

# La maîtrise des traitements biologiques des déchets biodégradables : de la nécessité d'un dialogue entre le génie des procédés et l'ingénierie

■ A. LE BOZEC<sup>1</sup>

Mots-clés : déchets biodégradables, traitements biologiques, ingénierie, procédés

## 1. Introduction

En France, selon les derniers chiffres connus de 2004 [ADEME, 2006], le compostage concerne 4,6 millions de tonnes de déchets municipaux (93 % des déchets organiques et 5 % des ordures ménagères) et la méthanisation traite 150 000 tonnes, essentiellement des ordures ménagères. Sur le total de 46,8 millions de tonnes de déchets municipaux, seulement 10 % font donc l'objet de traitements biologiques.

La directive européenne 1999/31/CE du 26 avril 1999 relative à la mise en décharge des déchets demande aux États membres de définir une stratégie nationale afin de réduire les déchets municipaux biodégradables mis en décharge à 75 % de la quantité de 1995 en 2006 et à 35 % en 2016. Ainsi, pour les ordures ménagères, la stratégie nationale demande de ramener les quantités orientées vers le stockage et l'incinération à 200 kg/hab/an à l'échéance de 10 ans. À terme, nous devrions donc assister à une évolution de la place des traitements biologiques et de leur rôle dans la gestion des déchets biodégradables, entre valorisation et stabilisation.

Le propos se limite à souligner, à l'expérience de l'analyse de projets et de réalisations, les interactions entre les disciplines « génie des procédés » et « ingénierie » dans la maîtrise des traitements biologiques industriels appliqués aux déchets municipaux. Toute-

fois, il est important de rappeler qu'aucune autre voie de traitement n'est autant dépendante de la nature des déchets et donc de l'existence des collectes sélectives mises en œuvre (emballages, déchets d'activités de soins, déchets phytosanitaires, déchets ménagers spéciaux) et de la présence de déchetteries. De plus, ces installations de traitement biologique s'adressent le plus souvent aux déchets biodégradables d'un territoire, qu'ils soient d'origine municipale ou industrielle.

## 2. Les traitements biologiques et leurs évolutions

Le compostage est un processus<sup>2</sup> de dégradation de la matière organique par fermentation aérobie, sous l'action des micro-organismes, qui s'opère en conditions contrôlées d'aération et d'humidité pour l'obtention d'un produit organique stable et riche en composés humiques, appelé « compost ». La méthanisation met en œuvre un processus de digestion anaérobie qui s'opère en quatre étapes, en milieu généralement humide, pour aboutir au dégagement de biogaz et à un digestat compostable. Elle s'adresse en priorité à des déchets fermentescibles homogènes. Les traitements biologiques s'adressent à des déchets biodégradables variés :

- déchets de jardins,
- déchets des espaces verts publics,
- fraction fermentescible des ordures ménagères,
- ordures ménagères résiduelles,
- boues de stations de dépuración,
- sous-produits des industries agroalimentaires

<sup>1</sup> Cemagref - Unité " Gestion environnementale et traitement biologique des déchets " 17 avenue de Cucillé, CS 64427 35044 Rennes Cedex, France. Mél. : andre.le-bozec@cemagref.fr

<sup>2</sup> Mécanismes fondamentaux de transformation de la matière.

Ces biodéchets peuvent se présenter dans les installations de traitement biologique, soit en un seul flux mono-déchet ou mélange de déchets, soit en flux séparés de déchets.

### 2.1. Une typologie des procédés de traitement biologique

Les procédés<sup>3</sup> de compostage et de méthanisation sont très diversifiés et justifient une typologie par analogie technique. D'autres typologies sont orientées par le mode d'aération : statique, semi-dynamique et dynamique [M. KRANERT, 2002].

#### • Procédés aérobies : compostage

*Procédé ouvert en andains :*

andains statiques, andains retournés, andains aérés, andains aérés et retournés.

*Procédés fermés :*

- Tunnel fermé, conteneur fermé.
- Tube rotatif horizontal.
- Cellule ou silo en hall fermé.

#### • Procédés anaérobies : digestion anaérobie

- Digesteur horizontal.
- Digesteur vertical.

### 2.2. L'évolution des procédés de traitement biologique

L'évolution des traitements biologiques va de pair avec celle des flux de déchets collectés.

Dès les années 1980, plus de 10 % des ordures ménagères brutes étaient traitées par compostage. Mais le broyage en tête, l'absence de collectes sélectives, la présence de déchets toxiques ont conduit à l'obtention d'un compost de mauvaise qualité physico-chimique. La digestion anaérobie a tenté une percée sans grand succès car appliquée à des déchets trop hétérogènes.

À partir de 1990, le compostage en andains retournés des déchets verts d'entretien des espaces publics et des jardins privés se répand et constitue une voie pérenne de valorisation. La stratégie de collecte

<sup>3</sup> Par référence à la technologie mise en œuvre pour la fermentation.

<sup>4</sup> Une définition de ce concept peut être la suivante : « Le traitement mécano-biologique est une combinaison variée de procédés biologiques et de procédés mécaniques choisis et agencés selon l(es) objectif(s) fixé(s) à l'unité de traitement devant assurer au moins la valorisation des ordures ménagères résiduelles ».

sélective au porte-à-porte des biodéchets ménagers (déchets alimentaires + déchets de jardins) en vue d'un compostage centralisé en andains aérés ou en réacteurs fermés est mise en œuvre par des collectivités, mais son extension se heurte à l'absence d'analyse économique de la filière.

Depuis 2000, le concept MBT (traitement mécano-biologique)<sup>4</sup> se développe, à l'origine en Allemagne et Autriche, pour pré-traiter le flux des ordures ménagères résiduelles afin d'assurer une stabilisation par fermentation de la fraction biodégradable avant la mise en stockage. Mais dans un contexte difficile d'implantation des installations de stockage et d'incinération, le concept jouit d'une image nouvelle et attractive par les potentialités de valorisation organique et thermique. Ces installations privilégient les traitements en réacteurs ou en halls fermés qui permettent de limiter les impacts sur l'environnement (gaz, odeurs).

### 3. La maîtrise des procédés de traitement biologique

Toute installation de traitement biologique (figure 1) comprend au moins les phases de pré-traitement afin de préparer le substrat, de fermentation mettant en œuvre des processus, d'affinage pour extraire les éléments physiques indésirables, de maturation ou stabilisation afin de rendre le produit final compatible avec sa destination.

La compréhension des réactions chimiques du processus biologique de la fermentation relève de la discipline « génie des procédés » portée par la recherche scientifique (figure 2). L'application des résultats de

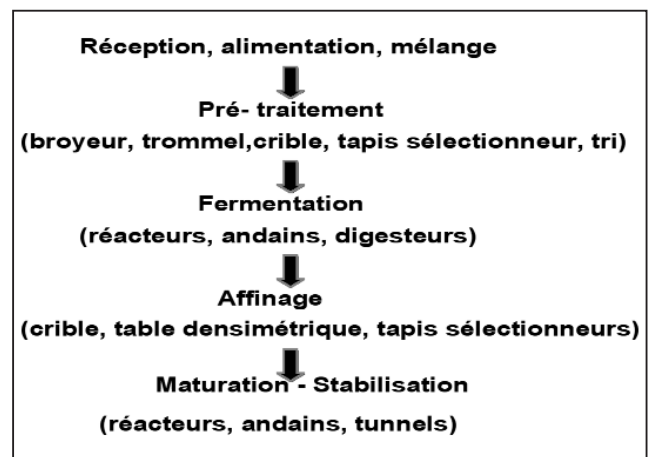


Figure 1. Synoptique type d'une installation de traitement biologique

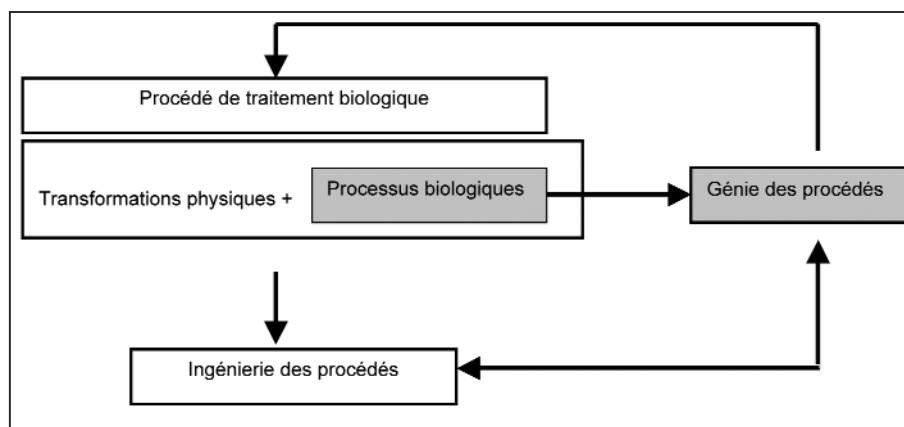


Figure 2. Liaisons « génie des procédés - ingénierie »

cette discipline dans un procédé industriel constitue le savoir-faire des opérateurs qui, au travers de « l'ingénierie », doivent concevoir et dimensionner la chaîne de traitement.

L'installation doit traiter les déchets, les valoriser et réduire les impacts environnementaux. Nous avons montré que l'on assiste à une évolution d'installations mono-procédés vers des installations qui combinent des procédés de traitement biologique reliés entre eux par des flux de déchets subissant des pré-traitements mécaniques. Nous sommes donc amenés à nous interroger sur les perturbations qu'entraînent ces pré-traitements, d'une part sur les évolutions du processus de dégradation de la matière organique (génie des procédés) et d'autre part, sur la conception et les performances de ces installations (ingénierie des procédés).

### 3.1. L'approche « génie des procédés » : influence des process<sup>5</sup>

Les questions posées à la recherche sont nombreuses, citons :

- Quels développements métrologiques spécifiques aux traitements biologiques faut-il conduire ?
- Comment la détermination de la vitesse de dégradation des déchets conduit-elle à concevoir et dimensionner les réacteurs du process ?
- Comment assurer la « transposabilité » des résultats expérimentaux vers la conception des installations industrielles ?

<sup>5</sup> Agencement des équipements en vue de l'obtention de sous-produits définis.

- Quelle stabilité biologique atteindre selon les produits attendus (compost, stabilisé) ?

#### • Besoins de métrologie

La méthode d'analyse des inertes et impuretés des composts a permis des avancées sur la connaissance des performances des équipements mécaniques et sur la définition des chaînes de compostage. De nouvelles méthodes de mesures (micro-analyse par microscopie électronique, fractionnement biochimique de la matière organique, respirométrie) vont permettre une compréhension plus fine des phénomènes de transformation de la matière organique et de ses composantes lors du processus de fermentation. De même, des besoins se font sentir d'outils d'aide à l'exploitation de ces installations (biodégradabilité, respirométrie, interprétation des analyses des gaz, etc.).

#### • Caractérisation des substrats

Des travaux de recherche sont engagés sur la compostabilité des produits, sur la caractérisation et la compréhension des écoulements liquides et gazeux et sur la cinétique de biodégradation des substrats lors de processus de fermentation aérobie. La transposition des résultats expérimentaux vers la vraie grandeur, dans des outils de simulation, impliquera une confrontation avec le terrain afin de prendre en compte :

- la nature intrinsèque des déchets à traiter,
- les modifications apportées par les pré-traitements mécaniques (trommel, crible, tris aérodynamique ou densimétrique) sur la biodégradabilité des produits entrants dans les réacteurs,

- des éventuelles pré-fermentations en biostabilisateur qui assurent une pré-dégradation de la matière organique.

#### • **Connaissance de l'évolution de la matière organique**

Une meilleure connaissance, par respirométrie, des phénomènes de consommation d'oxygène dans les phases de fermentation et de maturation permettrait d'améliorer l'optimisation de l'aération et donc des temps de séjour qui déterminent le dimensionnement des réacteurs. Toutefois, le passage du laboratoire aux conditions réelles nécessite de faire intervenir, dans les modèles de simulation, les effets des retournements, l'inertie des réacteurs et des andains et les tassements au moyen de coefficients de correction de transferts. Le développement du traitement mécano-biologique interroge sur le niveau de stabilisation biologique à atteindre pour optimiser le bilan des gaz à effet de serre entre la fermentation et le stockage ultérieure. De manière plus générale, les travaux sur l'évolution des phases de la dégradation des composants de la matière organique devraient aider à la conception de la séparation des opérations de fermentation et de maturation et entre les phases propres à chaque type de fermentation.

### **3.2. L'approche ingénierie des procédés : complexification des process**

Les préoccupations des opérateurs industriels se portent sur les questions suivantes.

- Quelle est la «compostabilité» des déchets organiques et leurs vitesses de dégradation ? Quel est le mélange de déchets biodégradables possible ?

- Comment concevoir (étapes du traitement, temps de séjour), dimensionner et optimiser (disposition, dimensionnement des appareils) la chaîne de traitement ?

- Comment maîtriser l'aération, l'humidification, l'extraction des impuretés et des composants utiles de la matière organique au cours du process pour obtenir des produits de qualité et limiter les impacts environnementaux ?

#### • **Conception des traitements mécaniques**

L'agencement des appareils d'une installation de traitement biologique doit tendre vers l'obtention de performances techniques et environnementales. Ainsi, le broyage préalable à la fermentation est à réserver aux produits propres et exempts d'éléments traces métalliques ou d'indésirables physiques, comme les déchets verts. De même, le placement des appareils mécaniques (trommel, crible, tapis sélectionneur, tri aéroulque etc.) sur la chaîne du process conditionne la répartition des flux et la nature des déchets orientés vers le(s) réacteur(s) des traitements biologiques. En particulier, la conservation des papiers-cartons utiles à la méthanogénèse et à la production de compost doit être recherchée pour la fermentation. L'intégrité physique des impuretés (verre-cailloux, calcaires, plastiques) est nécessaire au cours des traitements mécaniques pour rendre possible leur extraction.

#### • **Conception des réacteurs**

La transposition des résultats expérimentaux à la conception d'installations industrielles pose la question du changement d'échelles dans le dimensionnement précis des réacteurs. S'y ajoutent d'autres contraintes, tels les phénomènes hydrauliques selon les formes possibles des réacteurs au regard de l'homogénéité de brassage du mélange et du respect des temps de séjour. Ceci est important dans les réacteurs de fermentation et de maturation, notamment dans les unités de digestion anaérobie. De même la sédimentation éventuelle de certains éléments indésirables lourds sont de nature à réduire les capacités disponibles et par là même de perturber les fermentations (risque de colmatage).

#### • **Maîtrise de l'humidité**

La question de la maîtrise du facteur humidité se révèle aussi complexe entre d'une part, une valeur généralement élevée (> 50 %) nécessaire lors des fermentations et d'autre part, une valeur plus basse (< 40 %) compatible avec un bon fonctionnement des appareils de tri et de séparation mécanique.

#### • **Maîtrise des gaz**

La conception du process peut être guidée par la maximisation de la valorisation, par la minimisation des déchets à stoker et par la limitation des effets environnementaux. Ces différents objectifs peuvent

se révéler antagonistes. Ainsi, afin de limiter les impacts environnementaux du compostage à l'air libre, le process peut être installé en hall fermé avec des conséquences telles que la perturbation de la fermentation par une humidité insuffisante, l'agressivité des gaz sur les équipements, des risques accrus pour le personnel d'exploitation. Le choix se pose du sens de l'aération de la masse des déchets entre l'insufflation soufflage ou l'aspiration.

Des voies de recherche s'ouvrent donc sur l'ingénierie des procédés et l'optimisation des chaînes de traitement. Ils permettront ainsi de définir des éléments plus tangibles à introduire dans les cahiers des charges et aussi à préciser, de manière plus fine, les garanties de performances possibles au regard des caractéristiques des déchets et de la conception de l'installation industrielle.

#### 4. Conclusions et perspectives

Les nombreux travaux conduits sur la cinétique de dégradation des déchets biodégradables doivent prendre en considération, non seulement les caractéristiques des déchets, mais aussi l'influence de la place de la fermentation dans le process. Comme nous l'avons vu, de multiples pré-traitements peuvent modifier très sensiblement les caractéristiques du substrat qui au final se présentera à l'entrée des réacteurs de fermentation.

De plus, la place future de la filière de valorisation organique des déchets biodégradables repose aussi sur l'obtention de hautes performances des installations, tant en bilan matière qu'en matière environnementale. Des recherches importantes sont donc à engager sur ce créneau de l'ingénierie et en particulier sur les assemblages et les combinaisons des appareils mécaniques pour la préparation des substrats et pour l'affinage des sous-produits.

Enfin, les impacts environnementaux des traitements biologiques (odeurs, émissions gazeuses, poussières, bio-aérosols, micropolluants organiques etc..) doivent être mieux connus et les mécanismes de leurs formations mis en relation avec les conditions d'exploitation des déchets réceptionnés. De plus, les sous-produits valorisables (compost, digestat, stabilisat, biogaz, combustible) appellent une définition de leurs spécifications physico-chimiques selon les débouchés envisagés, ainsi qu'une évaluation des risques sanitaires.

Au final les chercheurs en génie des procédés et les concepteurs de l'ingénierie des process ont un large spectre de dialogue et de collaboration sur les traitements biologiques. La production de connaissances et d'outils d'analyses et l'évolution du savoir-faire industriel enrichiront ce dialogue et convergeront vers des réponses aux enjeux de la maîtrise des traitements biologiques des déchets biodégradables.

#### Bibliographie

- ADEME, 2006, SINOE, "ITOM 2004".  
KRANERT M., 2002, "Typologie des unités de compostage", Université de Stuttgart.

## Résumé

**A. LE BOZEC. La maîtrise des traitements biologiques des déchets biodégradables : de la nécessité d'un dialogue entre le génie des procédés et l'ingénierie**

Afin de satisfaire à la directive européenne qui limite la quantité de déchets biodégradables en centre de stockage, les traitements biologiques de valorisation (compostage, méthanisation, traitement mécano-biologique) vont prendre une place importante dans la gestion des déchets. La maîtrise de ces procédés biologiques passe par une meilleure connaissance des déchets, des processus de dégradation, des émissions gazeuses et des effets des équipements mécaniques. Cette communication vise à montrer la nécessité d'échanges entre la discipline du génie des procédés et l'ingénierie des procédés pour améliorer la maîtrise des procédés biologiques.

## Summary

**A. LE BOZEC. The biological treatment control of biodegradable waste : need for a dialogue between engineering processes and know-how**

In order to satisfy the European directive which limits the quantity of biodegradable waste in landfill, the biological treatments (composting, methanisation, mechanical biological treatment) will take an important place in the waste management. The control of these biological processes require a better knowledge of waste, degradation processes, gas emissions and effects of the mechanical equipment. This communication aims at showing the need for exchanges between the discipline of the chemical engineering and process engineering to improve the control of the biological processes.