

Chapitre 1

Le stockage bioactif des déchets : stratégie et processus bio-physico-chimiques

1.1 Déchets ménagers non dangereux (DND)

Dans la loi du 15 juillet 1975, un déchet est défini comme « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit, ou plus généralement tout bien nuisible abandonné, ou que son détenteur destine à l'abandon ». Le terme de déchets ménagers non dangereux (DND) désigne les ordures ménagères (OM) qui sont issues de l'activité domestique des ménages ainsi que les déchets provenant des entreprises industrielles, artisans, commerçants, écoles, services publics, hôpitaux, services tertiaires, qui sont collectés dans les mêmes conditions que les OM (Ademe, 2002).

1.1.1 Production des déchets ménagers

En 1990, la production mondiale de déchets ménagers s'élevait à environ un milliard de tonnes, et elle ne cesse d'augmenter. Entre 1960 et 1995, la production d'ordures ménagères de chaque Français a doublé. En 1997, elle atteignait 369 kilos par habitant et par an, soit plus d'un kilo par jour.

Selon les chiffres Ademe-Ifen en 2002, les Français produisent trente millions de tonnes de déchets ménagers par an (soit environ 500 kg par personne et par an incluant les ordures ménagères OM, les encombrants et les déchets verts), 14 Mt de déchets des collectivités, auxquels on peut ajouter 95 Mt de déchets industriels banals dont près de 5 Mt sont collectées avec les OM (chiffres Ademe-Ifen 2002). La production des déchets ménagers s'est stabilisée en France pour la première fois entre 2000 et 2002 (Ademe, 2000, 2002), mais semblerait à nouveau augmenter en 2007-2008.

Cette augmentation reflète l'évolution de la société :

- Croissance démographique,
- Croissance de la consommation,
- Remplacement des produits bruts (fruits et légumes par exemple) par des produits élaborés et emballés,
- Développement des emballages en portion individuelle (augmentation de la part des ménages d'une ou deux personnes et individualisation des consommations au sein des familles),
- Urbanisation et baisse du compostage de fond de jardin,
- Raccourcissement de la durée de vie de certains produits (bâtiments, électroménager, produits jetables...).

Les activités humaines ont toujours produit des déchets, mais le développement de l'urbanisation puis la révolution industrielle a entraîné d'importantes évolutions. Il a fallu collecter ces déchets (ils ont longtemps été jetés au milieu de la rue), leur volume n'a pas cessé d'augmenter, et la matière organique a diminué au profit du verre, des métaux, du papier-carton puis des plastiques et des produits toxiques (piles, huiles de moteur, peintures...).

Mettre en œuvre les filières de traitement de nos déchets nécessite la mise en place de sites industriels indispensables pour chacun d'entre eux : les emballages vers un centre de tri, les déchets verts vers une unité de compostage industriel, les déchets ménagers non recyclables vers un incinérateur à valorisation énergétique, les déchets ultimes vers une installation de stockage.

1.1.2 Le stockage

Le stockage des déchets est le procédé d'élimination à la fois le plus simple et le plus répandu sur la planète. En France, les déchets sont répartis entre trois types d'installation de stockage:

- Les ISD de classe 1: particulièrement bien protégés, ils sont destinés aux déchets industriels ultimes (la plupart de ces déchets doivent subir une stabilisation avant enfouissement).
- Les ISD de classe 2 ou ISDND: ils accueillent les déchets ménagers et les déchets industriels banals (déchets non dangereux).
- Les ISD de classe 3: ils sont réservés aux déchets inertes du bâtiment ou des travaux publics par exemple et ne nécessitent pas autant de précautions technologiques que les deux premières catégories.

1.1.3 L'ISDND bioactive ou bioréacteur

La minimisation des impacts environnementaux et des coûts associés à la mise en œuvre des ISDND constitue un enjeu très important. Au niveau international, le stockage des déchets reste le mode de gestion des déchets privilégié. Les marchés dans les pays développés comme dans les pays en voie de développement sont donc importants. A titre d'exemple, dans les pays en voie de développement (PED), la totalité des villes comptent aujourd'hui 2 milliards d'habitants, soit deux fois plus que la totalité des villes des pays industrialisés. Leur population va doubler d'ici 2030. Elles rejettent aujourd'hui près de 300 millions d'ordures ménagères qui atterrissent pour l'essentiel dans des dépotoirs. La production de déchets dans les PED oscille entre 0,2 et 0,6 kg /hab /jour, soit 73 à 219 kg/hab/an. Si l'on retient la moyenne de 146 kg /hab /an, on obtient 292 millions de tonnes de déchets par an. Composés de 50 à 70 % de matière organique, le double environ du ratio des pays les plus industrialisés, ces déchets émettent 361 millions de tonnes d'équivalent CO₂ par an dans l'atmosphère. Rapportées à l'habitant, les émissions de méthane des décharges des PED représentent 70 kg d'équivalent carbone par an, soit près de 20 % des gaz à effet de serre émis en moyenne par habitant dans les PED (400 kg d'équivalent carbone). Cela représente aussi près de 15 % du crédit d'émission dont chaque terrien disposerait si l'on veut stabiliser la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, soit 500 kg d'équivalent carbone par an. Maîtriser la production de ce méthane, le capter et le valoriser, représente ainsi un enjeu important sur les plans environnementaux comme énergétique, partout dans le monde.

C'est pourquoi un consensus international d'experts se dégage actuellement en faveur de modes de gestion différents, mettant en œuvre des stratégies pour exprimer de façon contrôlée le potentiel polluant contenu dans les déchets et accélérer la dégradation biologique des déchets biodégradables et matières organiques : c'est la stratégie du stockage bioactif (Barber et Maris, 1984 ; Yuen et al., 1995). Ce mode de gestion a donné lieu à une intense activité de recherche depuis une vingtaine d'années environ et à la mise en œuvre d'un ensemble d'installations expérimentales à pleine échelle.

L'intérêt porté à l'accélération de la dégradation biologique des déchets nécessite la connaissance des paramètres influant les processus et réactions de dégradation. Les réactions de dégradation des déchets sont conditionnées par de nombreux paramètres environnementaux. Ces paramètres sont maintenant bien connus mais leurs effets demeurent encore difficilement quantifiables en raison de leur mutuelle dépendance (Aran, 2000). Selon la littérature, les deux principaux facteurs contrôlant le plus la dégradation des déchets et la production de biogaz sont la température, l'humidité des déchets (Farquhar et Rovers (1973), Rees (1980), Gurijala et Suflita (1983), Jokela et al (1999); Mc Dougall et Pyrah (1999)) et plus particulièrement la répartition du lixiviat au sein du massif de déchets (Klink and Ham, 1982).

La technique la plus courante afin d'accélérer la dégradation des déchets stockés dans les ISDND bioactives est la recirculation du lixiviat récupéré en fond de casier dans le massif de déchets (Mehta et al., 2002). Cette approche permet d'augmenter le taux de production du biogaz et notamment du méthane. Le concept de « développement durable » appliqué aux centres de stockage des déchets conduit aujourd'hui à rechercher des pratiques de gestion compatibles avec l'échelle d'une génération (30 ans environ). Par conséquent, le bioréacteur, méthaniseur *in situ*, est une voie pertinente à explorer.

1.2 Processus bio-physico-chimiques dans les ISDND

1.2.1 La composition des déchets ménagers non dangereux (DND)

D'une manière générale, les déchets non dangereux sont les déchets qui ne présentent aucune des caractéristiques relatives à la *dangerosité* (toxique, explosif, corrosif, ...). Ce sont les déchets ménagers et les déchets banals des entreprises, commerçants et artisans (papiers, cartons, bois, textiles...). Le terme de déchets ménagers non dangereux (DND) désigne les ordures ménagères (OM) qui sont issues de l'activité domestique des ménages ainsi que les déchets provenant des entreprises industrielles, artisans, commerçants, écoles, services publics, hôpitaux, services tertiaires, qui sont collectés dans les mêmes conditions que les OM (Ademe, 2002). La production annuelle de déchets en France est estimée à environ 880 millions de tonnes dont 47Mt de DND et 20Mt d'OM (site internet de La DRIRE Bourgogne, 2008 et Ademe, 2002).

Le stockage des DND (Ademe, 2002) reste le mode d'élimination majoritaire en France et concerne 52% des DND produits. Les autres filières d'éliminations principales en France sont le tri des matériaux recyclables, l'incinération, le traitement biologique des déchets. Les centres de tri (Ademe, 2002) qui sont au cœur du processus devant aboutir à une meilleure valorisation des déchets recyclables ont absorbé 11 % des DND en 2002. Le traitement biologique a permis d'éliminer 9 % des DND (Ademe, 2002). Ce traitement est soit réalisé en présence d'oxygène par compostage, soit en l'absence d'oxygène par méthanisation.

L'incinération est le principal traitement thermique (Ademe, 2002), il est fondé sur la combustion avec excès d'air et a permis de traiter 28 % de DND en 2002. En 2004, 52 % des ordures ménagères (OM) ont été valorisés, l'incinération de 13 millions de tonnes de déchets a produit 3200 GWh et 8300 GWh de chaleur et 1,73 millions de tonnes de compost ont été produites (Ademe, site internet 2008).

L'Ademe a réalisé une campagne nationale de caractérisation des déchets ménagers et assimilés en 1993 utilisant la procédure MODECOM (méthode de caractérisation des ordures ménagères, qui a été développée par l'Ademe en 1993). Elle propose une procédure d'échantillonnage aléatoire des déchets et recommande une prise d'échantillon d'au moins 500 kilogrammes. Cette campagne avait notamment pour but de préciser la composition du gisement de déchets en différenciant des catégories et des sous-catégories. La composition des DND est variable selon le pays, le site, la période de l'année, le type d'habitat, voire même d'un jour à l'autre pour un même site. Cette variabilité peut être mise en évidence par la comparaison de la répartition des DND en fonction de la zone de collecte des déchets : zone urbaine, semi-urbaine ou rurale. A titre d'exemple, le papier est plus abondant dans les poubelles des zones urbaines que dans les deux autres zones

(Ademe, 1999). La comparaison de la répartition des déchets entre différents pays est rendue difficile par le manque d'homogénéité dans la définition des catégories d'un pays à l'autre. Les répartitions des déchets en France en 1993 sont proposées par l'Ademe dans le Tableau 1-1. Les lignes 1 à 6 représentent les composantes biodégradables de déchets.

Tableau 1-1 Composition moyenne des déchets ménagers et assimilés en France en 1993

Catégories	Répartition (%)	
	Poids humide	Poids sec
1 Déchets putrescibles (déchets de cuisine et verts...)	28,6	15,8
2 Papiers (emballages, journaux, magazines...)	16,1	17,7
3 Cartons (cartons plats, ondulés, autres...)	9,3	9,2
4 Complexes (emballages complexes type Tétrabrick)	1,4	1,6
5 Textiles (emballages textiles, autres...)	2,6	3,0
6 Textiles sanitaires (couches, coton hygiénique)	3,1	1,9
7 Plastiques (PE, PVC, PET, polystyrène)	11,1	12,7
8 Combustibles non classés (bois, caoutchouc...)	3,3	3,9
9 Verres	13,1	19,1
10 Métaux (aluminium, métaux ferreux, cuivre...)	4,0	5,6
11 Incombustibles non classés (pierres, gravats...)	6,8	8,9
12 Déchets spéciaux (chiffons souillés, piles...)	0,5	0,7

D'un point de vue biochimique, la matière organique peut être classée en trois grandes familles de substances : les glucides, les lipides et les protéines. Parmi les polymères glucidiques les plus courants, nous pouvons citer la cellulose, qui est la substance principalement responsable de la structure des parois cellulaires des végétaux (Weil, 1989) ; l'hémicellulose est un polymère beaucoup moins résistant à la biodégradation que la cellulose ; la lignine, est un polymère très présent sous la forme de lignocellulose.

La cellulose, l'hémi-cellulose, les protéines et les lipides constituent les principales sources de matière organique non synthétique des déchets ménagers.

La cellulose et l'hémicellulose produisent 91% du méthane issu de la dégradation des déchets (Barlaz et al., 1989). Les protéines produisent 8.3% et les sucres 0.5% du méthane. La lignine ne se décompose qu'extrêmement lentement en conditions anaérobiques (Young et Frazer, 1989). Ainsi, en connaissant la composition des déchets, on peut avoir une estimation de la production potentielle de biogaz dans un centre de stockage des déchets.

La variabilité de la proportion de ces composantes dans un DND est fonction de leur composition par catégorie de déchets (Tableau 1-1). Certaines catégories de déchets, comme le papier de bureau, contiennent une forte proportion de cellulose, tandis que d'autres catégories, comme les feuilles d'arbre contiennent une plus grande quantité de lignine. Ces proportions varient également en fonction de l'état de dégradation du déchet. En effet, en se dégradant, la proportion de cellulose d'un papier de bureau ou d'un journal diminue. La composition biochimique moyenne des déchets ménagers et assimilés serait comprise entre 30 % et 50 % de cellulose, 5 et 12 % d'hémicellulose, 4 et 10 % de protéine et entre 10 et 15 % de lignine (Barlaz et al., 1990 ; Peres et al., 1992). Cette composition varie également en fonction de l'état de dégradation du déchet.

1.2.2 Teneur en eau et en matières sèches des DND

Le séchage d'un déchet permet de connaître sa teneur en eau et en matières sèches. La teneur en eau du déchet global est dépendante de celle de chaque catégorie de déchets et de leur proportion dans le déchet global. A l'échelle des constituants, la teneur en eau est tout aussi variable, pouvant

passer de quelques pourcents (plastique, papier, etc.) à plus de 75 % (rapporté à la masse solide) s'agissant de fruits et légumes (Olivier, 2003). De ce fait, des teneurs en eau de DND très différentes peuvent être trouvées dans la littérature : 40.2 % (Zhao et al., 2002), 59 % (Chan et al., 2002), 63.8 % (Iglesias et al., 2000), 85% (Sponza et Agdag, 2005).

La structure hétérogène du déchet implique une répartition de cette teneur en eau souvent aléatoire. Tandis qu'une partie des déchets peut être dans un état quasi sec, une autre partie peut rester partiellement voire entièrement saturée.

1.2.3 La digestion anaérobie de la matière organique

Dans ce paragraphe nous résumons la littérature disponible sur la digestion anaérobie de la matière organique en général, et pas particulièrement issue des déchets solides. Trois groupes de microorganismes anaérobies sont nécessaires pour produire le méthane par dégradation des polymères biologiques (cellulose, hémicellulose et protéine) (Wolfe, 1979; Zender et al., 1982). Le premier groupe est constitué de microorganismes fermentatifs et hydrolytiques qui sont responsables de l'hydrolyse des polymères biologiques. Les premiers produits d'hydrolyse sont les sucres solubles, les acides aminés, les acides carboxyliques à longue chaîne et le glycérol. Les microorganismes fermentatifs et hydrolytiques digèrent ces produits et les transforment en acides carboxyliques à courte chaîne, alcools, CO₂ et hydrogène. L'acétate qui est un précurseur direct du méthane est aussi produit à ce stade (Barlaz et al. 1989). Le deuxième groupe des microorganismes actifs dans la transformation des polymères biologiques en méthane est le groupe des microorganismes acétogènes. Ils oxydent les produits fermentés du premier groupe et produisent de l'acétate, du CO₂ et de l'hydrogène. Le troisième groupe est celui des microorganismes méthanogènes. Ces microorganismes peuvent utiliser un nombre limité de substrats dont le méthanol, les méthylamines, l'hydrogène, le CO₂ et l'acétate (Wolin et Miller, 1985). Dans les digesteurs de boues, on estime que 70% du méthane produit provient de la dégradation de l'acétate (Zeikus, 1980; Mah et al., 1978). La production de méthane à partir de l'acétate libère 31 KJ/ mol de CH₄, ce qui est à peine suffisant pour la génération d'adénosine triphosphate (ATP) qui a besoin de 30,6KJ/ mol de CH₄. C'est pourquoi la croissance des microorganismes méthanogènes acétoclastiques est relativement lente. La production de méthane à partir du CO₂ et de l'hydrogène libère 135,6 KJ/mol de CH₄. La réaction liée aux microorganismes hydrogénophiles est donc énergétiquement plus favorable. Les méthanogènes sont plus actives à un pH de 6,8 à 7,4 (Zehnder, 1978).

L'importance des microorganismes méthanogènes pour la digestion anaérobie, dont les étapes sont présentées dans la Figure (1-1), est résumée par Zeikus (1980). Les méthanogènes:

- 1) contrôlent le pH de l'écosystème par consommation de l'acétate,
- 2) régulent l'écoulement des électrons par consommation de l'hydrogène, ce qui crée des conditions thermodynamiquement favorables au catabolisme des alcools et des acides,
- 3) excrètent des facteurs de croissance organique incluant des vitamines et des acides aminés qui sont utilisés par d'autres microorganismes dans l'écosystème.

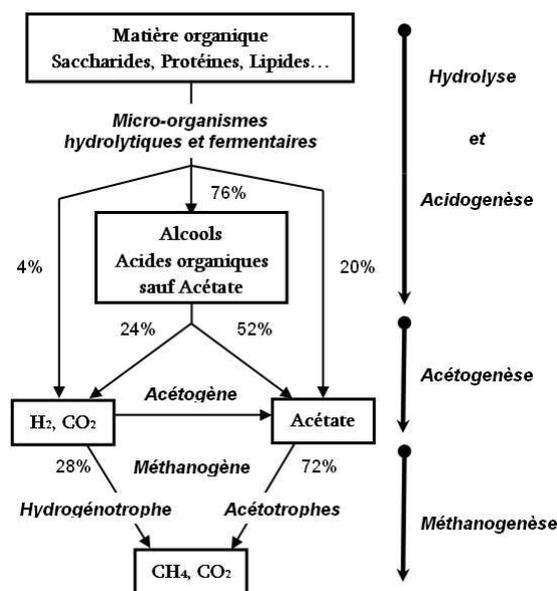


Figure (1-1) Etapes de digestion des polymères biologiques et de la production de méthane (Zehnder, 1978)

Si l'activité des microorganismes fermentatifs (hydrolytiques et acidogènes) excède ceux des acétogènes et méthanogènes, il y aura un déséquilibre dans le système. Ce déséquilibre fait chuter le pH du milieu par l'accumulation d'acide carboxylique et d'hydrogène, et inhibe les méthanogènes.

1.2.4 Le lixiviat

Le lixiviat (jus de déchets) est défini comme tout liquide filtrant par percolation des déchets mis en décharge et s'écoulant d'une décharge ou contenu dans celle-ci (définition de la Directive européenne (99/31/CE) du 26 avril 1999 et de l'arrêté ministériel du 9 septembre 1997). La qualité chimique et microbiologique de ce liquide évolue au cours de la dégradation des déchets et reflète les phases de dégradation majoritaire. Les lixiviats ne peuvent être rejetés dans le milieu naturel sans un traitement visant à réduire la concentration des polluants à des valeurs seuils imposées par la réglementation. Il est interdit de diluer les lixiviats ou de les épandre. Au cours de l'exploitation du site, la fréquence de suivi du volume de lixiviat recueilli est mensuelle et l'analyse de la composition du lixiviat est trimestrielle (arrêté du 9 septembre 1997).

1.2.5 Le biogaz

Le biogaz de décharge est le mélange de tous les gaz produits par les déchets mis en décharge (définition de la Directive européenne (99/31/CE)). La composition du biogaz évolue au cours de la dégradation des déchets. Dans la phase anaérobie méthanogène il est principalement composé de méthane et de dioxyde de carbone : entre 50 et 70% de méthane pour 30 à 50% de dioxyde de carbone (Farquhar et al., 1973). La composition du biogaz au cours des quatre phases de dégradation selon Barlaz et al. 1989b, est présentée sur la Figure (1-2) où la phase 1 est la phase aérobie, la phase 2 est la phase acide anaérobie, la phase 3 est la phase méthanogène accélérée et la phase 4 est la phase méthanogène ralentie.

La réglementation impose la collecte et le traitement du biogaz afin de protéger l'environnement des gaz à effet de serre, d'assurer la sécurité du site en évitant l'accumulation de biogaz pouvant provoquer des explosions ou des incendies et éventuellement de réduire les coûts d'exploitation du site par valorisation du biogaz produit. L'arrêté du 9 septembre 1997 impose un suivi mensuel des émissions de gaz, des pressions et de la composition du biogaz.

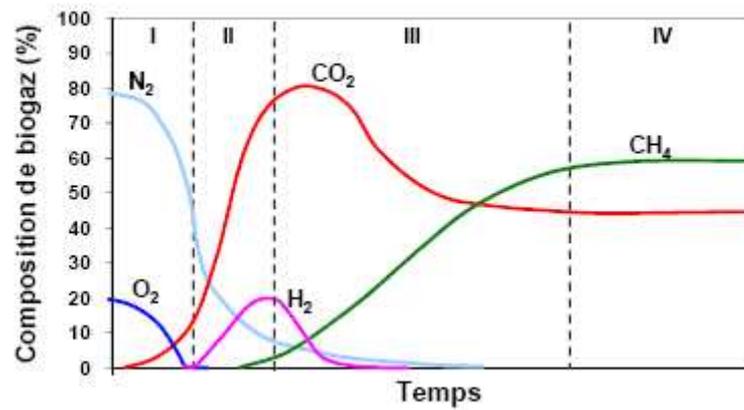


Figure (1-2) Composition du biogaz au cours des différentes phases de dégradation (d'après Farquhar et Rovers, 1973)

