

Chapitre 4. Traitement des déchets.

1. Traitement biologique des déchets ménagers et assimilés : Biométhanisation & Compostage

1.1. BIOMETHANISATION

1.1.1 . 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, composé d'environ 60% de méthane, de 40% de CO_2 et de composés gazeux à l'état de traces (H_2S , NH_3 ...).

1.1.2 . 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*.

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'acidogénèse

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'acétogénèse L'étape d'acétogénèse 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'acétogénèse.

(4) La méthanogénèse

Dernière phase au cours de laquelle les produits issus de l'acétogénèse (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 :

- ❖ Les *méthanogènes acétotrophes* : $\text{acétate (CH}_3\text{COO}^\ominus) + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$
- ❖ Les *méthanogènes hydrogénotrophes* : $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

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.

1.1.3. 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.

1.1.4. 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 : □ 0,94 m³ 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.

1.1.5. 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.

1.1.6. Paramètres à contrôler dans une installation de biométhanisation

- pH** proche de la neutralité ;
- température** mésophile, généralement de 35 ± 2 °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.

1.1.7. Exemple de réalisation industrielle : Procédé Valorga Le procédé Valorga de biométhanisation des ordures ménagères a été développé au début des années 1980, puis testé de 1984 à 1990 à l'échelle de pilote industriel (8 000 t d'ordures par an) à Grenoble (France). La figure 2 présente le synopsis du procédé. La filière de traitement comporte quatre étapes principales : *tri* en amont sur les ordures entrantes,

1. Le tri les biodéchets suivent une chaîne de tri automatique afin d'extraire les divers 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 épaisses 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-presses. 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 massive 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.

1.2. COMPOSTAGE

1.2.1. 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 3). Le produit ainsi obtenu est appelé **compost** (matériau stable et granulaire).

Le compostage a pour objet une accélération et une optimisation des processus biologiques aérobies 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 , lorsque les conditions de température, d'humidité, d'oxygénation et de pH du milieu sont convenables.

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 :

Matière organique + Micro-organismes + O₂ □ Produit oxydé (Compost) + CO₂ + H₂O + Chaleur

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).

1.2.2. 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**

1.2.3. 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.

1.2.4. 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 5).

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.

1.2.5. 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** (tigré 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.

1.2.5.1. 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 6).

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).

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*.

1.2.5.2. 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 aérobique (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.

2. Traitement thermique des déchets ménagers et assimilés : Incinération & Pyrolyse

2.1. INCINERATION

2.1.1. Définitions

L'incinération est une technique d'oxydation de la matière organique par voie thermique en présence d'oxygène. Elle permet de réduire fortement le volume (plus de 90%) et la masse (plus de 70%) des déchets ménagers et assimilés entrant en les transformant en gaz, en chaleur et en matériaux stériles et inertes, les cendres et les mâchefers.

L'incinération des ordures ménagères consiste à brûler les ordures dans des fours avec un PCI suffisant pour qu'il ne soit pas nécessaire d'ajouter un combustible auxiliaire. La température optimale d'incinération est de 1000°C. Le refroidissement des gaz de combustion se fait, par transfert calorifique, dans une chaudière à vapeur.

Les gaz formés contiennent essentiellement l'air en excès, la vapeur d'eau, le CO₂, les NO_x, des cendres volantes et, en faibles quantités, des produits divers issus de la combustion : CO, H₂, CH₄, SO₂, etc. La chaleur dégagée est fonction du pouvoir calorifique des déchets. Le PCI moyen des déchets ménagers se situe entre 1200 et 2500 kcal/kg. Les cendres et les mâchefers sont les solides et inertes provenant des matières minérales contenues dans les déchets ménagers (verre, métaux, terres...). Ils représentent 15 à 40% du poids des déchets. Les mâchefers (Figure 9) sont constitués des scories essentiellement siliciques (80 à 90%), de métaux (10 à 15%) et d'imbrûlés (1 à 5%). Les cendres ont une composition analogue à celle des mâchefers, elles sont toutefois plus riches en alumine et en magnésie, que ceux-ci.

Actuellement, en technique routière, les mâchefers issus de l'incinération des ordures ménagères (**MIOM**) sont essentiellement utilisés en couche de forme (ronds points, parking, autoroute) ou remblai (bords d'autoroute, remblais de quais des voies ferroviaires, comblement de mines) pour des chantiers nécessitant des quantités importantes.

2.1.2 . Réactions chimiques intervenant au cours de la combustion

La combustion (ou l'incinération) désigne la réaction d'oxydation complète des déchets solides avec l'air préchauffé injecté dans le four. Les réactions de combustion des déchets ménagers sont multiples et extrêmement variées.

L'hydrogène disponible réagit en partie avec le chlore issu de la décomposition des déchets plastiques (PVC ou autres) pour former de l'acide chlorhydrique gazeux.

A haute température, l'azote issu des déchets ou de l'azote de l'air réagit avec l'oxygène disponible pour former des oxydes d'azote NO, NO₂ et N₂O désignés sous le terme générique de NO_x.

Le four produit des scories solides ou mâchefers et des fumées chargées de poussières. La plus grande partie des gaz contenus dans les fumées est constituée par N, CO₂ et H₂O ainsi que par de l'oxygène en excès. Les autres gaz, généralement fixés par adsorption sur les poussières rejetées par la cheminée, n'existent qu'en faible proportion, suffisante cependant pour qu'il soit nécessaire de prendre leur caractère polluant en considération.

2.1.3. Règle des 3 T

L'incinération est un processus d'oxydation de la partie combustible d'un déchet, au sein d'une unité adaptée aux variations de caractéristiques des déchets en contrôlant trois facteurs : la *température de combustion*, le *temps de séjour* et la *turbulence* (règle des 3T). Le respect de cette règle garantit un bon fonctionnement du four.

2.1.3.1. La température

Elle doit être suffisante pour réduire la majorité des molécules auto-combustibles. En général, la température doit être comprise entre 850 et 1000°C pour empêcher la formation de gaz toxiques polluants. Cette fourchette de température convient à l'incinération des déchets ménagers et assimilés avec une consommation minimale de combustible d'appoint. Toutefois, des températures élevées peuvent entraîner la formation de dioxyde d'azote, alors que les basses températures favorisent le dégagement de monoxyde de carbone et des dioxines.

2.1.3.2. Le temps de séjour

C'est le temps pendant lequel les déchets sont exposés aux hautes températures. Il doit être suffisamment long pour permettre à l'ensemble des réactions chimiques de se réaliser. Il doit être de l'ordre de 30 à 60 min pour assurer une combustion complète des déchets. Le temps de séjour est déterminé par la relation suivante :

2.3.3.3. La turbulence

Elle exprime le mélange entre les combustibles et l'air comburant. Elle doit être suffisante pour maintenir une bonne homogénéité. Ce qui a pour rôle d'éviter la présence de zones froides, qui diminueraient les vitesses de combustion, et les déficits en oxygène responsables de la formation de matières organiques non brûlées.

2.1.4. Volume d'air et air en excès

Le volume en m³ de l'*air théorique* nécessaire à la combustion de 1 kg de déchets ménagers est calculé à partir de la teneur en pourcentage des composantes élémentaires principales (C, H, O, S), C, H, S et O représentent la fraction massique de ces constituants dans le déchet, en pourcentage.

Le volume d'air (V_a) ou volume d'air théorique n'est pas suffisant en pratique pour assurer la combustion complète d'un combustible et en particulier des déchets, vu leur particularité physique et leur nature très hétérogène. C'est pourquoi il faut augmenter la quantité d'air amenée par rapport à l'air théorique requis et parler alors « d'excès d'air ».

L'*excès d'air* s'exprime en pourcentage et se définit comme le rapport de la quantité d'air en surplus nécessaire à la quantité d'air théorique permettant d'assurer la combustion complète.

En plus d'assurer la combustion complète, l'excès d'air a pour effet direct d'abaisser la température des gaz de combustion; par conséquent, c'est un paramètre important dans le contrôle du procédé. L'excès d'air se mesure par la teneur en CO₂ ou en O₂ dans les gaz de

combustion. Dans les installations courantes, l'excès d'air est de l'ordre de 70 à 100%. **5.1.5. Conditions physiques pour une incinération avec valorisation énergétique**

Le choix de l'incinération est conditionné par l'aptitude du déchet à la combustion. Partant de ce principe, les quatre paramètres physiques essentiels sont le pouvoir calorifique inférieur (PCI), la teneur en eau, la teneur en cendres et la teneur en matières combustibles.

2.1.5.1. PCI

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du déchet intervient à deux niveaux. Il détermine d'abord la capacité du déchet à brûler sans apport supplémentaire de combustible. Ensuite, il est un indicateur indirect de la quantité d'air nécessaire à la combustion et de la quantité de fumée qui sera générée. Connaître le PCI est donc une information importante pour l'exploitant d'une installation d'incinération, qui ajustera les paramètres de fonctionnement de son unité en fonction de sa valeur.

2.1.5.2. Teneur en eau

La teneur en eau joue un rôle important puisqu'elle influe sur l'auto-combustion des déchets ménagers. L'auto-combustion est la capacité que possède un combustible à libérer de l'énergie pour entretenir la combustion sans apport d'énergie auxiliaire. Alors, pour que les déchets ménagers puissent être incinérés sans combustible d'appoint, ils ne doivent pas posséder un taux d'humidité supérieur à 50%.

2.1.5.3. Teneur en cendres (ou inertes)

La teneur en cendres (composées des matériaux minéraux et des métaux) influence le pouvoir calorifique inférieur. Plus elle est élevée, plus la disponibilité énergétique est faible.

2.1.5.4. Teneur en matières combustibles

Les matières combustibles sont des éléments à base de carbone et d'hydrogène (papier, bois, végétaux, plastiques) et à fort pouvoir calorifique (30 à 100% celui du pétrole). Indispensables à la combustion, elles associent en un tout divers élément simple tel que le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, le chlore et l'azote qui s'échappent sous forme de gaz, pour la plupart combinés à l'oxygène en fin de processus. Le teneur des ordures ménagères en matières combustibles varie, en général, entre 15 et 50% par unité de masse.

2.1.6. Diagramme de combustion et diagramme ternaire de Tanner

Le *diagramme de combustion* traduit suivant un système d'axes orthonormés (x, y) la zone de fonctionnement du four (Figure 10). En abscisses le *débit des déchets* exprimée en tonnes/heure et en ordonnées la *puissance thermique* exprimée en thermies/heure (1 thermie = 10^3 calorie). Les différentes valeurs du PCI s'expriment dans ce diagramme suivant un faisceau de droites linéaires (*valeur minimale* : 1200 kcal/kg et *valeur maximale* : 2500 kcal/kg).

Les ordures ménagères ayant un PCI inférieur à 1200 kcal/kg, leur combustion est difficile. La valorisation énergétique est conditionnée par un PCI égal au moins à 1200 kcal/kg, soit 5021 kJ/kg.

Le *diagramme ternaire de Tanner* ou le *triangle d'ordures* (Figure 11) exprime aussi l'aptitude à la combustion des ordures en fonction de leur teneur en cendres et en eau ainsi que

de leur teneur en matières combustibles. La **surface grise** marque le domaine de combustion des ordures sans combustibles supplémentaires (déchets auto-combustibles).

2.1.7. Les différentes phases du processus d'incinération

En général, l'incinération des déchets se déroule en trois phases distinctes, à savoir :

- une phase de séchage avec évaporation de l'eau, durant laquelle se dégagent les matières volatiles ;
- une phase de vaporisation des matières organiques à partir de 200°C ;
- une phase de gazéification et de combustion du résidu carboné : les matières volatiles émises brûlent à partir de 500°C, cette combustion est considérée complète à 1000°C, pour autant que le contact air/combustible soit satisfaisant et que le temps de séjour à ces hautes températures soit suffisant.

Les matières combustibles, constituées essentiellement des éléments C, H, Cl, S, et N, subissent une dégradation thermique conduisant à la génération de CO₂, H₂O et en quantité moindre de HCl, SO_x, NO_x qui se trouvent dans les effluents gazeux. Les fumées produites sont donc riches en poussières et gaz polluants.

2.1.8. Structure d'une installation d'incinération des ordures ménagères Une usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM) comporte généralement les éléments suivants, la fosse de stockage des ordures ;

- le grappin qui mélange les déchets et alimente les trémies situées au-dessus du four ;
 - le four de combustion pourvu éventuellement d'une chambre de postcombustion ;
- la chaudière qui génère la vapeur en refroidissant les gaz de combustion ;
- le système d'extraction des mâchefers et des cendres volantes (résidus de combustion) ;
- le dispositif de traitement et d'évacuation des fumées tels que le dépoussiérage (centrifugation et/ou électro-filtre et/ou filtre à manche), lavage-neutralisation (voie sèche ou semi-sèche, humide ou semi-humide, voie par condensation) ;

2.1.9. Types de fours d'incinération des ordures ménagères

Concernant la phase de combustion en elle-même, plusieurs types de fours ont été développés et sont présentés ci-dessous. La majorité des installations sont équipées de « **fours à grille** », mais d'autres technologies comme les « **fours tournants et/ou oscillants** » ou les « **fours à lit fluidisé** » sont aussi employées.

2.1.9.1. Fours à grilles mobiles

L'incinération a connu sa première et grande révolution technologique dans les années trente avec l'utilisation des fours à grilles mobiles inventés en 1925 par l'ingénieur allemand Joseph MARTIN. C'est le procédé d'incinération le plus utilisé pour les déchets urbains.

Le schéma de principe est représenté sur la figure 47. Dans ce type de four, la combustion des déchets a lieu sur un support mobile, en général une grille, constituée soit de barreaux (mouvements de translation du déchet), soit de rouleaux (mouvements de rotation). Les fumées produites sont extraites, en partie haute, vers une enceinte verticale revêtue de matériaux réfractaires, couplée ou non à une chaudière de récupération (postcombustion). Les éléments de la grille (barreaux et rouleaux) forment un ensemble de pièces mobiles animées de mouvements alternatifs, permettant l'avancement des déchets, ainsi que leur brassage. Cette

grille est soit inclinée, soit horizontale. L'air primaire de combustion, en excès, est reparti sous la grille via des caissons de distribution. Ce mode d'aération permet non seulement le refroidissement de la grille, mais aussi une aération des déchets en cours de combustion. La combustion est organisée le long de la grille de façon à réaliser :

- en entrée, une zone de séchage des déchets par rayonnement de la voûte ;
- suivie d'une zone de pyrolyse des déchets avec inflammation des matières volatiles en phase gazeuse ;
- puis d'une zone de combustion du carbone fixe résiduel ;
- et enfin, une zone de refroidissement des mâchefers, avant leur évacuation en sortie de foyer, où ils subissent une extinction dans une garde à eau (extracteur à mâchefers), permettant également d'éviter toute pénétration d'air parasite.

Les gaz produits par la combustion des déchets sont mélangés à de l'air secondaire au niveau de la postcombustion, pour permettre la combustion complète des matières volatiles et imbrûlés formés au niveau de la grille.

2.1.9.2. Fours tournants et/ou oscillants

Ce type de four consiste essentiellement en une enceinte cylindrique réfractorisée, légèrement inclinée sur l'horizontale (1 à 4°), mise en mouvement de rotation lente (moins de 2 tr/min), ou d'oscillation, pour permettre la mise en mouvement et le brassage des déchets. Ce type de four est, en général, équipé d'une double enveloppe, assurant le préchauffage de l'air de combustion, celui-ci étant injecté sous les déchets.

En *four tournant* (Figure 12), les fumées sont extraites au niveau de l'introduction des déchets, en face avant, les fumées progressant dans ce cas à contre-courant de la charge.

En *four oscillant*, les fumées sont extraites au milieu du four, au niveau de l'enveloppe cylindrique, les fumées progressant alors à courant parallèle puis à contre-courant de la charge.

2.1.9.3. Fours à lit fluidisé

La combustion en lit fluidisé est une technique éprouvée sur le charbon ou sur certains déchets homogènes (boues de station d'épuration). Son application au traitement thermique des déchets ménagers est relativement récente et repose sur le principe d'incinérer les ordures dans un lit de matériaux solides inertes constitués généralement de 95% de sable et de 5% de déchets, mis en suspension par une injection d'air à sa base.

Les fours à lit fluidisé sont de trois types: *dense*, *circulant* et *rotatif*, qui se différencient principalement sur le moyen d'assurer la meilleure combustion afin de réduire les imbrûlés.

2.1.9.3.1. Four à lit fluidisé dense (LFD)

Dans le four à lit fluidisé dense, les particules minérales et l'air sont injectées à la base du four. La vitesse de l'air ascendant est alors de l'ordre de 1 à 3 m/s. La densité moyenne du lit est importante, d'où le nom donné à cette technologie. Le mélange avec les déchets (granulométrie de 150 mm), est concentré en partie inférieure. Les déchets sont portés à 700°C et la combustion est très bonne. Il s'agit de la technologie la plus simple techniquement, adaptée à des installations de petites capacités (2 à 10 t/h), et à une large gamme de déchets (après broyage), avec une plage de PCI comprise entre 1500 et 6000 kcal/kg.

2.1.9.3.2. Four à lit fluidisé rotatif (LFR)

un lit fluidisé rotatif qui est une variante du lit fluidisé dense. A la différence du procédé classique où l'air suit un mouvement ascendant, le lit fluidisé rotatif opère avec des injections d'air latérales réparties sur la hauteur du four. L'écart de densité du lit entre la zone centrale et les zones extérieures crée des mouvements rotatifs. En plus, la géométrie du four présente une sorte de goulot d'étranglement en son milieu qui accélère la circulation du lit.

Ces deux modifications permettent d'avoir un meilleur brassage et, par conséquent, une meilleure combustion. La température de combustion est d'ailleurs un peu plus faible que dans le four classique, de l'ordre de 650 à 700°C. La plupart des déchets : ordures ménagères, déchets industriels banals, boues de STEP, pneumatiques... peuvent traités par ce procédé.

2.1.9.3.3. Four à lit fluidisé circulant (LFC)

Le four à lit fluidisé circulant) présente deux caractéristiques. D'une part, l'injection d'air à la base du four se fait à une vitesse supérieure, de façon à ce que les particules soient en suspension sur l'ensemble de la hauteur du four. D'autre part, les particules de sable (auxquelles est ajoutée une injection de carbonate de calcium afin de traiter en même temps le SO₂ et le HCl) qui sont évacuées avec les gaz de combustion en partie haute du four, sont récupérées dans un cyclone, puis réinjectées dans le foyer de combustion jusqu'à ce que tous les déchets soient brûlés.

Cette technologie nécessite un déferrailage et un broyage fin (50 à 100 mm), ainsi qu'une extraction du verre (pour limiter l'érosion) et une température élevée (850°C). Elle est adaptée aux installations d'assez forte capacité (10 à 15 t/h). Le rendement est cependant élevé avec une bonne production d'électricité et il y a peu de mâchefers (10%) et d'imbrûlés (3%).

2.1.10. Traitement des gaz de combustion et des fumées

Les polluants contenus dans les fumées de combustion se présentent sous la forme de solides particulaires (poussières) ou sous forme gazeuse (HCl, SO_x, NO_x...). Il convient donc, après refroidissement, d'effectuer des opérations de dépoussiérage et de neutralisation des fumées, avant leur rejet à l'atmosphère.

2.1.10.1. Dispositifs de dépoussiérage

On distingue quatre types de dépoussiéreurs : mécaniques, humides, à couches filtrantes et électrostatiques.

- **Dépoussiéreurs mécaniques** : ces dispositifs utilisent les forces d'inertie et gravitaire pour la séparation gaz/solide. Ils regroupent les cyclones, les multicyclones et les chambres de sédimentation (séparation par gravité pour les particules de plus de 50 microns).
 - **Dépoussiéreurs humides** : ces dispositifs, appelés également laveurs Venturi, utilisent une pulvérisation d'eau, à co_courant des fumées chargées, au col d'un conduit Venturi, les gouttelettes venant capter les poussières.
- **Dépoussiéreurs à couches filtrantes** : ces dispositifs, également désignés par filtre à manches, utilisent un média filtrant (tissu ou fibres) en poche, pour effectuer la séparation solide/gaz. Ces filtres sont décolmatables par injection séquentielle d'air comprimé.

- **Dépoussiéreurs électrostatiques sec ou humides** : désignés également par électro-filtres, ils permettent la séparation gaz/solides dans les fumées par attraction électrostatique des particules chargées par des électrodes émissives puis collectées par des électrodes réceptrices (plaques).

2.1.10.2. Dispositifs de neutralisation des fumées

Différents procédés d'abattage ou de neutralisation des fumées sont actuellement disponibles (Figure13).

- **Épuration par voie sèche et réactif alcalin** : l'épuration des fumées par voie sèche consiste à injecter dans les fumées un réactif (chaux ou bicarbonate de sodium), sous forme de solide pulvérulent sec, pour assurer la neutralisation des gaz acides (SO₂, HCl, HF). Ces réactifs sont, éventuellement, injectés dans un réacteur en amont d'un système de dépoussiérage (électro-filtre ou filtre à manches), placé en aval. Ceci permet de capter les poussières, mais aussi les sels calciques formés lors du contact réactionnel avec le réactif en excès.
- **Épuration par voie semi-humide** : comme dans le cas du procédé sec, le principe du procédé semi-humide consiste à neutraliser les gaz acides par injection de chaux, celle-ci étant, dans ce cas, préalablement mélangée à de l'eau, pour former un lait de chaux.
 - **Épuration en voie humide** : le procédé s'apparente à un procédé de lavage de gaz, à l'eau additionnée d'un réactif basique (soude, chaux). Les gaz doivent d'abord être dépoussiérés à l'aide d'un électro-filtre ou d'un filtre à manches, suivi d'un refroidissement par *quench* à l'eau, jusqu'à une température de 65°C.

Pour améliorer la captation des gaz acides, on dispose en général de deux étages de captation : un premier étage dit acide pour la captation de HCl et des métaux lourds par lavage à l'eau, suivi d'un deuxième étage, dit basique, pour la captation du SO₂ et finition de la captation de HCl par lavage avec une solution de soude.

Des soutirages en bas de chaque laveur permettent de récupérer les sels dissous. Le procédé humide peut être couplé à un procédé semi-humide, placé en amont, afin de permettre le recyclage de l'effluent du procédé humide dans la tour d'atomisation du semihumide, ce qui permet de limiter ou d'éviter tout rejet.

2.1.11. Résidus solides de l'incinération des ordures ménagères

En plus des rejets gazeux, l'incinération des déchets ménagers produits des résidus solides qui sont principalement les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) et les résidus d'épuration des fumées d'incinération des ordures ménagères (REFIOM).

2.1.11.1. Mâchefers (MIOM)

Ce sont les principaux résidus (scories) retirés des foyers après incinération des ordures ménagères et composés de matériaux plus au moins incombustibles et facilement identifiables comme le verre, les ferrailles et tous les composés non volatils contenus dans les ordures ménagères. Ils ont l'aspect d'un solide noirâtre, de granulométrie variée et sont composés à 90 % d'oxydes de silice et d'aluminium (en majorité) et d'oxydes de sodium, de potassium et de magnésium.

Les mâchefers sont classés en trois catégories : **mâchefers de classe V** (directement valorisés), **mâchefers de classe M** (valorisés après maturation de 1 à 4 mois) et **mâchefers de classe S** (stockés dans des CET de classe 2).

2.1.11.2 . Résidus d'épuration des fumées d'incinération des ordures ménagères (REFIOM)

Ce sont des cendres volantes (poussières, fines particules, gâteau de filtration...), véhiculés par les gaz de combustion et captés par l'électro-filtre (1^{er} dépoussiéreur) et des résidus de neutralisation et d'élimination des métaux lourds et des dioxines/furanes captés par une large majorité par le 2^{ème} dépoussiéreur (filtre à manches).

Les REFIOM sont constitués de 90% en moyenne de composés minéraux sans danger (silice et calcaire), le reste de métaux lourds, de dioxines et furanes. Les cendres volantes renferment 100 fois plus de dioxines que l'air rejeté à la sortie de la chambre de combustion.

Considérés comme déchets ultimes, ils sont évacués et stockés dans des CET de classe 1 après un traitement de stabilisation et solidification qui permet de réduire leur fraction lessivable (lixivable) due surtout aux métaux lourds.

2.2. PYROLYSE

2.2.1. Principe de la pyrolyse

La pyrolyse des déchets, également désignée par thermolyse ou distillation sèche, consiste en un traitement thermique endothermique ($\Delta H > 0$), à température modérée, au cours duquel la fraction organique du déchet est décomposée, en l'absence d'air ou en atmosphère réductrice ($O_2 < 2\%$), pour fournir une phase gazeuse et une phase solide :

Cette distillation thermique de la charge peut s'appliquer aux déchets ménagers et donne comme sous-produits :

- de poussières composées principalement de noir de carbone ;
- d'un gaz combustible ($CO, H_2, CH_4, H_2O...$) ;
- d'un résidu huileux composé principalement de produits organiques partiellement oxydés (esters, acides, alcools,...) ;
- d'un résidu carboné solide (coke de pyrolyse).

La pyrolyse s'effectue selon trois phases : un séchage pour l'élimination de l'eau, suivi d'une distillation des matières volatiles et enfin une transformation en carbone fixe. Elle engendre moins de gaz que l'incinération, les dioxines et furanes sont totalement éliminés et le chlore est neutralisé. Les déchets visés sont des solides ou des boues et notamment :

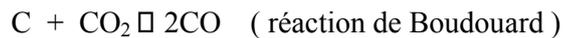
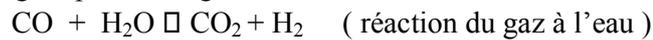
- ❖ des matériaux contenant une fraction inerte valorisable, de type métaux, ceux-ci n'étant pas oxydés lors du traitement pyrolytique, et donc recyclables ;
- ❖ des matériaux subissant des changements de phase, en fonction du niveau de température, et donc entraînant des processus de ramollissement avec agglomération de la charge à traiter. C'est le cas de déchets plastiques ou de déchets contenant des métaux fusibles ;
- ❖ des matériaux contenant une fraction volatilisable aux températures de l'incinération. C'est le cas des déchets contenant des sels ou des métaux vaporisables ;
- ❖ des matériaux fortement azotés, chlorés ou soufrés, leur pyrolyse limitant la génération de polluants gazeux de type NO_x, HCl et SO_x ;

- ❖ des boues biologiques contaminées, permettant leur séchage/ hygiénisation et carbonisation de leur fraction organique.

2.2.2. Principe de décomposition thermique sous atmosphère de gaz ou sous vide

2.2.2.1. En atmosphère neutre dépourvue d'oxygène

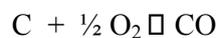
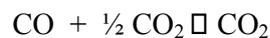
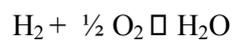
L'élévation progressive de la température des déchets conduit à leur décomposition et libération de composés sous forme de gaz (eau, COV) et rupture des macromolécules pour fournir des molécules plus courtes à l'état de gaz, de liquides ou de solides. L'oxygène présent est issu des molécules organiques, il réagit suivant :



Il se forme ainsi progressivement une atmosphère réductrice.

2.2.2.2. En présence d'oxygène

Aux effets précédents, s'ajoutent des phénomènes d'oxydation des composés organiques par réaction avec l'oxygène introduit (généré par décomposition du déchet). Les réactions sont alors :



2.2.3. Types de pyrolyse

Deux modes de conduite de la pyrolyse peuvent être appliqués au traitement pyrolytique des déchets :

- la *pyrolyse lente*, à température modérée ;
- la *pyrolyse rapide*, ou carbonisation à haute température.

En désignant par m_s et m_g les masses produites par pyrolyse, respectivement en solide

et en gaz, alors :

– en pyrolyse lente :

Temps de séjour élevé (~ 60 min)
Vitesse de chauffe lente (10-20 °C/min)
Température modérée (400-600 °C) } → m_s ↗
 m_g ↘

– en pyrolyse rapide :

Temps de séjour faible (~ 1-10 min)
Vitesse de chauffe élevée (300-800 °C/min)
Température élevée (650-850 °C) } → m_s ↘
 m_g ↗

Par exemple, pour une tonne de déchet brut contenant par exemple 20% d'humidité, une **pyrolyse lente** produit, après séchage (200 kg d'eau) :

- un gaz combustible, typiquement 380-400 kg par tonne de déchets bruts, composé d'un mélange complexe de gaz incondensables (hydrogène, monoxyde de carbone, méthane...) ainsi que d'hydrocarbures et/ou goudrons condensables ;
- un résidu solide carboné appelé coke, semi-coke ou charbon (□ 420-400 kg par tonne de déchets bruts), contenant de l'ordre de 40% de matériaux inertes.

Dans le cas d'une **pyrolyse rapide**, la fraction de gaz produits passe typiquement à 550-600 kg/t et la production de coke est réduite à 200-250 kg/t. Elle nécessite des réacteurs à coefficients de transfert thermique élevés. Le produit majoritaire formé est, au contraire, un gaz combustible. Celui-ci peut être craqué thermiquement, afin d'en éliminer les traces de goudrons, et épuré, afin d'alimenter un moteur thermique ou une turbine à gaz à des fins de production d'énergie électrique.

2.2.4. Valorisation des produits de pyrolyse

Le produit majoritaire d'une pyrolyse est soit un coke (pyrolyse lente), soit un gaz combustible (pyrolyse rapide). Dans le premier cas, le coke produit peut être valorisé :

- soit par combustion sur place (pyrolyse intégrée), les dispositifs de traitement des fumées et de récupération calorifique par chaudière aval étant similaires aux dispositifs utilisés en incinération conventionnelle ;
- soit après transport, en valorisation par combustion différée (co-incinération en cimenteries par exemple (cf. Chapitre VI)) ou, après épuration, utilisés en tant que combustibles secondaires.

Dans le second cas, le gaz de pyrolyse produit peut être :

- soit brûlé sur place (pyrolyse intégrée), la récupération d'énergie étant réalisée par chaudière ;
- soit craqué puis envoyé, après épuration, en moteur à gaz, lui-même couplé à un alternateur.

2.2.5. Types de fours utilisés en pyrolyse

Les technologies partent des conceptions de fours traditionnels en les adaptant aux particularités de la pyrolyse. Les quantités de gaz à traiter étant plus faibles, les traitements de fumées sont moins onéreux que dans le cas d'unités d'incinération traitant une quantité de déchets identique. La conception ne change pas, mais le montant de l'investissement s'en trouve réduit. Les types de fours utilisés en pyrolyse sont :

- Les **fours verticaux à lit tombant** : technologie voisine de la conception des hauts fourneaux. Les déchets calibrés, introduits en continu à la partie supérieure du four, se trouvent préchauffés par les gaz produits par la pyrolyse en position inférieure et qui s'échappent vers le haut.
- Les **fours tournants** : concept qui se rapproche des fours de cimenterie. Le four a la forme d'un cylindre incliné tournant sur lui-même. L'intérieur du four est lisse ou comporte des tubes échangeurs de chaleur permettant de chauffer la masse de déchets.
- Les **fours à lit fluidisé** : la combustion de déchets en lit fluidisé a conduit à ce type de four pour pyrolyse ; là aussi de sable en suspension favorise les transferts thermiques vers les déchets. Il suffit de faire circuler les gaz de pyrolyse pour obtenir des vitesses de fluidisation suffisantes bien que l'apport d'oxygène soit réduit.
- Les **fours à traitement par lots** : les déchets sont disposés en vrac dans des boîtes ou des wagonnets mobiles qui avancent dans le four fixe et sortent après pyrolyse.

2.2.6. Principales différences entre incinération et pyrolyse

2.2.6.1. Incinération

- L'incinération réside dans la combustion du déchet à haute température (> 850°C).
- Elle est adaptée aux traitements de grosses capacités (100 à 150000 tonnes/an).
- Elle dégage des gaz et fumées importants qui nécessitent un traitement efficace.
- Elle demande de gros investissements.

2.2.6.2. Pyrolyse

- La thermolyse décompose le déchet en le chauffant dans un four hermétique sans oxygène à moyenne température (entre 450 et 750°C).
- Elle est adaptée aux gisements moyens (moins de 50000 tonnes/an).
- Elle produit moins de fumées et pratiquement pas de dioxines et furanes.
- Les usines de pyrolyse sont généralement de taille moyenne

Références bibliographiques

Addou A., Développement durable : Traitement des déchets (valorisation, élimination). Ed. Ellipses, Paris, 2009.

ADEME, La composition des ordures ménagères en France. ADEME Editions, Paris, France, 1998.

Aloueimine S.O., Méthodologie de caractérisation des déchets ménagers à Nouakchott (Mauritanie) : Contribution à la gestion des déchets et outils d'aide à la décision. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Limoges, France, 2006.

Antonini G., Gislais P., Traitement thermique des déchets industriels. Ed. Tec & Doc, Lavoisier, Paris, 1995.

Antonini G., Traitements thermiques des déchets : Procédés et technologies associées. Coll. Techniques de l'ingénieur, G2 051, traité Environnement, Paris, France, 2005.

Batsch G. *et al.*, Les résidus urbains (Volume 1) : Collecte des résidus urbains-Nettoisement des voies publiques. Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux (AGHTM) et Ed. Tec & Doc, Lavoisier, Paris, France, 1985a.

Batsch G. *et al.*, Les résidus urbains (Volume 2) : Traitement et Valorisation. Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux (AGHTM) et Ed. Tec & Doc, Lavoisier, Paris, France, 1985b.

Behra P. *et al.*, Chimie et environnement : Cours, étude de cas et exercices corrigés. Ed. Dunod, Paris, France, 2013.

Bertholon J., Les déchets solides : de l'incinération des ordures ménagères. Mémoire de maîtrise, Université de Cergy-Pontoise, France, 2002.

Billard H., Centres de stockage des déchets : Exploitation. Coll. Techniques de l'ingénieur, G2 102, traité Environnement, Paris, France, 2000.

Bliefert C., Perraud R., Chimie de l'environnement : Air, Eau, Sols, Déchets, 1^{ère} édition. Ed. De Boeck Université, Bruxelles, Belgique, 2001.

Damien A., Guide du traitement des déchets, 3^{ème} édition. Ed. Dunod, Paris, France, 2004.

Debray B., Eléments de gestion des déchets. Ecole Nationale Supérieure des Mines de SaintEtienne, Centre SITE, France, 2000.

Dotreppe-Grisard N., Déchets solides industriels et urbains : Traitement, Destruction et Valorisation. Ed. Cebedoc, Liège, Belgique et Ed. Tec & Doc, Lavoisier, Paris, France, 1986.
Emilian K., Traitement des pollutions industrielles. Ed. Dunod, Paris, France, 2004.

Galvez-Cloutier R., Gestion intégrée de déchets solides municipaux. Département de Génie Civil et Génie des Eaux, Faculté de Sciences et Génie, Université Laval, Québec, Canada, 2012.

Gillet R., Traité de gestion des déchets solides : Programme minimum de gestion des ordures ménagères et des déchets assimilés (1^{er} Volume). OMS, PNUD, Copenhague, Allemagne, 1985.

Gillet R., Traité de gestion des déchets solides : Les traitements industriels des ordures ménagères et des déchets assimilés-Organisation et gestion d'un service (2^{ème} Volume). OMS, PNUD, Copenhague, Allemagne, 1986.

Gourdon R., Traitement biologique des déchets. Coll. Techniques de l'ingénieur, G2 060 , traité Environnement, Paris, France, 2000.

Lambert S. *et al.*, Manuel environnement à l'usage des industriels. Ed. AFNOR, Paris, 1994.

Le Groux J.-Y., Le Douce C., L'incinération des déchets ménagers. Ed. Economica, Paris, 1995.

Leroy J.B., Les déchets et leur traitement. Collection que sais-je?, Paris, France, 1981.

Loudjani F., Guide des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimilés. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE) en collaboration avec le Programme des Nations Unis pour le Développement (PNUD), Alger, Algérie, 2009.

Maës M., Déchets industriels : mode d'emploi. Ed. Tec & Doc, Lavoisier, Paris, France, 1986.

Maës M., La maîtrise des déchets industriels. Ed. Pierre Johanet S.A., Paris, France, 1992.

Maës M., Les résidus industriels (Tome 1) : Traitement, Valorisation, Législation. Ed. Tec & Doc, Lavoisier, Paris, France, 1975.

Maës M., Les résidus industriels (Tome 2) : Technologie propre, Traitement, Valorisation, Législation. Ed. Tec & Doc, Lavoisier, Paris, France, 1977.

Maës M., Options déchets. Ed. Pierre Johanet S.A., Paris, France, 1992.

MATE, Guide de gestion intégrée des déchets ménagers et assimilés. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement en collaboration avec la société Allemande GTZ, Alger, Algérie, 2012.

Mezouari Sandjakdine F., Conception et exploitation des centres de stockage des déchets en Algérie et limitation des impacts environnementaux. Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme, Université de Limoges, France, 2011.

Moletta R., Gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires. Ed. Tec & Doc, Lavoisier, Paris, France, 2002.

Murat M., Valorisation des déchets et des sous-produits industriels. Ed. Masson, Paris, France, 1981.

Navarro A., Approche systémique des déchets. Techniques de l'ingénieur, G2 000, traité Environnement, Paris, France, 2003.

Onibokun A.G., La gestion des déchets urbains : Des solutions pour l'Afrique. Éd. Karthala, Paris, France, 2001.

Savary B., Vincent R., Rodriguez C., Chollot A., Caractérisation des risques chimiques professionnels de la filière de gestion des déchets : Analyse à priori des risques potentiels. Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), Paris, France, 2004.

Smith P.G., Scott J.S., Dictionary of water and waste management, Second Edition. IWA Publishing, London, UK, 2005.

Turlan T., Les déchets : Collecte, Traitement, Tri, Recyclage. Ed. Dunod, Paris, France, 2013.

Weiner R.E., Matthews R.A., Environmental engineering, Fourth Edition. ButterworthHeinemann, Elsevier, Burlington, USA, 2003.

Williams P.T., Waste treatment and disposal, Second Edition. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, UK, 2005.

Woodard & Curran Inc., Industrial waste treatment handbook, Second Edition. ButterworthHeinemann, Elsevier, Burlington, USA, 2006.
