

Chapitre IV

Traitement biologique des déchets ménagers et assimilés : Biométhanisation & Compostage

4.1. BIOMETHANISATION

4.1.1. Définition

La biométhanisation (ou digestion anaérobie) est un processus biologique de dégradation de la matière organique sous l'action de populations microbiennes appropriées qui, en l'absence d'oxygène, produit un mélange de méthane et de gaz carbonique ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) appelé **biogaz**. Elle s'applique à la plupart des déchets organiques, qu'ils soient d'origine municipale, industrielle ou agricole, solides ou liquides.

La matière biodégradable est transformée en un **compost** désodorisé et hygiénisé et en **biogaz** (**biométhane**) énergétique, compose d'environ 60% de méthane, de 40% de CO_2 et de composés gazeux à l'état de traces (H_2S , NH_3 ...).

4.1.2. Les grandes étapes de la biodégradation des déchets

La biométhanisation, qui s'effectue en cellule close (digesteur), à l'abri de l'air, se divise en quatre étapes principales : l'**hydrolyse**, l'**acidogénèse**, l'**acétogénèse** et la **méthanogénèse** (figure 35).

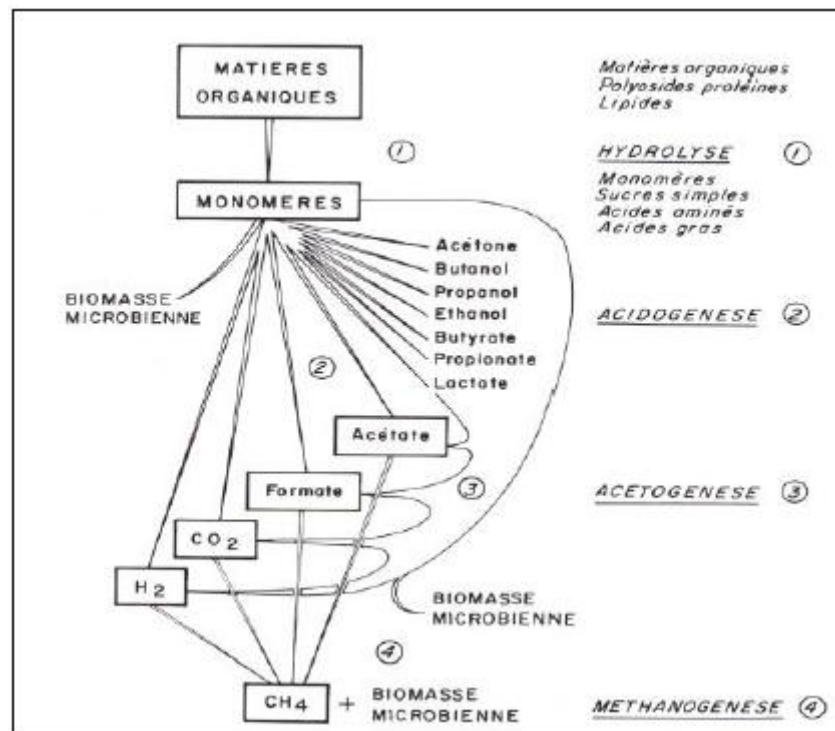


Figure 35 : Etapes biochimiques de la dégradation anaérobie de la matière organique.

Ce processus biologique nécessite une préparation mécanique des déchets par broyage grossier puis fin des classes fermentescibles, suivi d'un criblage et tamisage, puis d'une humidification.

(1) L'hydrolyse

Les macromolécules (protéines, lipides, polysaccharides) qui constituent la matière organique se décomposent en petites molécules solubles (acides gras, mono et disaccharides, peptides et acides aminés). C'est une étape importante avant le procédé de fermentation, car les bactéries fermentatives ne peuvent pas absorber les polymères organiques complexes directement dans leurs cellules. Cette étape est le plus souvent lente.

(2) L'acidogenèse

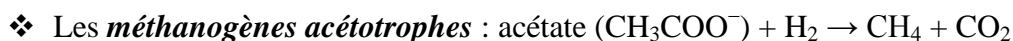
Au cours de cette étape, les composés obtenus lors de l'hydrolyse sont transformés en acides gras volatils (AGV) (acétiques, propioniques), en alcools (éthanol), en acides organiques (lactiques) en hydrogène et en dioxyde de carbone.

(3) L'acétogenèse

L'étape d'acétogenèse permet la transformation des divers composés issus des phases précédentes en précurseurs directs du méthane : l'acétate, le dioxyde de carbone et l'hydrogène. Lors de cette étape, l'hydrogène produit doit être éliminé en continu pour éviter son accumulation, et par conséquent, l'arrêt de l'acétogenèse.

(4) La méthanogenèse

Dernière phase au cours de laquelle les produits issus de l'acétogenèse (acétate, formate, hydrogène, dioxyde de carbone) sont minéralisés et transformés en méthane par des microorganismes méthanogènes (anaérobies stricts). Cette transformation est réalisée selon deux voies : l'une à partir de l'hydrogène et du dioxyde de carbone via les espèces dites **hydrogénotrophes**, et l'autre à partir de l'acétate en utilisant les espèces **acétotrophes**, selon le mécanisme suivant :



Environ 60 à 70 % du méthane est produit par les méthanogènes acétotrophes et les méthanogènes hydrogénotrophes.

Il est à signaler que cette étape est fortement influencée par les conditions opératoires telles que : la composition du substrat, le débit de la charge d'alimentation, la température, le pH, la composition du milieu, etc. Par exemple, un surplus de la charge entrante dans le digesteur conduit à une variation brusque de la température ; aussi la présence d'un excès d'oxygène peut inhiber la production du biométhane.

4.1.3. Principaux déchets concernés par la biométhanisation

Les déchets susceptibles d'être traités par digestion anaérobie sont de trois types :

- 1. Déchets ménagers et assimilés** : fraction fermentescible des déchets ménagers (déchets de plantes, gazon, déchets de fruits et légumes, restes de repas, etc.), sous-produits de l'assainissement urbain (boues d'épuration, refus de dégrillage) ;
- 2. Déchets agricoles** : résidus de grandes cultures (paille, ensilage "conservation des fourrages verts dans des silos", refus...), déjections animales (excréments : fumier, lisier) ;
- 3. Déchets industriels**, qui peuvent être classés en trois catégories distinctes :
 - ✓ Biodéchets industriels, notamment les déchets de restauration.
 - ✓ Fraction fermentescible des DIB résiduels (part restante après tri des emballages et divers recyclables).
 - ✓ Boues et effluents des industries agroalimentaires, déchets de processus des industries transformatrices de matières végétales et animales.

4.1.4. Intérêt technologique de la biométhanisation

La technologie du biogaz présente un triple intérêt à savoir : énergétique, environnemental et agricole. La valeur énergétique d'un mètre cube de biogaz correspond à : $\approx 0,94 \text{ m}^3$ de gaz naturel, 1,15 litre d'essence, 1 litre de mazout, 2,1 kg de bois sec, 1,7 litre d'alcool à brûler, 1,3 kg de charbon et 9,7 kWh d'électricité.

Le traitement des déchets par la technologie de la biométhanisation peut offrir des éléments de réponse aux problèmes liés à l'environnement :

- La destruction de nombreux germes pathogènes.
- L'élimination des odeurs par une stabilisation de la matière organique.
- La protection des eaux de ruissellement et souterraines.

4.1.5. Avantages et inconvénients de la biométhanisation

Parmi les avantages de la technologie de biométhanisation, nous citons les plus importants :

- mise en œuvre aisée du procédé ;
- possibilité de traiter des charges organiques élevées allant de 2 à 40 kg de DCO/m³ de réacteur et par jour avec des taux d'épuration pouvant atteindre 80 à 98% sur la DCO ;
- production d'un biogaz propre et renouvelable ;
- économie d'énergie par diminution de la consommation des énergies fossiles ;

- dépollution des effluents ;
- traitement des déchets et élimination des odeurs ;
- réduction du nombre de micro-organismes pathogènes ;
- protection de l'environnement par réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- durabilité du procédé.

Cependant, cette technologie présente quelques inconvénients :

- forte sensibilité aux variations de la charge entrante et aux composés toxiques ;
- dégradation plus lente que celle réalisée au moyen des procédés aérobies ;
- coûts d'investissement assez élevés ;
- faible vitesse de croissance des bactéries et par conséquent une cinétique d'épuration lente ;
- les populations microbiennes sont sensibles à la présence dans le milieu de l'oxygène et de métaux lourds ;
- le traitement par digestion anaérobie est souvent insuffisant pour rejeter directement les effluents dans le milieu naturel : un post-traitement aérobie est souvent indispensable pour éliminer certains éléments tels que : le carbone, l'azote et le phosphore.

4.1.6. Paramètres à contrôler dans une installation de biométhanisation

- **pH** proche de la neutralité ;
- **température** mésophile, généralement de $35 \pm 2^\circ\text{C}$;
- rapport optimal **C/N** entre 20 et 30 (au delà duquel le % de méthane dans le biogaz chuterait) ;
- **AGV**, normalement inférieurs à 500 mg/l.
- l'**agitation** (15 min toutes les 2 h) améliore le contact substrat/biomasse active. Le brassage, l'homogénéisation et la recirculation active les zones mortes du milieu de culture.

4.1.7. Exemple de réalisation industrielle : Procédé Valorga

Le procédé Valorga de biométhanisation des ordures ménagères a été développé au début des années 1980, puis teste de 1984 a 1990 a l'échelle de pilote industriel (8 000 t d'ordures par an) à Grenoble (France). La figure 36 présente le synopsis du procédé. La filière de traitement comporte quatre étapes principales : *tri* en amont sur les ordures entrantes, *méthanisation*, *pressage* et *affinage* (maturation) de la matière digérée.

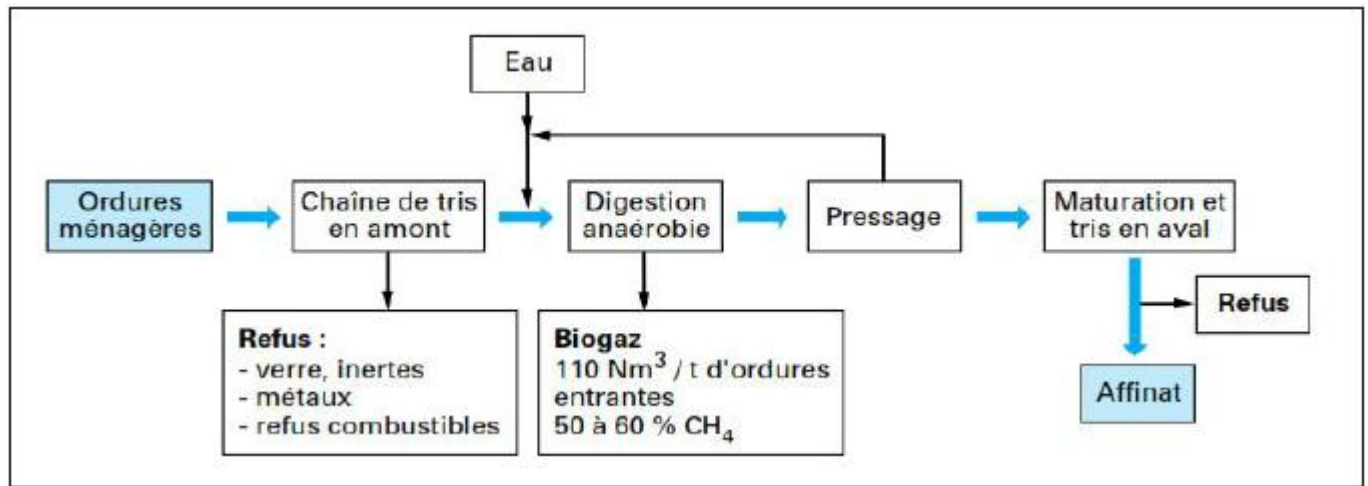


Figure 36 : Diagramme synoptique du procédé Valorga de méthanisation des ordures Ménagères.

1. Le tri

Les biodéchets suivent une chaîne de tri automatique afin d’extraire les diverses indésirables présents dans les ordures ménagères. Ils sont broyés, criblés, triés par tables densimétriques, déferrailés et malaxés avant introduction dans des digesteurs, cœur du procédé.

Le tri « en amont » extrait environ 30 à 35% de la masse d’ordures entrantes, qui sont constitués de refus de différentes natures (verre, inertes, métaux) et de refus combustibles qui sont un mélange de papiers/cartons, plastiques, bois et autres matières organiques.

2. La digestion

Le reste de la matière (65 à 70% de la masse entrante) subit le traitement biologique de méthanisation. La matière organique est d’abord humidifiée (avec de l’eau provenant pour partie du pressage de la matière digérée) et malaxée sous forme de boues très épaisse à 30–35 % de matières sèches. Puis la matière est transférée dans les digesteurs constitués par quatre cuves cylindriques de 2400 m³ chacune.

La température est maintenue à 37–40°C, ce qui nécessite une autoconsommation de biogaz de l’ordre de 10% de la production. Le temps de séjour est de 18 à 25 jours. Le mélangeage et la circulation de la matière dans les digesteurs sont assurés par injection de biogaz comprimé à la base des digesteurs. La production de biogaz est de l’ordre de 150 Nm³/t de matière entrant dans les digesteurs, soit environ 110 Nm³/t d’ordures entrantes à l’usine. Le biogaz produit contient 50 à 60% vol. de CH₄ et le complément n’est quasiment constitué que de CO₂.

3. Le pressage de la matière digérée

Après digestion, la matière soutirée des digesteurs est traitée sur filtre-pressé. On en extrait des jus qui sont recyclés, après centrifugation, pour être malaxés avec les ordures entrantes. Le pressât, contenant environ 55 % en masse de matières sèches est alors dirigé vers la chaîne d’affinage.

4. L'affinage

Le pressât est disposé en andains (tas), sous hangar. L'aération, lors de sa manutention, permet une maturation aérobie et un séchage progressif de la matière. Le temps de séjour est d'au moins un mois. L'**affinât** (matériau similaire au compost) est ensuite tamisé puis débarrassé des inertes dans un épierreur pour en faire un amendement organique.

La production massique d'amendement organique est de l'ordre de 25 à 30% de la masse des ordures entrantes. La destination des affinâts issus de la biométhanisation de déchets résiduels est fonction de leur qualité :

- ❖ Utilisations telles que le comblement d'anciennes mines, comme matériaux de recouvrement d'anciennes décharges ou de réhabilitation de sites pollués...
- ❖ Utilisation sur des sols à usages non alimentaires : plantations en bordures d'autoroutes, nouvelles plantations forestières, cultures de tabac...
- ❖ Stockage en CSDU (Centre de Stockage des Déchets Ultimes) comme déchets ultimes stabilisés.

4.2. COMPOSTAGE

4.2.1. Définitions

Il existe plusieurs définitions assez voisines du compostage qui permettent de le définir de la manière suivante :

Le **compostage** est un processus contrôlé de dégradation des constituants organiques (substrats) organiques, sous forme solide ou semi-solide et d'origine végétale et animale, par une succession de communautés microbiennes évoluant en condition aérobies, entraînant une montée en température et conduisant à l'élaboration d'une matière organique humifiée et stabilisée (Figure 37). Le produit ainsi obtenu est appelé **compost** (matériau stable et granulaire).

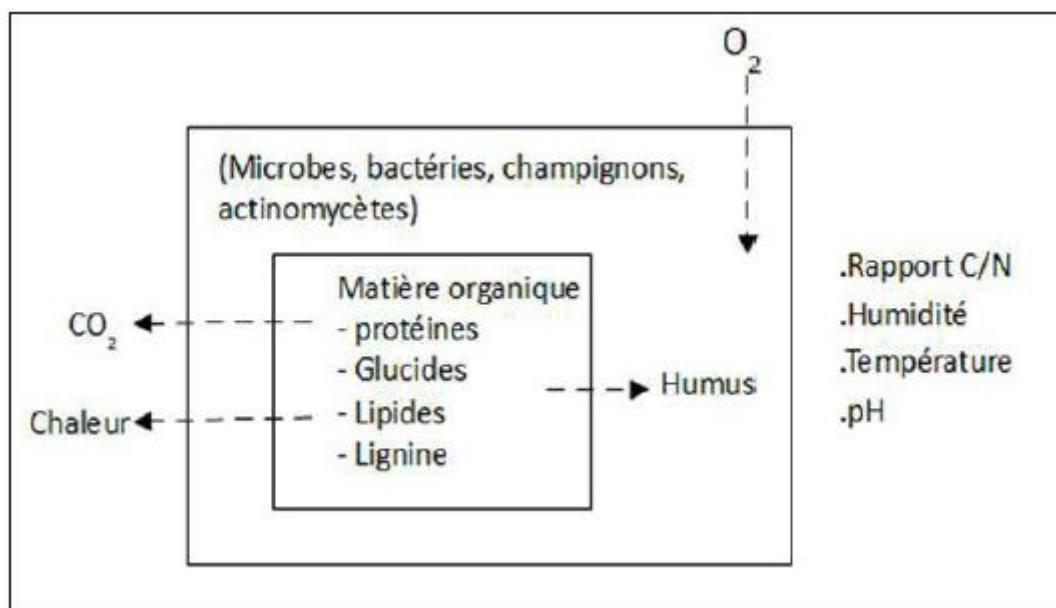


Figure 37 : Schéma descriptif du principe de compostage.

Le compostage a pour objet une accélération et une optimisation des processus biologiques aérobie de dégradation permettant l'humification (formation de l'humus) des matières organiques d'origines végétales ou animales : glucides simples ou condensés (cellulose), protéines, graisses, résines et surtout lignine... par des micro-organismes (bactéries : eubactéries mésophiles et thermophiles, actinomycètes (Streptomyces), levures et des champignons (Figure 38)), lorsque les conditions de température, d'humidité, d'oxygénation et de pH du milieu sont convenables.

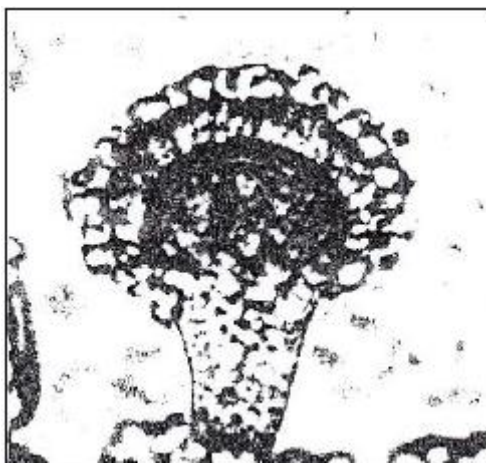


Figure 38 : *Aspergillus fumigatus*. Capable de dégrader la cellulose, ce champignon est un habitant normal du compost.

Le compostage est un traitement biologique de déchets organiques permettant de poursuivre un ou plusieurs des objectifs suivants :

- stabilisation du déchet pour réduire les pollutions ou nuisances associées à son évolution biologique ;
- réduction de la masse du déchet ;
- production d'un compost valorisable comme amendement organique des sols.

En résumé, tous les compostages sont basés sur l'équation globale de **biooxydation** de la matière organique (MO) suivante :



En tant que mode de traitement, le compostage possède deux atouts importants :

- ✓ une **technicité** relativement simple adaptée à toute taille de gisement et tout type de déchets organiques ;
- ✓ et un **coût de revient** intéressant par rapport aux autres coûts de traitement (incinération, CET II).

4.2.2. Qualité du compost

Le **compost** est la matière humique stable, assainie, riche en matière organique et non nauséabonde, qui résulte du compostage des biodéchets... Il est composé pour l'essentiel d'une fraction organique stabilisée et de composés minéraux. L'action de composter est donc de produire de la matière organique de type humique stable.

Le degré de maturité s'exprime généralement par la valeur du rapport (**MO/N**) de la matière organique (MO) à l'azote total (N). Sachant que : **MO = C/0,47**.

Les composts sont classés selon le degré de maturité comme suit :

- **Compost frais** (température de 60°C pendant au moins 4 jours) : **MO/N > 30**
- **Compost mûr** (stabilisation de la courbe de température) : **25 < MO/N < 30**
- **Compost demi-mûr** (état de maturité intermédiaire) : **MO/N < 25**

4.2.3. Paramètres à contrôler lors du compostage

Pour produire des composts de qualité, un contrôle sévère doit être exercé sur les différents paramètres du compostage qui influencent les processus de transformation :

- ❖ la **température** (élévation en fonction des mécanismes biologiques) ;
- ❖ la **teneur en eau** (teneur optimale voisine de 50 à 60%) ;
- ❖ l'**oxygène** et l'**air de ventilation** (pour maintenir une activité microbienne aérobie optimale) ;
- ❖ la nature et la **granulométrie** du substrat ;
- ❖ le rapport **carbone/azote** (C/N théorique proche de 30) ;
- ❖ et la valeur du **pH** (limites acceptables comprises entre 5 et 7).

Il est à signaler que ces facteurs sont interactifs, ce qui rend délicat le pilotage d'une unité de compostage.

4.2.4. Les quatre phases du compostage

L'évolution schématique de la température au sein du compost permet de définir quatre phases au cours du compostage (Figure 39).

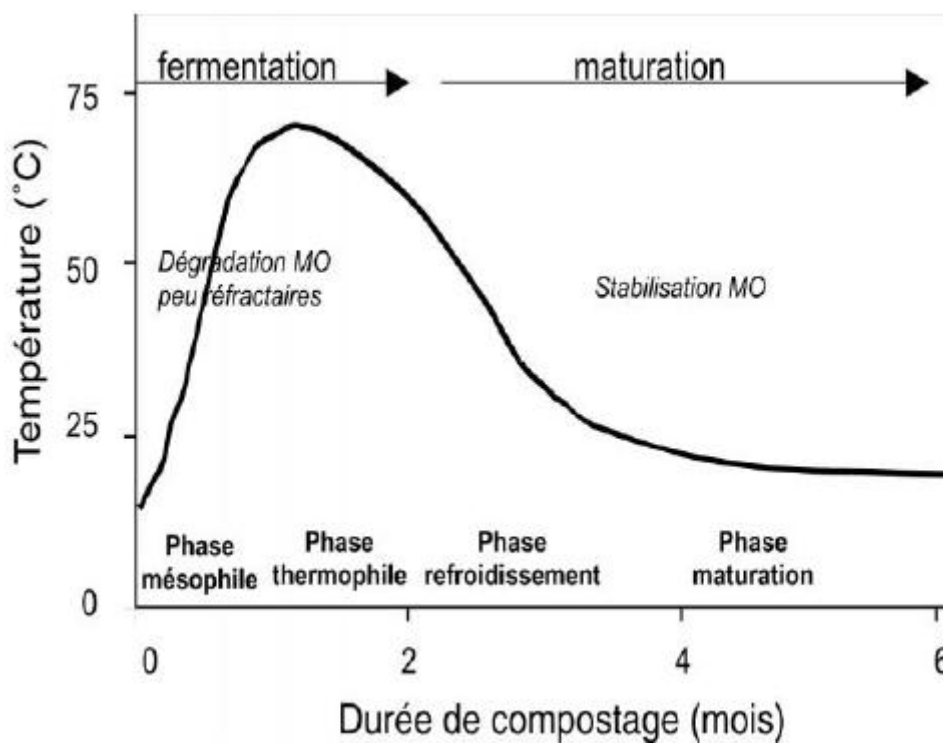


Figure 39 : Courbe théorique de l'évolution de la température au cours du compostage.

1. La **phase mésophile** est la phase initiale du compostage. Durant les premiers jours de compostage, la présence de matières organiques facilement biodégradables entraîne une forte activité microbienne (bactéries et champignons) générant une forte production de chaleur et une montée rapide de la température au cœur du compost.
2. Très vite la température atteint des valeurs de 60°C voire 75°C. Cette phase est appelée **phase thermophile** car seuls les micro-organismes thermorésistants (essentiellement des bactéries) peuvent survivre à ces hautes températures. Au cours de cette phase, une part importante de matière organique est perdue sous forme de CO₂, et un assèchement du compost lié à l'évaporation de l'eau est souvent observé.
3. A la phase thermophile succède la **phase de refroidissement**. La diminution de la quantité de matières organiques (MO) facilement dégradables provoque un ralentissement de l'activité microbienne. La chaleur générée par la dégradation microbienne est alors inférieure aux pertes dues aux échanges surfaciques et à l'évaporation, entraînant un refroidissement du compost. Cette phase de refroidissement peut être très progressive ou au contraire très rapide en fonction des conditions climatiques ou de la taille du tas de compost par exemple. Au cours de cette phase, des micro-organismes mésophiles colonisent à nouveau le compost.
4. Au cours de la dernière phase appelée **phase de maturation**, les processus d'humification prédominent, ainsi que la dégradation lente des composés résistants. Cette phase de maturation dure jusqu'à l'utilisation des composts.

Les deux premières phases (mésophile et thermophile) qui sont des phases de dégradation des matières organiques sont regroupées sous le nom de **fermentation**, correspondant à une phase de dégradation intensive de la matière organique.

4.2.5. Procédés de compostage

Classiquement, pour le compostage des déchets ménagers et assimilés deux principaux procédés sont envisagés. Il s'agit du **compostage en andains** (naturel ou lent) et du **compostage en récipients clos** (accéléré).

Il existe un autre mode de compostage qui est le **lombriocompostage**, ou le **vermicompostage**, qui est une variante reposant sur l'utilisation de vers de terre (**lombrics**) pour consommer et dégrader la matière organique du déchet. L'espèce la plus couramment utilisée est **Eisenia foetida** (tigre rouge violacé et jaune).

Il peut s'utiliser :

- soit en une seule étape de traitement (réservé au domaine agricole sur des tas ou andains présentant un rapport surface/volume important (de l'ordre de 2,5 m²/m³ de déchet) ;
- soit après une étape de fermentation chaude en substitution de l'étape classique de maturation (ce qui évite le problème d'échauffement) dans des systèmes plus compacts (rapport surface/volume faible). Le compost obtenu (lombricompost) est alors constitué par les excréments des vers qui ingèrent et digèrent la matière organique résiduelle.

4.2.5.1. Compostage en andains à l'air libre (lent)

Cette technique consiste, après traitement mécanique et éventuellement adjonction d'eau, à mettre les déchets broyés sur une plate-forme appropriée de fermentation : des andains ou des tas de substrats allongés de section triangulaire, de 2 à 3 m de hauteur sur un diamètre à la base de 3 à 5 m. Typiquement, les andains sont des tas dont la longueur peut atteindre une centaine de mètres et sont disposés par rangées parallèles et voisines (Figure 40).

Ces tas sont retournés régulièrement au moyen d'un trax ou de machines plus spécialisées : les produits doivent être retournés tous les 10 jours du premier mois, puis une fois par mois pendant les deux mois suivants. Après chaque retournement, on constate une brusque élévation de la température, qui peut atteindre 75°C ; provoquée par une accélération de l'activité des bactéries aérobies thermophiles. Après trois mois, la phase active de la fermentation (phase thermophile) est terminée et il n'y a plus que la maturation (la température redescend lentement et revient à 30°C : compost prêt).



Figure 40 : (a) Opération de compostage en andains, (b) Engin utilisé pour aérer le compost mis en andains.

Cette structure simple est à ciel ouvert, soumise au climat et aux intempéries, d'où des risques de lixiviats, qui doivent être récupérés et traités, des risques d'envol de poussières pouvant provoquer des gênes auprès des riverains.

De plus, l'andain peut être habité par des animaux indésirables. Une plate-forme de compostage comporte plusieurs andains, cela nécessite une surface au sol suffisante pour pouvoir les retourner.

A partir de ces constats, de nombreux systèmes ont été mis au point : plate-forme de compostage sous hangar, alimentation par air comprimé dans les andains, disposition des mélanges à composter dans des box, des containers fermés et alimentés en air comprimé, des enceintes étanches et isolées, aérées, etc. Seuls les coûts des appareils et du traitement, le coût de production du compost et son prix de vente limitent le développement d'une telle technologie.

Matériels utilisés

Les principaux matériels nécessaires à une plate-forme de compostage en fonctionnement en sont : le *broyeur*, le *retourneur d'andain* et le *crible* (Figure 41).



Figure 41 : (a) Broyeur, (b) Retourneur d'andain, (c) Crible (trommel rotatif, tamis à disques, tamis vibrants)

4.2.5.2. Compostage en bioréacteur (accéléré)

Pour mieux contrôler et guider le processus de compostage, les produits broyés sont stockés dans des tours fermées (réacteurs biologiques). Il existe de nombreux types de réacteur permettant un brassage (retournement) continu ou discontinu des produits, l'aération par aspiration d'air et le contrôle de l'humidité par adjonction d'eau du milieu en compostage.

Leur forme s'étend du tunnel au tambour en passant par le silo. Certains sont en rotation, d'autres sont fixes et pourvus de dispositifs internes assumant les fonctions ci-dessus. Certains sont alimentés en continu alors que d'autres se limitent à un fonctionnement par batch.

Ce type de compostage contrôle et optimise au mieux les paramètres influençant (température, oxygène, humidité...) afin de réduire les temps de séjour. Ce système réduit ainsi la phase active de la fermentation aérobie (phase thermophile) à quelques jours. Cette première phase dure 8 à 21 jours et suivie d'une phase de maturation "en tas" durant plusieurs semaines (obtention d'un *compost mûri*).

Le compostage en bioréacteur présente des avantages multiples :

- ❖ favorise l'**oxydation** des composées organiques ;
- ❖ fermentation **contrôlée** (diminution des risques de nuisances) : odeurs et production de lixiviats inexistantes ou réduites au minimum ;
- ❖ procédé **clos** (pas de contact avec l'extérieur : oiseaux, mouches et rongeurs) ;
- ❖ destruction plus complète des **germes pathogènes** ;
- ❖ **température** plus régulièrement maintenue.

La figure 42 suivante illustre une installation type de compostage a l'échelle industrielle.

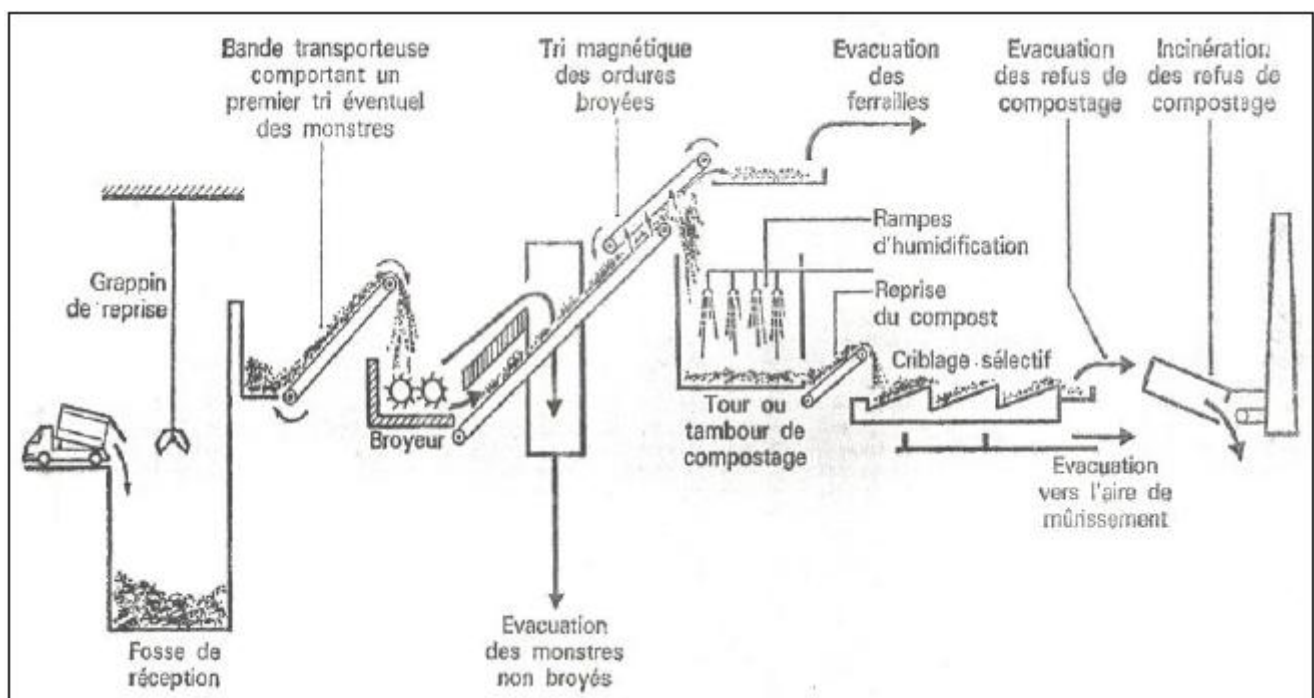


Figure 42 : Schéma d'une installation industrielle de compostage.