisition de la Compagnie Générale de Chauffage (rebaptisée DALKIA) spécialisée dans la gestion énergétique et de la Compagnie Générale des Entreprises Automobiles (CGEA) qui regroupe CONNEX et ONYX. Cette diversification s'accompagne d'un développement international dans toutes les activités de la Compagnie Générale des Eaux.

En 1997, une structure unique pour la gestion industrielle multiservice nommée Global Environnement est créée. L'année suivante, la Compagnie générale des Eaux devient Vivendi puis Vivendi Universal. Le pôle environnement au sein de ce groupe regroupe toutes les activités de services liées à l'environnement : Vivendi Water (eau), Onyx (propreté), Dalkia (énergie) et Connex (transport).

Ces transformations permettent au groupe de poursuivre sa croissance. En 1999, le groupe acquiert US Filter, n°1 américain du marché de l'eau. Le 20 juillet 2000, l'action de Vivendi Environnement est introduite à la Bourse de Paris.

En juillet 2002, Vivendi Environnement se sépare de Vivendi Universal et en mai 2003, Vivendi Environnement devient Véolia Environnement.

I.1. Les diverses activités du groupe Véolia Environnement

Le groupe Véolia Environnement comprend quatre (4) divisions (Figure I.1):

- Les déchets, gérés par ONYX, qui propose des services de collecte et de traitement.
- L'énergie, développée par DALKIA, spécialiste de la gestion énergétique.
- Le transport, assuré par Connex, qui maîtrise tous les types de transports.
- L'eau, assurée par Véolia Water.

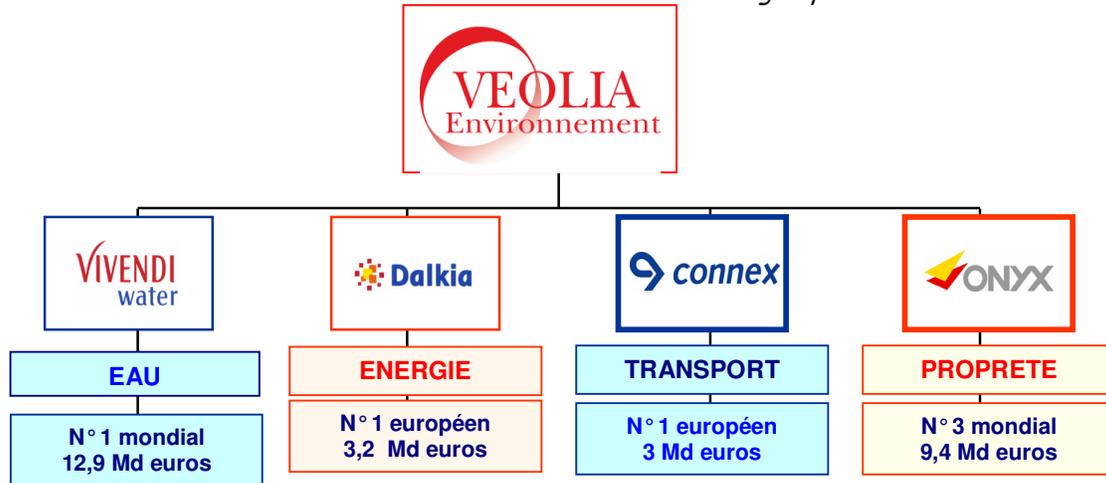


Figure I.1 : Structure générale du groupe Véolia Environnement

a) ONYX

Les sociétés du groupe dominent le marché français de la propreté. Leurs domaines d'activités sont :

- La collecte des déchets ménagers, industriels et hospitaliers,
- Le nettoyage en milieu industriel et hospitalier,
- La gestion des centre d'enfouissement technique (CET),
- Le tri, le recyclage et la valorisation des déchets.

Le groupe ONYX est leader européen et occupe le troisième rang mondial dans son domaine.

b) DALKIA

Le groupe Dalkia est spécialisé dans la gestion de l'énergie. Elle conçoit et gère de nombreuses installations de chauffage collectif ainsi que des centres de traitement thermique de déchets urbains et hospitaliers. Dalkia est actuellement leader européen dans son domaine.

c) CONNEX

Présent en Amérique, en Océanie, au Moyen-Orient et premier exploitant privé de transport collectif en Europe, Connex gère plusieurs centaines de réseaux routiers, ferroviaires et maritimes de toutes tailles et selon des structures décentralisées. Connex est le seul groupe européen à maîtriser simultanément ces trois domaines. Le groupe réalise des études de faisabilité de gestion de trafic et met en place des embranchements ferroviaires. Il est le premier opérateur privé de transport public de voyageurs en Europe et un des premiers mondiaux.

d) VEOLIA WATER

Véolia Water est spécialisé dans le domaine de l'eau avec pour objectif la protection de la ressource. Ses principales missions concernent :

- La production et la distribution d'eau potable et l'assainissement,
- La fabrication d'équipement de traitements des eaux,
- La construction et l'exploitation d'usines d'eau potable et de station d'épuration, d'équipement hydrauliques,
- Les services aux industriels et à la clientèle résidentielle.

Véolia Water est le premier groupe mondial spécialisé dans les métiers de l'eau.

I.2. Les centres de recherche du groupe Véolia Environnement

Près de 600 chercheurs sont mobilisés pour la recherche et le développement au sein du groupe Véolia Environnement et sont réparties dans trois centres principaux de recherches :

- Pour l'eau : Anjou-recherche avec ses unités associées aux Etats Unis, au Canada, en Allemagne et en Australie,
- Pour l'énergie et la propreté : le Centre de Recherches pour l'Environnement, l'Energie et le Déchet (CReeD) et ses antennes en Europe du Nord et en Australie,
- Pour le transport : Eurolum.

Réunis au sein de la Direction de la recherche, du Développement et de la Technique du groupe Véolia Environnement, ces centres travaillent de manière étroite avec les opérationnels du groupe dans le monde entier. Ils disposent des outils et méthodes les plus sophistiqués : modélisation, simulation numérique, logistique, recherche opérationnelle, intelligence artificielle. Ils effectuent leurs essais sur des installations allant du pilote à l'unité préindustrielle sur site, la validation sur le terrain par les opérationnels concluant systématiquement toute étude. Ils s'appuient sur un des plus grand réseaux de laboratoires analytiques d'Europe : le Centre d'Analyses Environnementales (CAE).

a) Le CReeD

Les travaux ayant aboutit à la rédaction de ce mémoire se sont effectués au sein du Pôle Traitement Biologiques et Valorisation Agricole du CreeD (Centre de Recherches pour l'Environnement, l'Energie et le Déchet) groupement d'intérêt économique (GIE) qui constitue le pôle de Recherche Développement et innovation des filiales Propreté et Energie

du groupe Véolia Environnement. Créé en avril 1992, le CReeD a pour vocation de proposer des solutions innovantes répondant aux besoins environnementaux des industriels et des collectivités territoriales. Le CReeD compte six partenaires à savoir :

- **CGEA-ONYX** : Compagnie Générale des Entreprises Automobiles, leader du groupe dans les domaines de la collecte des ordures ménagères, de la propreté et de l'enfouissement des déchets,
- **SARP** : spécialisée dans la gestion des déchets liquides, gras et le nettoyage des réseaux,
- **SARP Industries** : leader européen du traitement des déchets industriels spéciaux et de leur valorisation,
- **DALKIA** : filiale de la branche énergie, elle réalise des centres de traitement et de valorisation des déchets industriels et hospitaliers,
- **ANJOU-RECHERCHE** : spécialisé dans la recherche sur le traitement de l'eau,
- **SEDIBEX** : chargé de la gestion à Sandouville d'un des plus importants centres d'incinération de déchets industriels spéciaux.

Les thèmes de recherche abordés par le CReeD touchent l'ensemble des opérations de ses partenaires et s'organisent en neuf pôles.

- **Pôle Assainissement** : concevoir et développer des traitements de déchets de curage ou gras.
- **Pôle Traitement Biologiques et Valorisation Agricole** : améliorer le traitement des déchets fermentescibles et les procédés de régénération des sols.
- **Pôle Collecte/Tri** : optimiser la collecte en améliorant les techniques de séparation et de récupération des déchets.
- **Pôle Décharge** : optimiser la gestion des Centres de Stockage des Déchets (CSD) afin de maîtriser et potentiellement valoriser les rejets d'effluents liquides (lixiviats) et gazeux (biogaz) et accélérer la stabilisation des sites.
- **Pôle Déchets Dangereux** : concevoir et développer des moyens de traitement des effluents solides et liquides, stabiliser les déchets industriels spéciaux.
- **Pôle Energie Industrie** : définir des offres de services.
- **Pôle Energie Exploitation** : améliorer les performances des exploitations, développer de nouvelles technologies, maîtriser l'impact des installations sur l'environnement et la santé.
- **Pôle Valorisation** : développer et mettre en place des filières de valorisation.

- **Pôle Traitement Thermique** : optimiser la combustion des déchets et mettre en place de nouvelles techniques de traitement des polluants.

b) Anjou Recherche

Ce GIE coordonne l'ensemble de la recherche du groupe Véolia Environnement dans le domaine de l'eau. Il a pour vocation de développer de nouveaux outils en matière d'assainissement, de distribution et de « potabilisation » de l'eau.

c) Eurolum

Son objectif est de contribuer à l'augmentation de la fréquentation des réseaux exploités, d'être à la pointe des changements technologiques susceptibles d'influencer le monde du transport et de développer de nouveaux modes de déplacement.

II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1. Le compostage

II.1.1 Qu'est ce que le compostage ?

Le compostage est un processus biologique de traitement des déchets. Plusieurs définitions ont été données par différents auteurs (Mustin, 1987 ; Leclerc, 2001 ; Francou, 2003). Nous retiendrons de ces définitions que :

*« Le compostage est un processus biologique de transformation contrôlée de la matière organique par les microorganismes, vivant en aérobiose, en un produit stabilisé riche en composés humiques appelé **compost**. »*

Le contrôle des conditions du milieu distingue le compostage de l'évolution naturelle des matières organiques dans les sols.

Le compostage comme processus de traitement et de valorisation des déchets répond à trois principaux objectifs :

- Le traitement dans le but de transformer les déchets pour leur faire perdre leur potentiel de nuisance dans des conditions conformes à la législation et dans un cadre économique satisfaisant. On peut donc dire de ce qui précède que le compostage doit permettre de réduire la quantité de déchets d'environ 50% par rapport aux déchets initiaux (Das et Keener, 1997).
- La fabrication d'amendement organique et/ou un support de culture valorisable dans différents domaines (agriculture, horticulture, aménagement).
- L'hygiénisation des composts produits par la combinaison de la température et la libération de facteurs inhibiteurs permettent la destruction des graines des adventices de culture (Leclerc, 2001). On observe aussi une élimination des pathogènes des antagonistes microbiens suite à la toxicité de certains composés formés durant la décomposition.

II.1.2. Le processus de compostage

II.1.2.1. Les phases du compostage

Le suivi des paramètres physico – chimiques tels que la température, le pH, le taux d'oxygène, etc.... a permis de décomposer le processus de compostage en quatre phases (figure II.1) caractérisées par la succession des populations microbiennes. Le plus souvent, la courbe d'évolution de la température est utilisée pour décrire ces quatre phases. Les variations de la température au cours du compostage sont essentiellement liées à celles de l'intensité de l'activité microbienne (Waksman, 1939 ; Mustin, 1987 ; Leclerc, 2001).

La phase mésophile est la phase initiale du compostage et correspond à une colonisation du milieu par les microorganismes mésophiles généralement indigènes (bactéries et champignons). Il s'ensuit une intense activité de dégradation des molécules simples (sucres simples, acides aminés, alcools ...) et d'une partie des polymères (protéines, amidon, cellulose, hémicellulose, pectines) qui conduit à un dégagement de CO₂ et une montée de la température.

La phase thermophile succède à la phase mésophile et est caractérisée par une forte température 60 à 70°C qui agit sur les microorganismes ; seuls les thermophiles et les thermotolérants résistent. Cette phase est aussi caractérisée par une perte de matière organique sous forme de CO₂, une perte en azote minéralisé sous forme ammoniacale (NH₄⁺) qui se volatilise sous forme d'ammoniac (NH₃). On assiste aussi à un assèchement lié à l'évaporation de l'eau.

La phase de refroidissement : elle est caractérisée d'une part par une diminution de l'intensité de l'activité microbienne liée à la diminution des teneurs en composés organiques facilement dégradables et d'autre part par une recolonisation par les microorganismes mésophiles qui dégradent les polymères restés intacts et incorporent l'azote dans les molécules complexes.

La phase de maturation est l'ultime étape du processus de compostage. Elle se prolonge jusqu'à l'utilisation du compost. On y observe peu d'activités microbiennes. La phase de maturation se caractérise par la stabilisation de la matière organique et des processus d'humification de la matière organique stabilisée.

La durée des différentes phases du compostage dépend essentiellement de la matière première et des conditions de compostage. Les trois premières phases sont cependant rapides

par rapport à la phase de maturation. Les deux premières phases sont souvent appelées phase de fermentation car elles correspondent à une intense activité de dégradation de la matière organique (Mustin, 1987).

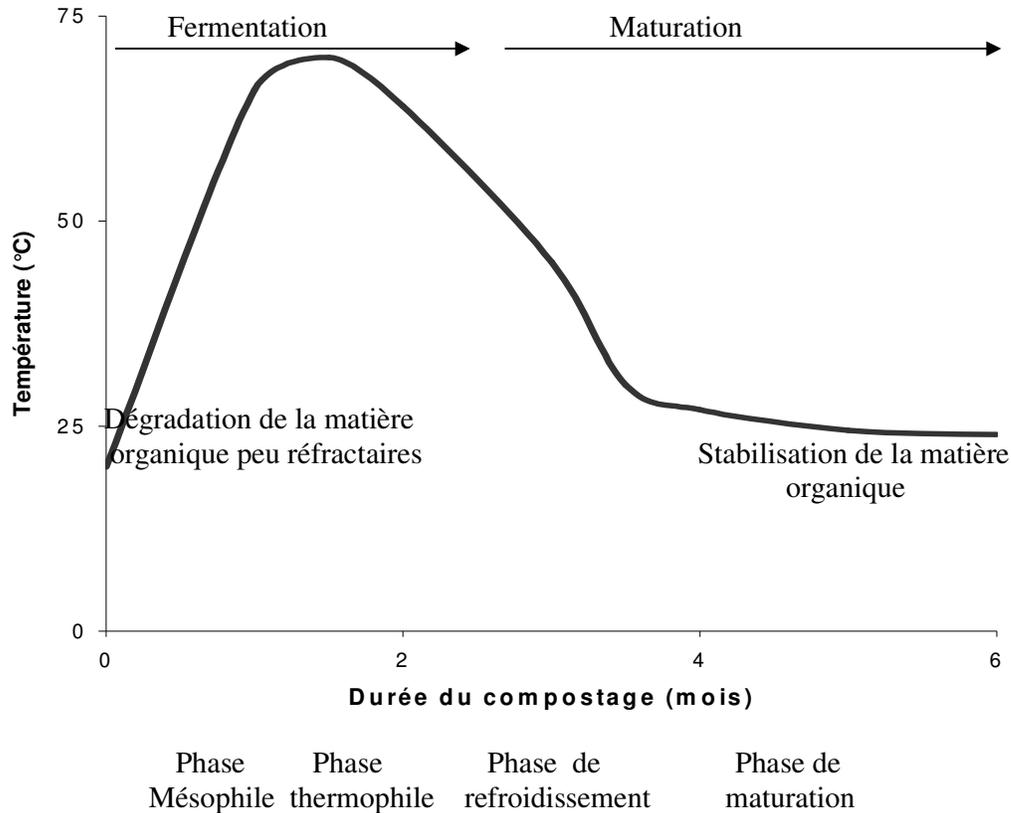


Figure II.1 : Courbe théorique d'évolution de la température au cours du compostage (Francou, 2003).

II.1.2.2. Les paramètres du compostage

Les principaux paramètres du compostage sont ceux qui ont une influence sur les conditions de vie des microorganismes, c'est à dire ceux qui régissent leur métabolisme. Ce sont la température, le taux d'oxygène lacunaire (aération), l'humidité, les caractéristiques physico – chimiques du substrat et les microorganismes (paramètres biologiques). Ces paramètres agissent simultanément au cours du compostage (Leclerc, 2001).

a) La température

L'augmentation de la température au cours du compostage est le paramètre le plus facile à mesurer. La température est à la fois une conséquence de l'activité microbienne et un facteur conditionnant cette activité microbienne. L'élévation de la température est due à l'activité des microorganismes qui oxydent la matière organique des substrats et libèrent l'énergie contenue dans les liaisons chimiques des molécules constitutives. Une partie de cette énergie est récupérée par les microorganismes mais la grande partie est perdue et dissipée dans l'atmosphère. L'évolution de la température au cours du compostage dépend :

- De la composition des substrats mis à composter : les déchets riches en composés fermentescibles (sucres simples et protéines) permettront d'atteindre rapidement des températures élevées contrairement aux autres déchets peu fermentescibles (végétaux lignocellulosiques). De même des composés riches en graisses et huiles (lipides) dégageront plus de chaleur par unité de masse que d'autres composés organiques (Leclerc, 2001).
- Du régime des échanges thermiques dans la masse en fermentation : en fonction de la masse, de la forme du tas ou du fermenteur, du climat, de la présence de couches externes isolantes et du procédé de compostage (retournements), des niveaux très différents de température seront atteints pour un même substrat (Mustin, 1987 ; Devisscher, 1997).

En début de compostage, la température monte pour atteindre des valeurs de 60 à 70 °C. Au-delà de 60 à 65 °C, la température devient limitante pour l'activité biologique (inactivation des enzymes par dénaturation de la structure), ce qui conduit à une réduction de la chaleur produite ; la température se stabilise jusqu'à ce que certaines conditions deviennent limitantes, notamment la dégradabilité du substrat et entraînent la baisse de la température (Mustin, 1987 ; Francou, 2003).

L'augmentation de la température est très importante pour la destruction des germes pathogènes, des graines des adventices qui peuvent être présents dans les déchets mis à composter. La qualité de cette « hygiénisation » du compost est vitale pour éviter un transfert de contamination lors de son utilisation ultérieure surtout en agriculture.

b) Le taux d'oxygène lacunaire

La présence de l'oxygène est indispensable au bon déroulement du processus de compostage. L'oxygène est consommé par les microorganismes au cours de la respiration. La décomposition de la matière organique conduit ainsi à un dégagement de CO₂ dont l'augmentation est corrélée à une baisse du taux d'oxygène. Un apport d'oxygène est donc nécessaire au cours du compostage des déchets.

On considère que le seuil d'oxygène minimal nécessaire pour maintenir les conditions aérobies est d'environ 5% (Duval, 1993 ; Leclerc, 2001). Sous ce seuil, la mise en place des conditions anaérobies déséquilibrerait la flore en place au profit d'une autre.

La consommation de l'oxygène par une masse de matière organique, paramètre direct d'évaluation de l'activité des microorganismes aérobies, permet de situer le stade d'évolution atteint par le compost.

c) L'humidité

La teneur en eau du substrat à composter est un paramètre qui conditionne l'activité microbienne et donc la biodégradation (Jeris et Regan, 1973). La teneur en eau optimale pour un compostage se situe généralement entre 50 et 80 % et dépend de la nature des déchets à composter (Willson, 1989 ; Richard et *al.*, 2002).

Le taux d'humidité optimal dépend de la structure de la matière organique de départ (Godden, 1986). Pour assurer un bon déroulement du compostage il faut assurer un taux optimal de l'humidité qui peut être défini pour un substrat donné par le taux maximal d'espaces lacunaires qui n'entraîne pas d'inhibition de l'activité biologique (Mustin, 1987). Le taux optimal d'espace lacunaire se situe entre 50 et 70% (Richard et *al.*, 2002).

d) Les caractéristiques physico – chimiques des substrats à composter

Les substrats pouvant être compostés sont extrêmement variables dans leur composition chimique ce qui a une influence sur le déroulement du compostage. En effet les microorganismes décomposent par l'action des enzymes qu'ils produisent la matière

organique en éléments simples ou nutriments qu'ils vont utiliser pour leurs propres besoins métaboliques et physiologiques. On peut donc évaluer la compostabilité d'un substrat en fonction de ses caractéristiques physico – chimiques. Ce sont principalement : le rapport entre les éléments majeurs (carbone, azote, phosphore et soufre), plus particulièrement le rapport carbone/azote (rapport C/N), le pH, le taux de matières minérales et le taux de matières organiques.

d.1) Le rapport carbone/azote

Il mesure les proportions relatives en carbone et en azote, nutriments essentiels à la vie des microorganismes. Le rapport C/N optimal pour un bon compostage que l'on retrouve dans la littérature est très variable et se situe dans l'intervalle 25 – 35 (Mustin, 1987 ; Godden, 1995). On procède le plus souvent à des mélanges de substrats pour approcher la valeur optimale de C/N pour les substrats inaptes à être compostés seuls (Leclerc, 2001 ; Sadaka et El Taweel, 2003).

De façon générale, un manque d'azote implique un processus de compostage lent et un excès d'azote ou un défaut de carbone est à l'origine des pertes importantes d'azote (Lemaire et al., 1989).

d.2) Les autres rapports

Il s'agit des rapports N/P, C/P, C/S, ... Vis à vis des autres nutriments, on considère généralement que leurs teneurs ne doivent pas être limitantes et elles sont rarement mesurées. Les rapports optimums N/P varient entre 2 et 5. La teneur en potassium doit être comprise entre 0,2 à 0,5% de la matière sèche. Pour les autres éléments majeurs tels que le soufre, le calcium et le magnésium, les teneurs limitantes sont rares (Mustin, 1987).

d.3) Le pH

Le pH n'a pas d'influence majeure sur le procédé de compostage, la plage optimale se situe autour de la neutralité, entre 6,5 et 8,5. Le pH des déchets urbains est compris entre 5 et

9 (Morel et *al.*, 1986). Selon de Bertoldi et *al.* (1983), l'acidité des déchets n'apparaît pas comme un facteur limitant pour le compostage.

d.4) Caractéristiques de la matière minérale et de la matière organique.

La composition des substrats à composter a une influence sur le processus de compostage. La quantité de carbone minéralisé dépend surtout de la nature des composés carbonés des substrats plutôt que du rapport C/N (Lemaire et *al.*, 1989). Les matériaux riches en lignine se décomposent très lentement contrairement aux matériaux riches en cellulose et hémicellulose.

d.5) Granulométrie des déchets à composter

La granulométrie des matériaux qui est la mesure de la dimension des particules d'un mélange est particulièrement importante. La granulométrie est définie ici comme la proportion relative de répartition des particules dans différentes classes de dimensions (Devischer, 1997). Comme précisé précédemment, l'aération est un paramètre prépondérant d'un bon déroulement de la fermentation au cours du compostage des déchets. La présence d'oxygène est directement liée au pourcentage d'espaces lacunaires (porosité). Or ce pourcentage est fonction de la granulométrie. Si la granulométrie est trop fine, elle provoque un « étouffement » du tas, si elle est trop grossière, elle peut être synonyme de dessèchement dû à des circulations d'air importantes. Un broyage des déchets est donc nécessaire pour obtenir une granulométrie favorable et un bon mélange des produits (Mustin, 1987).

e) Paramètres microbiologiques

Le compostage est un processus biologique qui fait intervenir de nombreux microorganismes responsables de la décomposition de la matière organique. La flore microbienne du compostage est majoritairement constituée de bactéries et de champignons (Mustin, 1987). Il faut noter que ces microorganismes sont déjà présents en grande quantité dans tous les substrats destinés à être compostés ou épandus sur le sol. Le processus démarre

donc généralement de manière spontanée sauf dans des cas particuliers de substrats stériles ou des conditions de milieu défavorables (substrat trop sec ou trop acide). On peut dire en fait que « les déchets charrient les germes de leur propre destruction » (Mustin, 1987 ; Devischer, 1997). Certains auteurs recommandent l'utilisation d'ensemencements bactériens sélectionnés mais ils n'ont pas fait preuve d'efficacité puisqu'ils sont rapidement noyés dans l'écosystème microbien qui se développe spontanément (Mustin, 1987 ; Leclerc, 2001).

Les microorganismes appartiennent aux groupes suivants : bactéries, actinomycètes, champignons, protozoaires et algues. A l'intérieur d'un même groupe, tous les microorganismes n'agissent pas de la même façon sur le substrat et on peut les classer suivant la fonction biochimique spécifique qu'ils assurent au sein du compost : ce sont par exemple des amylolytiques qui dégradent l'amidon, des nitrificateurs qui transforment les composés azotés (acides aminés, urée, acides nucléiques...) (Leclerc, 2001).

Les microorganismes et la microfaune des invertébrés dégradent la matière organique par production d'enzymes véritables biocatalyseurs de toutes les réactions biochimiques. Ces enzymes peuvent être extracellulaires c'est à dire produits et excrétés par les microorganismes en activité, ou intracellulaires et libérés lors de la mort ou de la destruction des cellules et qui peuvent continuer à exercer en dépit de leur fragilité. Par l'action de ces enzymes, les microorganismes modifient la composition du substrat mais aussi la température et le pH du milieu. Or les enzymes fonctionnent dans une gamme de température et de pH donnée. Au fur et à mesure de l'évolution de ces deux paramètres, il va avoir une sélection des populations microbiennes possédant un équipement enzymatique propre à s'adapter aux nouvelles conditions du milieu (Mustin, 1987 ; Leclerc, 2001). De part leurs activités de biodégradation, les microorganismes du compostage vont créer les conditions de leur propre destruction, conditions qui se trouvent optimales pour la vague suivante de populations microbienne. La diversité de la flore existante est donc liée aux différents niveaux de biodégradabilité des constituants organiques. Des communautés différentes de microorganismes vont ainsi se succéder en fonction du niveau de décomposition atteint et de leur équipement enzymatique. Cette succession de décomposition explique en fait la succession des différentes phases du compostage. Le tableau II.1 donne les caractéristiques des microorganismes du compostage et leurs fonctions.

Tableau II.1: Les microorganismes du compost : caractéristiques (Mustin, 1987).

Groupes	Caractéristiques et commentaires	Nombre estimé d'espèces dans les composts
Bactéries	Toujours présentes dans les composts et largement dominantes en qualité et en quantité. Forte croissance si C/N bas et humidité élevée. Large gamme de pH, surtout substrats frais.	800 à 1000 espèces au minimum
Champignons	Dominants si C/N haut (dégradation des celluloses et lignines. Biomasse supérieure aux bactéries dans ces milieux. Ils sont capables de croître pour des taux d'humidité plus bas et tolèrent une large gamme de pH (2-9)	Plusieurs dizaines de milliers d'espèces
Actinomycètes	Attaquent les substances non dégradées par les bactéries et les champignons (Chitine par exemple). Neutrophiles, ils tolèrent les pH légèrement basiques, sont peu compétitifs vis à vis des autres groupes. Ils se développent plutôt en conditions difficiles ou dans les phases finales de maturation. Les genres <i>Nocardia</i> et <i>Streptomyces</i> représentent 90% de leur biomasse. Beaucoup d'odeurs aromatiques des sols ou composts mûrs sont dues aux actinomycètes.	Plusieurs dizaines d'espèces
Algues	Organismes chlorophylliens, elles se cantonnent en surface et dans les dix premiers centimètres de la couche superficielle, en utilisant les sels minéraux. Un milieu humide est nécessaire dans une gamme de pH autour de la neutralité ou légèrement alcalin. En absence de lumière (en dessous de 0,05% d'intensité lumineuse) elles peuvent devenir hétérotrophes.	Idem
Protozoaires	Grand groupe hétérogène d'unicellulaires mobiles. Ils réclament un milieu humide (eau interstitielle) et sont plus petits dans les composts que dans les eaux. Grands consommateurs de bactéries, éventuellement d'autres microorganismes. Leur rôle écologique est mal connu.	Idem
Cyanophycées	Procaryotes proches des bactéries, leur abondance coïncide généralement avec une activité des bactéries. Les cyanophycées sont fixatrices d'azote atmosphérique et sont aérobies.	Idem

II.1.2.3. Evolution des caractéristiques physico – chimiques au cours du compostage

Au cours du compostage, les matériaux subissent des modifications importantes de leurs caractéristiques physico – chimiques. Les caractéristiques les plus suivies sont : la teneur en eau, la teneur en matière organique, les teneurs en carbone et en azote, le pH et la capacité d'échange cationique (CEC).

a) La teneur en eau

La teneur en eau varie au cours du compostage : elle peut augmenter à cause des réactions chimiques d'oxydation ou diminuer suite à l'élévation de la température (évaporation) et de l'aération qui provoque une perte de vapeur d'eau.

On observe généralement au cours du compostage une évaporation de l'eau suite à l'énergie dégagée par la dégradation du substrat. L'intensité de cette évaporation est variable et est liée à la nature du substrat et aux conditions du milieu. Des pertes de l'ordre de 50% sont fréquemment mesurées (Canet et Pomares, 1995 ; Sadaka et El Taweel, 2003), un arrosage est souvent préconisé pour compenser ces pertes en eau et maintenir des conditions d'humidité favorable à l'activité microbienne.

b) la matière organique

On observe généralement une diminution de la teneur en matière organique durant le compostage. Cette diminution s'accompagne de la perte de matières au cours du processus. Cette diminution est très variable et dépend des conditions opératoires et de leur durée. Des pertes de l'ordre de 20 à 60% de la matière organique initiale sont souvent observées (Ianotti et *al.*, 1994 ; Canet et Pomares, 1995 ; Atkinson et *al.*, 1996).

c) Le carbone

Il est constitué du carbone organique total (COT), du carbone minéral (carbonates et bicarbonates). C'est le principal constituant des déchets à composter. Sa teneur dans les

composts varie en fonction des déchets. Le COT varie dans les composts finaux de 20 à 30% pour les composts de déchets verts (Riffaldi et *al.*, 1986 ; Vallini et *al.*, 1993), de 25 à 50% pour les ordures ménagères (Garcia et *al.*, 1992 ; Avnimelech et *al.*, 1996) et de 30 à 40% pour les boues (Garcia et *al.*, 1992 ; Navarro et *al.*, 1993 ; Diaz – Burgos et *al.*, 1993 ; Ayuso et *al.*, 1996 ; Bernal et *al.*, 1998).

La minéralisation principalement en CO₂ au cours du compostage est à l'origine de la diminution de la teneur en carbone organique. On peut assister dans certains cas lorsque les conditions d'anaérobiose s'installent à un départ de carbone sous forme de méthane (He et *al.*, 2000) ou sous forme d'acides gras volatiles qui contribuent à baisser le pH du milieu (Michel et Reddy, 1998 ; Beck – Friis et *al.*, 2003).

d) L'azote

C'est le second élément constitutif de la matière organique après le carbone et il représente 1 à 4% de la matière sèche (Hirai et *al.*, 1982 ; Willson, 1989). Les formes d'azote rencontrées dans le compost sont l'azote organique, l'ammonium (NH₄⁺) et les nitrates (NO₃⁻) qui peuvent être soit incorporées par les microorganismes pour leur métabolisme, soit intégrées dans la matière organique dans le processus d'humification ou libérées dans le compost sous formes minérales (Larsen et Mc Cartney, 2000).

On observe généralement au cours du compostage une augmentation de la teneur en azote sous forme de NO₃⁻ (Sanchez – Monedero et *al.*, 2001) qui est un indicateur de la maturité des composts. Les pertes en azote au cours du compostage sont liées au pH donc à la présence d'acides gras volatiles. Mais elles peuvent également être liées à un lessivage des nitrates dans le cas des composts non protégés ou à la volatilisation d'ammoniac (NH₃) ou d'oxyde nitreux (NO₂). Une augmentation du pH entraîne une transformation de NH₄⁺ en NH₃ volatil, inversement, une diminution du pH entraîne un blocage d'azote sous forme de NH₄⁺ (Michel et Reddy, 1998).

e) le rapport C/N

Le rapport C/N décroît au cours du compostage pour se stabiliser dans un compost fini vers 10 (Mustin, 1987) : ceci s'explique par le fait que le carbone est perdu par minéralisation

en CO₂ qui se volatilise alors que la plupart de l'azote minéralisé reste dans le compost. La figure II.2 illustre l'évolution du rapport C/N de quelques substrats au cours du compostage.

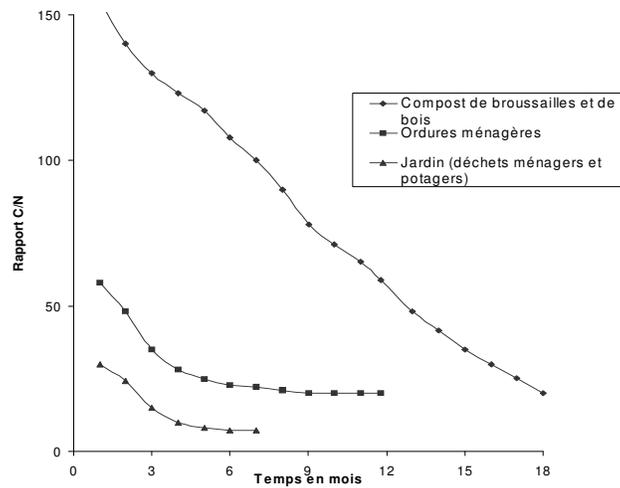


Figure II.2 : Courbe de principe d'évolution du rapport C/N de plusieurs substrats au cours du compostage (Mustin, 1987).

f) Le pH

Les déchets urbains ont un pH généralement compris entre 5 et 9 (Morel *et al.*, 1986). En début de compostage (phase mésophile), on observe une acidification suite à la production d'acides organiques et à l'immobilisation de l'ammonium. La minéralisation de ces acides et de l'azote en phase thermophile entraîne une alcalinisation du compost.

Le contrôle du pH est souvent très utile en fermentation, il permet de suivre le processus et ultérieurement de l'orienter favorablement. Le pH en fin de compostage est de 8 à 9. (Duval, 1993).

g) La capacité d'échange cationique (CEC)

La CEC se définit comme l'ensemble des charges négatives du compost ou la quantité de cation que le compost peut fixer. Elle est directement liée au pH et augmente au cours du compostage. La CEC est inférieure à 40 meq/100 g au début et évolue pour atteindre des valeurs supérieures à 60 meq/100 g en fin de compostage (Iglesias-Jimenez et Perez-Garcia, 1989 ; Saharinen, 1998).

h) Formation des substances humiques

Les déchets à composter sont constitués de quantités variables des constituants primaires tels que les protéines, les glucides, les lipides et quelques fois les acides nucléiques. Au cours du compostage, on assiste à une transformation de ces constituants biochimiques initiaux en matière organique humifiée. L'humification, en partie, explique la stabilisation du compost un des paramètres conditionnant la maturité des composts.

La formation de substances humiques dans le sol ou dans les composts en maturation est le résultat des réactions biochimiques qui commencent par le vieillissement des organismes animaux et végétaux (Andreux et *al.*, 1994). Ce sont essentiellement des composés transitoires de nature aromatique qui sont les précurseurs des substances humiques (Mustin, 1987).

La matière organique n'est jamais à l'état pur dans le sol et les composts, elle est toujours associée à des matières minérales solubles (ions par exemple) ou particulières (minéraux des sols comme les argiles). Les composantes de l'humus n'évoluent donc pas indépendamment des autres constituants du milieu. Il existe une interaction permanente avec :

- Les autres molécules organiques : protéines, polysaccharides, acides gras, alcanes.
- Les minéraux comme les argiles, les ions minéraux et les hydroxydes.

II.2. La maturité des composts

II.2.1 Définitions

La maturité des composts est une notion primordiale pour l'optimisation de leur utilisation. Elle est abordée selon diverses voies par les auteurs (He et *al.*, 1992 ; Becker et Kotter, 1995 ; Houot et *al.*, 2001).

- La maturité est évaluée par certains auteurs comme un degré de stabilité de la matière organique. Un compost est dit mûr si sa matière organique est stable, c'est à dire que le niveau de biodégradabilité est faible et peut être comparé à celui de la matière organique du sol (Nicolardot et *al.*, 1982 ; Iglésias-Jimenez et Perez-Garcia, 1989, Becker et Kotter, 1995 ; Houot et *al.*, 2001).

- D'autres auteurs considèrent qu'un compost est mûr s'il ne présente aucun effet inhibiteur pour les plantes. On estime donc la maturité ici par l'impact du compost sur la plante (Spohn, 1978 ; De Bertoldi et *al.*, 1983 ; Iannotti et *al.*, 1994 ; Wu et Ma, 2001).

S'il est établi que la stabilité de la matière organique du compost est une condition sine qua non d'évaluation de sa maturité, il n'existe cependant pas une valeur fixant ce niveau de stabilité (Francou, 2003).

II.2.2 Indicateurs de la maturité des composts

Différentes méthodes sont utilisées pour évaluer la maturité d'un compost (tableau II.2). On distingue des méthodes physiques, chimiques, biologiques et spectrales.

a) Test respirométrique

Il est basé sur l'activité respiratoire des micro-organismes du compost. Il s'agit de mesurer la consommation d'oxygène ou le dégagement de CO₂ du compost pour en déterminer la maturité. Le principe est que le compost en fin de fermentation a une consommation d'oxygène faible et une faible production de gaz carbonique. On considère qu'un compost est mature si la consommation d'oxygène est inférieure à 10 mg d'O₂ par Kg de matière sèche en 4 jours (Nicolardot et *al.*, 1986 ; Iannotti et *al.*, 1994).

b) Test d'auto – échauffement

Le degré de stabilité de la matière organique d'un compost peut être mesuré par rapport à l'augmentation de la température d'une masse de compost placée dans un récipient isolé thermiquement. Le test est réalisé sur du compost tamisé à 10 mm et réhumidifié à l'optimum de l'activité microbienne. L'absence de toute montée de température indique que le compost est mûr. Le test d'auto – échauffement est réalisé dans un isotherme DEWAR (1,5L). Un indice supérieur ou égal à IV sur une échelle de V révèle un compost mûr (FCQAO, 1994).

c) indice SOLVITA®

Ce test commercialisé sous le nom de test SOLVITA® (Woods End® Research Management, USA) est basé à la fois sur le niveau d'activité respiratoire de l'échantillon (minéralisation du carbone) et la volatilisation de l'azote ammoniacal qui caractérise un produit frais peu oxydé. Il est effectué sur du compost dont l'humidité est ajustée comme précédemment. Deux indicateurs colorés mesurant les émissions de NH_3 et de CO_2 sont introduits dans le flacon d'analyse, l'incubation dure 4 heures. Un indice supérieur à 6 sur une échelle de 1 à 8 indique un compost mûr.

d) Caractéristiques physico – chimiques

Les paramètres utilisés pour évaluer la maturité d'un compost sont le pH, la CEC, les rapports C/N et $\text{N-NO}_3^-/\text{N-NH}_4^+$.

d.1) Le pH

Le pH varie au cours du compostage pour se stabiliser autour de la neutralité. Un pH acide indique un compost non mûr alors que un compost mûr a un pH compris entre 7 et 9 (Roletto et *al.*, 1985 ; Forster et *al.*, 1993 ; Avnimelech, 1996). Le pH n'est cependant pas un bon indicateur car on a des composts instables avec des pH élevés (Francou, 2003).

d.2) La CEC

La capacité d'échange cationique est également utilisée pour estimer la maturité des composts. Une CEC supérieure à 60 meq/100 g caractérise un compost mûr (Iglésias-Jimenez et Perez-Garcia, 1989). La CEC ne peut cependant pas être utilisée pour évaluer la maturité des composts des déchets d'origine et de composition variées (Saharinen, 1998).

d.3) Le rapport C/N

Le C/N est souvent considéré comme l'indice de biodégradabilité d'un substrat organique. Au cours du compostage, le C/N diminue. On estime qu'un C/N inférieur à 25 – 20 définit un compost mûr (Iglésias-Jimenez et Perez-Garcia, 1989 ; Roletto et *al.*, 1985). Le C/N est trop variable dans les composts mûrs pour être considéré comme un indicateur fiable. D'autre part le C/N se stabilise avant que la matière organique du compost ne se stabilise (Roletto et *al.*, 1985).

d.4) Le rapport $N-NO_3^-/N-NH_4^+$

La teneur en composés ammoniacaux baisse au cours du compostage au profit des formes oxydées de l'azote. Le rapport $N-NO_3^-/N-NH_4^+$ devrait donc théoriquement augmenter au cours du compostage (Mustin, 1987).

d.5) Stabilité biologique de la matière organique

Le ralentissement de l'activité microbienne en fin de compostage traduit la stabilisation de la matière organique qui peut être définie comme l'augmentation de la résistance à la biodégradation de la matière organique : plus la matière organique est stable plus l'activité microbienne est faible.

La stabilité de la matière organique des composts est estimée lors des incubations en conditions contrôlées de mélanges sols-composts. (Beloso et *al.*, 1993).

Lors des incubations en conditions contrôlées, la majeure partie de carbone est minéralisée durant les deux premières semaines, traduisant la minéralisation rapide des composés peu réfractaires à la dégradation microbienne (Beloso et *al.*, 1993 ; Robertson et Morgan, 1996 ; Hadas et Portnoy, 1997).

e) le rapport d'humification (AH/AF)

L'étude du procédé de compostage comme processus d'humification a conduit des auteurs à orienter leurs travaux vers l'étude de la matière organique humifiée. Le fractionnement chimique de la matière organique en acides fulviques, humiques et humine a conduit certains auteurs à calculer des indicateurs de maturité à partir des différentes fractions. Le plus couramment utilisé est le rapport AH/AF. Ce rapport augmente au cours du compostage qui est un processus d'humification (Saviozzi *et al.*, 1988). Une valeur de AH/AF inférieure à 1 indique des composts non mûrs et une valeur supérieure à 1 ou 3 indique des composts mûrs.

f) Tests de phytotoxicité

La stabilisation de la matière organique au cours du compostage est une condition pour réduire les risques de phytotoxicité des composts (Hirai *et al.*, 1986). Les tests de phytotoxicité généralement utilisés reposent sur des mesures de la croissance des plantes (Hirai, 1987 ; Garcia *et al.*, 1992) : la germination de graines (Zucconi *et al.*, 1981 ; Garcia *et al.*, 1992 ; Wu *et al.*, 2000) ou le développement racinaire (Brinton et Evan, 2000).

L'effet phytotoxique d'un compost insuffisamment mûr provient d'une éventuelle compétition nutritive par la biomasse fermentaire et de la présence d'ammoniac en concentration trop forte. (Hirai *et al.*, 1986 ; Iglésias-Jimenez et Perez-Garcia, 1989 ; Garcia *et al.*, 1992).

Le test couramment utilisé est le test CRESSON qui est basé sur la germination et la croissance d'une plante : le cresson (*Cresson alenois*). D'autres plantes telles que le tabac, le ray-gras peuvent aussi être utilisées pour ce test. (Spohn, 1978 ; Zucconi, 1981).

g) Analyses spectrales

Les analyses spectrales sont utilisées pour caractériser la nature chimique des matières organiques. Ces méthodes permettent une meilleure compréhension des processus de dégradation de la matière organique au cours du compostage. Les principales techniques utilisées pour étudier la stabilisation des composts sont la spectrométrie infrarouge (IR), la

résonance magnétique nucléaire (RMN) et la pyrolyse couplée à un spectromètre de masse (Chen, 2003).

Tableau II.2 : Différentes méthodes d'évaluation de la maturité des composts (Francou, 2003)

	Tests	Exemples de références
Physique	Température	(Harada <i>et al.</i> , 1981 ; Kapetanios <i>et al.</i> , 1993)
	Odeur	(Sugahara <i>et al.</i> , 1979 ; Morel, 1982)
	Couleur	
Chimique	PH	(Forster <i>et al.</i> , 1993 ; Avnimelech <i>et al.</i> , 1996)
	C/N	(Roletto <i>et al.</i> , 1985 ; Saviozzi <i>et al.</i> , 1988)
	NO ₃ ⁻ /NH ₄ ⁺	(Forster <i>et al.</i> , 1993 ; Sanchez-Monedero <i>et al.</i> , 2001)
	CEC	(Saharinen, 1998)
	AH/AF	(Roletto <i>et al.</i> , 1985 ; Saviozzi <i>et al.</i> , 1988)
	Solvita	(Brinton <i>et Evans</i> , 2000 ; Changa <i>et al.</i> , 2003)
Activité microbienne	CO ₂ émis ou O ₂ consommé	(Nicolardot <i>et al.</i> , 1986 ; Adani <i>et al.</i> , 1995)
	Enzyme	(Forster <i>et al.</i> , 1993 ; Kostov <i>et al.</i> , 1994)
	Auto-échauffement	(Bidlemaier, 1993 ; Weppen <i>et al.</i> , 1998)
	Solvita	(Brinton <i>et Evans</i> , 2000 ; Changa <i>et al.</i> , 2003)
Sur les plantes	Germination	(Garcia <i>et al.</i> , 1992 ; Wu <i>et al.</i> , 2000)
	Croissance	(Garcia <i>et al.</i> , 1992 ; Helfrich <i>et al.</i> , 1998)
	Croissance racinaire	(Zucconi <i>et al.</i> , 1981 ; Brinton <i>et Evans</i> , 2000)
Analyse spectrale	RMN-C13	(Deiana <i>et al.</i> , 1990 ; Chen, 2003)
	Infrarouge	(Provenzano <i>et al.</i> , 1998 ; Chen, 2003)

II.3. Les déchets compostables

Pour Mustin (1987), ce sont avant tous des déchets organiques fermentescibles. Ces déchets sont constitués majoritairement des déchets urbains (ou municipaux) dont l'élimination relève de la compétence des communes. Ces déchets se repartissent en selon les catégories suivantes :

- Les ordures ménagères,
- Les biodéchets ou fraction fermentescibles des ordures ménagères,
- Les boues de station d'épuration,
- Les déchets verts des collectivités locales,
- Les sous produits agricoles et agro alimentaires.

La valorisation organique (compostage) ne concerne qu'environ 7% des déchets fermentescibles en France (ADEME 2001).

Savage (1996) et Francou (2003) relèvent l'influence des caractéristiques des déchets utilisés (déchets organiques solides mélangés ou triés en fonction de leur source) sur la qualité finale des composts.

II.3.1 Les boues de station d'épuration

Les eaux usées urbaines d'origine domestique et les effluents agroalimentaires et industriels de nature organique dominante contiennent de la matière organique dissoute (fraction soluble) dans la phase liquide, et de la matière organique dite « figurée » dans les matières en suspension. Cette dernière fraction est décantable et constitue la boue. C'est un substrat fermentescible souvent riche en éléments minéraux mais toujours difficile à composter en raison de son taux d'humidité élevé et de sa texture. Les boues doivent donc être épaissies ou déshydratées, et un agent structurant est généralement ajouté car les boues sont le plus souvent sans porosité, plastiques avec une tendance nette à la compaction. De plus, du carbone sous forme organique doit être ajouté pour remonter le C/N inférieur à 15 et prévenir les pertes d'azote sous forme d'ammoniac. Souvent, les boues sont compostées avec d'autres sous-produits tels que les déchets verts, les copeaux de paille, les palettes ou les biodéchets. 2 à 5% des boues de stations d'épuration sont compostés en France (FNADE. 2002).

II.3.2. Les ordures ménagères

Les ordures ménagères sont des déchets compostables par leur deux premiers composants dominants en masse : papier-carton et matières végétales et animales, soit 35 à 70 % de la masse totale. Cependant, la nature hétérogène et variable des ordures ménagères est un obstacle au compostage. Un tri préalable est donc nécessaire, ainsi qu'un broyage.

De plus en plus souvent un tri des emballages recyclables (carton, papier, verre, récipients plastiques et métalliques) permet d'améliorer la qualité des déchets à composter (Ordures ménagères grises). La qualité du compost dépendra beaucoup de la collecte en amont pour ce type de déchets ainsi que du tri sur le site de compostage.

II.3.3. Les biodéchets ou fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM)

Ce sont les déchets de cuisines et les reliefs de repas (cantines, restaurants, supermarchés). Une collecte sélective des biodéchets permet d'obtenir un matériau valorisable par compostage. 90 000 tonnes de biodéchets ont été transformées en 25 000 tonnes de compost sur une trentaine de plates formes, en France, en 2000 (ADEME 2001).

II.3.4. Les déchets verts

Le compostage des déchets verts s'est particulièrement développé dans les années 1990. Les déchets verts regroupent essentiellement les déchets verts de jardin. On y associe parfois les sous produits ligneux.

Les sous-produits ligneux (écorces, sciures, copeaux, boues cellulosiques...) compostés sont proches des humus naturels de forêt. La nature des déchets ligneux détermine leur évolution. Ainsi on distingue les arbres résineux, au bois peu dense et riche en composés phytotoxiques et les feuillus, qui diffèrent par leur lignine et leur densité plus forte. Les composts forestiers, peu riches en éléments minéraux utilisables, sont avant tout des amendements humifères. Leurs propriétés physiques les rendent utilisables comme support de cultures substituables aux tourbes.

II.3.5. Les sous-produits agricoles et agroalimentaires

Leur nature organique est largement dominante, ce qui permet leur compostage. Les fumiers et lisiers ne sont compostés que pour être directement épandus ou parfois servir de source de matières azotées dans les engrais organiques.

Dans l'ensemble, l'intérêt majeur du compostage reste lié, pour ces sous-produits, à l'hygiénisation des produits animaux et à la très bonne désinfection et inhibition des parasites pathogènes des végétaux.

II.4. Valorisation du compost

La valorisation des déchets issus de la biomasse obéit à certaines priorités à savoir : la finalité industrielle (matière première, recyclage), la finalité alimentaire (extraction de molécules organiques) et la finalité énergétique. Il existe plusieurs types de valorisation du compost (Devischer, 1997). Nous insisterons beaucoup plus sur la valorisation agronomique qui est l'objet de notre étude. Les autres types de valorisations sont la valorisation énergétique et la valorisation environnementale.

II.4.1. La valorisation agronomique

Les composts sont avant tout utilisés en agriculture comme apport de matière organique, ils doivent suivre la réglementation pour une homologation en fonction des normes.

L'apport de compost ne représente pas seulement une restitution légitime à la terre de ce qui lui a été enlevé : du point de vue agronomique, l'apport de compost a un rôle important à tenir dans le maintien d'une bonne qualité du sol pour satisfaire pleinement aux exigences des plantations.

La valorisation agronomique des déchets organiques consiste au retour au sol des matières organiques après transformations ou non de ces déchets. Ce retour au sol est encadré par la loi française qui définit deux options fondamentales distinctes :

- La transformation du déchet en matière fertilisante : application du cadre « Production de matière fertilisante dérivée de déchet »
- Conservation du statut de déchet : application du cadre « Epannage contrôlé »

Dans les matières fertilisantes on distingue quatre types :

- Les amendements organiques (NF U 44-051) sont des matières fertilisantes composées principalement de combinaisons carbonées d'origine végétales fermentées ou fermentescibles. Les amendements organiques possèdent par définition moins de 3% d'azote, ils participent à l'entretien ou à l'amélioration des propriétés physico-chimiques et biologiques des sols. Ils ne participent pas directement à la nutrition des plantes (Mustin, 1987 ; Devischer, 1997 ; Leclerc, 2001).

- Les amendements calciques ou magnésiens (NFU 44-001). Les amendements calcaires ont le rôle de régulariser l'état ionique de la solution et du complexe argilo-humique, créant ainsi un milieu favorable à l'activité biologique et à la nutrition des plantes. Les amendements magnésiens s'y rattachent, calcium et magnésium ayant des rôles voisins se trouvant liés dans certains amendements.
- Les supports de cultures (NF U 44-551) : produits destinés à servir de milieu de culture à certains végétaux. Leur mise en œuvre aboutit à la formation de milieux possédant une porosité en air et en eau telle qu'il sont capables à la fois d'ancrer les organes absorbants des plantes et de leur permettre d'être en contact avec les solutions nécessaires à leur croissance.
- Les engrais (NF U 42 001) : A l'opposé des amendements organiques, les engrais participent seulement à la nutrition de la plante soit directement (engrais passant dans la solution du sol) soit indirectement en corrigeant les réserves du sol en un ou plusieurs éléments (fertilisation de redressement). En aucun cas ils n'agissent sur la structure du sol.

Les composts sont utilisés comme amendement pour rétablir le niveau de matière organique dans un sol. Ce n'est pas un fertilisant au sens habituel du terme : les substances nutritives qu'il peut contenir (azote et phosphore) sont en quantité trop faible pour justifier le transport et les frais d'épandage. Mais ces apports sont indispensables dès que les conditions agricoles conduisent à une consommation élevée en matière organique par exemple en cas d'humidité et de température élevée, dans le cas des terres de maraîchage intensif du sud de l'Europe.

Le compost s'utilise comme amendement organique. Cependant il doit être suffisamment stabilisé pour ne pas entraîner des risques de blocage de l'azote du sol ou des engrais (« faim d'azote ») (Dondey, 1994 ; Devischer, 1997).

Nous donnons ici quelques exemples d'utilisation du compost en cultures spéciales :

- **Maraîchage, horticulture d'ornement** : C'est dans ce domaine qu'un compost de bonne maturité pourra avoir les meilleurs débouchés car il n'y a pas de contraintes de productivité ou de normes alimentaires (cas de l'ornement) des productions. Son utilisation sera particulièrement intéressante comme amendement organique de fond pour les plantations d'arbres et l'installation de nouveaux gazons.

- **Culture de champignons** : Ces derniers, décomposeurs primaires de la matière organique fraîche se satisfont de composts grossiers faiblement matures.
- **Viticulture, arboriculture** : Les composts y sont principalement utilisés comme mulch pour la protection des sols souvent dénudés et en pente, contre l'érosion et comme apport de masse à la plantation. Des produits grossiers en qualité comme la granulométrie peuvent trouver leur usage et l'ont trouvé fort longtemps dans des zones géographiques limitées.
- **Agriculture biologique** : Les produits bénéficiant du label « biologique » doivent respecter un cahier des charges de production. Cette agriculture exclut l'utilisation de produits chimiques de synthèse et le sol doit être fertilisé avec des engrais naturels. Le compost peut trouver un bon débouché auprès des agriculteurs « biologiques ».
- **Jardinage** : dans les jardins potagers et dans les vergers, la faible superficie concernée, la relative intensification des productions, la succession des cultures sur la même planche sans période de jachère, rendent obligatoires le maintien d'une bonne structure et d'une activité biologique soutenue du sol. L'utilisation de compost dans le jardin est donc, de ce fait une nécessité et peut absorber ainsi les déchets des jardins voire les déchets ménagers.

II.4.2 Valorisation environnementale

Il s'agit à l'origine de la mise en place de filtres à compost : les macromolécules humiques des composts mûrs ont en effet un fort pouvoir adsorbant et cette propriété est mise à profit dans certains systèmes de traitement des effluents gazeux ou liquides. Ce système de filtre actif peut être utilisé comme système de filtration des odeurs dans une station d'épuration ou une station de traitement des ordures ménagères. Le compost est aussi très efficace dans la rétention des composés organiques malodorants et toxiques (mercaptans, thioesters, ammoniac).

D'autres filières de valorisation environnementale du compost sont aussi développées :

- Remise en état des sols dégradés, notamment ceux des forêts calcinées.
- Réhabilitation d'anciennes décharges.
- Végétalisation des sites comme les carrières.
- Equipements urbains ou couverture des banquettes d'autoroute.

II.4.3 Valorisation énergétique

Cette filière, très méconnue de nos jours, s'est développée avec la crise énergétique des années 70 – 80. Le principe de la valorisation énergétique du compost est de récupérer l'énergie dégagée soit au niveau du tas soit au niveau du fermenteur, pour cela on peut :

- Installer un échangeur eau – compost dans la masse en fermentation (tuyau de polyéthylène ou de polypropylène) et y faire circuler l'eau qui s'échauffe progressivement à ce contact.
- Récupérer les calories sur l'extrait par aération forcée dans un fermenteur ou sur tas.

Diverses expériences ont montré que ces deux techniques dites « à calories basses températures » peuvent être mises en place et rentabilisées pour la production agricole sous serre et pour la production d'eau chaude.

Cette voie souffre de la concurrence de la méthanisation autre voie de valorisation organique des déchets beaucoup plus rentable en énergie (Boulala et *al.*, 2002).

Conclusion sur le compostage : Objectifs de l'étude

Le compostage correspond à la mise en œuvre d'une technologie très pointue. Si à la base, le phénomène est simple : action de micro-organismes de façon spontanée sur la matière organique, il nécessite en fait un grand savoir-faire puisque cette réaction de base va être orientée par le contrôle de certains paramètres (température, oxygène, humidité), il ne s'agit pas seulement de faire dégrader la matière organique à disposition par des micro-organismes mais de la dégrader « efficacement » de façon à pouvoir obtenir un produit : le compost possédant certaines qualités internes qui vont permettre de le valoriser.

L'application de ce procédé, ancestral dans son principe et son utilisation, a été « redécouvert » récemment sous la pression d'une politique anti-gaspillage et s'est traduit dans la pratique par la mise en place de **plates-formes de compostage** qui ont pour objectif de traiter les déchets organiques produits aussi bien par les ménages que les industries (bois, agro-alimentaire) ou les exploitations agricoles.

Même si chaque unité de compostage possède ses propres caractéristiques en fonction du type de déchets traités, elles n'en demeurent pas moins basées sur un même schéma d'organisation, lui-même directement issu de la technologie du compostage.

L'objectif de cette étude sera d'évaluer le niveau de maturité des composts sur différents sites de compostage. Il s'agira pour nous de voir l'influence du type déchets, du procédé de compostage et de l'âge du compost sur la qualité (maturité) du compost.

Le travail consistera :

1. A une phase d'échantillonnage de composts prêt à être commercialisés sur sites,
2. Une caractérisation physico – chimique : teneurs en matière sèche (MS) en matière organique totale (MOT) et en carbone organique totale (COT),
3. Une appréciation de leur maturité à l'aide des tests Solvita et Rottegrad,
4. Des études plus poussées concernant la stabilisation de la matière organique par suivi de la minéralisation de leur matière organique au cours des incubations en conditions contrôlées de mélanges sol – composts.

III. MATERIELS ET METHODES

III.1. Echantillonnage

Les échantillons de compost utilisés au cours de notre étude proviennent de différentes plates formes (sites de compostage) de ONYX et Scale Environnement. Ce sont des composts d'ordures ménagères grises (OMG) de déchets verts (DV) et de boues (Tableau III.1 et Annexe A.4). Chaque site de compostage utilise un procédé spécifique. Les détails de ces procédés sont donnés dans le tableau III.2.

Nous avons adopté les appellations suivantes pour les différents composts étudiés :

- **OMG** : pour les composts d'ordures ménagères grises.
- **DV** : pour les composts de déchets verts
- **DVBIO** : pour les composts de déchets verts et de biodéchets
- **BDV** : pour les composts de boues et déchets verts.

Ainsi nous nommerons nos échantillons comme indiqués dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Les différents échantillons de composts étudiés

Types de composts	Déchets compostés	Nom de l'échantillon
Ordures ménagères grises	Ordures ménagères grises	OMG1
		OMG2
		OMG3
		OMG4
	Ordures ménagères grises et déchets des IAA	OMG5
Déchets verts	Déchets verts	DV1
		DV2
		DV3
		DV4
		DV5
		DV6
Déchets verts et biodéchets	Déchets verts et bio divers	DVBIO1
Boues	Boues, palettes, bois et refus SEDE	BDV1
	Déchets verts, palettes, refus SEDE et boues	BDV2

III.2. Analyses physico – chimiques

Les analyses ont été réalisées en partie au CReeD et dans les laboratoires de l'Institut National Agronomique de Paris – Grignon (INA-PG) dans le cadre de la collaboration CReeD/INRA. Nous n'avons pas effectué toutes les analyses physico – chimiques sur la qualité des composts à cause de la durée trop courte de notre période de stage.

III.2.1. Teneur en matière sèche (MS)

Dans une boîte tarée de masse m on place une aliquote de compost. L'ensemble est pesé avant (M_1) puis après séchage à l'étuve (M_2) à 105°C. On considère que le séchage est fini lorsque la masse ne varie plus (environ 48 heures). La teneur en matières sèches est donnée par la formule ci après. Trois répétitions sont réalisées pour chaque échantillon.

$$MS = 100 \times \frac{M_2 - m}{M_1 - m} \text{ (en \% de la masse totale)}$$

III.2.2. Teneur en matière organique totale (MOT)

La teneur en MOT est déterminée par pesée (M_3) après calcination à 480°C pendant 6 heures de l'échantillon obtenu après séchage à 105°C. La MOT s'exprime en % de MS à 105°C. Pour chaque échantillon nous avons réalisé trois répétitions.

$$MOT = 100 \times \frac{M_2 - M_3}{M_2 - m} \text{ (en \% MS à 105°C)}$$

III.2.3. Teneur en carbone organique total (COT)

Elle est déterminée après combustion sèche (Norme ISO 10694). La teneur en CO₂ dégagé après oxydation du carbone total à 900°C sous flux d'oxygène est déterminée par catharométrie à l'aide d'un détecteur infrarouge (Appareil Shimadzu Détecteur TOC 5050A Four SSM 5000A). L'échantillon est d'abord séché puis broyé. Une aliquote est pesée de

manière à être dans la gamme correspondant à une échelle choisie en fonction du pourcentage en MOT initialement calculé. Pour chaque échantillon nous avons effectué trois répétitions. Le COT est exprimé en g/Kg ou en % de MS à 105°C.

III.2. Tests de maturité

III.2.1. Préparation des échantillons

Les tests de maturité sont réalisés sur tous les échantillons frais. L'échantillon est tamisé (taille des mailles 10 mm), puis l'humidité est ajustée entre 40 et 50% suite au test de la poignée la veille de l'analyse (FCQAO., 1994). Le test de la poignée consiste à presser l'échantillon de compost dans la main. Si l'échantillon s'effrite de lui même quand on ouvre la main, le compost est trop sec et doit être humidifié. L'humidité est bonne si l'échantillon s'effrite sous une légère pression du pouce. S'il est seulement déformé et ne s'effrite pas lors de la pression légère, il est trop humide et doit être séché.

III.2.2. Indice SOLVITA[®]

Une quantité de l'échantillon (environ 100ml) est placée dans un récipient de 250 ml hermétiquement fermé et contenant deux indicateurs colorés. Un indicateur mesure le carbone minéralisé et vire en fonction du CO₂ dégagé et le second indicateur mesure l'azote volatilisé et vire en fonction du dégagement du NH₃. L'ensemble est placé dans une enceinte thermostatée 25°C pendant 4 heures. Les indices en fonction des couleurs varient de 1 à 8 pour le CO₂ et de 1 à 5 pour l'ammoniac et sont compilés en un indice de maturité variant de 1 pour le compost frais à 8 pour le compost considéré comme mûr (Tableau III.3).

Tableau III.3 : Grille de détermination de l'indice de maturité SOLVITA® en fonction des indices CO₂ et NH₃ et interprétation (Woods End® Research Laboratory , USA ; Francou 2003).

		CO ₂ SOLVITA								
		CO ₂ élevé				CO ₂ faible				
NH ₃ SOLVITA	NH ₃ faible		1	2	3	4	5	6	7	8
		5	1	2	3	4	5	6	7	8
		4	1	2	3	4	<i>Maturation</i>		7	8
		3	1	1	<i>Dégradation</i>		4	5	6	7
	NH ₃ élevé	2	1	<i>Frais</i>	1	2	3	4	5	6
		1	1	1	1	1	1	2	3	4

Selon le fabricant, on distingue trois classes principales de maturité des composts par rapport à l'indice Solvita : compost frais ($I_{Solvita} < 3$), compost « actif » en dégradation ou maturation : ($I_{Solvita} = [3 ; 6]$), compost fini ou mûr ($I_{Solvita} > 6$).

III.2.3. Test d'auto - échauffement

Ce test est décrit par la norme allemande FCQAO 1994. Il est basé sur la mesure de la température maximale d'un échantillon de compost après incubation en conditions contrôlées pendant plusieurs jours. On remplit un vase (isotherme DEWAR) de 1,5 l par l'échantillon de compost préparé comme précédemment sans tassement actif. Un thermomètre dont le capteur est placé à 20 cm sous la surface du compost permet de lire la température à l'intérieur du vase qui est ouvert en son sommet et placé dans une enceinte thermostatée à 25°C pendant 10 jours. Le degré de maturité de l'échantillon de compost est estimé par la température maximale atteinte (Tableau III.4). Cet indice va de I (température maximale supérieure à 60°C) pour un compost assimilé à de la matière brute, à V (température maximale inférieure à 30°C) pour un compost considéré comme mûr. Les autres indices sont indice II (température maximale entre 50 et 60°C), indice III (température maximale entre 40 et 50°C) et indice IV (température maximale entre 30 et 40°C) et correspondent aux niveaux intermédiaires.

Tableau III.4 : Valeurs de l'indice de maturité du test d'auto – échauffement en fonction de la température maximale (T_{\max}) atteinte (FCQAO 1994).

	Compost frais	Intermédiaire			Compost mûr
T_{\max} (°C)	60-70	50-60	40-50	30-40	< 30
Rotting degree (indice DEWAR)	I	II	III	IV	V

III.3. Minéralisation du carbone

III.3.1. Incubation en conditions contrôlées

a. Principe

L'objectif ici est de déterminer la biodégradabilité du carbone des composts. La minéralisation est due à l'activité microbienne des sols d'où les conditions optimales de l'activité microbienne exigées pour l'incubation (température 28°C et humidité équivalente à pF 2,8).

Il s'agit ici expérimentalement de mettre en place une incubation de mélange sol-compost et de suivre en fonction du temps la minéralisation de carbone organique en C-CO₂, ce qui conduit à des cinétiques de minéralisation du carbone et de l'azote en fonction du temps.

Le suivi de la minéralisation du carbone organique en CO₂ au cours des incubations se fait par piégeage du CO₂ dégagé dans une solution de soude. Périodiquement, le piège de soude est prélevé pour analyses et remplacé dans les flacons d'incubation par un piège de soude de même volume et même normalité. Le C-CO₂ est ensuite analysé dans la soude par colorimétrie en flux continue au SKALAR (Annexe A.3).

b. Mode opératoire

Les incubations ont été réalisées avec du sol frais tamisé à 5 mm dont l'humidité est équivalente à pF 2,8. Il s'agissait d'un sol limoneux - argileux de teneur en matière organique inférieure à 1% et provenant des parcelles du dispositif de FEUCHEROLLES (INA – Paris – Grignon) (Programme QUALIAGRO CReeD – INRA).

Les échantillons de composts ont été séchés (40°C) et broyés à une maille de 1 mm. Les incubations des mélanges sol-composts ont été réalisées avec 25 g du sol pesé dans des flacons et une masse de compost apportant 50 mg de carbone soit 2‰ de la masse du sol. Les incubations témoins sont réalisées avec la même masse de sol seul. Les mélanges ont été placés dans des flacons d'incubation de 500 ml. Un pilulier contenant 10 ml de NaOH à 0,5 N est placé dans les bocaux d'incubation.

Les dates de mesures sont le 1^{er}, 3^e, 7^e, 10^e, 14^e, 21^e et le 28^e jour d'incubation. A chaque date de mesure le pilulier de NaOH est remplacé par un pilulier équivalent. Avant analyse les piluliers contenant de la soude sont placés dans un dessiccateur pour limiter la contamination par le CO₂ atmosphérique.

III.3.2. Dosage du C-CO₂

a. Principe

Le CO₂ dégagé au cours d'une incubation est solubilisé sous forme de carbonate dans la soude NaOH de normalité variable. La mesure du CO₂ s'effectue en deux temps :

- Libération du CO₂ piégé par la soude par acidification du milieu par l'acide sulfurique : $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{SO}_4$
- Le CO₂ ainsi dégagé est repris dans une solution tamponnée carbonate-bicarbonate contenant de la phénolphthaléine coloré à pH = 8,6 à 50°C. Cette solution s'acidifie en piégeant le CO₂. Cette acidification entraîne une diminution de couleur, qui est mesurée à 550 nm avec un spectrophotomètre. Le passage d'un échantillon provoque la décoloration qui se traduit à l'enregistrement par un pic dont la hauteur est proportionnelle à la diminution de la densité optique. La comparaison de la hauteur des pics d'une gamme étalon et des échantillons permet de calculer les concentrations de C- CO₂. La comparaison se fait automatiquement à l'aide d'un logiciel de calcul (SKALAR61).

b. Mode opératoire

Le protocole suivi est décrit de la manière suivante : une gamme de 4 étalons au moins a été préparée puis conservée au réfrigérateur. Pour chaque analyse, une aliquote de 2,5 ml

environ de chaque étalon est mise dans un godet transparent blanc puis bouchée avec du parafilm.

De même une aliquote de 2,5 ml de chaque échantillon, conservée dans un dessiccateur, est placée dans un godet et recouvert par du parafilm.

L'appareil (Skalar, Sampler 1000, Pompe 6010, Photometer 6010) est mis en route et la longueur d'onde est réglée à 920 nm. Les godets contenant les étalons, échantillons et l'eau pour le lavage sont placés sur le passeur d'échantillon suivant un ordre bien défini (photo en annexe). Au fur à mesure de la progression de l'analyse un intégrateur fournit les pics correspondant aux différents échantillons analysés.

III.3.3. Expressions des résultats

A la fin de chaque analyse un logiciel permet de calculer la quantité de C-CO₂ en mg/l de volume de soude qu'on peut ramener en g/kg de sol sec connaissant le volume de soude utilisé.

La quantité de C-CO₂ minéralisé par le sol seul ou le mélange sol + compost est donnée par la relation :

$$C_{\text{sol+comp}} = (c_{\text{solution}} - c_{\text{blanc}}) \frac{V_{\text{NaOH}}}{m_{\text{sol}}}$$

Avec :

$C_{\text{sol+comp}}$ = C minéralisé par le mélange sol + compost (mg/Kg sol sec)

c_{solution} = C-CO₂ dans la solution de NaOH (mg/l)

c_{blanc} = C-CO₂ dans la solution de NaOH du mouchard (mg/l).

V_{NaOH} = Volume de NaOH (ml)

m_{sol} = masse de sol (g)

On en déduit la quantité de carbone minéralisé provenant du compost par la relation :

$$C_{\text{comp}} = \frac{(C_{\text{sol+comp}} - C_{\text{sol seul}})}{m_{\text{comp}}}$$

Avec :

C_{comp} = C du compost minéralisé (g/Kg de compost sec)

$C_{\text{sol seul}}$ = Carbone minéralisé pour le sol seul (mg/Kg de sol sec)

$m_{s_{comp}}$ = masse de compost (g)

En pourcentage on aura :

$$C_{comp} (\%COT) = 100 \times \frac{C_{comp} (\text{g/Kg compost sec})}{COT (\text{g/Kg compost sec})}$$

III.3.4. Stabilité de la matière organique des composts

La stabilité d'un compost traduit l'aptitude ou le degré du compost à résister à une dégradation microbienne lorsqu'il est incorporé au sol lors des incubations en conditions contrôlées.

Francou (2003) appelle coefficient de biodégradabilité à 28 jours (CB28), la proportion de carbone organique du compost minéralisé en 28 jours d'incubation à 28 °C dans des mélanges sol-composts. A partir de ce coefficient il a défini cinq classes de stabilité allant du compost très instable au compost très stable (tableau III.5).

$CB_{28} = \frac{\text{CCO}_2 \text{ issu de la minéralisation du COT du compost après 28 jours d'incubation}}{\text{COT du compost}} * 100$
--

Tableau III.5 : Classes de stabilité basée sur la minéralisation du carbone en conditions contrôlées (Francou 2003).

C minéralisé (% COT)	[0 ; 6]] 6 ; 10]] 10 ; 15]] 15 ; 23]	> 23
Classe de stabilité	Très stable	Stable	Moyennement stable	Instable	Très instable

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Caractéristiques physico – chimiques des échantillons

La détermination des caractéristiques physico – chimiques des échantillons est la phase initiale pour les analyses sur la maturité des composts, en effet ces caractéristiques permettent une interprétation des résultats d’incubations en conditions contrôlées et des tests de maturité (Solvita et Rottegrad). Nous n’avons que déterminées les teneurs en matières sèche (MS) en matière organique totale (MOT) et en carbone organique total (COT). Les résultats sont consignés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Caractéristiques physico – chimiques des composts

Type de compost	Echantillons	Age	Paramètres physico - chimiques		
			MS (%)	MOT (% MS)	COT (% MS)
Ordures ménagères grises	OMG1	5 mois	52,7 ± 1,3	53,2 ± 2,2	17,7 ± 0,5
	OMG2	4 mois	57,5 ± 0,2	63,3 ± 0,3	16,2 ± 1,8
	OMG3	40 jours	79,2 ± 1,3	54,6 ± 2,5	24,7 ± 1,4
	OMG4	2 mois	86,7 ± 1,3	60,3 ± 0,6	33,0 ± 1,4
	OMG5	12 mois	56,7 ± 0,2	64,5 ± 1,6	35,7 ± 2,5
Déchets verts	DV1	8 mois	66,3 ± 1,4	43,9 ± 0,5	20,4 ± 1,3
	DV2	7 mois	79,5 ± 1,3	49,7 ± 0,6	24,7 ± 1,2
	DV3	6 mois	67,8 ± 0,3	50,6 ± 1,4	24,8 ± 1,6
	DV4	5 mois	53,2 ± 0,2	49,9 ± 1,3	31,7 ± 1,5
	DV5	8 mois	69,7 ± 1,1	52,6 ± 1,5	25,8 ± 0,5
	DV6	8 mois	73,9 ± 1,2	50,7 ± 2,3	24,9 ± 0,8
Déchets verts et biodéchets	DVBIO1	6 mois	60,2 ± 0,5	40,7 ± 1,3	21,3 ± 0,3

On observe pas une grande différence suivant le type de compost, sauf pour OMG4. Dans tous les cas les teneurs en matière sèche sont supérieures à 50% ce qui signifie qu’il n’y a pas d’humidité excessive. Pour le compost d’ordures ménagères, les échantillons les plus secs sont OMG3 et OMG4. Ce sont les composts les plus jeunes et aussi ce sont des échantillons dont le processus de compostage a été piloté par la température. Dans les composts de déchets verts, le plus humide est le plus jeune, cela peut être expliqué par une perte d’eau par évaporation au cours du compostage. DV2 est plus sec que DV1 pourtant c’est le même processus et en plus DV1 est plus jeune, cela peut être expliqué par les conditions atmosphérique en début de compostage ou les mélange initiaux.

Les teneurs en matières organique varient en moyenne de 59% pour les composts d’OMG, 49,6% pour les DV et 40,7% pour DVBIO ce qui montrent une grande différence suivant le type de composts ; c’est l’effet type de déchet, les ordures ménagères contiennent

plus de matière organique que les déchets verts à l'état initial (Riffaldi et al., 1986 ; Vallini et al., 1993). Il peut aussi avoir l'effet de l'âge car les composts de déchets verts sont plus vieux par rapport à ceux d'ordures ménagères. OMG2 contient plus de matière organique que OMG1 cela est lié à l'effet de retournement durant la maturation et surtout à la durée de compostage ; il est connu que quand la durée de compostage augmente la teneur en matière organique diminue.

La teneur en COT est plus faible dans les composts de déchets verts que les composts d'ordures ménagères ; les rapports moyens MOT/COT sont de l'ordre de 1,92 pour les composts de déchets verts et biodéchets et 2,14 pour les composts d'ordures ménagères. Les Composts de déchets verts présentent donc de fortes proportions en carbone minéral que les composts d'ordures ménagères.

Les composts OMG1 et OMG2 montrent des teneurs en COT plus faibles à celles de la bibliographie probablement dues à la nature des déchets entrants. En effet Pour les déchets verts, Riffaldi et al (1986) et Vallini et al (1993) trouvent des valeurs de COT de 20 à 30%. Cette teneur est de 25 à 50% pour les composts d'ordures ménagères (Garcia et al., 1992 ; Avnimelech et al., 1996).

IV.2. Test SOLVITA

Nous rappelons que ce test est basé sur la minéralisation du carbone sous forme de CO₂ et la volatilisation de l'ammoniac. Les différents indices obtenus avec nos échantillons sont donnés dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 : Classe de maturité des composts selon l'indice solvita

Type de compost	Echantillons	Age	Solvita			Degré de maturité
			CO ₂	NH ₃	Indice	
Ordures ménagères grises	OMG1	5 mois	3	4	3	Compost en dégradation
	OMG2	4 mois	4	4	4	Compost en maturation
	OMG3	40 jours	3	4	3	Compost en dégradation
	OMG4	2 mois	3	5	3	Compost en dégradation
	OMG5	12 mois	5	4	5	Compost en maturation
Déchets verts	DV1	8 mois	7	5	7	Compost mûr
	DV2	7 mois	7	5	7	Compost mûr
	DV3	6 mois	7	5	7	Compost mûr
	DV4	5 mois	5	5	5	Compost en maturation
	DV5	8 mois	6	5	6	Compost en maturation
	DV6	8 mois	6	5	6	Compost en maturation
Déchets verts et biodéchets	DVBIO1	6 mois	6	5	6	Compost en maturation

Les échantillons les plus âgés présentent ont un degré de maturité élevé qui se traduit par des indices Solvita élevés.

Selon le fabricant, on distingue trois classes principales de maturité des composts par rapport à l'indice Solvita : compost frais ($I_{Solvita} < 3$), compost fini ($I_{Solvita} > 6$), compost « actif » ($I_{Solvita} = [3 ; 6]$). A partir de cette classification et du degré de maturité du tableau II.6, nous pouvons attribuer aux échantillons les degrés de maturité du tableau IV.2. Il ressort de cette classification que les composts d'ordures ménagères sont pour la plus part en phase de dégradation, alors que parmi les composts de déchets verts et de biodéchets, les échantillons DV1, DV2 et DV3 sont mûrs ; les échantillons DVBIO1, DV4 ,DV5 et DV6 sont en phase de maturation.

Ces résultats ne nous permettent pas de bien repartir nos échantillons, cependant si l'on dissocie les résultats de CO_2 et NH_3 , on remarque que le degré attribué dépend beaucoup plus de la minéralisation du carbone que de la volatilisation de l'azote (tableau IV.2). Ces observations ont été confirmées par Changa et al. (2003) qui estiment une faible corrélation entre l'indice NH_3 et les autres indicateurs alors que l'indice CO_2 est un bon indicateur.

IV.3. Test ROTTEGRAD

Ce test estime le niveau de stabilité de la matière organique d'un compost à partir de la température maximale atteinte après au moins 10 jours en vase. Les différents indices relevés pour nos échantillons sont consignés dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Classe de maturité des composts selon l'indice Rottegrad

Type de compost	Echantillons	Age	Rottegrad		Degré de maturité
			T° max. (°C)	Indice	
Ordures ménagères grises	OMG1	5 mois	60	I	Compost frais
	OMG2	4 mois	58	II	Intermédiaire
	OMG3	40 jours	70	I	Compost frais
	OMG4	2 mois	63	I	Compost frais
	OMG5	12 mois	72	I	Compost frais
Déchets verts	DV1	8 mois	30	IV	Intermédiaire
	DV2	7 mois	35	IV	Intermédiaire
	DV3	6 mois	32	IV	Intermédiaire
	DV4	5 mois	33	IV	Intermédiaire
	DV5	8 mois	39	IV	Intermédiaire
	DV6	8 mois	39	IV	Intermédiaire
Déchets verts et biodéchets	DVBIO1	6 mois	32	IV	Intermédiaire

Ces résultats confirment le degré de maturité plus faible des composts d'ordures ménagères par rapport aux composts de déchets verts et de biodéchets.

Les composts d'ordures ménagères qui contiennent des teneurs en matières organiques élevées par rapports au compost de déchet verts ont les indices Rottegrad les plus faibles.

Ces résultats ne permettent pas de bien séparer les échantillons surtout pour des composts d'un degré de maturité élevée. Cependant après cinq mois les composts de déchets verts présentent un degré de maturité élevé.

Avec cette indication, tous les composts de déchets verts ont un degré de maturité élevé dès cinq mois, les composts d'ordures ménagères sont peu matures même après une durée de compostage longue (OMG1 et OMG5) et avec un processus accéléré.

IV.4. Minéralisation du carbone

IV.4.1. Cinétiques de la minéralisation

Les différentes courbes de minéralisation présentent une phase rapide de minéralisation en début d'incubation (10 –14 jours) (figures IV.1 et IV.2). Cette forte quantité de carbone produite est due à la présence d'éléments facilement biodégradables, En fin d'incubation on observe une baisse du taux de minéralisation due à la disparition d'éléments faciles à biodégrader.

Les figures IV.1 et IV.2 montrent deux grandes familles, une première famille composée des compost d'ordures ménagères (OMG1, OMG2, OMG3, OMG4 et OMG5) qui présentent une forte minéralisation en début d'incubation après deux semaines : 20% de carbone minéralisé et 25 à 30% après 28 jours d'incubation. La deuxième famille est constituée par les composts de déchets verts et de biodéchets (DV3, DV4 et DV BIO1) qui montrent une minéralisation assez lente 5 à 10% après deux semaines et 7 à 12% après 28 jours. Notons que OMG2 minéralise un peu moins que OMG1 ce qui confirme le Rottegrad.

Ces observations confirment celles d'autres auteurs (Hadas et Portonoy 1997, Francou 2003). Les composts d'ordures ménagères présentent les plus fortes teneurs en carbone minéralisé (figure IV.1).

Pour les composts de déchets verts et de biodéchets, la proportion de carbone minéralisé varie de 7,5 (DV3) à 10,4 (DV4). Cette proportion est de 21,88 (OMG2) à 25,87

(OMG1) pour le compost d'ordures ménagères. Ces résultats sont les mêmes que ceux obtenus par Garcia et *al* en 2003 sur un compost végétal (11% à 15% de carbone minéralisé) et par Francou (2003) pour des composts de déchets verts de six mois des taux de 6 à 9% de carbone minéralisé.

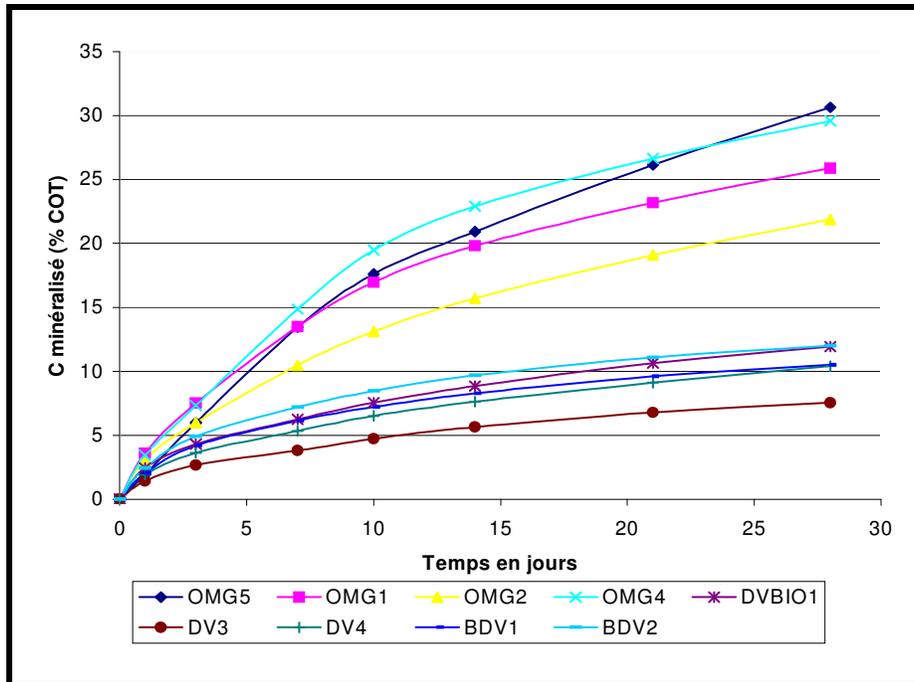


Figure IV.1 : Cinétiques de minéralisation du carbone en % COT de tous les composts étudiés.

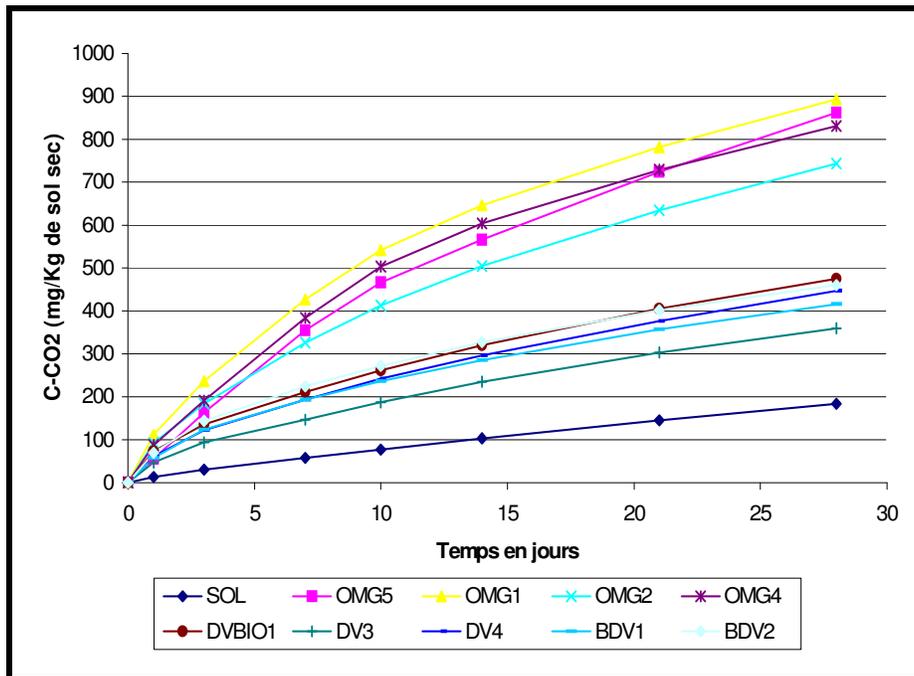


Figure IV.2 : Cinétiques de minéralisation du carbone en mg/kg de sol sec de tous les composts étudiés

IV.4.2. Etude de la stabilité des composts

Le degré de stabilité d'un compost traduit l'aptitude de la matière organique du compost à résister à une dégradation microbienne lorsqu'il est incorporé au sol ce degré de stabilité est évalué lors des incubations en conditions contrôlées. Les cinétiques de la minéralisation en conditions contrôlées de nos échantillons sont données par les figures IV.1 et IV.2.

Les résultats de minéralisation permettent de classer les composts dans les cinq classes de stabilité proposées par Francou (2003) (Tableau III.5 Partie III) ; le degré de stabilité par rapport au carbone organique des composts étudiés sont ceux du tableau IV.4.

Tableau IV.4. : Degré de stabilité des composts étudiés

Echantillons	Age	C minéralisé (% COT) à 28 jours	Degré de stabilité
OMG1	5 mois	25,8	Très instable
OMG2	4 mois	21,8	Instable
OMG4	2 mois	29,6	Très instable
OMG5	12 mois	30,6	Très instable
DV3	6 mois	7,5	Stable
DV4	5 mois	10,4	Moyennement Stable
DVBIO1	6 mois	11,9	Moyennement Stable

La proportion de carbone minéralisée traduit le degré de stabilité du compost (Figure IV.3), plus la quantité de carbone minéralisé est élevée moins le compost est stable. Ce qui nous emmène à établir pour nos échantillons le diagramme de stabilité suivant :

$$\boxed{\text{OMG5} < \text{OMG4} < \text{OMG1} < \text{OMG2} < \text{DVBIO1} < \text{DV4} < \text{DV3}}$$



Degré de stabilité croissante

Les composts de déchets verts apparaissent comme ceux qui ont la matière organique la plus stable, ces composts peuvent donc être considérés comme mûrs.

A durée de compostage égale, les composts d'ordures ménagères sont moins stabilisés que les composts de déchets verts malgré un procédé accéléré (exemple OMG1 et DV4). Ce qui indique que la stabilisation de la matière organique est plus rapide pour les composts issus de déchets verts. On observe l'effet de l'âge et ou du processus dans la stabilisation des composts de déchets verts en effet DV3 apparaît plus stabilisé que DV4. La durée de

maturation de cinq mois et le processus accéléré par insufflation (Tableau III.1) utilisé pour la fabrication de DV3 peuvent expliquer cela.

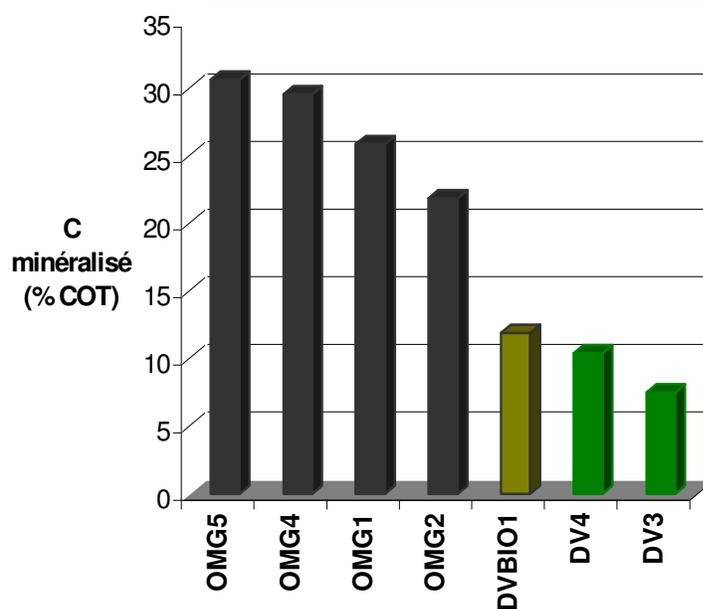


Figure IV.3 : Quantité totale (% COT) de carbone minéralisé au cours des incubations en conditions contrôlées des composts étudiés.

IV.5. Influence du procédé de compostage sur la maturité des composts étudiés

Les différents paramètres qui ont une influence sur la stabilité de la matière organique des composts après observations des différents procédés (Tableau III.2.) utilisés par les plates formes sont :

- La durée de la fermentation et de la maturation,
- Le criblage en fin de fermentation,
- Les retournements pendant la fermentation et pendant la maturation,
- Le système de compostage : système lent, accéléré avec aspiration ou insufflation, avec BRS ou en Silo.

D'une manière générale une durée de compostage suffisamment longue permet d'avoir un compost avec un degré de stabilité élevé. On observe l'influence de la durée de compostage avec les échantillons DV1, DV2, DV3, OMG4 et OMG1. Les composts DV1 et DV2 avec une durée de fermentation et de maturation élevée sont très stables. Cette observation est seulement vérifiée dans le cas des composts de déchets verts. Dans le cas des composts

d'ordures ménagères même avec une durée suffisamment longue le compost n'atteint pas un degré de stabilité satisfaisant. C'est le cas avec l'échantillon OMG5 âgé de 12 mois. D'autres paramètres que nous verrons après tels que le criblage et les retournements pourraient également influencer. L'utilisation d'un système de compostage accéléré avec insufflation ou aspiration de l'aire permet de réduire la durée. Nous observons cela avec les échantillons DV3, BDV1, BDV2 et un peu avec OMG4.

Le criblage en fin de fermentation influe aussi sur la stabilité de la matière organique des composts. On observe l'effet du criblage sur les échantillons OMG1, DV4, DV5, DV6, DVBIO1, BDV1 et BDV2 (Tableau II). Les échantillons DV4 et BDV1 et BDV2, bien que mois âgés et sans période de maturation, qui ont été criblés en fin de fermentation ont le même degré de stabilité que les composts DV5, DV6 et DVBIO1. L'instabilité observée avec OMG1 serait en partie due au manque de criblage en fin de fermentation. Le criblage en fin de maturation n'a pas en général beaucoup d'effets sur la maturité des composts, ils sont beaucoup liés à l'usage ultérieur du compost.

Les retournements pendant la fermentation et pendant la maturation sont aussi des facteurs qui conditionnent la stabilité des composts. En effet ils permettent une aération du tas et l'exposition de nouvelles surfaces à la biodégradation. L'instabilité de la matière organique de OMG1 et OMG3 est due en partie au faible nombre de retournements malgré la durée très élevée de compostage.

L'utilisation d'un système de compostage accéléré avec insufflation permet de réduire la durée de compostage, le nombre de retournements et d'assurer une stabilité de la matière organique. On observe cela avec les échantillons DV3, BDV1 et BDV2. Les déchets verts sont ceux qui présentent une relative souplesse pour le compostage par rapport au système à utiliser. Par contre avec les ordures ménagères, il convient de combiner plusieurs paramètres (Durée, retournements, criblage, système avec BRS ou en silo) pour obtenir des composts avec un niveau de stabilité de la matière organique satisfaisant. Une ventilation avec des retournements et ou des criblages permet une meilleure homogénéité du compost (OMG1, OMG2 et DV3) (Annexe A.4).

Tableau III.8 : Caractéristiques des différents composts étudiés (Récapitulatif)

<i>Types de composts</i>	<i>Composts</i>	<i>Age</i>	<i>MS (%)</i>	<i>MOT (% MS)</i>	<i>COT (% MS)</i>	<i>Indice Solvita</i>	<i>Indice Rottegrad</i>	<i>% C minéralisé en 28 jours</i>	<i>Degré de stabilité d'après CB₂₈</i>
Ordures ménagères	OMG1	5 mois	52,7 ± 1,3	53,2 ± 2,2	17,7 ± 0,5	3	I	25,8	Très instable
	OMG2	4 mois	57,5 ± 0,2	63,3 ± 0,3	16,2 ± 1,8	4	II	21,8	Instable
	OMG3	40 jours	79,2 ± 1,3	54,6 ± 2,5	24,7 ± 1,4	3	I	nd	nd
	OMG4	2 mois	86,7 ± 1,3	60,3 ± 0,6	33,0 ± 1,4	3	I	29,5	Très instable
	OMG5	12 mois	56,7 ± 0,2	64,5 ± 1,6	35,7 ± 2,5	5	I	30,6	Très instable
Déchets verts	DV1	8 mois	66,3 ± 1,4	43,9 ± 0,5	20,4 ± 1,3	7	IV	nd	nd
	DV2	7 mois	79,5 ± 1,3	49,7 ± 0,6	24,7 ± 1,2	7	IV	nd	nd
	DV3	6 mois	67,8 ± 0,3	50,6 ± 1,4	24,8 ± 1,6	7	IV	7,5	Stable
	DV4	5 mois	53,2 ± 0,2	49,9 ± 1,3	31,7 ± 1,5	5	IV	10,4	Moyennement stable
	DV5	8 mois	69,7 ± 1,1	52,6 ± 1,5	25,8 ± 0,5	6	IV	nd	nd
	DV6	8 mois	73,9 ± 1,2	50,7 ± 2,3	24,9 ± 0,8	6	IV	nd	nd
Déchets verts et biodéchets	DVBIO1	6 mois	60,2 ± 0,5	40,7 ± 1,3	21,3 ± 0,3	6	IV	11,9	Moyennement stable

nd = non déterminé

IV.6. Caractéristiques des composts site par site

Les tableaux suivants donnent une analyse par sites des différents composts analysés.

Echantillons	OMG1 et OMG2	
Type de compost	Ordures ménagères grises	
Rappel du process	<ul style="list-style-type: none"> • SILODA accéléré couvert pilotage par température • Fermentation 12 jours en silo avec retournements (5), criblage en fin • Maturation 5 mois (OMG1) et 4 mois (OMG2) avec retournements (4) pour OMG1 et sans retournements pour OMG2, pas de criblage en fin (OMG1 et OMG2). 	
Principaux résultats	OMG1	OMG2
	MS = 52,7 ± 1,3 MOT = 53,3 ± 2,2 COT = 17,7 ± 0,5 % C minéralisé = 25,8 Indice solvita = 3 Indice Rottegrad = I	MS = 57,5 ± 0,2 MOT = 63,3 ± 0,3 COT = 16,2 ± 1,8 % C minéralisé = 21,8 Indice solvita = 4 Indice Rottegrad = II
Commentaires		
Ces deux échantillons sont produits selon les mêmes procédés. La durée de maturation est plus longue pour OMG1 que pour OMG2. Les indices Solvita et Rottegrad montrent des échantillons avec la matière organique active. Ces deux échantillons ne sont donc pas mûrs. On note cependant une tendance à un degré de maturité un peu plus élevé pour OMG2. Cela serait lié à la composition des déchets entrants		

Echantillon	OMG3
Type de compost	Ordures ménagères grises
Rappel du process	<ul style="list-style-type: none"> • SILODA accéléré, fermé pilotage par température, • Fermentation 10 jours en silo avec retournements et criblage en fin (maille 10 mm). • Maturation 1 mois sans retournement et criblage.
Principaux résultats	MS = 79,2 ± 1,3 MOT = 54,6 ± 2,5 COT = 24,7 ± 1,4 % C minéralisé = nd Indice solvita = 3 Indice Rottegrad = I
Commentaires	
L'aération forcée contribue à assécher le compost d'où la teneur en MS élevée. L'indice solvita de 3 indique un compost avec de la matière organique à l'état actif. De même pour le Rottegrad de I qui donne un composts frais. Ce compost contient donc de la matière organique instable et peut être considéré comme non mûr. Il convient donc de prolonger la durée de la maturation. Le criblage à faible maille peut aussi ralentir la biodégradation. En effet il pourrait gêner la circulation de l'air dans le tas et provoquer un ralentissement l'activité microbienne.	

Echantillon	OMG4
Type de compost	Ordures ménagères grises
Rappel du process	<ul style="list-style-type: none"> • BRS accéléré, fermé pilotage par température, • Fermentation 3 jours en BRS et 1 mois en tas avec retournements (7) et criblage en fin (maille 10 et 15 mm). • Maturation 1 mois avec retournements (7) sans criblage.
Principaux résultats	MS = $86,7 \pm 1,3$ MOT = $60,3 \pm 0,6$ COT = $33,0 \pm 1,4$ % C minéralisé = 29,6 Indice solvita = 3 Indice Rottegrad = I
Commentaires	
<p>L'aération forcée contribue à asséché le compost d'où la teneur en MS élevée. L'indice solvita de 3 indique un compost avec de la matière organique à l'état actif. De même pour le Rottegrad de I qui donne un composts frais. Ce compost contient donc de la matière organique instable et peut être considéré comme non mûr. Il convient donc de prolonger la durée de la maturation. Le criblage à faible maille peut aussi ralentir la biodégradation. En effet il pourrait gêner la circulation de l'air dans le tas et provoquer un ralentissement l'activité microbienne.</p>	

Echantillon	OMG5
Type de compost	Ordures ménagères grises et déchets des IAA
Rappel du process	<ul style="list-style-type: none"> • BRS accéléré, • Fermentation 2 jours en BRS et 6 mois en tas avec retournements(2) sans criblage en fin, • Maturation 6 mois avec retournement (1) et criblage en fin (maille 15 mm).
Principaux résultats	MS = $56,7 \pm 0,2$ MOT = $64,5 \pm 1,6$ COT = $35,7 \pm 2,5$ % C minéralisé = 30,7 Indice solvita = 5 Indice Rottegrad = I
Commentaires	
<p>Le processus de fabrication de ce compost a duré 12 mois en tout cependant, il contient encore plus de matière organique. L'indice Solvita de 5 donne un compost avec de la matière organique à l'état actif. Il en est de même pour l'indice Rottegrad de I qui donne un compost frais. Cela se traduit par le pourcentage élevé de carbone organique minéralisé. Le manque de maturité serait au nombre réduit de retournements pendant la phase de maturation. La présence de déchets des agro industries dans le mélange initial peut également influencer sur la maturité de cet échantillon.</p>	

Echantillons	DV1 et DV2	
Type de compost	Déchets verts	
Rappel du process	<ul style="list-style-type: none"> • Système lent et ouvert pilotage par température • Fermentation 4 mois (DV1) et 3 mois (DV2) avec retournements (4) et criblage en fin (maille 0 – 20 mm), • Maturation 4 mois (DV1 et DV2) avec retournement (4) et criblage en fin (maille 0 – 20 mm). 	
Principaux résultats	DV1	DV2
	MS = 66,3 ± 1,4 MOT = 43,9 ± 0,5 COT = 20,4 ± 1,3 % C minéralisé = nd Indice solvita = 7 Indice Rottegrad = IV	MS = 79,5 ± 1,3 MOT = 49,7 ± 0,6 COT = 24,7 ± 1,2 % C minéralisé = nd Indice solvita = 7 Indice Rottegrad = IV
Commentaires		
Ces deux échantillons fabriqués sur le même site présentent les mêmes indices Solvita (7) et Rottegrad IV qui indiquent des composts finis. La durée de maturation est cependant plus longue pour DV1 (4 mois) que DV2 (3 mois), ce qui se traduit au niveau des teneurs en matières organiques et en carbone organique total qui sont légèrement plus élevées pour DV2. De plus la température maximale lors du test d'auto – échauffement de DV2 (35°C) est supérieure à celle de DV1 (30°C). L'augmentation de la durée de compostage pourrait contribuer à accroître le degré de maturité des composts.		

Echantillon	DV3
Type de compost	Déchets verts
Rappel du process	<ul style="list-style-type: none"> • Système accéléré et ouvert avec ventilation, pilotage par temporisation • Fermentation 1 mois avec retournements (5) sans criblage en fin • Maturation 5 mois sans retournements, criblage en fin (0-12 mm).
Principaux résultats	MS = 67,8 ± 0,3 MOT = 50,6 ± 1,4 COT = 24,8 ± 1,6 % C minéralisé = 7,5% Indice solvita = 7 Indice Rottegrad = IV
Commentaires	
Cet échantillon contient un faible teneur en carbone organique. Les indices solvita et Rottegrad donnent un compost avec de la matière organique stable. Ce qui est confirmé avec le faible pourcentage de carbone minéralisé après incubation en conditions contrôlées. Cette maturité est atteinte sans criblage en fin de fermentation et de retournements pendant la maturation. Une durée de maturation plus longue peut compenser l'effet des retournements sur la qualité des composts dans le cas des composts de déchets verts.	

Echantillon	DV4
Type de compost	Déchets verts
Rappel du process	<ul style="list-style-type: none"> • Système lent et ouvert • Fermentation 5 mois avec retournements (5) et criblage en fin. • Pas de maturation.
Principaux résultats	MS = 53,2± 0,2 MOT = 49,9 ± 1,3 COT = 31,7 ± 1,5 % C minéralisé = 10,4% Indice solvita = 5 Indice Rottegrad = IV
Commentaires	
<p>Ce compost peut être considéré comme mûr à partir des indices Solvita et Rottegrad. De plus la faible proportion de carbone minéralisée témoigne ce degré de maturité élevé. Cet échantillon n'a pas subi de phase de maturation mais une fermentation qui a durée 5 mois avec cinq retournements. Quelque soit le type de procédé (lent ou accéléré), une durée d'au moins 4 mois de fermentation est nécessaire pour obtenir des composts mûrs dans le cas des composts de déchets verts.</p>	

Echantillons	DV5 et DV6	
Type de compost	Déchets verts	
Rappel du process	<ul style="list-style-type: none"> • Système lent et ouvert pilotage par température • Fermentation 4 mois avec retournements (6) sans criblage en fin • Maturation. 4 mois sans retournements, criblage en fin (maille 20 mm). 	
Principaux résultats	DV5	DV6
	MS = 69,7± 1,1 MOT = 52,6 ± 1,5 COT = 25,8 ± 0,5 % C minéralisé = nd Indice solvita = 6 Indice Rottegrad = IV	MS = 73,9± 1,2 MOT = 50,7 ± 2,3 COT = 24,9 ± 0,8 % C minéralisé = nd Indice solvita = 6 Indice Rottegrad = IV
Commentaires		
<p>Ces deux échantillons sont produits selon le même procédé. Les différences aux niveaux des teneurs en MS, MOT et COT seraient dues aux mélanges initiaux. Ces deux échantillons peuvent être considéré comme mûrs à partir des indices solvita et Rottegrad. La durée de compostage est suffisamment longue pour garantir une maturité malgré l'absence de retournements pendant la maturation.</p>		

Echantillon	DVBIO1
Type de compost	Déchets verts et biodéchets
Rappel du process	<ul style="list-style-type: none"> • Système lent et ouvert • Fermentation 3 mois avec retournements et criblage en fin • Maturation 3 mois avec retournements et broyage type mulch en fin.
Résultats d'analyses	MS = 60,2± 0,5 MOT = 40,7 ± 1,3 COT = 21,3 ± 0,3 % C minéralisé = 11,9% Indice solvita = 6 Indice Rottegrad = IV
Commentaires	
<p>A partir des indices Solvita et Rottegrad un degré de maturité moyenne peut être attribué à ce compost. La quantité de carbone minéralisé indique une certaine stabilité de la matière organique. Cette stabilité est atteinte après six mois de compostage et malgré l'absence criblage en fin de fermentation. La proportion de déchets verts élevée dans le mélange initial pourrait contribuer à ce degré de maturité.</p>	

V.7. Autres composts étudiés

Il s'agit ici des composts issus d'un mélange de boues et de déchets divers (tableau II) produit au niveau du site « Alsace Compost ». Ce sont les échantillons BDV1 et BDV2 dont les caractéristiques sont données dans le tableau suivant.

Echantillons	BDV1 et BDV2	
Type de compost	Boue	
Rappel du process	<ul style="list-style-type: none"> • Système accéléré type Andain avec aération forcée • Fermentation 34 jours (BDV1) et 32 jours (BDV2) sans retournements avec criblage en fin • Maturation pas de maturation 	
Résultats d'analyses	BDV1	BDV2
	MS = 58,5± 1,1 MOT = 50,0 ± 1,5 COT = 27,7 ± 0,5 % C minéralisé = 10,5 Indice solvita = 4 Indice Rottegrad = IV	MS = 65,2± 1,2 MOT = 45,3 ± 2,3 COT = 26,2 ± 0,8 % C minéralisé = 12 Indice solvita = 3 Indice Rottegrad = III
Commentaires		
<p>A partir des indices Solvita et Rottegrad, ces échantillons sont à maturité moyenne. Ces échantillons présentent une stabilité de leur matière organique avec une stabilité légèrement élevée pour BDV1 probablement due au mélange initial.</p>		

CONCLUSION

Le compostage est un mode de traitement et de valorisation des déchets qui conduit à l'élaboration d'un produit : le compost utilisé comme amendement organique en agriculture. Le but de notre étude était d'établir le lien entre le type de déchets, le procédé de compostage et la qualité en particulier la stabilité de la matière organique. Les analyses effectuées sur des échantillons de composts provenant de divers sites du groupe ONYX, nous ont permis d'établir le lien type de déchets – process - qualité du compost.

Les différents résultats montrent une influence du type de déchets sur la qualité du compost. Ainsi les composts produits à partir des déchets verts sont ceux qui atteignent rapidement un degré de stabilité élevé de leur matière organique. Cette maturité peut être atteinte après au moins trois mois de compostage.

Les composts d'ordures ménagères sont ceux qui présentent les taux de matière organique les plus élevés et libèrent plus de carbone après minéralisation. Quel que soit le type de composts, les courbes de minéralisation du carbone organique présentent une même allure prouvant que le processus de minéralisation est identique mais avec des amplitudes variant en fonction de la teneur en carbone des échantillons.

Le procédé utilisé a beaucoup plus d'influence pour le traitement des déchets à base d'ordures ménagères. En effet les degrés de maturité sont variables d'un compost à l'autre selon le procédé utilisé, mais en général une longue période de maturation avec des retournements est à préconiser. Un criblage précoce à maille faible (10 mm) après la phase de dégradation accélérée peut avoir un effet néfaste sur la maturation par suite d'une absence d'oxygène nécessaire à l'activité de biodégradation des microorganismes durant le compostage.

Des deux tests de maturité utilisés, le test d'auto échauffement semble être plus fiable que l'indice Solvita. En effet le second surestime la maturité des composts et ne confirme pas souvent les résultats de la minéralisation du carbone en conditions contrôlées alors que l'auto échauffement d'un compost traduit directement la quantité de carbone organique contenu dans l'échantillon.

Les résultats présentés semblent montrer que les objectifs fixés sont atteints sans cependant donner une orientation sur la valeur agronomique (amendement organique) des échantillons.

Le compostage est un mode de traitement et de valorisation des déchets respectueux de l'environnement à cause du fait qu'on ne constate pas de rejets incontrôlés, ensuite la production d'un amendement organique en vue de l'épandage permet de rendre au sol ce qui y

a été puisé. La boucle est ainsi bouclée par ce biais, les utilisations annexes d'amendements chimiques sont alors réduites.

Le niveau de maturité des composts dépend donc directement du type de déchet et de la durée de compostage, à cela s'ajoute le procédé de compostage. Bien que présentant des niveaux de maturité satisfaisante, l'utilisation des composts en agriculture nécessite une connaissance de leur valeur amendante, un fractionnement biochimique est à préconiser pour déterminer la valeur amendante des composts.

BIBLIOGRAPHIE

- Abad Berjon, M., M.D. Climent Morato, P. Aragon Revuelta, and A. Camarero Simon. 1997. The influence of solid urban waste compost and nitrogen-mineral fertilizer on growth and productivity in potatoes. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 28 : 1653-1661.
- Adani, F.P.,L. Genevini, and F. Tambone. 1995. A new index of organic matter stability. *Compost Science and Utilization.* 3 : 23-37.
- ADEME – AVAL. 2001. Approche de la qualité des composts de déchets en France. Résultats d'une enquête en 1998, 133 pages.
- Anderson, T.H. 1994. Physiological analysis of microbial communities in soil : applications and limitations. In : beyond the biomass. *Compositional and functional analysis of soil microbial communities.* K. Ritz, J. Dighton, et K.E. Giller. Ed. John Wiley et sons (UK) P : 67-76.
- Andreux,F., P. Dutartre, B. Guillet, T. Choné, and T. Desjardins. 1994. The statuts of soil organic matter in selected fragile ecosystems. In : Humic substances in the global environment and implications on human health. N. Senesi et T.M. Miano. Ed. Elsevier Science B.V. P : 389-403.
- ANRED. 1990. Le tri compostage des ordures ménagères. Cahier Technique de la Direction de l'eau et de la prévention des pollutions et risques (*Agence Nationale pour la récupération et l'Élimination des Déchets*). N° 27. 88 pages.
- Asomani – Boateng R. et M. Haight. 1999. Reusing organic solid waste in urban farming in African cities : a challenge for urban planners. Site web. www.idrc.ca/books/focus/890/13aAsoma.html2002.
- Atkinson, C.F., D.D. Jones, and J.J. Gauthier. 1996. Biodegradabilities and microbial activities during composting of municipal solid waste in bench-scale reactors. *Compost Science and Utilization.* 2 (1) 80 – 87.
- Avnimelech, Y., M. Bruner, I. Ezrony, R. Sela, and M. Kochba. 1996. Stability indexes for municipal solid waste compost. *Compost Science and Utilization* 4 (2) 13 – 20.
- Ayuso, M., J.A. Pascual, C. Garcia, and T. Hernandez. 1996. Evaluation of urban wastes for agricultural use. *Soil Sci. Plant Nutri.* 42 (1) 105-111.
- Baldock, J.A., and N. Nelson. 2000. Soil organic matter. In hand book of soil science, Malcolm E. Summer ed. (CRD PRESS) B26-B84.
- Becker, G. and A. Kotter. 1995. A standard measurment for compost maturity. International symposium « *Biological Waste Management-A wasted chance?* ».
- Beck-Friis, B., S. Jonsson, H. Eklind, Y. Kirchman, and H. Smars. 2003. Composting of source-separated houshold organics at different oxygen levels : gaining and undstanding of the emission dynamics. *Compost Science and Utilization* 11 (1) 41-50

- Begnaud, B. et F.X. De Blignieres. 1987. Le traitement des ordures ménagères par tri/compostage. Vol 2. Evaluation de la matière organique dans différents broyats mis en fermentation sur aire de compostage. Vol 2. ADEME. 103 P et annexes.
- Beloso, M.C., M.C. Villar, A. Cabaneiro, M. Carballas, S.J. Gonzales-Pietro, and T. Carballas. 1993. Carbon and nitrogen mineralization in acid soil fertilized with composted urban refuses. *Bioresource Technology*, 45 :123 - 129.
- Berben, G., et E. François. 1994. Approche génétique de l'écologie microbienne du sol : tour d'horizon des possibilités actuelles et des perspectives. *Bulletin de Recherches Agronomiques de Gembloux*. 29 : 23-59.
- Bernal, M.P., M.A. Sanchez-Monedero, C. Paredes, and A Roig. 1998. Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 69 : 175-189.
- Bidlingmaier, W. 1993. The history of development of compost standards in Germany. In *Science and Engineering of Composting : design, Environmental, Microbiological and Utilization aspects*. Ed. Harry A.J. and Harold M. Keener. P : 536-544.
- Boulala, P.F., P.W. Savadogo, A.S. Ouattara and A.S. Traoré. 2002. Caractérisation physico – chimique et perspectives de traitement des déchets solides de l'abattoir frigorifique de Ouagadougou (Burkina Faso). *Le cahiers de l'agriculture* 50 : 31-47.
- Brinton, W.F., and E. Evans. 2000. Plant performance in relation to depletion, CO₂-rate and volatile fatty acids in container media composts of varying maturity. *BioCycle* 64-69.
- Canet, R. and F. Pomares. 1995. Changes in physical, chemical and physico-chemical parameters during the composting of municipal solid wastes in two plants valencia. *Bioresources Technology*, 51 : 259-264.
- Changa, C.M., P. Wang, M.E. Watson, and H.A.J.M.F. Hoitink. 2003. Assessment of the reliability of a commercial maturity test kit for composted manures. *Compost Sciences and Utilization*. 11 (2) 125-143.
- Chaussod, R. et S. Houot. 1993. La biomasse microbienne des sols : perspectives d'utilisation de cette mesure pour l'estimation de la fourniture d'azote par les sols. In : *Matières Organiques et Agricultures* ; Ed. J. Decroux et J.C Ignazi. P : 312-326.
- Chaussod, R., B. Nicolardot, G. Catroux, and J. Chrétien. 1986. Relations entre les caractéristiques physico – chimiques et microbiologiques de quelques sols cultivés. *Science du sol*. 2 : 213-226.
- Chaussod, R. 1996. La qualité biologique des sols : Evaluation et implication. *Etude et Gestion des sols*. 3 (4) P : 261-277.
- Chaussod, R., M. Zuvia, M.C. Breuil et J.M. Hetier. 1992. Biomasse microbienne et « statut organique » des sols tropicaux : exemple d'un sol vénézuélien des Lianos sous différents systèmes de culture. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol 27 N°1 P : 59-67.

- Chen, Y. 2003. Nuclear magnetic resonance, infra-red and pyrolysis : application of spectroscopic methodologies to maturity determination. *Compost Science and Utilization*. 11 (2) 152-168.
- Das, K. and H.M. Keener. 1997. Moisture effect on compaction and permeability in composts. *J. Environ. Engn.*, 123 (3) P : 275-281.
- De Bertoldi, M., G Vallini, and A. Pera. 1983. The biology of composting a review. *Waste Management and Research*. 1 : 157-176.
- De Haan, S. 1981. Result of municipal waste compost research over more than fifty years at the Institute for Soil Fertility at Haren/Gorninge, *The Netherlands. Neth. J. Agric. Sci.* 29 : 49-61.
- Deiana, S., C. Gessa, B. Manunza, R. Raussa, and R. Seeber. 1990. Analytical and spectroscopic characterization of humic acids extracted from sewage sludge, manure, and worm compost. *Soil Science*. 150 (1) 419-424.
- Devisscher, S. 1997. Le compost : propriétés et valorisation. *Mémoire de DESS. Université Picardie*. 60 P.
- Diaz-Burgos, M.A., B. Ceccanti, and A. Polo. 1993. Monitoring biochemical activity during sewage sludge composting. *Biol. Fertil. Soils*. 16 : 145-150.
- Duchaufour, P. 1997. Abrégé de pédologie. Sol, Végétation, Environnement. *Ed Masson*.
- Duval, J. 1993. Méthodes d'évaluation de la maturité des composts. *AgroBio*. 310 (02) 15 pages.
- FCQAO. 1994. Methods book for the analysis of compost- Kompost information Nr 230. *Ed. BGK*.
- FNADE. 2002. Eléments pour la prise en compte des effets des unités de compostage de déchets sur la santé des populations riveraines. Rapport d'étude. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. France. 33 pages.
- Forster, J.C., W. Zech, and E. Würdinger. 1993. Comparaison of chemical and microbial methods for the characterization of maturity of compost from contrasting sources. *Biol. Fertil. Soils*. 16 : 93-99.
- Francou, C. 2003. Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains : influence de la nature des déchets et du procédé de compostage ; recherche d'indicateurs pertinents. *Thèse de Doctorat de l'institut National Agronomique Paris – Grignon*. 242 P et annexes.
- Garcia, C., T. Hernandez, F. Costa, and J.A. Pascual. 1992. Phytotoxicity due to the agricultural use of urban wastes. Germination experiments. *J. Sci. Food agric*. 59 : 313-319.

- Germon, J.C., and C. Henault. 1995. Processus d'émissions de méthane et d'oxydes d'azote gazeux par les sols. Evolution quantification, spatialisation. *Dossiers de l'Environnement de l'INRA*. 10 : 29-38.
- Godden, B. 1986. Etude du processus de compostage du fumier de bovin. *Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques*. Université libre de Bruxelles. Laboratoire de microbiologie. 136 P et annexes.
- Godden, B. 1995. La gestion des effluents d'élevage. *N.S.T.* vol 13 N° 1 P : 131-134.
- Harada, Y., A. Inoko, M. Taddaki, and T. Izawa. 1981. Maturing process of city refuse compost during piling. *Soil. Sci. Plant. Nutr.* 27 (3) 357-364.
- He, X.T., S.J. Traina, and J.L Terry. 1992. Chemical properties of municipal solid waste composts. *J. Environ. Qual.* 21 : 318-329.
- He, Y., Y. Inamori, M. Mizuochi, H. Kong, N Iwami, and T. Sun. 2000. Measurements of N₂O and CH₄ from aerated composting of food waste. *Sci. Total Environ.* 254 : 65-74.
- Helfrich, P., B. Chefetz, Y. Hadar, Y. Chen, and H. Schnabl. 1998 a novel methode for determining phytotoxicity in composts. *Compost Science and Utilization*. 6 (3) 6-13.
- Hirai, M.F., V. Chanyasak, and H. Kubota. 1982. A standard measurement for compost maturity. *BioCycle*. 24 (6) 54-56.
- Hirai. M.F., A. Katayama, and H. Kubota. 1986. Effect of compost maturuty on plant growth. *BioCycle*. 27 : 58-61.
- Houot, S., G. Delaitre et S. Bourgeois. 1999. Simulation of the behaviour of sewage sludges in a soil : variation with sludge treatment. INRA. *Unité de Science du Sol Thiverval Grignon*. P : 293-303.
- Houot,S., C. Francou, and C. Vergé-Leviel. 2001. Gestion de la maturité des composts : conséquence sur leur valeur agronomique et leur innocuité. Les nouveaux défis de la fertilisation raisonnée. *Actes des 5èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de la terre*. Palais des Congrès de Blois. 27-29 novembre 2001. Ed. G. Thevenet (Comifer) et A. Joubert (Gemmas).
- Houot, S., C. Francou, M. Annabi et M. Poitrenaud. 2004. Evaluation des effets des matières organiques sur les propriétés des sols. *Journées techniques « Retour au sol des matières organiques »* ADEME. Paris 27-28 avril. P : 39-50.
- Ianotti, D.A., M.E. Grebus, B.L. Toth, L.V. Madden, and A.J. Hoitink. 1994. Oxygen respirometry to assess stability and maturity of composted municipal solid waste. *J. Environn. Qual.* 23 : 1177-1183.
- Iglesias-Jimenez, M., and V. Perez-Garcia. 1989. Evaluation of city refuse compost maturity : A review. *Biological Wastes*. 27 : 115-142.

- ITAB. 2002. Activités biologiques et fertilité des sols : intérêts et limites des méthodes analytiques disponibles. Groupe de travail « état et activité biologiques des sols » *Commission « Agronomie - système de production » de l'ITAB*. 27 P.
- Jenkinson, D.S. 1966. Studies on the decomposition of plante material in soil. II) partial sterilisation and the soil biomass. *Journal of Soil Science*. 17 : 280-302.
- Jeris, J.S. and R.W. Regan. 1973. Controlling environmental parameters for optimum composting. II Moisture free air and recycle. *Compost Science* March – Avril : 8-15.
- Kapetanios, E.G., M. Loizidou, and G. Valkanas. 1993. Compost production from greek domestic refuse. *Bioresource Technology*. 44 : 13-16.
- Kostov, O., G. Petkova, and O. Van Cleemput. 1994. Microbial indicators for sawdust and bark compost stability and humification process. *Bioresource Technology*. 50 : 193-200.
- Larsen, K.L., and D.M. McCartney. 2000. Effect of C/N ration on microbial activity and N retention in bench-scale study using pulp and paper biosolids. *Compost Science and Utilization*. 8 (2) 147-159.
- Leclerc, B. 2001. Guide des matières organiques. 2è édition Tome 1. *Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB)*. Paris. 238 P.
- Lemaire, G. F. Gastal, D. Planet, and J. Le Bot. 1997. Le prélèvement d'azote par les peuplements végétaux et la production des cultures. Colloque : « Maîtrise de l'azote dans les agro système » 88 : 121-139 Ed. INRA –Les Colloques.
- Lineres, M., and J.L. Djakovitch. 1993. Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par analyse biochimique. Matières organiques et agriculture. *Actes des 4èmes journées du GEMAS et du 5^{ème} forum du COMIFER*. Blois, France. Ed. Decroux et Ignazi. P : 150-168.
- Michel, F.C., and C.A. Reddy. 1998. Effect of oxygenation level on yard trimmings composting rate, odor production, and compost quality in bench-scale reactors. *Compost Science and Utilization* 4 (1) 26 43.
- Morel, J.L. 1982. L'évaluation de la maturité des composts urbains par une méthode colorimétrique. *Compost-information*. 10 : 4-8.
- Morel, J.L., A. Guckert, B. Nicolardot, D. Benistant, G. Catroux, and J.C. Germon. 1986. Etude de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques et de la stabilité biologique des ordures ménagères au cours du compostage. *Agronomie* 6 (8) 693-701.
- Morel, R. 1989. La fertilité des sols. In : *les sols cultivés*. Lacvoisier, Coll. Tec. et Doc. Paris. P : 341-363.
- Mustin, M. 1987. Le compost : Gestion de la matière organique. *Ed. François Dubusc*. Paris. 954 P.

- Navarro, A.F., J. Cegarra, A. Roig, and D. Garcia. 1993. Relationships between organic matter and carbon contents of organic wastes. *Bioresources Technology*. 3 : 203-207.
- Nicolardot, B. J.C. Germon, R. Chaussod, and G. Catroux. 1982. Une technique simple pour déterminer la maturité des composts urbains. *Compost-Information*. 10 : 2-4.
- Nicolardot, B., R. Chaussod, J.L. Morel, A. Guckert, D. Benistant, G. Catroux, and J.C. Germon. 1986. Appréciation simple de la maturité des composts urbains en relation avec leurs effets sur la production végétale. *Agronomie*. 6 (9) 819-827.
- Plenchette, C. 1991. Utilisation des mycorhizes en agriculture et horticulture. In : *Les mycorhizes des arbres et des plantes cultivées*. Coll. Lavoisier Tech. Et Doc. P : 131-196.
- Powlson, D.S., P.C. Brookes, and B.T. Christensen. 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry*. 19 : 159-164.
- Provenzano, M. R., N. Senesi, and G. Piccone. 1998. Thermal and spectroscopic characterization of composts from municipal solid wastes. *Compost Science and Utilization*. 6 (3) 67-73.
- Richard, T.L., H.V.M. Hamelers, A. Veeken, and T. Silva. 2002. Moisture relationships in composting process. *Compost Science and Utilization*. 10 (4) P : 286-302.
- Riffaldi, R., R. Levi-Menzi, A. Pera, and M. de Bertoldi. 1986. Evaluation of compost maturity by means of chemical and microbial analyses. *Wastes management and research*. 4 : 387-396.
- Roletto, E., R. Barberis, M. Consiglio, and R. Jodice. 1985. Chemical parameters for evaluating compost maturity. *BioCycle*. 26 : 46-47.
- Sadaka, S. and A. El. Taweel. 2003. Effect of aeration and C/N ratio on household waste composting in Egypt. *Compost Science and Utilization*, 11 (1) 36-40.
- Saharinen, M.H. 1998. Evaluation of changes in CECE during composting. *Compost Science and Utilization*. Autumn : 29-37.
- Sanchez-Monedero, M.A., A. Roig, C. Paredes, and M.P. Bernal. 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the rugers system and its effects on pH, EC, and maturity of the composting mixtures. *Bioresource Technology*. 78 : 301-308.
- Saviozzi, A., R. Levi-Menzi, and R. Riffaldi. 1988. Maturity evaluation of organic waste. *BioCycle*. 29 : 54-56.
- Smith, J.L. 1993. Cycling of nitrogen through microbial activity. In *Soil Biology : effect on soil quality*, Ed. J.L. Hatfield et B.A. Stewart. *Advances in Soil Science*. P : 91-120.
- Spohn, E. 1978. Determination of compost maturity. *Compost science/Land Utilization*. May-june : 26-27

- Stevenson, F.J. 1994. Humus chemistry. Genesis, Composition, Reactions. *Ed. John Wiley and sons, Inc.* 350 P.
- Sugahara, K., Y. Harad, and A. Inoko. 1979. Color change of city refuse during composting process. *Soil Sci. Plant. Nutr.* 25 (2) 197-208.
- Trehan, P., D.C. Coleman, J.M. Rusek, J. Berthelin, and R. Bardin. 1993. Soil biology : a conceptual approach with specific goals. *European Journal of Soil Biology.* 29 : 1-6.
- Vallini, G., A. Pera, M. Vadrighi, and F. Cecchi. 1993. Process constraints in source-collected vegetable waste composting. *Wat. Sci. Tech.* 28 (2) 229-236.
- Waksman, S.A., T.C. Cordor, and B. Hulpoi. 1939. Influence of temperature upon of the microbiological population and decomposition processes in composts of stable manure. *Sol Sci.*
- Weppen, P., U. Gudladt, and A. Willert. 1998. Die rotter gradbestimmung von kompost in Dewar-gefässen-Eine kalorimetrische interpretation. *J. Thermal Anal.* 52 : 81-91.
- Willson, G.B. 1989. Combining raw materials for composting. *BioCycle*, 30 : 82-83.
- Wu,J., R.G., Joergensen, B. Pommerening, R. Chaussod, and P.C. Brookes. 1990. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation – Extraction –An automated procedure. *Soil Biology and Biochemistry.* 22 : 1167-1189.
- Wu, L., L.Q. Ma, and G.A. Martinez. 2000. Comparaison of methodes for evaluating stability and maturity of biosolids compost. *J. Environ. Qual.* 29 : 424-429.
- Wu, L., and L.Q. Ma. 2001. Effect of sample storage on biosolids compost stability and maturity evaluation. *J. Environ. Qual.*
- Zucconi, F., A. Pera, and M. Forte. 1981. Evaluating toxicity of immature compost. *BioCycle.* 22 : 54-57

ANNEXES

Annexe A.1 : Courbes de minéralisation des échantillons.

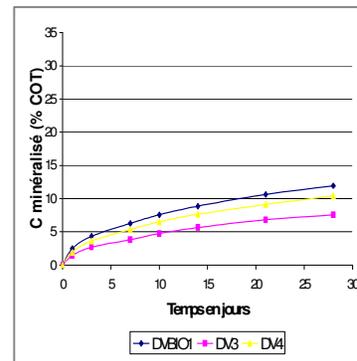
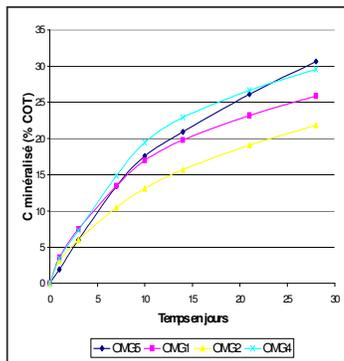


Figure A.1 : Cinétiques de minéralisation du carbone : composts d'ordures ménagères

Figure A.2 : Cinétiques de minéralisation du carbone : composts de déchets verts

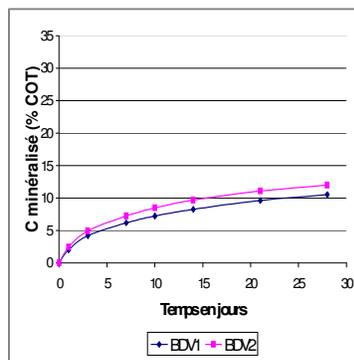


Figure A.3 : Cinétiques de minéralisation du carbone : composts de boue

ANNEXE A. 2 : Les réactifs utilisés pour le suivi de la minéralisation du carbone

(Réactif du dispositif SKALAR)

- Acide sulfurique 50 ml/l à 36 N
- Acide sulfurique 3 ml/l
- Tampon carbonate : dans une fiole de 200 ml ; dissoudre 57,23 g de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ou 21,20 g de Na_2CO_3 . Dans une autre fiole de 100 ml dissoudre 8,4 g de NaHCO_3 . Mélanger le contenu des fioles et conserver au froid.
- Antifoam B : diluer 1 ml dans 1 l d'eau et conserver au froid.
- Réactif coloré : dans une fiole de 1 l ajouter le volume de tampon carbonate correspondant à la gamme choisie, 1,5 ml de phénolphthaléine, ajuster à 1 l et ajouter 1 ml de Brij. Transvaser dans un flacon contenant du barreau aimanté et conserver à l'abri de la lumière.
- Solution de NaOH 6 N.

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	iv
AVANT PROPOS	vi
RESUME	viii
INTRODUCTION	1
I. LE GROUPE VEOLIA ENVIRONNEMENT	4
HISTORIQUE	5
I.1. LES DIVERSES ACTIVITES DU GROUPE VEOLIA ENVIRONNEMENT	5
I.2. LES CENTRES DE RECHERCHE DU GROUPE VEOLIA ENVIRONNEMENT	7
II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	10
II.1. LE COMPOSTAGE	12
II.1.1 <i>Qu'est ce que le compostage ?</i>	12
II.1.2. <i>Le processus de compostage</i>	13
II.1.2.1. Les phases du compostage	13
II.1.2.2. Les paramètres du compostage	14
a) La température	15
b) Le taux d'oxygène lacunaire.....	16
c) L'humidité	16
d) Les caractéristiques physico – chimiques des substrats à composter	16
e) Paramètres microbiologiques.....	18
II.1.2.3. Evolution des caractéristiques physico – chimiques au cours du compostage	21
a) La teneur en eau	21
b) la matière organique	21
c) Le carbone	21
d) L'azote	22
e) le rapport C/N	22
f) Le pH.....	23
g) La capacité d'échange cationique (CEC)	23
h) Formation des substances humiques.....	24
II.2. LA MATURITE DES COMPOSTS	24
II.2.1 <i>Définitions</i>	24
II.2.2 <i>Indicateurs de la maturité des composts</i>	25
a) Test respirométrique.....	25
b) Test d'auto – échauffement.....	25
c) indice SOLVITA®	26
d) Caractéristiques physico – chimiques	26
d.1) Le pH	26
d.2) La CEC	26
d.3) Le rapport C/N.....	27
d.4) Le rapport $N-NO_3^-/N-NH_4^+$	27
d.5) Stabilité biologique de la matière organique	27
e) le rapport d'humification (AH/AF)	28
f) Tests de phytotoxicité	28
g) Analyses spectrales	28
II.3. LES DECHETS COMPOSTABLES	29
II.3.1 <i>Les boues de station d'épuration</i>	30
II.3.2. <i>Les ordures ménagères</i>	30
II.3.3. <i>Les biodéchets ou fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM)</i>	31
II.3.4. <i>Les déchets verts</i>	31

II.3.5. <i>Les sous-produits agricoles et agroalimentaires</i>	31
II.4. VALORISATION DU COMPOST	32
II.4.1. <i>La valorisation agronomique</i>	32
II.4.2 <i>Valorisation environnementale</i>	34
II.4.3 <i>Valorisation énergétique</i>	35
CONCLUSION SUR LE COMPOSTAGE : OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	35
III. MATERIELS ET METHODES	37
III.1. ECHANTILLONNAGE	38
III.2. ANALYSES PHYSICO – CHIMIQUES	40
III.2.1. <i>Teneur en matière sèche (MS)</i>	40
III.2.2. <i>Teneur en matière organique totale (MOT)</i>	40
III.2.3. <i>Teneur en carbone organique total (COT)</i>	40
III.2. TESTS DE MATURITE.....	41
III.2.1. <i>Préparation des échantillons</i>	41
III.2.2. <i>Indice SOLVITA®</i>	41
III.2.3. <i>Test d'auto - échauffement</i>	42
III.3. MINERALISATION DU CARBONE	43
III.3.1. <i>Incubation en conditions contrôlées</i>	43
III.3.2. <i>Dosage du C-CO2</i>	44
III.3.3. <i>Expressions des résultats</i>	45
III.3.4. <i>Stabilité de la matière organique des composts</i>	46
IV. RESULTATS ET DISCUSSION.....	47
IV.1. CARACTERISTIQUES PHYSICO – CHIMIQUES DES ECHANTILLONS.....	48
IV.2. TEST SOLVITA	49
IV.3. TEST ROTTEGRAD	50
IV.4. MINERALISATION DU CARBONE.....	51
IV.4.1. <i>Cinétiques de la minéralisation</i>	51
IV.4.2. <i>Etude de la stabilité des composts</i>	54
IV.5. INFLUENCE DU PROCEDE DE COMPOSTAGE SUR LA MATURITE DES COMPOSTS ETUDIES	55
IV.6. CARACTERISTIQUES DES COMPOSTS SITE PAR SITE	58
V.7. AUTRES COMPOSTS ETUDIES	62
CONCLUSION	63
BIBLIOGRAPHIE.....	66
ANNEXES.....	74

SOMMAIRE

Annexe A.3 : ANALYSES AU LABORATOIRE



Test d'auto – échauffement



Incubations en conditions contrôlées

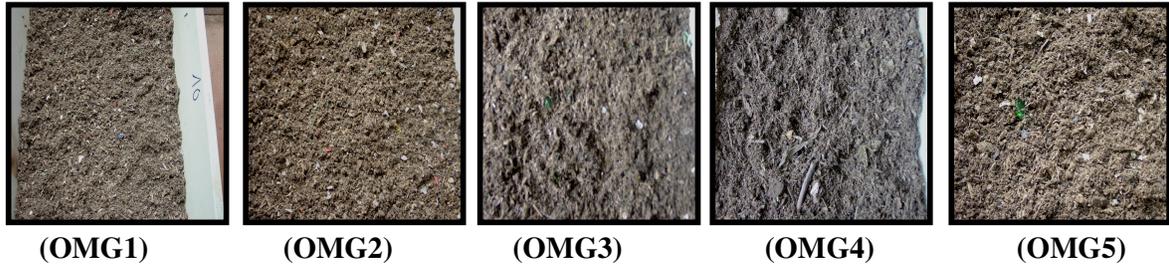


Test SOLVITA



Dispositif SKALAR de dosage de C-CO₂

Annexe A.4 : ECHANTILLONS DE COMPOSTS ETUDIES



1.

2. Composts d'Ordures Ménagères Grises (OMG)

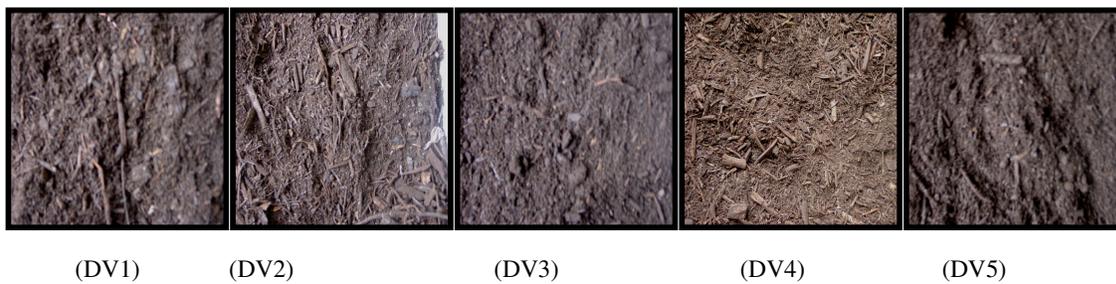


3.

(BDV1)

(BDV2)

4. Composts de Boue et de Déchets Verts



Composts de Déchets Verts (DV) et de Biodéchets