



Polycopié de cours

Matière : Gestion et traitement des déchets solides

Niveau : Master 1 Génie des Procédés de
l'Environnement

Dr. Moufok Azzoug

Maitre de conférences université de Bejaia
Faculté de technologie
Département de génie des procédés
moufok.azzouq@univ-bejaia.dz



Année universitaire 2024-2025

Avant-propos

Les activités humaines en tous genres ont toujours été accompagnées d'une production de déchets avec une étendue, des techniques d'éliminations et des problèmes spécifiques inhérents à chaque époque. Au cours des temps anciens, les déchets générés avaient probablement une incidence mineure sur l'environnement dans la mesure où les peuplements étaient peu nombreux et leurs détritiques étaient majoritairement biodégradables. Toutefois, avec l'avènement de la civilisation industrielle, les déchets sont devenus de plus en plus diversifiés et présentant une problématique nouvelle ; leur volume conséquent, la non-biodégradabilité ou la toxicité et la dangerosité de certains d'entre eux, leur durée de vie et leur impact sur l'environnement et la santé publique. Cette prise de conscience actuelle a conduit les politiques publiques à s'intéresser de près à tout ce qui touche à la gestion et au traitement des déchets et en faire une de leurs préoccupations. La mise en décharge a été pendant longtemps la solution privilégiée par les pouvoirs publics, passant, au fil du temps, des décharges sauvages aux décharges contrôlées, finissant ainsi par être elles-mêmes une source de nuisance pour l'environnement. Aujourd'hui, les nécessités de réduction de la pollution, d'économies d'énergie et de ressources naturelles ont transformé le secteur de traitement des déchets en une discipline rigoureuse ayant pour objectif la préservation des équilibres écologiques de la planète.

L'intégration des cours sur le traitement des déchets dans les programmes universitaires est essentielle pour préparer les futurs cadres dirigeants à relever les défis environnementaux actuels et futurs et susciter des vocations. Avec l'augmentation continue des volumes de déchets produits par nos sociétés, il devient impératif de former des experts capables de concevoir et de mettre en œuvre des solutions durables et efficaces pour leur gestion. C'est dans ce contexte que se situe ce support pédagogique qui s'adresse aux étudiants en Génie des Procédés, Génie des Procédés de l'environnement et autres disciplines liées aux sciences environnementales. Ce support de cours de gestion et traitement des déchets solides offre une formation approfondie aux étudiants sur les méthodes modernes et durables de gestion des déchets solides. Il couvre l'ensemble du cycle de vie des déchets solides, de leur caractéristiques, leur classification, leur production à leur élimination finale, en passant par la collecte, le tri, le recyclage et le traitement. Les techniques de traitement étudiées incluent les installations de stockage (CET), les traitements biologiques (compostage et méthanisation),

les traitements thermiques (incinération et pyrolyse). De plus, une grande partie est consacrée aux déchets industriels sépciaux (DIS) et aux déchets d'activités de soins (DASRI). Les objectifs pédagogiques de ce module sont de permettre aux étudiants de comprendre les défis environnementaux liés aux déchets solides, de maîtriser les techniques avancées de traitement et de gestion, et de se familiariser avec les réglementations et les politiques en matière de gestion des déchets. En acquérant ces connaissances, les étudiants seront capables de concevoir et de mettre en œuvre des solutions innovantes pour réduire l'impact environnemental des déchets solides. Ce module prépare les étudiants à une insertion professionnelle réussie dans le domaine du génie de l'environnement, avec des opportunités de carrière telles qu'ingénieur en gestion des déchets, consultant en environnement, gestionnaire de programmes de recyclage, ou encore responsable environnemental dans les collectivités locales et territoriale.

Plan du cours

Chapitre 1 : Généralités sur les déchets solides

1. Généralités sur les déchets solides.....	1
1.1. Définition	1
1.2. Classification des déchets solides	1
1.2.1. Par origine	1
1.2.2. Par dangerosité	2
1.2.2.1. Déchets dangereux ou déchets industriels spéciaux (DIS)	2
1.2.2.2. Déchets inertes	3
1.2.2.3. Déchets non dangereux	4
1.2.3. Par intérêt économique	4
1.2.3.1. Emballages.....	4
1.2.3.2. Déchets 5 flux	4
1.2.3.3. Biodéchets.....	4
1.2.3.4. Combustibles solides de récupération (CSR)	5
1.2.3.5. Déchets ultimes	5
1.3. Caractérisation des déchets solides	5
1.4. Nomenclature des déchets	6
1.5. Législation et cadre institutionnel algérien	7

Chapitre 2: Déchets ménagers et assimilés (DMA)

2. Déchets ménagers et assimilés.....	9
2.1. Définition	9
2.2. Production et flux.....	9
2.3. Composition	10
2.4. Collecte des DMA.....	11
2.4.1. Types de collecte	11
2.4.1.1. Collecte en mélange (porte-à-porte)	11
2.4.1.2. Collecte des encombrants	12
2.4.1.3. Collecte séparative (porte-à-porte)	12
2.4.1.4. Collecte pneumatique	12
2.4.1.5. Collecte séparative par apport volontaire	13
2.4.1.6. Dépôt volontaire en déchetterie	13

2.4.2. Equipements de collecte	14
2.4.3. Trajets de la collecte	15
2.4.4. Stations de transfert des déchets	15
2.5. Mise en décharge des déchets	17
2.5.1. Problématique des décharges incontrôlées (sauvages)	17
2.5.2. Centre d'enfouissement technique (CET)	19
2.5.2.1 Déchets admissibles en CET	20
2.5.2.2 Caractéristiques techniques d'un CET de classe 2	22
a. Barrière de sécurité passive (naturelle)	23
b. Barrière de sécurité active (artificielle)	23
c. Couverture du CET	24
d. Système de captage et de valorisation du biogaz	25
e. Système de collecte et de traitement des lixiviats	26
f. Dimensionnement	29
g. Fermeture et surveillance	30
2.6. Bioconversion organique des déchets	32
2.6.1. Compostage	32
2.6.1.1. Définition	32
2.6.1.2. Avantage du compostage	32
2.6.1.3. Déchets compostables	33
2.6.1.4. Phases de compostage	34
2.6.1.5. Paramètres opératoires du compostage	35
a. Les paramètres opératoires	35
b. Les paramètres intrinsèques du déchet	36
2.6.1.6. Techniques et procédés de compostage	38
a. Compostage par andain (Windrow composting)	38
b. Tas de compost aéré artificiellement (<i>aerated static pile composting</i>)	38
c. Compostage en réacteur (<i>in-vessel composting systems</i>)	39
d. Compostage individuel	39
e. Lombricompostage	40
2.6.1.7. Détermination de la maturité d'un compost	41
2.6.1.8. Evaluation de la qualité du compost	41
2.6.2. Méthanisation	43
2.6.2.1. Définition	43

2.6.2.2. Déchets méthanisables	43
2.6.2.3. Importance du méthane dans les procédés industriels	43
2.6.2.4. Phases de la méthanisation	44
a. Hydrolyse	45
b. Acidogénèse	45
c. Acétogénèse.....	45
d. Méthanogénèse.....	45
2.6.2.5. Paramètres de mise œuvre de la méthanisation	46
a. Température.....	46
b. pH.....	46
c. Contrôle de la charge organique.....	46
d. Le temps de séjour des solides (SRT, Solid Retention Time) et le temps de séjour hydraulique (HRT, Hydraulic Retention Time).....	46
e. Besoins nutritionnels	47
f. L'agitation.....	47
g. Contrôle des Inhibiteurs	47
2.6.2.6. Voie de la méthanisation.....	48
a. La méthanisation par voie sèche	48
b. La méthanisation par voie humide	48
2.6.2.7. Types de digesteurs.....	48
a. Les digesteurs pour les déchets liquides et les boues	49
b. Les digesteurs pour les déchets solides	50
2.6.2.8. Production et Traitement du biogaz	51
2.7. Incinération des déchets	52
2.7.1. Définition et but du procédé	52
2.7.2. Phases de l'incinération	52
2.7.2.1. Phase de Séchage	52
2.7.2.2. Phase de Vaporisation de la Matière Organique.....	53
2.7.2.3. Phase de Gazéification.....	53
2.7.3. Paramètres de l'incinération	53
2.7.3.1. Paramètres opératoires	53
a. Température.....	53
b. Temps de séjour	53
c. Volume d'air de combustion nécessaire.....	54

d. Turbulence.....	54
2.7.3.2. Paramètres du déchet	54
2.7.4. Types de four d'incinération	55
2.7.4.1. Four à grilles	55
2.7.4.2. Four tournants et/ou oscillants	56
2.7.4.3. Four à lits fluidisés.....	56
2.7.5. Dispositifs de traitement des fumées	57
2.7.5.1. Dépoussiérage	58
a. Dépoussiéreurs mécaniques	58
b. Dépoussiéreurs humides.....	58
c. Dépoussiéreurs à manches.....	59
d. Dépoussiéreurs électrostatiques	59
2.7.5.2. Neutralisation des fumées	60
a. L'épuration des fumées par voie sèche	60
b. L'épuration des fumées par voie semi-humide.....	60
C. Techniques complémentaires	60
2.7.6. Traitement des sous-produits de l'incinération	61
2.7.6.1. Les résidus d'épuration des fumées	61
2.7.6.2. Les mâchefers	62
2.8. Le recyclage	64
2.8.1. Définition.....	64
2.8.2. Importance du recyclage.....	64
2.8.3. Logos du recyclage.....	65
2.8.4. Déchets recyclables et non recyclables	67
2.8.5. Importance du tri sélectif dans la filière de recyclage	67

Chapitre 3: Déchets industriels spéciaux (DIS)

3. Déchets industriels spéciaux (DIS).....	67
3.1. Définition et nomenclature.....	67
3.2. Types et sources de production	67
3.3. Stockage	68
3.4. Traitement des déchets dangereux	69
3.4.1. Traitements physico-chimiques.....	69
3.4.1.1. Neutralisation.....	69

3.4.1.2. Précipitation chimique	69
3.4.1.3. Oxydoréduction	70
3.4.1.4. Adsorption	71
3.4.1.5. Solidification et stabilisation	73
a. Stabilisation par chaulage.....	73
b. Stabilisation à base de liants hydrauliques.....	74
C. Stabilisation à base de bitumes.....	75
3.4.1.6. Injection en puits.....	75
3.4.2. Traitements thermiques	76
3.4.2.1. Incinération	76
3.4.2.2. Pyrolyse	76
3.4.2.3. Oxydation hydrothermale	77
3.4.2.4. Vitrification.....	79
a. Types de four pour vitrification.....	80
b. Stockage des vitrifiats	81

Chapitre 4: Déchets d'activité de soins à risques infectieux (DASRI)

4. Déchets d'activité de soins à risques infectieux (DASRI).....	82
4.1. Définition et sources	82
4.2. Types de DASRI	82
4.2.1. Déchets piquants, coupants ou tranchants (PCT).....	82
4.2.2. Déchets contaminés ou potentiellement contaminés.....	82
4.2.3. Déchets infectieux et hautement infectieux.....	82
4.2.4. Déchets anatomiques humains	83
4.2.5. Déchets assimilés aux DASRI.....	83
4.3. Législation.....	83
4.3. Gestion des DASRI	83
4.3.1. Tri	84
4.3.2. Conditionnement et étiquetage	85
4.3.3. Collecte.....	86
4.3.4. Stockage	86
4.3.5. Transport.....	87
4.3.6. Traitement.....	87
4.3.6.1. Incinération	87

4.3.6.2. Banalisation	88
a. Désinfection chimique.....	88
b. Stérilisation par autoclavage	88
C. Stérilisation par microonde.....	89
4.3.6.3. Enfouissement.....	89

Chapitre 1 :

Généralités sur les déchets

1. Généralités sur les déchets solides

1.1. Définition

Toutes les activités économiques ont un vocabulaire qui leur est spécifique. Au niveau national, la définition usuelle d'un déchet a été énoncée dans l'article 3 de la loi 01/19 du 12 décembre 2001 parue au Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire (JORADP), relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets comme suit : *« tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou, plus généralement, tout objet, bien meuble dont le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer ».*

1.2. Classification des déchets solides

Étant donné la diversité des types de déchets, plusieurs classifications ont été établies. Ces classifications permettent de définir les méthodes de gestion appropriées en fonction des risques associés.

Actuellement, différentes classifications des déchets sont en usage, basées sur plusieurs critères : la nature des déchets et les risques qu'ils posent pour la santé publique et l'environnement (déchets dangereux et non dangereux), l'origine des déchets (déchets municipaux et assimilés, déchets issus des activités économiques) ainsi que par l'intérêt économique.

1.2.1. Par origine

Cette classification permet de définir deux grandes catégories de déchets :

- **Déchet ménager** : Tout déchet, qu'il soit dangereux ou non, produit par un ménage.
- **Déchet d'activités économiques** : Tout déchet, qu'il soit dangereux ou non, produit par une entité dont le producteur initial n'est pas un ménage. Cela donne lieu à une classe de déchets dits « **assimilés** », sous-entendu assimilés aux ordures ménagères qui regroupe les déchets municipaux et des activités économiques pouvant être collectés sans contrainte ou sujétion particulières eu égard à leurs caractéristiques et aux quantités produites (déchets des artisans, des commerçants, des agriculteurs, des activités tertiaires ainsi que les déchets des administrations et des établissements publics (écoles, hôpitaux...)).

Chapitre 1 : Généralités sur les déchets solides

1.2.2. Par dangerosité

Ce deuxième critère de classification est le risque et le danger encourus par l'homme et/ou l'environnement. On distingue alors selon la dangerosité des déchets trois grandes catégories :

1.2.2.1. Déchets dangereux ou déchets industriels spéciaux (DIS)

Ce sont tous les déchets qui présentent une ou plusieurs des propriétés de dangers énumérées dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Définitions des propriétés dangereuses des déchets dangereux (Décret exécutif N°06-104 du 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux (JORADP))

Propriété	Définitions
Explosible	Est explosible une substance ou un déchet solide, liquide, pâteux ou gélatineux qui, même sans la présence de l'oxygène atmosphérique, peut présenter une réaction exothermique avec développement rapide de gaz et, qui dans des conditions d'essai déterminés, détone, déflagre rapidement ou, sous l'effet de la chaleur, explose en cas de confinement partiel.
Combustible	Est combustible une substance ou un déchet qui, au contact d'autres substances, notamment des substances inflammables, présente une réaction fortement exothermique.
Extrêmement inflammable	Est extrêmement inflammable une substance ou Déchet dont le point d'éclair est extrêmement bas et le point d'ébullition bas, ainsi qu'une substance ou une préparation gazeuse qui, à température et pression ambiantes, est inflammable à l'air.
Facilement inflammable	Est facilement inflammable une substance ou un déchet pouvant s'échauffer au point de s'enflammer à l'air à température ambiante sans apport d'énergie ou à l'état solide qui peut s'enflammer facilement par une brève action, d'une source d'inflammation et qui continue à brûler ou à se consumer après l'élimination de cette source; ou à l'état liquide, dont le point d'éclair est très bas, ou qui, au contact de l'eau ou de l'air humide, produit des gaz extrêmement inflammables en quantités dangereuses.
Inflammable	Est inflammable une substance ou un déchet liquide dont le point d'éclair est bas.
Irritante	Est irritante une substance ou un déchet non corrosive qui, par contact immédiat, prolongé ou répété avec la peau ou les muqueuses, peut provoquer une réaction inflammatoire.
Nocive	Est nocive une substance ou un déchet qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peut entraîner la mort ou des risques aigus ou chroniques

Chapitre 1 : Généralités sur les déchets solides

Toxique	• Est toxique une substance ou un déchet qui par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, en petites quantités, peut entraîner la mort ou des risques aigus ou chroniques.
Cancérogène	• Est cancérogène une substance ou un déchet qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peut produire le cancer ou en augmenter la fréquence
Corrosive	• Est corrosive une substance ou un déchet qui, en contact avec les tissus vivants, peut exercer une action destructrice avec ces derniers.
Infectieuse	• Est infectieuse une matière ou un déchet contenant des micro-organismes viables ou leur toxines, susceptibles de causer la maladie chez l'homme ou chez d'autres organismes vivants.
Toxique vis-à-vis de la reproduction	• Est toxique vis-à-vis de la reproduction une substance ou un déchet qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peut produire ou augmenter la fréquence d'effets indésirables non héréditaires dans la progéniture ou porter atteinte aux fonctions ou capacités reproductives.
Mutagène	• Est mutagène une substance ou un déchet qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peut produire des défauts génétiques héréditaires ou en augmenter la fréquence.
Dangereuse pour l'environnement	• Est dangereuse pour l'environnement une substance ou un déchet qui, présente ou peut présenter des risques immédiats ou différés pour une ou plusieurs composantes de l'environnement, susceptible de modifier la composition de la nature, de l'eau, du sol, ou de l'air, du climat, de la faune, de la flore ou des micro-organismes.

1.2.2.2. Déchets inertes

Cette catégorie de déchets se définit comme : « tout déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine ».

On distingue dans cette catégorie:

- Les déchets provenant de la prospection, de l'extraction, de l'exploitation des mines et des carrières.
- Les déchets provenant du secteur de la construction et des travaux publics. Pour être comptabilisés en tant que déchets, les déblais ou les remblais doivent quitter le chantier ou ils ont été produits. Dans le cas contraire, ils ne sont pas considérés comme des déchets.

Chapitre 1 : Généralités sur les déchets solides

Dans les définitions officielles, les déchets inertes sont souvent assimilés aux déchets minéraux. Toutefois, cette définition peut prêter à confusion. Par exemple, la chaux très basique, souvent utilisée comme réactif pour l'inertage des déchets, ne peut être considérée comme inerte par nature. Un autre exemple concerne le plâtre, dont la dissolution peut, sous certaines conditions, polluer les nappes phréatiques par des composés sulfurés ou des réactions avec des matières organiques. Par ailleurs, les matériaux contenant des résidus d'amiante et sont considérés comme dangereux.

1.2.2.3. Déchets non dangereux

On considère comme non dangereux (et non inerte) tout déchet qui ne présente aucune des caractéristiques qui rendent un déchet dangereux.

1.2.3. Par intérêt économique

Les déchets peuvent acquérir de la valeur s'ils sont recyclés ou transformés en d'autres ressources, telles que des matières premières ou des combustibles de substitution. Cependant, il est essentiel de les identifier et de les isoler de manière à conserver leurs caractéristiques matérielles ou énergétiques, permettant ainsi de leur donner une seconde vie. Ce critère de classification permet de définir des sous-catégories de déchets en fonction des filières de valorisation qu'il est possible de leur appliquer.

1.2.3.1. Emballages

Les déchets d'emballages non souillés par des produits dangereux qu'ils soient ménagers ou non. Ils doivent cependant être séparés à la source des autres déchets non dangereux afin de faciliter leur valorisation par des moyens appropriés à leur nature et à leur quantité.

1.2.3.2. Déchets 5 flux

Cette catégorie a vu le jour dans les pays dotés de législations environnementales contraignantes (France, union européenne). Les entreprises doivent séparer et trier 5 catégories de déchets, à savoir le papier, les métaux, les plastiques, le verre et le bois du reste de leurs déchets en vue de leur réutilisation ou de leur recyclage.

1.2.3.3. Biodéchets

Les biodéchets désignent tous les déchets non dangereux et biodégradables provenant de jardins ou de parcs, ainsi que tous les déchets alimentaires ou de cuisine issus notamment des ménages, des restaurants, des traiteurs ou des magasins de vente au détail. Ils incluent également les déchets comparables provenant des établissements de production ou de transformation de denrées alimentaires, y compris les huiles alimentaires usagées.

1.2.3.4. Combustibles solides de récupération (CSR)

Le combustible solide de récupération (CSR) est défini comme un déchet non dangereux solide, composé de déchets qui ont été triés afin d'extraire la fraction valorisable sous forme de matière. Il est préparé pour être utilisé comme combustible, seul ou associé à de la biomasse non traitée, dans certaines installations de production (les déchets secs et riches en résidus de plastiques, bois, papier, etc., qui ne sont pas recyclables dans les conditions actuelles).

1.2.3.5. Déchets ultimes

Un déchet ultime se définit comme déchet qui n'est plus susceptible d'être réutilisé ou valorisé dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux.

1.3. Caractérisation des déchets solides

Les réglementations actuelles imposent une bonne connaissance de la composition des déchets, soulignant ainsi l'importance cruciale de la caractérisation en laboratoire. Une caractérisation précise est également indispensable pour sélectionner une technique de traitement appropriée, qu'il s'agisse d'incinération, de valorisation de matière ou de mise en décharge. De nombreuses techniques analytiques sont employées. En réalité, la planification d'une filière de gestion implique le respect d'un cahier des charges analytique propre à chaque filière. Le tableau 1.2 présente, à titre d'exemple, les éléments les plus couramment utilisés dans une caractérisation analytique.

Tableau 1.2 : Caractérisation analytique des déchets (Navarro, 2016).

Caractéristiques principales	Exemples
Composition chimique élémentaire	• Teneurs en métaux, C, H, N, P, S, Cl...
Composition chimique moléculaire	• Teneurs en Benzène, phénols, protéines, sucres, sels minéraux, oxydes, polymères...
Propriétés thermodynamiques et chimiques	• Pouvoir calorifique, point d'éclair, limite d'explosivité, capacité thermique, pH, conductivité...
Propriétés physiques et mécaniques	• État physique, granulométrie, masse volumique, dureté...
Propriétés spécifiques	• Taux de cendres, humidité, rapport C/N, couleur, biodégradabilité...
Toxicité, et écotoxicité	• Tests de toxicité aiguë, de mutagenèse, d'écotoxicité...
Comportement spécifique	• Tests de lixiviation, pouvoir fertilisant...

Chapitre 1 : Généralités sur les déchets solides

Cette caractérisation analytique du déchet doit être accompagnée d'une analyse quantitative (quantités produites, tonnages concernés) et spatio-temporelle (plan géographique du gisement de déchet, son flux d'émission, évolution de la composition des déchets).

1.4. Nomenclature des déchets

La particularité du secteur de la gestion des déchets réside dans la grande diversité des termes et des abréviations utilisés par les différents acteurs. Cela entraîne des confusions dans l'interprétation des données, des échanges entre détenteurs, et une absence de consensus sur un certain nombre de définitions. C'est en partie pour remédier à cette difficulté de communication entre les différents acteurs de la filière des déchets qu'une nomenclature codifiée a été créée. Elle permet de donner une identité à chacun des déchets en proposant 842 codes à six chiffres (de 01 à 20 03 99) reprenant :

- Le secteur d'origine du déchet (1^{er} et 2^{ème} chiffres)
- La subdivision du secteur d'origine (3^{ème} et 4^{ème} chiffres)
- La désignation du déchet (5^{ème} et 6^{ème} chiffres). Les déchets classés dangereux sont accompagnés d'un astérisque (*).

Cette nomenclature codifiée a été développée par la communauté européenne et a été adoptée depuis 2006 par la réglementation algérienne. Elle est énoncée en annexe du Décret exécutif N°06-104 du 28 février 2006 du JORADP fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux. Un exemple de codification d'un déchet industriel est illustré dans la figure 1.1.

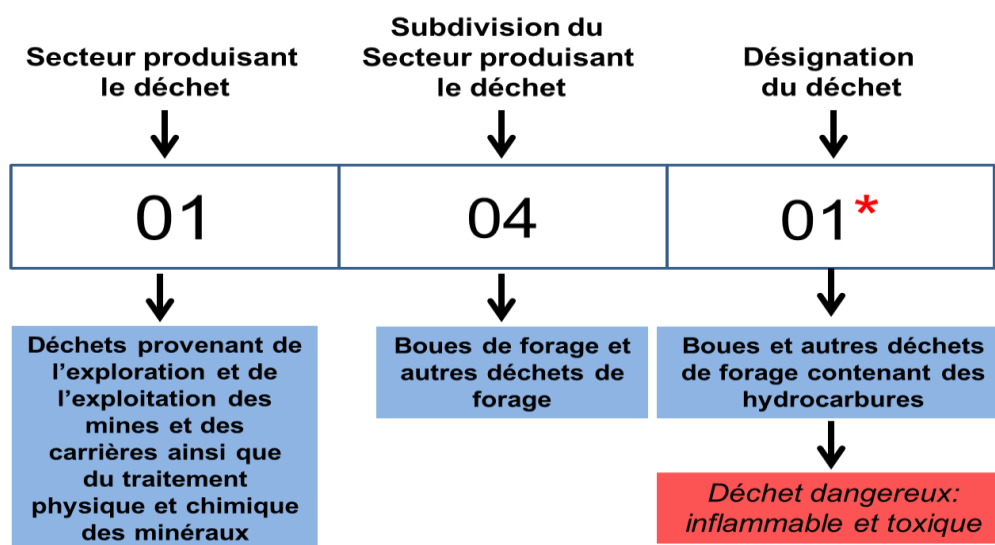


Figure 1.1 : Exemple de codification et de désignation d'un déchet industriel

L'attribution du code déchet doit être effectuée avec soin, car ce code figurera sur tous les documents nécessaires à sa traçabilité et à sa gestion.

1.5. Législation et cadre institutionnel algérien

La législation sur la gestion des déchets vise principalement à minimiser les dangers pour l'environnement et la santé publique, qui peuvent résulter de l'abandon des déchets dans la nature. À partir de 2001, le gouvernement algérien a élaboré une stratégie nationale pour la protection de l'environnement, concrétisée par le Plan National d'Action pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD). Dans le domaine des déchets, le PNAE-DD a été subdivisé en deux programmes :

- **Progdem** : Programme de gestion des déchets solides municipaux.
- **Pnagdes** : Plan national de gestion des déchets spéciaux.

Pour mettre en œuvre cette stratégie, le gouvernement a initié un vaste programme de mise à niveau comprenant :

- **Renforcement de la réglementation** : Adoption de la loi 01-19 du 12 décembre 2001, relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- **Renforcement institutionnel** : Création d'institutions spécialisées dans divers domaines environnementaux, notamment l'Agence Nationale des Déchets (AND), dont la mission principale est de promouvoir la gestion intégrée des déchets.
- **Services décentralisés** : Établissement de 48 directions de l'environnement de wilayas et inspections régionales.
- **Introduction de la fiscalité environnementale** : Mise en place de la taxe d'enlèvement des ordures ménagères (TEOM) et de la taxe sur les activités polluantes et dangereuses (TAPD).

L'Algérie vise, à travers Progdem et Pnagdes, à développer une gestion intégrée des déchets. Pour ce faire :

- 135 centres d'enfouissement techniques pour DMA et DI ont été réalisés ou sont en cours de réalisation.
- La majorité des communes ont élaboré des schémas directeurs pour la gestion des DMA.
- Les grandes décharges publiques ont été éradiquées ou sont en cours de réhabilitation.
- Des actions pilotes de tri à la source incitent au tri et au recyclage.
- Des unités de tri et de déchetteries ont été créées.
- Un système public de reprise et de traitement des déchets d'emballages (Eco-Jem) a été mis en place.

Chapitre 1 : Généralités sur les déchets solides

Plusieurs textes de lois et de décrets pour mettre en œuvre la politique de gestion des déchets en Algérie ont été énoncés dans le JORADP qu'il convient de souligner :

- Loi N 01-19 du 12 Décembre 2001, relative à la gestion, au contrôle et l'élimination des déchets.
- Loi N 03-10 du 19 juillet 2003, relative la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
- Décret N 02-372 du 11 novembre 2002, relatif aux déchets d'emballages.
- Décret N 02-175 du 20 mai 2002, portant création, organisation et fonctionnement de l'Agence Nationale des Déchets.
- Décret N 04-199 du 19 juillet 2004, fixant les modalités de création, organisation, fonctionnement et de financement du système public de reprise et de valorisation des déchets d'emballages Eco-Jem.
- Décret exécutif N°04-409 du 14 décembre 2004 fixant les modalités de transport
- des déchets spéciaux dangereux.
- Décret exécutif N°4-410 du 14 décembre 2004 fixant les règles générales d'aménagement et d'exploitation des installations de traitement des déchets et les conditions d'admission de ces déchets au niveau de ces installations.
- Décret exécutif N°05-314 du 10 septembre 2005 fixant les modalités d'agréments de générateurs et / ou détenteurs de déchets spéciaux.
- Décret exécutif N°05-315 du 10 septembre 2005 fixant les modalités de déclaration des déchets spéciaux dangereux.
- Décret exécutif N° 06-104 du 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux.
- Décret n°19-10 du 23 janvier 2019 réglementant l'exportation des déchets spéciaux dangereux.

Conseils de lecture pour ce chapitre

- **BALET, J.M., 2023.** Gestion des déchets : Les différents types de déchets, les modes de collecte et de gestion, les filières de traitement. Edition Dunod, 368p.
- **LETCHER, T.M., VALERO, D.A., 2019.** Waste: A handbook for management. Academic Press, Elsevier, 793p.
- **NAVARRO, A., 2016.** Approche systémique des déchets. Techniques de l'ingénieur.
- **VIALLE, C., 2018.** Principes de gestion opérationnelle des déchets d'activités économiques. Techniques de l'ingénieur.
- **WORRELL, W.A., VESILIND, P.A., 2012.** Solid waste engineering. Cengage Learning, 427p.

Site internet de l'agence nationale des déchets (AND)

- <https://and.dz/>

Chapitre 2

Les Déchets Ménagers et Assimilés (DMA)

2. Déchets ménagers et assimilés

2.1. Définition

Les déchets ménagers et assimilés (DMA) sont tous les déchets issus des ménages, des activités industrielles, commerciales, artisanales, et autres, qui sont assimilables aux déchets ménagers par leur nature et leur composition (ordures ménagères, déchets municipaux, déchets industriels banals (DIB), déchets agricoles et déchets encombrants (déchet d'ameublement)).

2.2. Production et flux

Les quantités de déchets produites sont souvent exprimées sous forme de “taux de production unitaire”, le plus souvent en Kg/habitant/Jour ou en kg/habitant/an afin de rendre les données entre régions et entre pays relativement comparables. A l'échelle mondiale, cette production unitaire varie considérablement, de 0,1 à 4,5 kg/hab/j, avec des quantités plus élevées dans les pays à haut revenu (Figure 2.1). En Algérie le ratio quotidien moyen est de 0.8 kg/hab/j, avec des disparités nord-sud et entre les milieux urbains et ruraux.

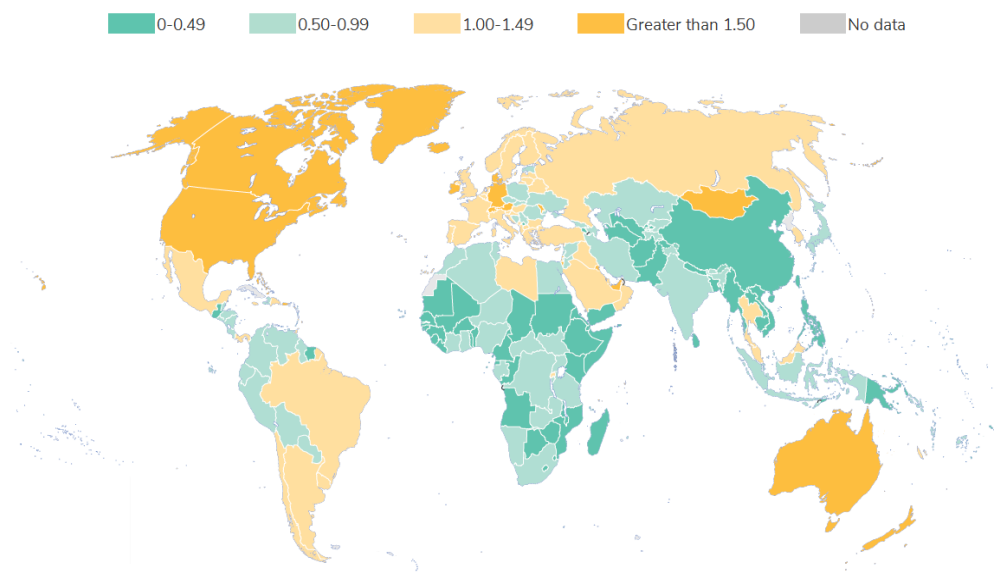


Figure 2.1 : Production de DMA dans le monde en Kg/hab/j (World Bank, 2020).

D'après le rapport de la banque mondiale, l'humanité génère plus de deux milliards de tonnes de déchets solides municipaux chaque année. La Chine est le pays qui produit le plus de déchets, avec 395 millions de tonnes par an, suivie par les États-Unis (265 millions de tonnes). En Algérie, la quantité de DMA produite s'élève 13.1 millions de tonnes en 2018. En raison de l'augmentation du niveau de vie, de l'urbanisation rapide et de l'explosion

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

démographique, le volume mondial de déchet risque d'augmenter pour atteindre les 3,4 milliards de tonnes en 2050.

2.3. Composition

La composition des déchets ménagers est variée et comprend principalement des matières organiques, du papier, du carton, du verre, des plastiques, et des métaux. Connaître cette composition est cruciale pour une gestion efficace des déchets, car elle permet de mettre en place des stratégies de tri et de recyclage adaptées, réduisant ainsi l'impact environnemental et les coûts de gestion. Par exemple, une forte proportion de matières organiques peut justifier la mise en place de programmes de compostage, tandis qu'une grande quantité de papier et de carton peut encourager des initiatives de recyclage spécifiques à ces matériaux.

La composition des déchets ménagers varie considérablement d'un pays à l'autre en fonction de plusieurs facteurs. Dans les pays développés, les déchets sont souvent composés d'une plus grande proportion de papiers, de cartons et de plastiques, en raison de la consommation élevée de produits emballés. À l'inverse, dans de nombreux pays en développement, les matières organiques représentent souvent une part plus importante des déchets ménagers, en raison d'une consommation plus importante de produits frais et d'un moindre recours aux emballages (Figure 2.2).

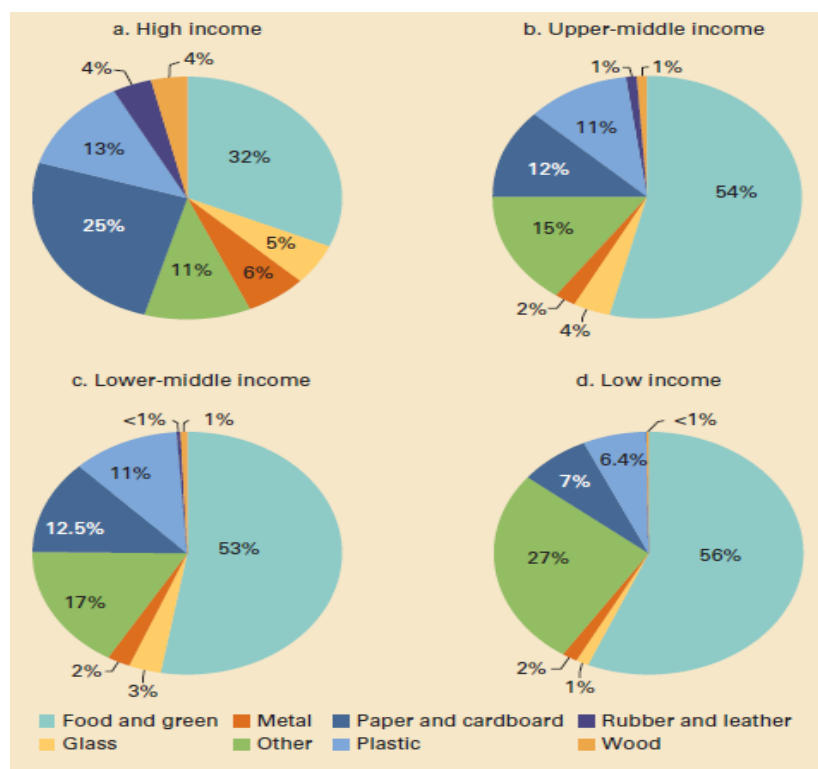


Figure 2.2 : Composition moyenne des déchets ménagers dans le monde en fonction du niveau de revenu (World bank, 2020).

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

En Algérie, selon le rapport de l'Agence Nationale des Déchets (AND, 2020), la composition des déchets ménagers est majoritairement constituée de matières organiques, représentant environ 54 % du total des déchets. Les plastiques et les papiers/cartons représentent respectivement 15.3 % et 6.7 %, tandis que le verre et les métaux constituent environ 3 % des déchets. Les textiles et d'autres types de déchets composent le reste. Cette forte proportion de matières organiques s'explique par des habitudes alimentaires basées sur la consommation de produits frais et peu emballés (Figure 2.3).

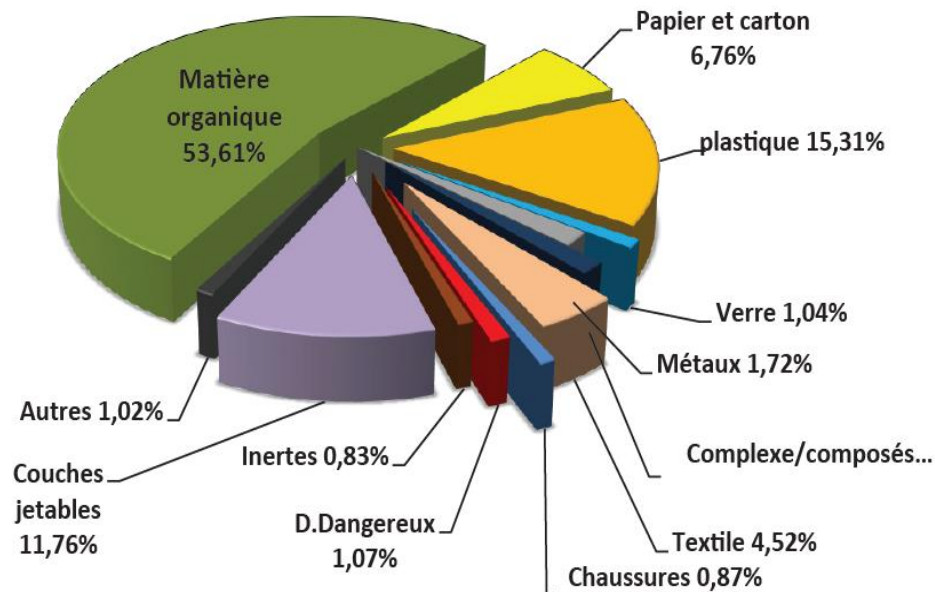


Figure 2.3 : Composition moyenne des déchets ménagers en Algérie (AND, 2020)

2.4. Collecte des DMA

La collecte des déchets ménagers revêt une importance cruciale pour le maintien de l'hygiène publique et la préservation de l'environnement. En effet, une collecte efficace, régulière et organisée permet de réduire les risques sanitaires liés à l'accumulation des ordures, mais aussi de prévenir la pollution des sols et des eaux et limiter les nuisances olfactives. Cette première étape essentielle dans le processus de gestion des déchets et prépare le terrain pour les stratégies de traitement des déchets post-collecte.

2.4.1. Types de collecte

2.4.1.1. Collecte en mélange (porte-à-porte)

C'est la collecte traditionnelle qui consiste à ramasser les déchets ménagers non triés, placés dans des sacs plastiques ou divers récipients tels que des poubelles ou de petits containers (Figure 2.4). Ces récipients sont déposés devant les maisons et collectés à des jours fixes.



Figure 2.4 : Exemples de récipients à ordures ménagères non triées dans des quartiers de Béjaia

2.4.1.2. Collecte des encombrants

La collecte des encombrants, appelée aussi collecte des monstres est un service essentiel qui permet aux habitants de se débarrasser de leurs objets volumineux et indésirables. Ces objets incluent généralement des meubles usagés, des appareils électroménagers hors d'usage, des matelas, et d'autres articles qui ne peuvent être éliminés par les moyens de collecte traditionnels. La collecte des monstres est généralement organisée à des dates spécifiques, permettant aux résidents de déposer leurs encombrants sur le trottoir pour qu'ils soient ramassés par les services municipaux.

2.4.1.3. Collecte séparative (porte-à-porte)

La collecte séparative porte à porte est une méthode de gestion des déchets qui encourage le tri à la source, permettant ainsi une meilleure valorisation des matières recyclables. Dans ce système, les ménages sont tenus de séparer leurs déchets en différentes catégories, telles que les matières organiques, les plastiques, les papiers, les verres et les mettre dans des containers différents reconnaissables. Chaque type de déchet est ensuite collecté séparément par les services municipaux à des jours spécifiques, directement devant les portes des maisons. Les déchets ainsi collectés sont orientés ensuite vers des centres de tri afin de faciliter le recyclage et le compostage, réduisant ainsi la quantité de déchets envoyés en décharge.

2.4.1.4. Collecte pneumatique

La collecte pneumatique est un système innovant de gestion des déchets qui utilise des réseaux souterrains pour transporter les ordures directement des points de dépôt vers des centres de traitement ou de collecte centralisés. Ce système repose sur l'aspiration pneumatique pour déplacer les déchets à grande vitesse, éliminant ainsi le besoin de camions de collecte traditionnels. Les points de dépôt sont généralement situés dans des endroits

stratégiques, tels que des immeubles résidentiels, des centres commerciaux, ou des espaces publics, permettant aux usagers de déposer leurs déchets dans des bornes spécifiques (figure 2.5).



Figure 2.5 : Schéma d'un système de collecte pneumatique des déchets

2.4.1.5. Collecte séparative par apport volontaire

La collecte séparative par apport volontaire est un système de gestion des déchets qui repose sur la participation active des citoyens. Les habitants trient eux-mêmes leurs déchets et les déposent dans des conteneurs spécifiques, souvent situés dans des points d'apport volontaire répartis dans les communes. Ce type de collecte est particulièrement efficace pour les matériaux recyclables tels que le verre, le papier, le carton, les plastiques et les métaux.

2.4.1.6. Dépôt volontaire en déchetterie

Le dépôt volontaire en déchetterie est un système de gestion des déchets où les citoyens apportent leurs déchets triés et séparés à des points de collecte dédiés, appelés déchetteries (Figure 2.6). Ce processus encourage une gestion des déchets par les usagers eux-mêmes. Les déchetteries sont équipées de compartiments dédiés pour accueillir divers types de déchets, notamment les déchets verts, les matériaux recyclables (papier, carton, plastique, verre, métal), les déchets électroniques, des déchets d'ameublement ainsi que les déchets dangereux tels que les peintures et les produits chimiques. Ce système permet également de réduire les coûts de collecte et de traitement en centralisant les déchets et en minimisant le besoin de ramassage à domicile. De plus, les déchetteries offrent un espace organisé et sécurisé pour le dépôt des déchets, réduisant ainsi les risques de dépôts sauvages et favorisant une prise de conscience environnementale plus large.



Figure 2.6 : Vue d'une déchetterie

2.4.2. Equipements de collecte

Les équipements de collecte des déchets varient considérablement entre les pays développés et les pays en développement. Dans les pays développés, les camions de collecte modernes sont souvent équipés de technologies avancées telles que des bennes tasseuses, qui compactent les déchets pour optimiser l'espace et réduire les coûts de transport (Figure 2.7). Ces véhicules sont également souvent dotés de systèmes de levage automatisés pour faciliter le chargement et le déchargement des conteneurs, ainsi que de dispositifs GPS pour optimiser les itinéraires de collecte. En revanche, dans de nombreux pays en développement, la collecte des déchets repose encore sur des camions traditionnels, souvent moins sophistiqués et moins efficaces. Ces camions peuvent manquer de bennes tasseuses, ce qui entraîne une capacité de chargement réduite et nécessite des trajets plus fréquents vers les sites de traitement ou de décharge. De plus, le manque d'infrastructure et de financement peut entraîner une collecte irrégulière et inefficace, aggravant les problèmes de gestion des déchets et d'hygiène publique.



Figure 2.7 : Camions de collecte des ordures ménagères : camion rudimentaire (a), camion à benne tasseuse (b).

2.4.3. Trajets de la collecte

La gestion des trajets de collecte des déchets dans les municipalités est cruciale pour assurer l'efficacité et la rentabilité du service. En optimisant les itinéraires de collecte, les municipalités peuvent réduire la consommation de carburant, diminuer les émissions de gaz à effet de serre et abaisser les coûts opérationnels. L'utilisation de technologies telles que les systèmes de positionnement par GPS permet de planifier des trajets plus courts et plus directs, minimisant ainsi le temps passé sur la route et améliorant la ponctualité du service. De plus, une bonne gestion des rotations des camions permet de maximiser l'utilisation des véhicules, en évitant les trajets à vide et en assurant une répartition équilibrée de la charge de travail parmi les équipes. Cette approche permet également de mieux répondre aux besoins des citoyens, en adaptant la fréquence de collecte aux variations saisonnières ou aux spécificités des quartiers. En somme, une gestion optimisée des trajets de collecte des déchets contribue non seulement à des économies financières substantielles pour les municipalités, mais aussi à une meilleure qualité de vie pour les résidents grâce à un environnement plus propre et plus sain.

2.4.4. Stations de transfert des déchets

Les stations de transfert des déchets jouent un rôle clé dans la gestion efficace des déchets en centralisant et en optimisant le traitement préliminaire avant leur transport vers les leurs sites de traitement, de valorisation ou d'élimination finale. À leur arrivée, les déchets sont d'abord déchargés des camions de collecte. Ensuite, un tri initial est réalisé, souvent avec l'aide de tapis roulants, pour séparer les matériaux recyclables des non-recyclables. La séparation magnétique est utilisée pour séparer les métaux ferreux, des métaux non ferreux. Les déchets sont ensuite broyés à l'aide de broyeurs industriels, ce qui réduit leur volume et facilite le traitement ultérieur. Les équipements de compactage, tels que les compacteurs à déchets, compresse les matériaux pour optimiser l'espace de transport. Parfois, les matériaux recyclables, comme les papiers et les cartons, sont mis en balles à l'aide de presses à balles pour faciliter leur manutention et leur expédition vers les centres de recyclage. L'utilisation de ces équipements spécialisés permet non seulement de centraliser et d'optimiser le traitement des déchets, mais aussi de réduire les coûts de transport et les impacts environnementaux en diminuant le volume des déchets et en améliorant l'efficacité logistique globale. La figure 2.8 illustre les principaux équipements utilisés dans une station de transfert des déchets.



Figure 2.8 : Quelques équipements utilisés dans une station de transfert des déchets : Séparateur magnétique (a), Tapis de tri manuel (b), Broyeurs à cisailles (c), appareil de mise en balles des déchets (d) et vue de déchets compactés en balles (e) et (f).

2.5. Mise en décharge des déchets

2.5.1. Problématique des décharges incontrôlées (sauvages)

Les décharges classiques, incontrôlées ou sauvages sont des sites situés généralement à la périphérie des villes où divers types de déchets, ou immondices, sont entassés et mélangés sans distinction ni traitement préalable. Ces décharges reçoivent des déchets ménagers, industriels, et parfois même des déchets dangereux, tous accumulés en couches successives. Cette approche rudimentaire de gestion des déchets ne prévoit ni tri sélectif, ni traitement spécifique des différentes catégories de déchets, entraînant une décomposition incontrôlée et la libération de substances polluantes dans l'environnement. En effet, une décharge fonctionne comme un bioréacteur naturel, où se déroulent diverses réactions microbiologiques de dégradation des déchets complexes qui transforment les déchets en biogaz et en lixiviats (Figure 2.9).

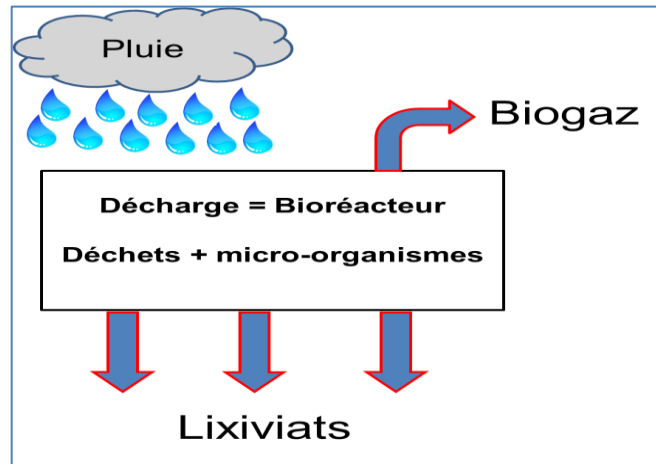


Figure 2.9 : Schéma simplifié du fonctionnement d'une décharge

Les déchets organiques, lorsqu'ils sont enfouis, sont décomposés par des micro-organismes qui dégradent les matières organiques, générant du biogaz, principalement composé de méthane et de dioxyde de carbone (Tableau 2.1)

Tableau 2.1 : Composition moyenne des gaz de décharge (Damien, 2016)

	Minimum	Maximum
CH ₄	30 %	55 %
CO ₂	22 %	50 %
N ₂	3 %	26 %
H ₂ S	4 mg/m ³	20 mg/m ³
CO	0	3 %
H ₂	0	3 %
O ₂	1 %	8 %

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

NH ₃	0	0.35*10 ⁻⁶ vol
H ₂ O	4 %	

On trouve également à l'état de traces (quelques mg/m³) des alcools, des composés organosoufrés qui sont malodorants, des organohalogénés et des hydrocarbures entre autres. Ces émissions gazeuses, principalement le méthane et le dioxyde de carbone, contribuent au réchauffement climatique (10% du méthane atmosphérique est issu des décharges). De plus, les odeurs nauséabondes émises par la décomposition des déchets affectent la qualité de vie des résidents à proximité.

Parallèlement à la production de biogaz par les décharges, l'infiltration des eaux de pluie qui percole à travers les déchets et l'eau contenue dans le déchet créent des lixiviats (jus de décharge), des liquides chargés en polluants dissous (Tableau 2.2). Ces lixiviats peuvent contaminer les sols et les nappes phréatiques avec des substances toxiques, affectant ainsi la qualité de l'eau potable.

Tableau 2.2 : Composition moyenne des lixiviats (mg/l) (Tchobanoglous et Kreith, 2002).

Constituants	Intervalle
DCO (demande chimique en oxygène)	3000 - 60 000
DBO ₅ (demande biologique en oxygène-5jours)	2000 - 30 000
COT (carbone organique total)	1500 - 20 000
pH	4.5 – 7.5
N Kjeldahl	10 – 50
Nitrates	5 - 40
Phosphates	4 - 80
Sulfates	50 - 1000
Cr	0.05 - 1
Cd	0.001 - 0.1
Cu	0.02 - 1
Pb	0.1 - 1
Ni	0.1 - 1
Fe	50 - 1200
Zn	0.5 - 30
Cl	200 - 3000

Par ailleurs, les décharges sauvages constituent un terrain propice au développement de bactéries et de vecteurs de maladies tels que les rats, les chiens errants et les moustiques, augmentant le risque de propagation de maladies infectieuses. Face à ces nombreux problèmes posés par les décharges incontrôlées, il est devenu crucial, au fil des ans, de concevoir des décharges plus sécurisées et contrôlées, réduisant ainsi les impacts environnementaux et sanitaires. Aujourd'hui, ces décharges sont rebaptisées installation de stockage des déchets non dangereux (ISDND), ou centres d'enfouissement technique (CET), des termes moins péjoratifs.

2.5.2. Centre d'enfouissement technique (CET)

Un Centre d'Enfouissement Technique est une installation conçue pour stocker les déchets de manière à les isoler de l'environnement immédiat, évitant ainsi toute contamination du sol et de la nappe phréatique. La création d'un site d'enfouissement doit être précédée d'études techniques rigoureuses pour garantir la sécurité et la durabilité de l'installation. Une étude géotechnique permet d'analyser la nature et la stabilité des sols, assurant ainsi que le site peut supporter le poids des déchets sans risque de glissement ou de tassement. Les études hydrogéologiques sont cruciales pour évaluer la profondeur des nappes phréatiques, afin de prévenir toute contamination potentielle des ressources en eau. La nature des sols est également examinée pour déterminer leur perméabilité et leur capacité à agir comme barrière naturelle contre les lixiviats. De plus, il est essentiel de s'assurer de l'absence de nuisances pour les riverains, en évaluant les impacts potentiels sur la qualité de l'air, le bruit et la circulation. L'accessibilité du site doit être optimisée pour faciliter le transport des déchets, tandis que la maîtrise foncière par les collectivités publiques garantit la gestion et le contrôle à long terme. Les installations de stockage de déchets sont classées en trois catégories, en fonction de la nature des déchets qu'elles peuvent accueillir :

- Classe 1 : réservée aux déchets industriels spéciaux (dangereux)
- Classe 2 : réservée aux déchets ménagers et assimilés
- Classe 3 : réservée aux déchets inertes.

Les classes de CET sont définies en fonction du degré de perméabilité du sous-sol du site aménagé. Ce coefficient de perméabilité est quantifié par la loi de Darcy qui se traduit par l'expression suivante :

$$Q = K * S * i \quad (1)$$

Avec :

- Q (m/s) est la vitesse de progression de l'eau dans la couche perméable

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

- K (m/s) est le coefficient de perméabilité du substratum, également appelé coefficient de Darcy
- i est le gradient hydraulique, défini par $i = h/e$
- h est la charge hydraulique (hauteur d'eau au-dessus du substratum),
- e est l'épaisseur du substratum (sol de fond du CET),
- S (m²) est la section perpendiculaire à la direction de l'écoulement.

La réglementation impose des niveaux spécifiques d'imperméabilité, définis par le coefficient de perméabilité « K » et l'épaisseur minimale du substratum « e », selon le type de déchets :

- **CET de classe 1** : $e = 5$ m ; $K = 10^{-9}$ m/s
- **CET de classe 2** :
 - $e = 1$ m ; $K = 10^{-9}$ m/s,
 - $e = 5$ m ; $K = 10^{-6}$ m/s.
- **CET de classe 3** : aucune exigence spécifique concernant l'imperméabilité.

2.5.2.1 Déchets admissibles en CET

Les déchets admissibles et interdits en fonction des types de CET sont résumés dans le tableau 2.3

Tableau 2.3 : Déchets admissibles et interdits en fonction du centre de stockage (Billard, 2001)

Déchets admissibles		
Classe 1	Classe 2	Classe 3
• Résidus de l'incinération (Suies et cendres non volantes, poussières fines et cendres volantes, déchets issus de la neutralisation des gaz ou des suies de lavage des gaz). • Résidus de la métallurgie : (Poussières provenant de la fabrication des aciers, Poussières issues des procédés de fabrication des métaux et scories, Crasses de deuxième fusion de métaux par bains de sels, Boues d'usinage contenant moins de 5 % en masse	• Ordures ménagères. • Objets encombrants. • Déchets de voirie. • Déchets industriels et commerciaux assimilables aux déchets ménagers. • Déchets verts. • Boues dont la siccité est supérieure ou égale à 30 %. • Déchets fermentescibles et fortement évolutifs de l'industrie et de l'agriculture. • Déchets de bois, papier,	• Plâtre, Déchets de matériaux en amiante et ciment, plaques ondulées, plaques supports de tuiles, ardoises en amiante ciment, produits plans, tuyaux et canalisations. • Déchets en mélange issus des chantiers de bâtiment (construction, démolition, réhabilitation). • Déchets de bâtiment et des travaux publics triés : terres non polluées, pierres, déchets de

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

d'hydrocarbures). • Résidus de forage. • Déchets minéraux de traitement chimique : (Oxydes et sels métalliques, Sels minéraux non cyanurés, Catalyseurs usés). Résidus de traitement d'effluents industriels, d'eaux industrielles, de déchets ou sols pollués : boues d'épuration d'affluents industriels (BHM) ; résidus de STEP ; résines échangeuses d'ions ; résidus de traitement des sols pollués. Résidus d'incinération (mâchefers d'incinération de déchets industriels) : poussières de fabrication d'aciers alliés. Résidus de peinture (déchets de peinture, résines sans phase liquide) Résidus de la métallurgie : scories, crasses hors catégorie; sables de fonderie. Résidus d'amiante Réfractaires et autres matériaux usés et souillés : matériaux souillés au cours du processus de fabrication ; matières premières, rebuts de fabrication et matériels divers souillés non recyclables.	carton. • Déchets contenant de l'amiante lié (amiante ciment et revêtements en vinyl-amiante).	minéraux, déchets de briques, ciment, béton, tuiles, céramique, terre cuite, porcelaine.
Déchets interdits		
Classe 1	Classe 2	Classe 3
• Déchets dont on peut extraire une partie	• Déchets dangereux et déchets industriels	• Terres polluées. • Déchets dangereux.

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

• Déchets radioactifs provenant du démantèlement des installations nucléaires de base. • Déchets explosifs • Déchets inflammables • Déchets radioactifs • Déchets pulvérulents non conditionnés. • Déchets fermentescibles. • Déchets contaminés (sanitaire).	• Déchets d'activités de soins et assimilés. • Déchets radioactifs. • Déchets contenant plus de 50 mg/kg de PCB. • Déchets inflammables et explosifs. • Déchets liquides ou dont la siccité est inférieure à 30 %. • Pneumatiques usagers	• Déchets ménagers et assimilés. • Déchets organiques fermentescibles. • Déchets radioactifs. • Déchets non refroidis. • Déchets explosifs ou susceptibles de s'enflammer spontanément.
---	--	---

2.5.2.2 Caractéristiques techniques d'un CET de classe 2

Un CET de classe 2 est une structure réservée aux déchets ménagers et assimilés. Il peut couvrir plusieurs dizaines d'hectares et se présente sous formes de plusieurs casiers indépendants sur le plan hydraulique, constitués d'alvéoles où sont déposés les déchets (figure 2.10).

La durée de vie d'un CET s'étend bien au-delà de sa période d'exploitation active. En effet, même après la fermeture du site, le CET nécessite une surveillance et une gestion rigoureuses pendant les nombreuses années nécessaires à la stabilisation des déchets (leur évolution vers un état physico-chimique définitif et inaltérable). Par conséquent, lors de la conception d'un CET, un grand soin doit être apporté aux systèmes de confinement et les barrières d'étanchéité passives et actives ainsi qu'aux systèmes de captage du biogaz et des systèmes de drainage des lixiviats afin de garantir l'isolement du déchet de l'environnement.



Figure 2.10 : Décharge en casiers séparés en exploitation

a. Barrière de sécurité passive (naturelle)

C'est la couche de sol naturelle qui tapisse le fond et les flancs de chaque casier. Elle doit présenter une perméabilité hydraulique inférieure à 10^{-9} m/s sur au moins **1 mètre** et inférieure à 10^{-6} m/s sur au moins **5 mètres** pour la couche du fond des casiers. Les flancs séparant les casiers doivent quant à eux être constitués d'une couche minérale avec une perméabilité inférieure à 10^{-9} m/s sur au moins **1 mètre**. Des matériaux argileux, limoneux et à base de bentonite sont souvent utilisés pour assurer cette étanchéité naturelle.

b. Barrière de sécurité active (artificielle)

Le système d'étanchéité et de drainage (du fond et des flancs) garantit l'indépendance hydraulique des casiers. Il assure également le drainage et la collecte des lixiviats, tout en évitant de solliciter la barrière de sécurité passive. Cette barrière d'étanchéité artificielle est réalisée par l'utilisation de géosynthétiques (DEG, dispositif d'étanchéité géosynthétique). Ils se composent d'une structure d'étanchéité et d'une structure de protection de l'étanchéité. Les géomembranes les plus couramment utilisées dans les centres de stockage sont en polyéthylène haute densité (PEHD), en polypropylène (PP), en polychlorure de vinyle (PVC), en polyéthylène basse densité (PEBD), en éthylène-propylène-diène-monomère (EPDM), en bitumes oxydés ou en « bitumes polymères ». Ces membranes sont souvent surmontées d'une couche de drainage des lixiviats en mixant l'utilisation de géosynthétiques et des matériaux naturels drainants comme le gravier (figure 2.11)



Figure 2.11 : Pose des géomembranes sur le fond des casiers d'un CET

C. Couverture du CET

La couverture des centres de stockage de déchets doit principalement garantir l'isolement des déchets par rapport à l'environnement extérieur. Cela implique de réduire ou empêcher les infiltrations d'eau, de contrôler la migration des gaz et de prévenir tout contact entre les déchets stockés et l'extérieur. Elle doit assurer des fonctions d'étanchéité et de drainage, tout en évitant d'être en contact direct avec les lixiviats.

Pour garantir la durabilité de l'ouvrage, la couverture doit :

- Résister aux phénomènes d'érosion et d'abrasion.
- Assurer un ruissellement contrôlé des eaux externes au site (eaux pluviales, eaux de surface, drains, etc.).
- Stabiliser les surfaces en tolérant les tassements et les déformations.
- Minimiser les tassements pour éviter les accumulations d'eau sous forme de poches.
- Empêcher les intrusions animales.

De plus, la couverture doit permettre la réintégration du site dans son environnement, en rétablissant son esthétique et en facilitant éventuellement une réhabilitation par une végétalisation en prenant soin de choisir les espèces locales avec un enracinement superficiel pour ne pas endommager la couche imperméable sous-jacente de la couverture. Les fonctions essentielles de la couverture doivent être maintenues sur une longue période, pouvant aller de plusieurs dizaines à plusieurs centaines d'années, selon le type de déchets.

Ces exigences ne peuvent être satisfaites que par une couverture composite, composée de plusieurs couches, chacune remplissant une fonction spécifique. La complexité et la nature des matériaux utilisés pour ces couches dépendent des impératifs propres à chaque site.

d. Système de captage et de valorisation du biogaz

Une tonne de déchets ménagers contient généralement entre 150 et 250 kg de matières organiques, qui sont biodégradables. Ces substances se décomposent par le biais de micro-organismes dans un environnement anaérobie, traversant quatre phases successives pour se transformer en biogaz. La figure 2.12 illustre la composition du biogaz de décharge du biogaz à chaque étape de la décomposition des matières organiques.

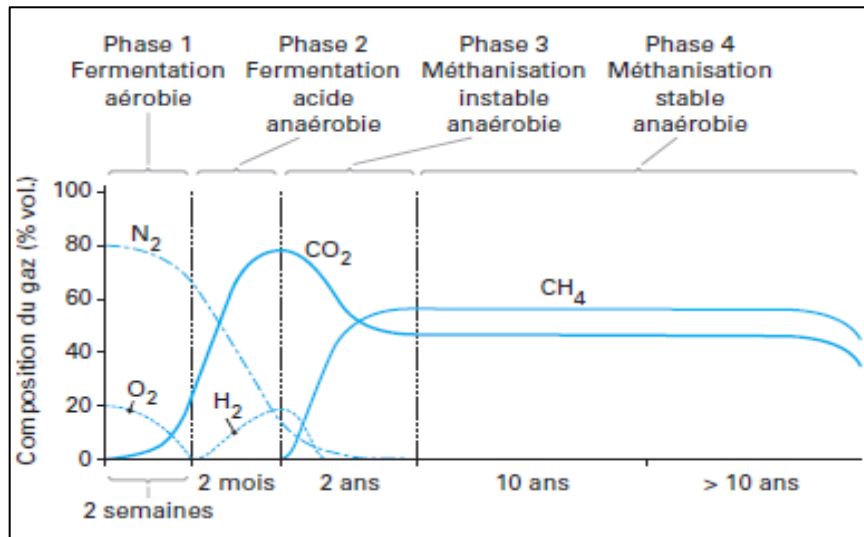


Figure 2.12 : Composition du biogaz de décharge en fonction du temps

La production moyenne de biogaz dans une décharge est comprise entre 50 et 150 m³/tonne, composé essentiellement de CH₄ et de CO₂, avec la présence d'autres gaz à l'état de traces (cf.2.5.1). Le captage du biogaz s'opère au moyen de drains verticaux en tubes de polyéthylène percés ou de drains horizontaux disposés dans des tranchées en gravier (figure 2.13).

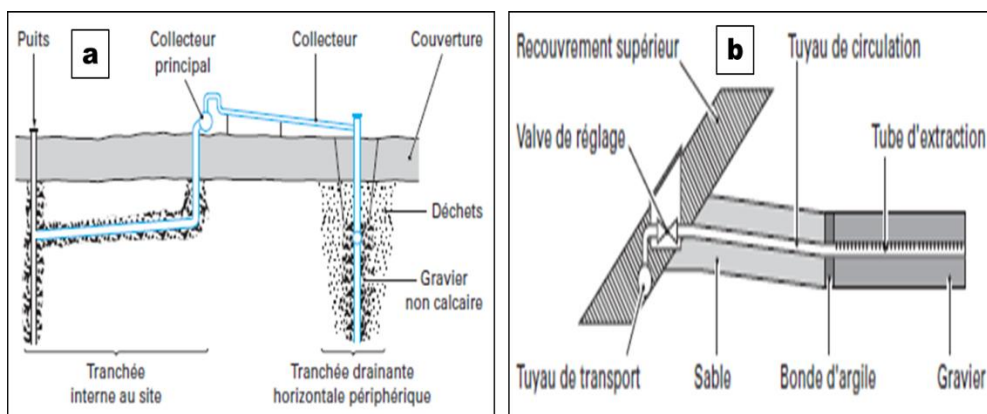


Figure 2.13 : Réseaux de collecte du biogaz de décharge : (a) drains verticaux ; (b) drain horizontal (Billard, 2001).

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

Le biogaz doit être capté pour une valorisation énergétique (carburant pour véhicules diesel, pour chaudières, injection dans le réseau d'alimentation en gaz naturel...) ou à défaut brûlé par des torchères au sein d'une installation à proximité du site d'enfouissement (figure 2.14). La production du biogaz au sein de la décharge n'est pas instantanée, un délai est souvent observé entre la mise en décharge des déchets et l'observation des premières émissions de biogaz. La production de biogaz peut durer plusieurs années après la fermeture de la décharge.

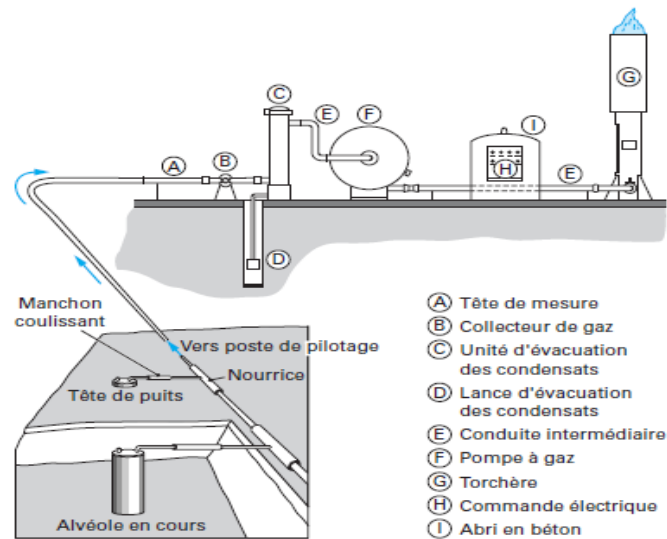


Figure 2.14 : Installation de captage et d'élimination du biogaz (Billard, 2001)

e. Système de collecte et de traitement des lixiviats

Les lixiviats sont des liquides produits par la percolation de l'eau à travers les déchets dans une décharge. Ils contiennent une charge organique et minérale significative, incluant des matières dissoutes et en suspension telles que les métaux lourds, les produits chimiques organiques, les nutriments, et les agents pathogènes (cf.2.5.1). Cette composition peut varier en fonction de la nature des déchets, des conditions climatiques, et de l'âge de la décharge. Les lixiviats peuvent être à l'origine de nuisances environnementales majeures, notamment la contamination des nappes phréatiques par infiltration, ce qui pose un risque pour la qualité de l'eau potable et les écosystèmes aquatiques.

Pour traiter les lixivats générés par la décharge, ils sont d'abord récoltés et extraits de l'intérieur des casiers par le biais de puits de collecte et des pompes de relevage (Figure 2.15). Une fois collectés, ces lixiviats sont acheminés vers des installations de traitement in situ ou ex situ.

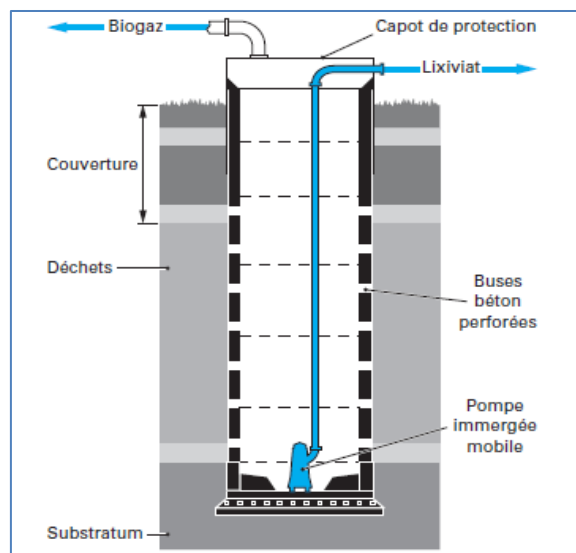


Figure 2.15 : Puits de collecte des lixiviats

Les lixiviats sont des eaux usées complexes qui nécessitent des technologies de traitement adéquates pour les rendre conformes aux normes de rejets mentionnées dans le Tableau (2.5).

Tableau 2.5: Les valeurs limites maximales des paramètres de rejet d'effluents industriels liquides dans un milieu récepteur (JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE, 2006).

Paramètres	Unités	Valeurs limites
Températures	°C	30
pH	-	6,5 à 8,5
MES	mg/l	35
DBO5	mg/l	35
DCO	mg/l	120
Azote Kjeldahl	mg/l	30
Phosphates	mg/l	10
Cyanures	mg/l	0,1
Aluminium	mg/l	3
Cadmium	mg/l	0,2
Chrome total	mg/l	0,5
Fer	mg/l	3
Manganèse	mg/l	1
Mercure	mg/l	0,01

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

Nickel	mg/l	0,5
Plomb	mg/l	0,5
Cuivre	mg/l	0,5
Zinc	mg/l	3
Huiles et Graisses	mg/l	20
Hydrocarbures totaux	mg/l	10
Indice de Phénols	mg/l	0,3
Solvants organiques	mg/l	20
Chlore actif	mg/l	1,0
PCB	mg/l	0,001
Détergents	mg/l	2
Tensioactifs anioniques	mg/l	10

Les technologies principalement utilisées pour le traitement des lixiviats comprennent des procédés biologiques et physico-chimiques. Les caractéristiques des lixiviats, leur âge et leur structure contrôlent l'efficacité du traitement. Par conséquent, le traitement adéquat des lixiviats est complexe et l'application de divers procédés est généralement nécessaire parmi lesquels on trouve :

- ❖ **Les traitements biologiques** : Ces traitements comprennent des traitements aérobies conventionnels appliqués aux usées (boues activées, lits bactériens et lagunage aéré). Les procédés biologiques sont principalement appliqués pour l'élimination de l'azote et sont adéquats pour traiter les lixiviats immatures riches en matières biodégradables et pauvres en produits chimiques toxiques et en métaux lourds.
- ❖ **La coagulation-floculation** : C'est un procédé qui facilite l'élimination des matières en suspension et des colloïdes en les rassemblant sous forme de floc dont la séparation est ensuite effectuée par des systèmes de décantation, flottation et/ou filtration. Dans ce procédé, le choix du coagulant approprié (généralement le sulfate d'aluminium, et le chlorure ferrique sont très couramment utilisés) et les effets du pH sont des facteurs critiques pour le traitement des lixiviats. L'efficacité du traitement peut atteindre 50% pour la DCO.
- ❖ **L'adsorption** : C'est une technique qui peut être efficace pour le traitement des lixiviats. Les deux types d'adsorbants les plus répandus qui peuvent facilement

adsorber et éliminer les composants organiques des lixiviats sont le charbon actif en poudre et le charbon actif en grains. Ce procédé peut également éliminer les métaux lourds. L'adsorption par le charbon actif peut éliminer environ 50 à 70 % de la DCO et de l'azote ammoniacal des lixiviats.

❖ **L'oxydation chimique** : Ça consiste à oxyder les substances organiques très difficilement ou pas biodégradables. C'est aussi une bonne solution pour désinfecter, désodoriser et décolorer les lixiviats. Les principaux oxydants sont l'ozone, le peroxyde d'hydrogène, le chlore, l'hypochlorite de calcium et le permanganate de potassium.

❖ **Les procédés membranaires** : L'ultrafiltration (UF), l'osmose inverse (OI), la nanofiltration (NF) et la microfiltration (MF) sont des techniques de filtration par membrane sous pression utilisées dans le traitement des eaux. Ces techniques peuvent éliminer les macromolécules et les particules de taille différentes en fonction de la taille des pores des membranes utilisées. Utilisée comme prétraitement ou traitement final, l'application des membranes dans le traitement des lixiviats a connu un essor croissant.

f. Dimensionnement

Le volume qu'occupe une décharge ressemble approximativement à la forme d'une pyramide tronquée (Figure 2.16).

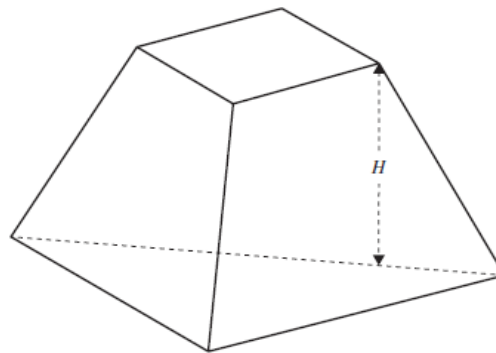


Figure 2.16: Forme typique d'un centre de stockage de déchet en fin d'exploitation

Ce volume est occupé par les déchets mis en décharge ainsi que par les matériaux de couverture, les puits de collecte de gaz et les dispositifs de recirculation des lixiviats. Il est donc nécessaire d'estimer d'abord la quantité (volume) de déchets qui seront enfouis pendant la durée de vie prévue de l'installation. Ensuite, il faut tenir compte pourcentage (généralement 10 à 20%) de l'espace qui sera occupé par des matériaux autres que les déchets. Le volume de la décharge est alors augmenté en conséquence. Lors de l'estimation du volume des déchets mis en décharge, il est important de prendre en compte les changements de densité dus au compactage qui se produit pendant le placement des déchets.

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

Une fois le volume total de la décharge estimé, les dimensions en surface et la hauteur finale de la décharge peuvent être déterminées. La configuration finale de la décharge dépendra de la géographie du site. Une approche simplifiée pour dimensionner une décharge consiste à supposer une conception de pyramide régulière tronquée comme indiqué sur la Figure (2.10). Lorsque la pyramide a une base carrée, une équation pour le volume de la décharge peut s'écrire comme suit :

$$V = \frac{H}{3} (A1 + A2 + \sqrt{A1 * A2}) \quad (2)$$

- A1 est la surface de la base inférieure,
- A2 est la surface de la base supérieure,
- H est la hauteur entre les deux bases.

En connaissant le volume total des déchets produit par une collectivité au cours d'un temps donné, la hauteur qu'on veut donner au CET et la pente de la pyramide, il est possible de calculer la surface de terrain nécessaire pour le CET. Cette approche permet de réserver suffisamment de foncier pour garantir que le CET peut contenir les déchets de manière sécurisée et conforme aux réglementations.

g. Fermeture et surveillance

Une décharge en fin d'exploitation est un site de gestion des déchets qui a atteint sa capacité maximale de réception des déchets et qui est en cours de fermeture. Ce processus implique plusieurs étapes essentielles pour assurer la sécurité environnementale et la conformité réglementaire. Tout d'abord, la surface de la décharge est recouverte d'une couche de protection, souvent constituée de matériaux imperméables et de terre végétale, pour minimiser l'infiltration des eaux de pluie et la production de lixiviats. Ensuite, des systèmes de collecte et de traitement des lixiviats et des biogaz sont installés pour gérer les émissions résiduelles et prévenir la contamination des nappes phréatiques et de l'air (figure 2.17).

Après la fermeture du site, il est essentiel de surveiller les nappes phréatiques pour détecter toute contamination potentielle due aux lixiviats. La qualité de l'air doit également être contrôlée pour évaluer les émissions de gaz de décharge, tels que le méthane et le dioxyde de carbone, qui peuvent avoir des impacts significatifs sur le climat et la qualité de l'air local. En outre, des inspections régulières de l'intégrité du recouvrement et des systèmes de drainage sont nécessaires pour prévenir les infiltrations d'eau et les érosions. Ces mesures de surveillance post-exploitation sont cruciales pour assurer la stabilité à long terme du site et minimiser les risques environnementaux. La réhabilitation du site peut inclure des initiatives

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

de reforestation ou la transformation en espaces verts publics, contribuant ainsi à la restauration écologique et à l'intégration harmonieuse du site dans son environnement local.

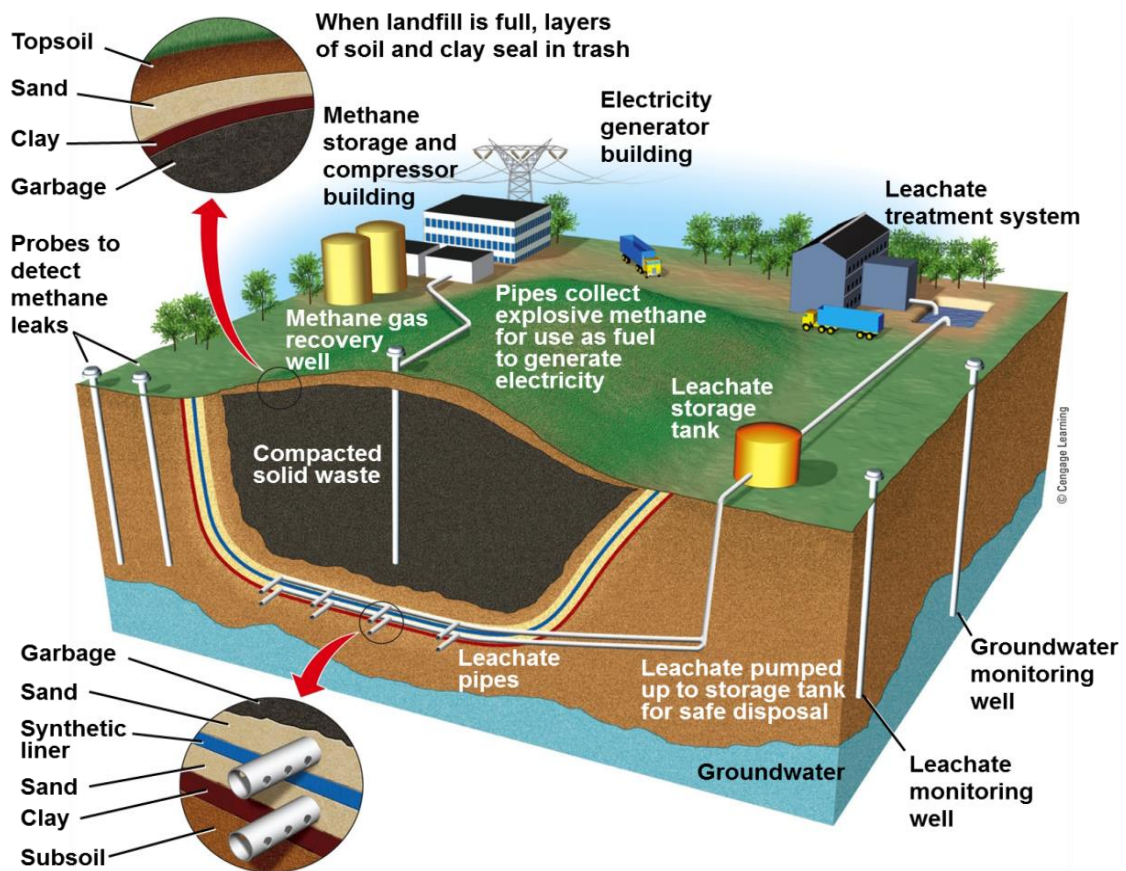


Figure 2.17 : Structure définitive d'un CET en fin d'exploitation

2.6. Bioconversion organique des déchets

2.6.1. Compostage

2.6.1.1. Définition

Le compostage est un processus contrôlé de dégradation des constituants organiques (substrats), sous forme solide ou semi-solide et d'origine végétale et animale, par une succession de communautés microbiennes (bactéries, levures, champignons) évoluant en conditions aérobies (présence d'oxygène), conduisant à l'élaboration d'une matière organique humifiée et stabilisée. Le produit ainsi obtenu est appelé compost (matériau stable et granulaire), valorisable en agriculture comme amendement ou engrais (figure 2.18). Ce métabolisme microbien des déchets s'accompagne d'une libération de chaleur et de CO_2 .

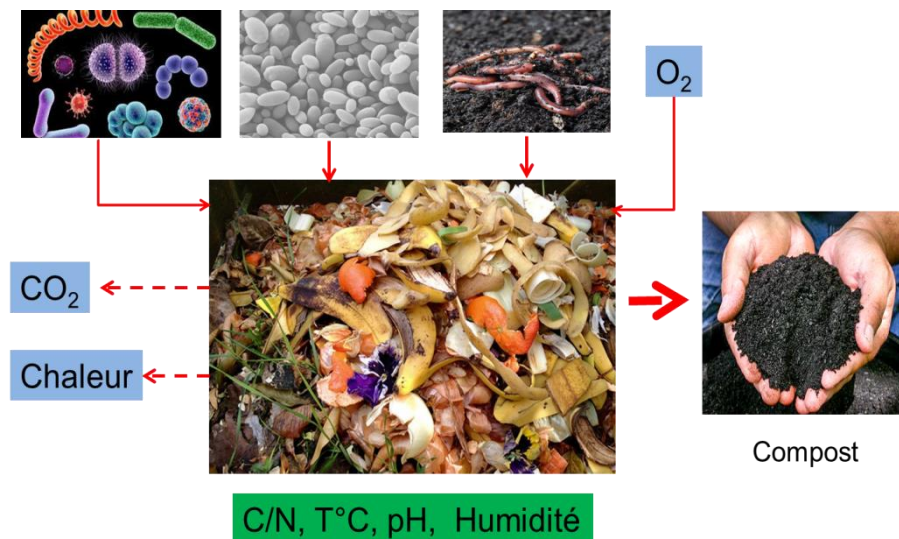


Figure 2.18 : Description du principe de métabolisme des déchets organique par compostage

2.6.1.2. Avantage du compostage

Le compostage est un procédé de traitement des déchets organiques qui présentent plusieurs avantages :

- Stabilisation du déchet pour réduire les pollutions ou nuisances associées à son évolution biologique
- Abattement des espèces pathogènes présentes dans le déchet (bactéries sporulantes, parasites, virus).
- Réduction de la masse du déchet
- Production d'un compost valorisable comme amendement organique des sols. En effet, les apports de compost sur les sols peuvent avoir plusieurs avantages (apport de matière organique et de nutriments qui contribue à la fertilité des sols, à la stabilité structurale des sols et à une meilleure rétention d'eau. En outre, la richesse du compost

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

en communautés microbienne contribue à l'abondance de la microflore des sols et l'amélioration de l'activité microbienne.

2.6.1.3. Déchets compostables

La distinction des déchets entre compostables et non compostables revêt une importance cruciale dans le procédé de compostage. Les déchets compostables sont organiques et peuvent se décomposer naturellement pour former du compost. En revanche, les déchets non compostables peuvent contaminer le compost final en substances chimiques ou pathogènes ou prolonger significativement le temps de décomposition. Par conséquent, une bonne connaissance des déchets compostables par rapport aux déchets non compostables est essentielle pour optimiser l'efficacité du compostage et obtenir un compost de qualité. Le tableau (2.6) illustre quelques exemples de déchets compostables et non compostables.

Tableau 2.6 : Types de déchets compostables et non compostables

Types de déchets	Déchets compostables	Déchets non compostables
Déchets de cuisine	• Coquilles d'œufs (à concasser) • Épluchures • Pelures de fruits et légumes • Sachets de thé • Marc et filtres à café • Coquillages • Pain • Arêtes de poisson à broyer • Restes de repas	• Os • Huiles végétales • Laitages • Matières grasses • Ail • Restes liquides (soupes, sauces...) • Métaux, boîtes de conserve
Déchets de jardins	• Feuilles mortes • Tontes de pelouse • Tailles de haies • Branchages • Fleurs/plantes coupées/fanées • Paille et foin • Écorces d'arbres • Déchets du potager • Aiguilles de pin • Mauvaises herbes sans graines	• Bois traité • Bois non broyé • Terre, Argile, Sable • Charbon de bois • Excréments d'animaux • Litières chimiques • Végétaux traités, végétaux malades • Mauvaises herbes avec graines • Plantes rampantes • Résineux

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

Autres sortes de déchets	• Cendres de bois froides. • Sciures et copeaux de bois. • Serviettes et Mouchoirs en papier. • Papiers et cartons non imprimés. • Essuie-tout. • Fumiers d'animaux. • Litières naturelles.	• Matières synthétiques : nylon, plastiques, caoutchouc, porcelaine • Couches de bébé • Mégots • Charbon de barbecue • Poussière et sacs aspirateurs • Papier et cartons imprimés, Magazines, journaux • Bois de palettes, contre-plaqué
---	---	--

2.6.1.4. Phases de compostage

La mise en œuvre du compostage comprend généralement deux étapes biologiques principales (Figure 2.19), ainsi que des prétraitements qui peuvent inclure des opérations de tri, de broyage ou encore de mélange avec d'autres matériaux.

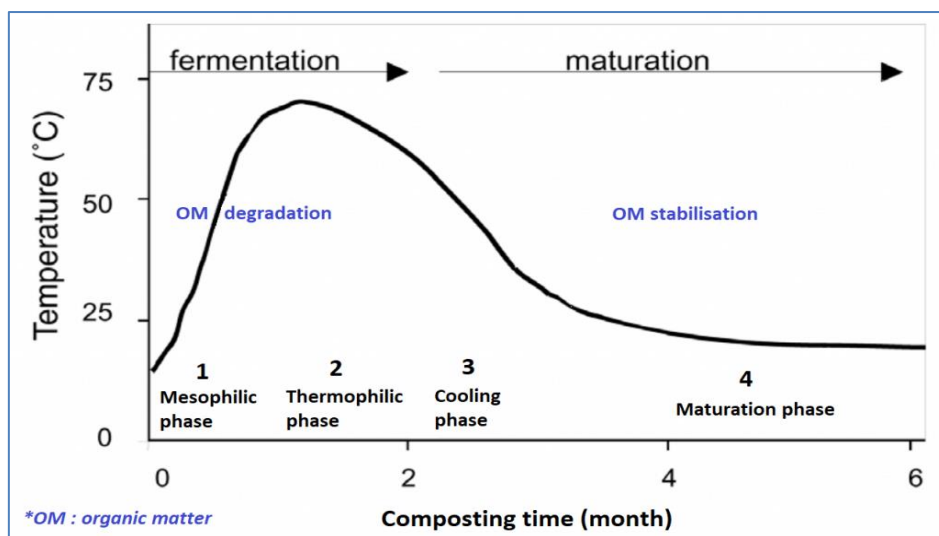


Figure 2.19 : Phases du compostage

La **première étape** biologique, dite de « **fermentation chaude** » a pour objectif la stabilisation du déchet et la réduction de sa masse. Elle se déroule en deux phases :

- **La phase mésophile** constitue la première phase du compostage. Au cours des premiers jours, la présence de matières organiques labiles (facilement biodégradables) stimule une très forte activité microbienne, impliquant principalement des bactéries et des champignons. Cette activité induit une production de chaleur significative, entraînant une montée rapide de la température au cœur du compost.

- **La phase thermophile**, également connue sous le nom de phase d'« hygiénisation », se caractérise par une température qui dépasse 45 °C. Durant cette étape, les micro-organismes mésophiles sont remplacés par des thermophiles (organismes résistant à des températures comprises entre 45 °C et 70 °C). Ces thermophiles sont capables de décomposer des matériaux plus complexes, comme la cellulose et la lignine. Cette phase peut durer plusieurs jours à quelques semaines, selon la nature du déchet et les conditions climatiques. Pendant cette période, la température reste élevée, mais l'activité biologique des micro-organismes commence à diminuer. Un processus de pasteurisation se produit, éliminant les bactéries pathogènes, ce qui contribue à l'assainissement du compost. A l'issue de cette phase, on enregistre une dégradation d'environ 30 à 40 % de la masse qui s'accompagne d'une réduction d'environ 50 % du volume. Pour maintenir l'efficacité de cette phase, le mélange doit être régulièrement aéré afin de fournir suffisamment d'oxygène aux micro-organismes, permettant ainsi une décomposition continue.

À cette étape de fermentation, se succède une étape de **maturation du compost** qui se déroule en deux phases :

- **La phase de refroidissement** : Après la phase thermophile, la fraction la plus biodégradable du déchet a été décomposée et l'activité bactérienne diminue. Le résultat est donc un déchet relativement stabilisé et la température du déchet diminue.
- **La phase de maturation** : C'est la phase pendant laquelle les processus d'humification prédominent pour former le compost final.

2.6.1.5. Paramètres opératoires du compostage

Pour produire des composts de qualité, un certain nombre de paramètres doivent être contrôlés pour optimiser le processus de transformation. Ces paramètres sont ceux qui peuvent affecter l'activité microbienne. On peut les classer en deux catégories : les paramètres opératoires du procédé de compostage (extrinsèques) et ceux qui sont caractéristiques du déchet (paramètres intrinsèques).

a. Les paramètres opératoires : Il s'agit essentiellement de l'aération, de la température et de la teneur en eau.

- **L'aération** : L'activité microbiologique aérobie intense durant le compostage consomme une grande quantité d'oxygène. Les besoins en oxygène augmentent proportionnellement à la quantité de matière biodégradable présente. Il est essentiel de maintenir une teneur en oxygène d'au moins 5 % (volume/volume) pour garantir des conditions aérobies adéquates pour le métabolisme de dégradation et éviter les

mauvaises odeurs qui peuvent résulter d'un taux d'aération insuffisant. Pour assurer une bonne répartition de l'oxygénation dans le tas à composter, deux paramètres doivent être pris en compte : la taille (distribution granulométrique) du matériau et l'humidité du tas de compost.

- **La température** : Le dégagement de chaleur dans le compost est une expression de l'activité des micro-organismes. Ce paramètre joue un rôle crucial dans la qualité du procédé et du produit final. En effet, une température élevée permet non seulement d'accélérer considérablement les vitesses de biodégradation, mais aussi d'assurer l'hygiénisation du déchet en éliminant les germes pathogènes présents au départ. La phase de fermentation aérobie à haute température peut être maintenue par une aération adéquate.
- **Teneur en eau** : La présence d'eau dans le déchet à composter est essentielle pour l'activité biologique. Initialement, cette humidité doit se situer entre 55 et 75 % de la masse brute. Au cours du compostage, l'humidité évolue en raison de la production d'eau par l'oxydation de la matière organique. Cependant, la hausse de température et l'aération favorisent le dessèchement du compost. Ce phénomène doit être maîtrisé pour éviter un ralentissement significatif de l'activité biologique par surchauffe, qui peut survenir lorsque la teneur en eau descend en dessous de 20 %.

b. Les paramètres intrinsèques du déchet : La nature et les caractéristiques du déchet jouent un rôle clé dans la faisabilité du traitement et la détermination des conditions opératoires. Cela inclut notamment sa biodégradabilité, sa granulométrie, son pH, ainsi que son rapport C/N/P.

- **La biodégradabilité** : La nature du déchet influence directement l'activité microbienne. Ce paramètre dépend de la structure des molécules qui composent la matière organique du déchet, déterminant ainsi sa biodégradabilité intrinsèque. Pour les déchets issus de la biomasse, la biodégradabilité intrinsèque est plus élevée lorsque la teneur en sucres libres, hémicelluloses ou amidon est importante, et elle diminue avec une plus grande présence de cellulose et de lignine. En conséquence, les déchets provenant des industries agroalimentaires, de l'élevage, ainsi que les déchets de cuisine sont généralement plus biodégradables que les déchets végétaux lignocellulosiques tels que les branchages et les troncs d'arbres.
- **La granulométrie** : La taille des particules du déchet influence directement l'accessibilité de la matière organique aux microorganismes. Par conséquent, en réduisant la granulométrie du déchet, on augmente sa surface spécifique, ce qui

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

améliore l'accès des microorganismes à la matière et favorise ainsi la biodégradation. Il est donc recommandé de procéder au compostage avec un déchet dont la taille des particules ne dépasse pas environ 10 cm, ce qui peut nécessiter un broyage initial, surtout pour certains déchets verts. Cependant, une granulométrie trop fine peut rendre l'aération plus difficile. Ainsi, on privilégie généralement une granulométrie comprise entre 2 et 10 cm environ.

- **Le pH :** Le pH optimal pour l'activité de la plupart des microorganismes est proche de la neutralité.
- **Le rapport C/N/P :** Le rapport massique C/N/P de la fraction biodégradable détermine la « valeur nutritive » du déchet. Les microorganismes hétérotrophes consomment généralement 20 à 30 fois plus de carbone que d'azote, et environ 100 fois plus de carbone que de phosphore. Par conséquent, le rapport C/N/P optimal est généralement de l'ordre de **100/(4 à 5)/1**. Il est recommandé d'ajouter parfois un co-substrat organique peut aider à équilibrer les sources de carbone et d'azote disponibles pour les microorganismes. Par exemple, les déchets verts, qui sont riches en carbone mais pauvres en azote, peuvent être mélangés avec co-substrat riche en azote et en phosphore (comme des boues de stations d'épuration ou des déchets d'origine animale) pour atteindre un rapport C/N/P optimal.

Les valeurs récapitulatives des conditions nécessaires au fonctionnement optimal du processus de compostage sont présentées dans le tableau (2.7).

Tableau 2.7 : Conditions opératoires optimales pour le compostage (Humeau et Le Cloirec, 2010)

Conditions opératoires	Fermentation aérobie	Maturation
Température	60 à 70°C	20 à 30°C
Teneur en eau	60 à 80%	40 à 60%
Porosité	30 à 36 %	/
pH initial	6 à 8	7 à 8
Rapport C/N	20 à 30	/
Temps de biodégradation	4 à 6 semaines	1 à 3 mois
Besoins en air	0.1 à 1m ³ .min ⁻¹ .tonne ⁻¹ (Matière Sèche)	<0.1 à 1m ³ .min ⁻¹ .tonne ⁻¹ (Matière Sèche)

2.6.1.6. Techniques et procédés de compostage

a. Compostage par andain (Windrow composting)

La technique de compostage en andains consiste à empiler les matériaux à composter en longues rangées, appelées andains, qui sont généralement disposées sur le sol ou sur une surface préparée. Ces andains sont souvent orientés dans le sens de la longueur pour maximiser l'exposition à l'air (Figure 2.20).



Figure 2.20 : Compostage par andain (a) ; Machine pour retourner et aérer les andains (b)

L'aération est primordiale dans cette technique, car elle favorise l'activité microbienne nécessaire à la décomposition des matières organiques. Pour maintenir des conditions optimales de compostage, les andains doivent être régulièrement retournés (1 fois par semaine) ou aérés à l'aide de machines spécifiques afin de garantir une bonne oxygénation et éviter la formation de zones anaérobies. La taille et la forme des andains peuvent varier en fonction du volume de matière à traiter et des conditions climatiques locales (1 à 3 mètres de hauteur ; 3 à 4 mètres de largeur). Cette méthode est efficace pour produire un compost de haute qualité au bout de 5 à 8 mois.

b. Tas de compost aéré artificiellement (*aerated static pile composting*)

Cette technique est un procédé de compostage aérobie qui se distingue par l'aération contrôlée des tas de compost sans nécessiter de le retourner régulièrement. Les déchets organiques sont empilés en tas ou en andains, et l'air est introduit au travers du matériau à l'aide de systèmes de ventilation, tels que des tuyaux perforés installés à la base du tas (Figure 2.21). De plus, cette technique permet de gérer plus facilement l'humidité et la température à l'intérieur du tas, ce qui améliore la qualité du compost final.



Figure 2.21 : Technique de compostage en tas de compost aéré artificiellement

C. Compostage en réacteur (*in-vessel composting systems*)

Le compostage en réacteur est une technique de compostage où les déchets organiques sont décomposés à l'intérieur de réacteurs fermés (Figure 2.22).



Figure 2.22 : Equipement utilisé dans le compostage en réacteur

Cette méthode permet un contrôle précis des conditions de compostage, telles que la température, l'humidité, et l'aération. Les réacteurs sont souvent équipés de systèmes automatisés pour gérer le mélange et l'aération des matériaux. Le compostage en réacteur est particulièrement adapté aux environnements urbains ou aux installations industrielles, où l'espace est limité et où les nuisances, comme les odeurs et les insectes, doivent être minimisées. En maintenant le compost dans un environnement contrôlé, cette méthode réduit les risques de contamination et permet une dégradation plus rapide des déchets organiques, souvent en quelques semaines seulement.

d. Compostage individuel

Le compostage individuel à domicile est une méthode simple et écologique pour recycler les déchets organiques produits au quotidien. En utilisant un bac à compost ou un composteur, généralement placé dans le jardin, les ménages peuvent transformer leurs restes de cuisine (comme les épluchures de fruits et légumes, le marc de café, et les coquilles d'œufs) ainsi que les déchets de jardinage (comme les feuilles mortes et les petites branches) en compost riche en nutriments (Figure 2.23).



Figure 2.23 : Compostage individuel

Ce processus permet non seulement de réduire la quantité de déchets envoyés en décharge, mais aussi de produire un amendement naturel pour enrichir le sol de son jardin ou de ses plantes d'intérieur.

e. Lombricomostage

Le lombricompostage est une méthode de compostage qui utilise des vers de terre, principalement des vers rouges (*Eisenia fetida*), pour décomposer les déchets organiques en un compost de haute qualité appelé lombricompost ou vermicompost (qui constitue leur déjections). Les vers consomment les restes de cuisine, comme les épluchures de fruits et légumes, et les transforment en un compost riche en nutriments, idéal pour fertiliser les plantes (Figure 2.24).



Figure 2.24 : Lombricompostage à l'aide de l'espèce *Eisenia fetida*

Ce procédé peut être utilisé de deux manières : soit comme une étape unique de traitement, soit après une phase de fermentation chaude, en remplacement de la maturation traditionnelle. La première méthode est principalement utilisée dans le secteur agricole, car elle nécessite des surfaces assez vastes (environ 2,5 m² par m³ de déchet). En effet, afin d'éviter une montée en température du déchet (due à l'activité microbienne de biodégradation aérobie), ce qui nuirait au développement des lombrics, il est crucial de travailler avec des tas

ou andains ayant un rapport surface/volume élevé. Généralement, la hauteur de ces tas ou andains ne dépasse pas 30 à 40 cm pour maintenir la température en dessous de 40°C. La durée du traitement varie en fonction de la nature des déchets, mais elle est souvent de plusieurs semaines à plusieurs mois.

2.6.1.7. Détermination de la maturité d'un compost

Plusieurs indices ont été mis au point dans la littérature afin d'évaluer la maturité des composts parmi lesquels on trouve :

- ❖ **Suivi de la température** : Une température du compost stable (qui ne remonte pas) et proche de la température ambiante est un paramètre qui indique un compost stable et mature
- ❖ **Test respirométrique** : Ce test mesure la consommation d'oxygène par le compost. On considère qu'un compost est mûr (commercialisable) si sa consommation d'oxygène est inférieure à 40 mg/ kg de produit sec par heure.
- ❖ **Test E₄/E₆** : C'est une méthode spectrométrique, qui repose sur la capacité d'un extrait de compost à absorber la lumière à différentes fréquences. Le rapport entre l'absorption lumineuse d'une solution d'acide humique à 465 nm et à 665 nm est appelé le rapport E₄/E₆. Un rapport E₄/E₆ inférieur à 5 indique une décomposition avancée (compost mûr) alors qu'un rapport supérieur à 5 indique un compost immature.
- ❖ **Rapport Carbone/Azote organique** : Un rapport C/N_{org} de 5 ou 6 indique un compost mature.
- ❖ **Rapport NH₄⁺/NO₃⁻** : Selon cet indice, les composts sont classés comme suit :
 - Compost immature : $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- > 3$
 - Compost mature : $0.5 > \text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- > 3$
 - Compost très mature : $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- < 0.5$

2.6.1.8. Evaluation de la qualité du compost

Le produit final obtenu à la fin du procédé de compostage est un produit susceptible d'être utilisé comme amendement organique. Cependant, sa composition et ses caractéristiques dépendent à la fois de la nature des déchets traités ainsi que des conditions opératoires du procédé de traitement. Pour utiliser le compost comme amendement organique en toute sécurité, un contrôle de qualité strict est essentiel. Le compost doit répondre à des normes rigoureuses en matière de composition et de sécurité pour garantir son efficacité et son innocuité (Tableau 2.8).

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

Tableau 2.8 : Normes françaises sur la composition des composts en vue de leur utilisation comme amendement organique

Composés	Valeurs limites (mg/kg) Matière sèche	Valeurs limites (mg/kg) Matière organique
Arsenic	18	
Cadmium	3	
Chrome	120	
Mercure	2	
Nickel	60	
Plomb	180	
Sélénium	12	
Cuivre	300	600
Zinc	600	1200
Composés traces organiques (CTO)		Flux limites (g/ha/an)
Fluoranthène	4	6
Benzo(b)fluoranthène	2.5	4
Benzo(a)pyrène	1.5	2
Inertes et impuretés	Valeurs limites (% matière sèche)	
Films plastiques > 5mm	0.3	
Autres plastiques > 5mm	0.8	
Verres et métaux > 2mm	2	
Microorganismes	Toutes cultures sauf maraichères	Cultures maraichères
Œufs d'helminthes viables	Absence dans 1.5g	Absence dans 1.5g
<i>Salmonella</i>	Absence dans 1g	Absence dans 25g

2.6.2. Méthanisation

2.6.2.1. Définition

La méthanisation, ou digestion anaérobie, est un processus biologique qui décompose la matière organique grâce à l'action de populations microbiennes spécifiques. En l'absence d'oxygène, ce processus génère un mélange de méthane et de dioxyde de carbone ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$), connu sous le nom de biogaz. Cette méthode peut être appliquée à la majorité des déchets organiques, qu'ils soient d'origine municipale, industrielle, agricole, qu'ils soient solides ou liquides.

Le processus de méthanisation aboutit aussi à la production d'un digestat, qui est la matière résiduelle obtenue après la digestion anaérobie des déchets, c'est-à-dire le déchet initial dont la fraction organique la plus facilement biodégradable a été éliminée. Ce digestat nécessite généralement des post-traitements aérobies pour le transformer en un matériau similaire au compost, souvent désigné sous le nom d'affinat.

2.6.2.2. Déchets méthanisables

Plusieurs types de déchets organiques peuvent faire l'objet d'une digestion anaérobie. Ces déchets peuvent provenir de sources et de secteurs :

- Les déchets liés aux activités domestiques, tels que les ordures ménagères résiduelles.
- Les biodéchets provenant d'une collecte sélective chez les particuliers ou générés par les gros producteurs, tels que ceux issus de la distribution alimentaire (marchés, détaillants...) et de la restauration (restauration commerciale et collective)
- Les déchets verts, principalement collectés dans des centres de tri sélectif
- Les déchets issus des activités agricoles, comme les résidus de culture et les déchets organiques provenant des déjections animales (lisiers, fumiers).
- Les co-produits ou sous-produits de l'industrie agroalimentaire, dérivés de la transformation de matières animales et végétales.
- Les résidus solides issus de l'assainissement collectif ou individuel, tels que les boues de stations d'épuration (STEP), les graisses ou les matières de vidange.

2.6.2.3. Importance du méthane dans les procédés industriels

Le méthane occupe une place centrale dans divers procédés industriels en raison de sa polyvalence en tant que source d'énergie et de matière première. Il joue un rôle clé :

- En tant que source d'énergie, principalement par la combustion de carburants contenant ce composé. Le gaz naturel, qui est composé de près de 90 % de méthane. La combustion du méthane est également exploitée dans les turbines à gaz pour la

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

production d'électricité et de chaleur, et il est couramment utilisé pour le chauffage des habitations.

- En tant que carburant pour les véhicules, commercialisé sous forme de gaz naturel comprimé (GNC) ou de gaz naturel liquéfié (GNL). Sa combustion dans les moteurs est plus efficace que celle du diesel ou de l'essence.
- En tant que matière première dans l'industrie chimique, notamment pour la production d'hydrogène via un procédé appelé vaporeformage. L'intérêt croissant pour l'hydrogène en tant que carburant du futur suscite ainsi un intérêt accru pour le méthane.
- En tant que matière première pour la production de méthanol (CH_3OH). Indirectement, le méthane est également impliqué dans la fabrication des pneus, grâce au noir de carbone (combustion incomplète du méthane), qui est utilisée pour renforcer le caoutchouc. Ce noir de carbone a également une utilisation dans la production de peintures et d'encre d'imprimerie.

2.6.2.4. Phases de la méthanisation

Le processus de méthanisation, qui convertit les composés organiques complexes en méthane et en dioxyde de carbone, repose sur l'action combinée d'une communauté microbienne complexe, tant sur le plan taxonomique que fonctionnel. Plus les substances chimiques à dégrader sont complexes, plus le nombre d'espèces microbiennes en interaction augmente. Ce processus s'opère en quatre phases clés, chacune réalisée par différents groupes de micro-organismes (Figure 2.25). Chaque étape produit des composés intermédiaires, qui deviennent à leur tour les substrats pour l'étape suivante du processus.

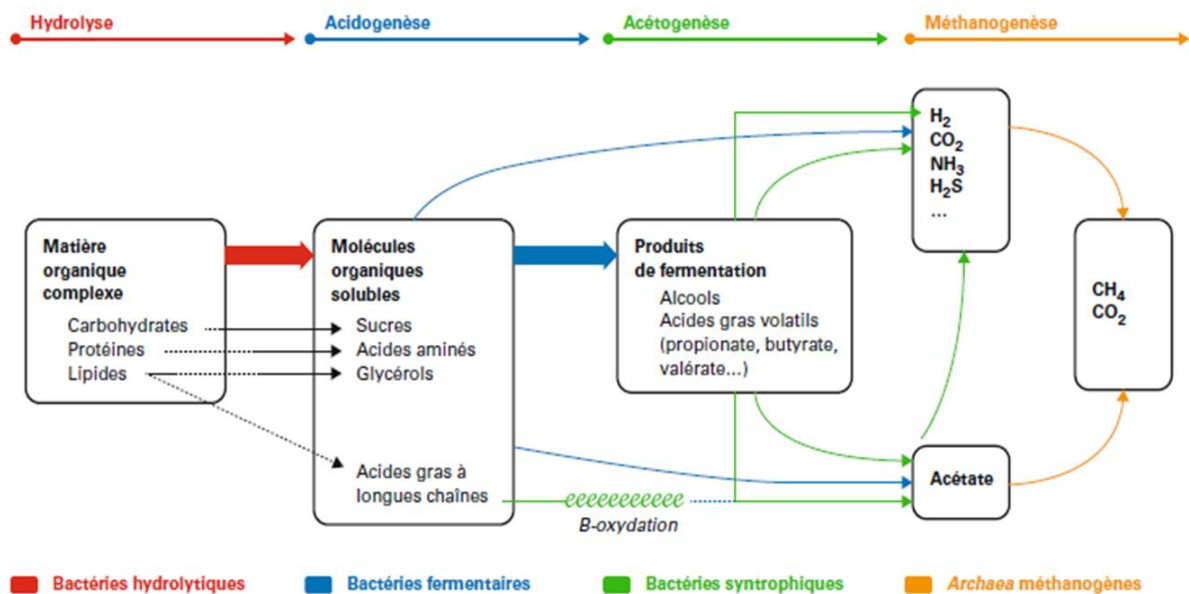


Figure 2.25 : Grandes étapes de la dégradation de matière organique par méthanisation

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

a. Hydrolyse

Au cours de cette étape, les molécules organiques complexes comme les polysaccharides, les lipides et les protéines sont hydrolysés en monomères (glucose, acides gras, acides aminés).

b. Acidogénèse

Suite à l'hydrolyse, les monomères obtenus sont convertis en acides gras volatils (acide acétique, propionique, butyrique et valérique), en alcools (éthanol), en hydrogène et en dioxyde de carbone lors de l'étape d'acidogénèse. Cette phase est caractérisée par l'activité des bactéries acidogènes, qui fermentent les produits de l'hydrolyse pour créer ces composés intermédiaires. L'acidogénèse est essentielle car elle prépare les substrats pour la phase suivante tout en libérant de l'énergie que les bactéries utilisent pour leur croissance.

c. Acétogénèse

Cette troisième étape voit les acides gras volatils et autres produits intermédiaires de l'acidogénèse transformés en acétate, hydrogène et dioxyde de carbone. Les bactéries acétogènes jouent un rôle clé dans cette conversion, produisant des composés simples qui serviront directement de substrats pour les méthanogènes lors de l'étape finale.

d. Méthanogénèse

La méthanogénèse est l'étape où le méthane est réellement produit. Les archées méthanogènes utilisent l'acétate, l'hydrogène pour produire du méthane, du dioxyde de carbone et de l'eau en suivant les réactions suivantes :



Cette étape finale est cruciale pour la transformation de la matière organique en biogaz, constitué principalement de méthane et de dioxyde de carbone, qui peut être capté et utilisé comme source d'énergie renouvelable.

En milieu anaérobie, en plus de la méthanisation, d'autres réactions microbiennes importantes se produisent, telles que :

- **La sulfatoréduction** : C'est un processus où des bactéries sulfatoréductrices utilisent des composés soufrés comme le sulfate (SO_4^{2-}), le sulfite (SO_3^{2-}) et le thiosulfate ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$), qu'ils réduisent en sulfure. Lorsque le pH est alcalin, l'ion sulfure (S^{2-}) prédomine, mais à mesure que le pH diminue, il se combine avec des ions H^+ pour former l'ion sulfhydryle (HS^-) et du sulfure d'hydrogène (H_2S). Ces formes réduites du soufre, en particulier le H_2S , sont largement dominantes dans les milieux de fermentation anaérobie. Le sulfure d'hydrogène

produit peut être toxique pour certains micro-organismes et est également responsable de la corrosion et des mauvaises odeurs dans les systèmes anaérobies. Des inhibitions modérées à complètes sur les bactéries méthanogènes sont observées pour des concentrations en sulfures variant de 50 mg.l⁻¹ à 1000 mg.l⁻¹.

- **La minéralisation de l'azote :** C'est un autre processus clé où la matière organique azotée, comme les protéines et les acides aminés, est décomposée par les micro-organismes en ammoniac (NH₃) ou en ammonium (NH₄⁺), mais l'accumulation excessive d'ammoniac peut inhiber certaines étapes de la méthanisation et influence ainsi l'efficacité globale des systèmes de digestion anaérobie.

2.6.2.5. Paramètres de mise œuvre de la méthanisation

La mise en œuvre du procédé de méthanisation repose sur plusieurs paramètres clés qui influencent l'efficacité et la stabilité du processus. Voici les principaux paramètres à considérer :

a. Température : La méthanisation peut se dérouler à différentes plages de température, principalement en mésophile (35-40°C) ou en thermophile (50-60°C). La température influence la vitesse de dégradation des substrats et la croissance des micro-organismes.

b. pH : Le pH optimal pour la méthanisation se situe généralement entre 6,5 et 8,5. Un pH trop acide ou trop alcalin peut inhiber les activités microbiennes, en particulier celles des méthanogènes, qui sont cruciales pour la production de méthane.

C. Contrôle de la charge organique : La charge organique spécifique, exprimée en kilogrammes de matière organique par mètre cube de digesteur par jour (kg/m³/jour), doit être bien ajustée. Une charge trop élevée peut surcharger le système et provoquer des inhibitions, tandis qu'une charge trop faible réduit l'efficacité du processus.

d. Temps de séjour des solides (SRT, Solid Retention Time) et temps de séjour hydraulique (HRT, Hydraulic Retention Time) : Ce sont deux paramètres clés dans le procédé de méthanisation, influençant fortement l'efficacité du processus. Le SRT représente la durée pendant laquelle les solides, ou la biomasse, restent dans le digesteur. Un SRT plus long permet une dégradation plus complète des matières organiques et favorise la croissance des micro-organismes nécessaires à la production de biogaz. Le HRT, quant à lui, est le temps moyen pendant lequel le fluide (ou les eaux usées) reste dans le digesteur. Un HRT approprié est essentiel pour garantir que les matières organiques ont suffisamment de temps pour être converties en méthane. En général, un HRT plus long permet une meilleure conversion des

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

substrats en biogaz, mais peut nécessiter un volume de digesteur plus important. L'optimisation du rapport entre SRT et HRT est cruciale pour maximiser l'efficacité du digesteur tout en minimisant les coûts et la taille de l'installation.

e. Besoins nutritionnels : Un rapport C/N/P équilibré est crucial pour une méthanisation efficace. Un rapport de 100/4 à 5/1 est généralement recommandé.

f. L'agitation : Elle permet de maintenir une homogénéité du substrat dans le digesteur, d'éviter la formation de zones mortes et de favoriser le contact entre les micro-organismes et la matière organique. Elle aide également à dégager les gaz produits. On distingue :

- **Le brassage mécanique :** Ce type de brassage est réalisé à l'aide d'un dispositif immergé dans le digesteur qui tourne lentement, à une vitesse de 20 à 50 tours par minute.
- **Le brassage hydraulique :** Il est effectué à l'aide de pompes adaptées, telles que les pompes, permettant de manipuler des fluides visqueux comme les déchets pâteux.
- **Le brassage par injection de biogaz :** Ce procédé consiste à injecter du biogaz comprimé à la base du digesteur, créant un effet air lift.

g. Contrôle des Inhibiteurs : Certaines substances, comme l'ammoniac en concentrations élevées, les métaux lourds, ou les acides gras volatils (AGV), peuvent inhiber le processus de méthanisation. Il est important de contrôler les concentrations de ces inhibiteurs pour éviter les perturbations du processus. Le tableau 2.9 illustre les plages de concentrations inhibitrices de certains éléments chimiques pour le procédé de méthanisation.

Tableau 2.9 : Concentrations en éléments inhibiteur de la méthanisation (Escudie et Cresson, 2017)

Eléments	Concentrations stimulatrices (mg/l)	Concentrations inhibitrices (mg/l)	Concentrations fortement inhibitrices (mg/l)
Azote ammoniacal ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$)	50 - 200	1000 - 1500	3000 - 5000
Sulfures (H_2S)	/	200	200
AGV	/	• 10 – 60 (forme non dissociée) • 1000 – 10000 (forme dissociée)	/

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

Calcium	100 - 200	2500 - 4500	8000
Magnésium	75 - 150	1000 - 1500	3000
Potassium	200 - 400	2500 - 4500	12000
Sodium	100 - 200	3500 - 5500	8000
Cuivre	/	/	0.5
Cadmium	/	/	150 mM/kg (MS)
Fer	/	/	1710 mM/kg (MS)
Chrome (IV)	/	/	200 - 250
Chrome (III)	/	/	18 - 420
Nickel	/	/	30
Zinc	/	/	1

2.6.2.6. Voie de la méthanisation

Le procédé de méthanisation peut être réalisé par voie sèche ou par voie humide

a. La méthanisation par voie sèche : Elle consiste à traiter des déchets à forte teneur en matières solides, généralement entre 20% et 40%. Cette méthode est adaptée aux déchets solides comme les résidus de culture, les déchets verts, ou les déchets ménagers. Les avantages de la méthanisation par voie sèche incluent une moindre consommation d'eau et une meilleure gestion des volumes de digestat, qui est plus facile à manipuler en raison de sa faible teneur en eau. Cependant, la méthanisation par voie sèche peut être plus complexe à mettre en œuvre, nécessitant des systèmes de mélange et d'aération plus sophistiqués pour garantir une dégradation homogène de la matière.

b. La méthanisation par voie humide : Elle traite des déchets avec une teneur en matières solides plus faible, généralement inférieure à 15%. Cette méthode est couramment utilisée pour des substrats liquides ou semi-liquides, tels que les boues d'épuration, les effluents d'élevage, ou les sous-produits de l'industrie agroalimentaire. L'un des principaux avantages de la méthanisation par voie humide est la facilité avec laquelle les déchets peuvent être pompés et mélangés. De plus, la production de biogaz est souvent plus stable et efficace dans ce type de méthanisation. Toutefois, la méthanisation par voie humide nécessite une gestion plus complexe des liquides résiduels et une consommation d'eau plus élevée, ce qui peut représenter un défi environnemental et économique dans certaines situations.

2.6.2.7. Types de digesteurs

Les digesteurs utilisés dans le procédé de méthanisation se déclinent en plusieurs types, chacun étant conçu pour s'adapter à des substrats spécifiques, aux conditions opératoires, et aux objectifs de production. En voici les principaux types:

a. **Les digesteurs pour les déchets liquides et les boues** : Ils sont conçus pour des substrats liquides et pompables. On distingue :

- **Les Digesteurs à cuve unique (CSTR - Continuous Stirred Tank Reactor)** : Ces digesteurs sont les plus courants et consistent en une cuve unique où la matière organique est continuellement agitée pour maintenir une homogénéité du mélange (Figure 2.26)

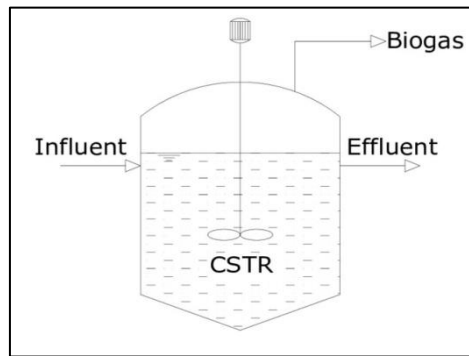


Figure 2.26 : Schéma simplifié d'un CSTR

- **Les digesteurs anaérobies à lits fixes ou fluidisés (Packed or fluidized Bed Anaerobic Bioreactors)** : Dans ces systèmes, le substrat circule à travers un lit de particules (fixes ou fluidisées) qui sert de support aux biofilms de micro-organismes qui offrent une grande surface sur laquelle les microorganismes peuvent s'attacher et former un biofilm. Ce biofilm joue un rôle crucial dans la dégradation de la matière organique présente dans les effluents (Figure 2.27).

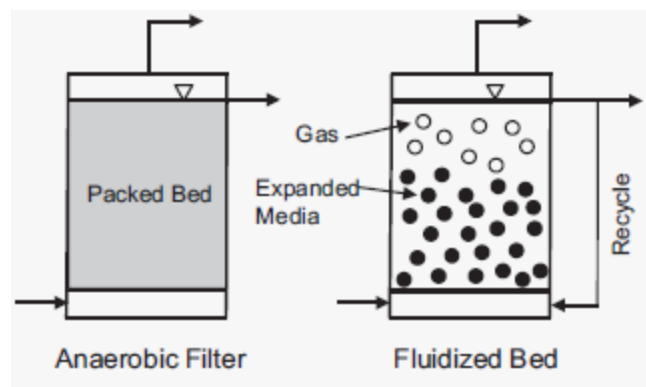


Figure 2.27 : Schémas simplifiés des bioréacteurs à lits fixes et fluidisés

- **Les Digesteurs UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)** : Ce type de digesteur est utilisé principalement pour les effluents liquides à faible concentration de matière organique. Dans un réacteur UASB, les substrats méthanisables passent à travers une couche de boues activées, appelées "sludge blanket", ce qui favorise le contact entre les substrats et les bactéries méthanogènes. Les micro-organismes présents dans la

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

boue convertissent les composés organiques en méthane et en dioxyde de carbone. L'efficacité du réacteur UASB repose sur sa capacité à maintenir une concentration élevée de boues (Figure 2.29a).

- **Les Digesteurs EGSB** (Expanded Granular Sludge Bed) : C'est un type de réacteur similaire au UASB, mais il se distingue par sa capacité à maintenir une suspension et une circulation plus efficaces des boues. Dans un réacteur EGSB, les effluents méthanisables montent à travers une couche de boues granuleuses, ce qui permet une meilleure séparation des solides et des liquides. Ce système favorise une meilleure activité microbienne et un contact plus intensif entre les boues et les substrats, entraînant une dégradation plus efficace des matières organiques (Figure 2.29b).

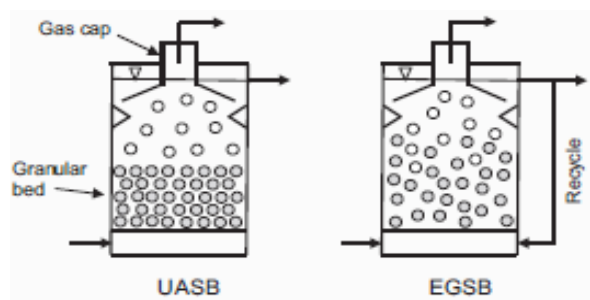


Figure 2.29 : Schémas simplifiés des digesteurs UASB et EGSB

b. Les digesteurs pour les déchets solides : Ils sont essentiellement sous forme de digesteurs en flux piston (plug flow digesters). Dans ce type de digesteur, les boues solides entrent dans le réacteur à une extrémité et se déplacent en ligne droite à travers le réacteur, sans recirculation ou mélange interne. Cette configuration favorise un traitement uniforme des boues, car chaque portion de boue suit le même chemin et le même temps de séjour dans le réacteur (Figure 2.30).

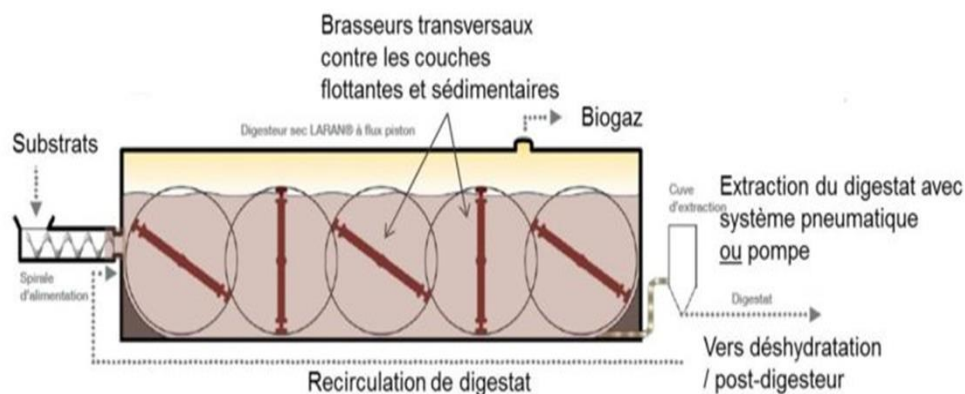


Figure 2.30 : Schéma d'un digesteur en flux piston

2.6.2.8. Production et Traitement du biogaz

La composition du biogaz est similaire à celle des gaz produits dans les décharges, comprenant principalement du méthane (CH_4) et du dioxyde de carbone (CO_2) (cf.2.5.1).

La quantité de CH_4 formé (potentiel méthanogène) dépend de la nature du substrat. Le tableau (2.10) donne quelques indications.

Tableau 2.10 : Potentiel méthanogène de quelques substrats (Akunna, 2018)

Substrats	Potentiel méthanogène (m^3/tonne)
Fumier	
• Fumier de bovin	200 – 400
• Lisier de porc	350 - 550
• Fumier de volaille	350 - 550
Résidus agricoles	
• Maïs	660 - 1000
• Gazon	500 - 750
• Patates	460 - 660
• Betterave sucrière	380 - 600
Autres résidus	
• Industries agroalimentaires	400 - 600
• DMA	400 - 500
• Boues de stations d'épuration	250 - 350

En plus de ces principaux composants, le biogaz contient également des gaz à l'état de trace tels que l'hydrogène sulfuré (H_2S), l'ammoniac (NH_3), et parfois des composés organiques volatils comme les mercaptans et les siloxanes. Ces gaz à l'état de trace, bien que présents en faibles concentrations, peuvent avoir des effets corrosifs et odorants. Par conséquent, la purification du biogaz issu de la méthanisation est cruciale pour en améliorer la qualité et le rendre adéquat pour une utilisation énergétique ou une injection dans le réseau. Pour le traitement de l'hydrogène sulfuré (H_2S), plusieurs techniques peuvent être utilisées. Parmi celles-ci, on trouve la voie sèche, qui utilise des cartouches filtrantes contenant de la limaille de fer ou des copeaux de bois imprégnés d'oxyde de fer hydraté. Le charbon actif, éventuellement enrichi en

iodure de potassium, peut également catalyser la réaction d'oxydoréduction entre l'oxygène de l'air et l'H₂S. Une autre méthode est la désulfuration biologique en voie humide, utilisant des biofiltres contenant des bactéries sulfo-oxydantes pour catalyser l'oxydation de l'H₂S en soufre en présence d'oxygène et de fer.

En plus de l'H₂S et de la vapeur d'eau, il est nécessaire d'éliminer le dioxyde de carbone (CO₂). Pour ce faire, on peut utiliser des réactifs alcalins qui piègent le CO₂ sous forme de carbonates ou d'hydrogénocarbonates, ou des solvants comme la diéthanolamine (HN(CH₂CH₂OH)₂). Dans ce processus, le biogaz comprimé est injecté à la base d'une colonne de traitement, où il circule à contre-courant d'une solution aqueuse alcaline ou d'un solvant, permettant ainsi l'élimination du CO₂.

2.7. Incinération des déchets

2.7.1. Définition et but du procédé

L'incinération est un procédé de traitement thermique par oxydation de la matière organique en présence d'oxygène. Ce processus permet de réduire de manière significative le volume (jusqu'à 90 %) et la masse (plus de 70 %) des déchets ménagers et assimilés. Les déchets sont transformés en gaz, en chaleur, et en résidus solides, tels que les cendres et les mâchefers. L'incinération des déchets a pour but de réduire considérablement le volume des déchets solides tout en minimisant les risques liés à leur stockage prolongé en décharge. Ce processus thermique permet en plus de diminuer le volume des déchets, de récupérer de l'énergie sous forme de chaleur, qui peut être convertie en électricité ou utilisée pour le chauffage urbain. Pour être efficace, l'incinération doit se dérouler à des températures optimales, généralement comprises entre 850 et 1 100°C, permettant de garantir une combustion complète et de réduire les émissions de polluants. À ces températures élevées, les matières organiques se transforment en gaz et en cendres, tandis que les résidus inorganiques sont stabilisés. Une gestion adéquate des émissions et des cendres résiduelles est essentielle pour minimiser les impacts environnementaux et assurer que l'incinération contribue positivement à la gestion des déchets.

2.7.2. Phases de l'incinération

L'incinération des déchets se déroule en plusieurs phases distinctes, chacune jouant un rôle crucial dans la transformation des déchets en produits finis. Voici une description des trois phases principales :

2.7.2.1. Phase de Séchage

Au début du processus d'incinération, les déchets entrants contiennent souvent une certaine quantité d'humidité. La phase de séchage consiste à éliminer cette eau avant que les

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

déchets ne soient entièrement incinérés. Cela se fait en chauffant les déchets à une température suffisante pour évaporer l'humidité, généralement autour de **100 à 150°C**. Cette étape est importante car elle prépare les déchets à une combustion plus efficace en réduisant leur contenu en eau, ce qui améliore le rendement énergétique du processus.

2.7.2.2. Phase de Vaporisation de la Matière Organique

Une fois que les déchets sont secs, la phase suivante est la vaporisation de la matière organique. À ce stade, les températures augmentent considérablement, atteignant entre 500 et 850°C. Pendant cette phase, les composants organiques des déchets (comme les plastiques, les papiers, et les résidus alimentaires) se décomposent et se transforment en gaz volatils, tels que la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, et d'autres composés organiques volatils. Cette transformation est essentielle pour réduire le volume des déchets et libérer de l'énergie.

2.7.2.3. Phase de Gazéification

Dans la phase de gazéification, qui se déroule à des températures encore plus élevées, généralement entre 850 et 1 100°C, les gaz produits lors de la phase de vaporisation sont complètement oxydés. Les températures élevées permettent une combustion complète des gaz, transformant les composés organiques restants en dioxyde de carbone et en vapeur d'eau. Parallèlement, les matières inorganiques qui ne brûlent pas se transforment en cendres résiduelles.

2.7.3. Paramètres de l'incinération

2.7.3.1. Paramètres opératoires

a. Température

La température est un facteur clé, généralement maintenue entre 850 et 1 100 degrés Celsius, afin de garantir une combustion complète des déchets, minimiser les émissions de polluants. Des températures élevées peuvent entraîner la formation de dioxyde d'azote (NO₂), alors que les basses températures favorisent le dégagement de monoxyde de carbone (CO) et des dioxines.

b. Temps de séjour

Le temps de séjour dans un four d'incinération est un paramètre crucial pour assurer une combustion complète des déchets. Il est généralement calculé à l'aide de la formule suivante :

$$t = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

Où :

- t est le temps de séjour (s).
- V est le volume utile du four (m³).

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

- Q est le débit volumique des gaz à travers le four (l'air de combustion et les gaz issus des déchets) (m^3/s).

Ce temps de séjour dans un four d'incinération de déchets dépend du type de four et des conditions d'exploitation, mais un ordre de grandeur couramment utilisé est entre 30 et 60 minutes

C. Volume d'air de combustion nécessaire

Le volume d'air nécessaire à la combustion d'un déchet s'établit en fonction de la composition du déchet exprimée en pourcentage de C, H, S et O par la relation suivante

$$V_a (\text{m}^3/\text{kg}) = 0.089 C + 0.266 H + 0.333 S - 0.333 O$$

D'autres formules empiriques permettent d'approcher le volume d'air comburivore en fonction du potentiel calorifique du déchet suivant cette formule :

$$V_a (\text{Nm}^3/\text{kg}) = \text{PCI}/1000$$

Où

- PCI : Potentiel calorifique inférieur : C'est la quantité de chaleur produite par la combustion totale de l'unité de masse du déchet considéré, lorsque l'eau produite se retrouve à l'état de vapeur. L'unité standard de cette grandeur thermodynamique est le kJ/kg ou thermie/kg, telle que 1 thermie = 4185 kJ.

d. Turbulence

La turbulence dans un four d'incinération de déchets est essentielle pour assurer un mélange adéquat entre les combustibles et l'air comburant. Une turbulence suffisante est nécessaire pour maintenir une bonne homogénéité au sein du four, évitant ainsi la formation de zones froides. Ces zones froides peuvent ralentir les vitesses de combustion et entraîner des déficits en oxygène, ce qui peut conduire à la formation de matières organiques non brûlées. Une turbulence optimale contribue donc à améliorer l'efficacité de la combustion et à minimiser les émissions de polluants.

2.7.3.2. Paramètres du déchet

Pour une incinération optimale, les déchets doivent présenter des caractéristiques spécifiques qui favorisent une combustion efficace et un rendement énergétique maximal.

- **Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) :** Il mesure l'énergie libérée lors de la combustion, doit être suffisamment élevé, pour ne pas recourir à un combustible d'appoint.
- **Teneur en eau des déchets :** Elle doit être aussi faible que possible, préférablement inférieure à 30%, car une forte humidité nécessite plus d'énergie pour l'évaporation, réduisant ainsi l'efficacité globale du processus.

- **Teneur en cendres** : Elle doit être minimisée, de préférence en dessous de 10%, car les cendres résiduelles ne participent pas à la combustion et nécessitent une gestion post-incinération.
- **Teneur en matières combustibles** : Elle doit être généralement supérieure à 60%, pour maximiser la conversion des déchets en énergie.

Ces caractéristiques, lorsqu'elles sont optimisées, permettent non seulement d'améliorer l'efficacité de l'incinération, mais aussi de réduire les impacts environnementaux associés.

2.7.4. Types de four d'incinération

Les déchets nécessitent souvent un prétraitement avant l'incinération. Ce prétraitement inclut l'élimination des éléments incombustibles, comme les matériaux inertes et les métaux, par criblage, séparation magnétique, et extraction des ferrailles. Ces opérations permettent également de valoriser certains composants des déchets. De plus, un ajustement de la taille des particules par déchiquetage, broyage et criblage est souvent nécessaire pour adapter les déchets au procédé thermique utilisé. Enfin, des mélanges peuvent être effectués pour stabiliser la composition des déchets et ajuster leur pouvoir calorifique, éventuellement par déshydratation ou séchage préalable.

Plusieurs technologies sont actuellement disponibles en ce qui concerne les procédés d'incinération des déchets solides : les fours à grilles, les fours tournants et/ou oscillants et les fours à lit fluidisé, dense, rotatif ou circulant.

2.7.4.1. Four à grilles

Dans ce type de four, la combustion des déchets se fait sur une grille mobile, composée de barreaux ou de rouleaux, qui permettent le déplacement et le brassage continu des déchets (Figure 2.31). Les fumées sont extraites en partie haute. La grille, qui peut être inclinée ou horizontale selon les modèles est conçue pour limiter le glissement des déchets. L'épaisseur de la couche de déchets est contrôlée (250-350 kg/m²/h) pour éviter le contact direct de la flamme avec les barreaux.

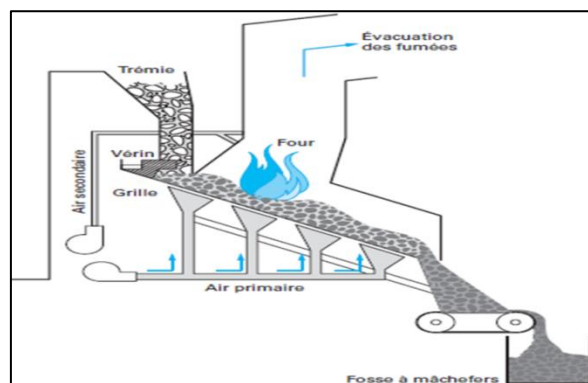


Figure 2.31 : Schéma d'un four à grilles

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

Les fours à grille incinèrent les déchets sur une durée de 45 minutes à 1 heure à une température maximale de 1 100°C. La température est régulée par l'ajout d'air. Les fours, équipés de matériaux réfractaires pour supporter des températures entre 850 et 950°C, ont une capacité de traitement élevée, allant de 5 à 40 tonnes par heure. Ils peuvent traiter une grande variété de déchets, de faible à fort pouvoir calorifique (6-35 MJ/kg).

2.7.4.2. Four tournants et/ou oscillants

Les fours rotatifs ou oscillants sont des enceintes cylindriques, légèrement inclinées et mises en rotation lente (moins de 2 tr/min) pour brasser les déchets (Figure 2.32)

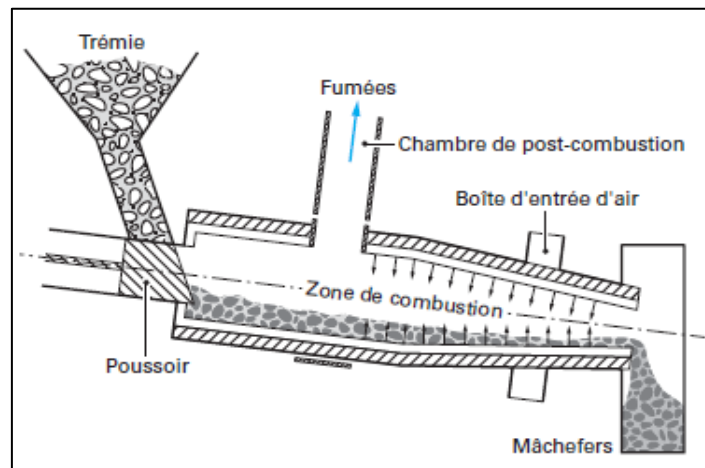


Figure 2.32 : Schéma d'un fou oscillant

Ces fours sont souvent équipés d'une double enveloppe pour préchauffer l'air de combustion, qui est injecté sous les déchets. Les fumées sont extraites et dirigées vers une chambre de postcombustion. Le temps de séjour des déchets dans ces fours varie de 45 minutes à 1h30, selon le type de déchet. Ces fours sont adaptés à divers déchets industriels, avec une capacité de traitement de 2 à 10 t/h.

2.7.4.3. Four à lits fluidisés

Ce type de four est différent des précédents dans la mesure où les déchets sont maintenus en suspension dans un bain de sable agité par l'air injecté en partie basse du lit de particules. On distingue trois types de lits fluidisés :

- **Le lit fluidisé dense (LFD) (Figure 2.33 a) :**

Les fours LFD (Lits Fluidisés Denses) sont des équipements de combustion avec des caractéristiques spécifiques : Le lit fluidisé dense est caractérisé par une interface nette entre le lit et la phase gazeuse, obtenue à des vitesses d'air de 1 à 3 m/s. Après préchauffage, les déchets broyés sont introduits dans le lit, qui se comporte comme un « lit bouillonnant » avec une température uniforme d'environ 850 °C. Le rendement de combustion est élevé (~95 %) avec une température contrôlée et une durée de séjour

des gaz de 1 à 5 secondes, des déchets liquides de 12 à 15 secondes, et des déchets solides de 1 à 2 minutes. Sa capacité est autour de 2 à 30 t/h et adaptée pour des déchets avec des PCI variés, nécessitant une adaptation granulométrique précise (20 à 30 cm).

- **Le lit fluidisé rotatif (LFR) (Figure 2.33 b) :**

Les fours LFR se distinguent des LFD par leur capacité de mélange vertical efficace grâce à une alimentation en air ascendant et une sole de distribution d'air inclinée, créant des vitesses de fluidisation distinctes et une double circulation interne. La température du lit rotatif est maintenue entre 750 et 800 °C. Bien qu'ils soient adaptés aux fonctionnements intermittents, ils rencontrent des problèmes liés aux particules, comme les dépôts et les cendres volumineuses. Leur capacité de traitement varie de 2 à 12 t/h.

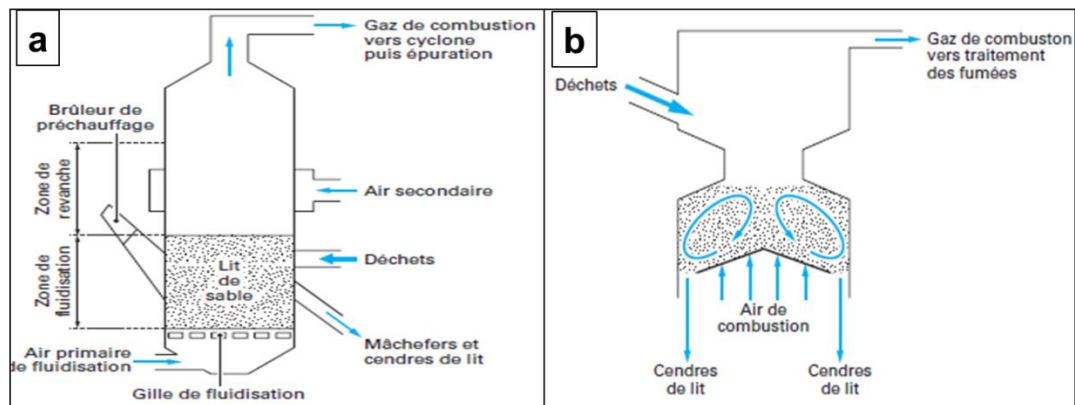


Figure 2.33 : Schéma de fours à lit fluidisé (a) dense ; (b) rotatif.

- **Fours à lit fluidisé circulant (LFC) :** Ils utilisent une technologie similaire à celle des LFD, mais avec des vitesses de fluidisation plus élevées, de l'ordre de 4 à 8 m/s, contre environ 2 m/s pour les LFD. Les LFC offrent un mélange latéral intense, avec des temps de séjour des solides d'une dizaine de minutes. La température de fonctionnement est bien contrôlée (~850 °C) par réglage du débit de recirculation. Cette technologie est principalement adaptée aux unités de capacité supérieure à 15 t/h.

2.7.5. Dispositifs de traitement des fumées

L'incinération des déchets, bien qu'efficace pour la réduction du volume des déchets solides, engendre la production de fumées contenant des particules fines, des métaux lourds, des oxydes d'azote et de soufre, des composés organiques volatils (COV) ainsi que des dioxines et des furanes. Ces composants peuvent avoir des impacts significatifs sur l'environnement et la santé publique. Afin de pallier à ces problèmes, les unités d'incinération d'ordures ménagères modernes sont équipées de dispositifs variés pour traiter les fumées.

2.7.5.1. Dépoussiérage

a. Dépoussiéreurs mécaniques (figure 2.34)

Ces systèmes exploitent les forces d'inertie et gravitaires pour séparer les particules solides des gaz et comprennent principalement les cyclones et les chambres de sédimentation. Les cyclones sont efficaces pour capturer environ 95 % des particules de taille 150-200 μm . Leur performance peut être optimisée en utilisant des multicyclones, qui sont des ensembles de cyclones de plus petit diamètre, permettant d'atteindre une capture de 95 % pour des particules aussi fines que 20-30 μm . Toutefois, ces dispositifs ne sont pas capables de retenir les poussières de diamètre inférieur à 5-10 μm et permettent à une grande partie des métaux lourds, qui se condensent sur les particules fines, de passer à travers.

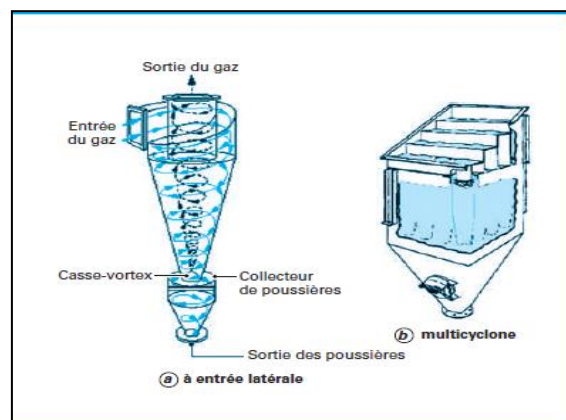


Figure 2.34 : Schéma de dépoussiéreurs cycloniques

b. Dépoussiéreurs humides (figure 2.35)

Ces dispositifs, également connus sous le nom de tour de lavage, utilisent une pulvérisation d'eau avec les fumées chargées, au niveau du col d'un conduit, où les gouttelettes capturent les particules de poussière. Ils sont efficaces à 95 % pour capturer des particules de 3 μm . Cependant, ils ne parviennent pas à capturer les particules sub-microniques. Ces dispositifs sont simples à construire et peuvent traiter des débits allant jusqu'à 200 000 Nm^3/h .

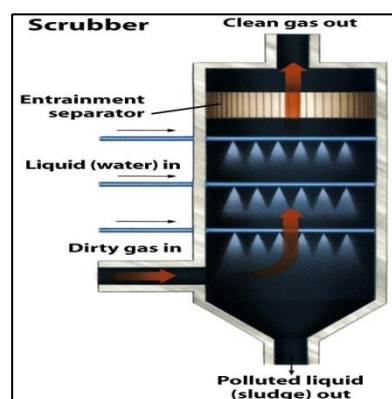


Figure 2.35 : Schéma d'une tour de lavage

c. Dépoussiéreurs à manches (figure 2.36)

Ces dispositifs, également appelés filtres à manches, utilisent un média filtrant en forme de poche (tissu ou fibres) pour séparer les solides des gaz. Le nettoyage des filtres se fait par injection d'air comprimé en contre-courant, permettant ainsi le décolmatage. La température de fonctionnement de ces filtres doit être maintenue entre 125 et 250 °C, selon le type de média filtrant utilisé. Ces filtres offrent une efficacité de captation de 95 % pour des particules de 0,1 μm . Les performances peuvent être encore améliorées en utilisant des cartouches filtrantes en céramique poreuse.

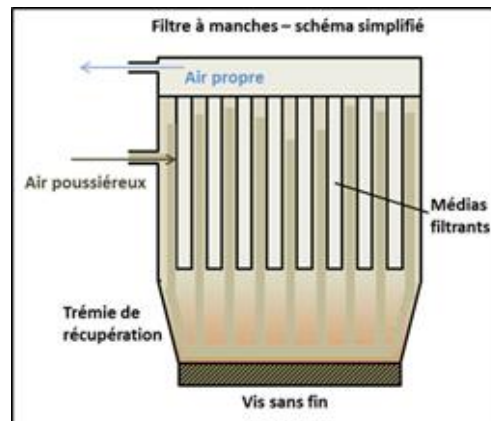


Figure 2.36 : Schéma d'un filtre à manches

d. Dépoussiéreurs électrostatiques

Également appelés électrofiltres, ces dispositifs permettent la séparation des gaz et des solides présents dans les fumées grâce à l'attraction électrostatique des particules. Celles-ci sont d'abord chargées par des électrodes émissives, puis capturées par des électrodes réceptrices sous forme de plaques. Une efficacité de captation de 95 % peut être atteinte pour des particules de 4 μm . Dans certaines configurations, utilisant 3 à 5 champs électrostatiques, les électrofiltres peuvent atteindre des niveaux de performance proches de ceux des filtres à manches.

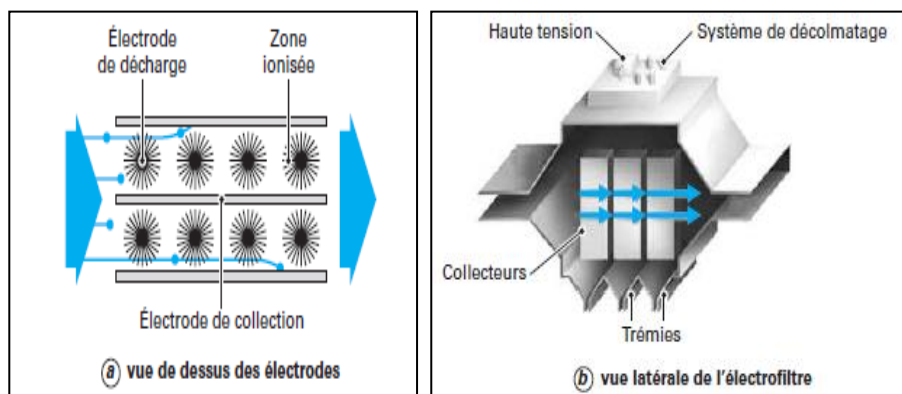


Figure 2.37 : Schéma d'un électrofiltre

2.7.5.2. Neutralisation des fumées

a. L'épuration des fumées par voie sèche

Elle se fait avec un réactif alcalin qui consiste à injecter un agent neutralisant, tel que la chaux ou le bicarbonate de soude, sous forme d'un solide sec dans les fumées, afin de neutraliser les gaz acides comme le SO_2 , le HCl et le HF . Lorsqu'on utilise de la chaux, celle-ci est introduite dans un réacteur en amont d'un système de dépoussiérage. Ce processus permet de capturer à la fois les poussières et les sels calciques formés lors de la réaction entre le sorbant et les gaz acides, ainsi que le réactif en excès. La chaux (Ca(OH)_2), permet de réduire les concentrations de SO_2 de 50-120 ppm à 20-40 ppm, et celles du HCl de 50-120 ppm à 10-30 ppm.

Le procédé sec utilisant un réactif sodique, tel que le bicarbonate de sodium (NaHCO_3), se distingue du procédé à la chaux en ce qu'il ne nécessite pas de réacteur de neutralisation avant le filtre à manches, en raison de sa réactivité élevée. La neutralisation se fait principalement au niveau du filtre, et la température optimale de réaction, comprise entre 150 et 220 °C, ne nécessite pas de refroidissement des fumées.

b. L'épuration des fumées par voie semi-humide

Elle consiste à neutraliser les gaz acides par injection de chaux, préalablement mélangée à de l'eau pour former un lait de chaux, avec une concentration de 30 à 150 g/L, pulvérisé dans le circuit de fumée.

C. Techniques complémentaires

Des techniques spécifiques pour la captation des oxydes d'azote, des dioxines, des furannes, et des composés organiques volatiles (COV) sont progressivement mises en œuvre pour traiter les rejets des installations de traitement thermique des déchets.

- **Le procédé de réduction sélective non catalytique (SNCR) :** Ce procédé vise à réduire les NO_x en injectant un agent réducteur, tel que l'ammoniac ou l'urée, directement dans le four ou à proximité de celui-ci, sans utilisation de catalyseur. Les réactions de réduction des NO_x en azote moléculaire se produisent naturellement entre 850 et 1 100 °C. L'injection de la solution doit se faire à une température proche de 900 °C pour éviter la décomposition du NH_3 et assurer une réduction efficace. Le procédé SNCR permet généralement de réduire les NO_x de 40 à 70 %.
- **Le procédé de réduction sélective catalytique (SCR),** quant à lui, transforme les oxydes d'azote en vapeur d'eau et en azote par l'injection d'ammoniac, qui agit comme agent réducteur en présence d'un catalyseur. La réduction optimale se produit entre 300 et 400 °C. Les catalyseurs utilisés incluent des oxydes comme l'oxyde de

vanadium (V_2O_5), l'oxyde de fer (Fe_2O_3), ou encore des oxydes de chrome (CrO_3). Le procédé SCR offre des performances de dénitrification atteignant 70 à 80 %, permettant de respecter largement les normes de rejet des NOx.

- **Les procédés d'adsorption sur charbon actif et/ou coke de lignite** : Ils exploitent des médias solides poreux, dotés d'une grande surface spécifique interne (500-1000 m^2/g), pour le traitement des fumées après une épuration classique (qu'elle soit sèche, semi-humide). Ces matériaux sont principalement utilisés pour capturer les composés organiques, tels que les dioxines et les furannes, ainsi que pour achever la captation des métaux lourds, notamment du mercure. Les charbons peuvent être injectés dans le flux gazeux en amont du filtre à manches, où ils sont ensuite récupérés, ou utilisés sous forme de lit fixe à des températures comprises entre 100 et 150°C. La consommation spécifique de charbon actif se situe entre 1 et 2 kg par tonne de déchets traités, permettant de réduire les rejets à moins de 0,1 mg/Nm³ pour le mercure et à moins de 0,1 ng/Nm³ en équivalent toxique pour les dioxines.
- **Chambres d'oxydation thermique** : Sont généralement conçues pour l'élimination des COV. Ceux-ci sont généralement détruits par postcombustion à des températures de 700 à 800 °C lors de l'incinération. Dans certains cas, les COV peuvent être récupérés par adsorption sur charbon actif.

2.7.6. Traitement des sous-produits de l'incinération

2.7.6.1. Les résidus d'épuration des fumées

Les résidus finaux issus des procédés de traitement thermique des déchets industriels sont principalement des produits minéraux solides ou des boues résiduelles toxiques. Il est essentiel de les stabiliser afin d'éviter leur lixiviation naturelle, qui pourrait entraîner la libération de polluants, tels que les chlorures et les métaux lourds, dans l'environnement. Un résidu est considéré comme stabilisé, au sens de la réglementation, lorsque sa perméabilité et sa fraction lixiviable ont été réduites, et lorsque sa résistance mécanique a été améliorée.

Les résidus d'épuration des fumées d'incinération de déchets ménagers (REFIOM) et industriels (REFIDI), comprennent :

- les cendres volantes (cendres sous chaudière, cendres sous filtre) ;
- les résidus de neutralisation des fumées ;
- les boues de filtration des eaux de lavage des fumées.

Deux principales techniques de stabilisation sont actuellement disponibles :

- **Stabilisation/solidification** par liants hydrauliques (ou minéraux) : Cette technique utilise différents réactifs, tels que des liants hydrauliques (chaux, ciments), des réactifs

à caractère pouzzolanique (cendres volantes, scories sidérurgiques, laitiers...), des silicates, des argiles, et des adjuvants de formulation. Les résidus à stabiliser sont incorporés par malaxage dans une formulation spécifique de liants minéraux avec lesquels ils réagissent. Ils sont ensuite conditionnés sous forme de blocs solidifiés ou de couches solides, puis disposés en stockage final.

- **Vitrification des résidus solides** : Ce procédé peut être réalisé dans des dispositifs adjoints à l'unité principale de traitement des déchets, placés en aval des traitements de fumées, ou bien dans des unités spécialisées après transport, par regroupement géographique des résidus à traiter. Les procédés de vitrification séparent les plus courants reposent sur la fusion des résidus minéraux à des températures de 1400 à 1800 °C. Cette fusion est réalisée dans des poches chauffées par torche à plasma à arc, ou dans des enceintes haute température chauffées par brûleurs permettant la fusion de la fraction minérale. Les minéraux fondus sont ensuite refroidis par air ou par eau, formant ainsi une matrice vitreuse. Cette matrice peut être dense si les métaux lourds sont majoritairement inclus, ou allégée si les métaux lourds ont été distillés et récupérés auparavant. Ces matériaux, souvent sous forme de granulés, respectent généralement les normes de lixiviation.

Les REFOM et les REFIDI ainsi stabilisés sont ensuite mis en CET de classe 1 pour leur stockage.

2.7.6.2. Les mâchefers

Les mâchefers sont des résidus solides résultant de l'incinération des déchets. Ils comprennent les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) et les mâchefers d'incinération des déchets industriels (MIDI). Ils sont issus des fours d'incinération et sont principalement composés de matériaux minéraux et de métaux. Leur valorisation et traitement dépendent de leur fraction lixiviable, classée en trois catégories :

- **Les mâchefers à faible fraction lixiviable dits « V » (valorisables)** : Ils sont généralement utilisés comme matériaux de construction, notamment dans les travaux publics (sous-couches routières).
- **Les mâchefers intermédiaires dits « M » (maturables)** : Ils nécessitent un prétraitement pour réduire leur lixivibilité, par des procédés comme le lavage, le tri granulométrique, ou l'élimination des métaux lourds par des traitements chimiques avant d'être éliminés en décharge de classe 2.
- **Les mâchefers à forte fraction lixiviable dits « S » (stockable)** : Ils présentent une fraction lixiviable élevée, ce qui nécessite une stabilisation par des techniques telles

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

que la solidification avec des liants hydrauliques (ciment, chaux), ou la vitrification, ce qui permet d'encapsuler les polluants et de réduire leur impact environnemental avant leur mise en décharge de classe 1.

2.8. Le recyclage

2.8.1. Définition

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux qui en sont issus dans le cycle de production d'autres produits équivalents ou différents. Le recyclage permet de réduire les volumes de déchets, et donc leur pollution, et de préserver les ressources naturelles en réutilisant des matières premières déjà extraites.

2.8.2. Importance du recyclage

Le recyclage joue un rôle crucial en tant que :

- **Pilier de l'économie circulaire (Figure 2.38) :** L'économie circulaire est un modèle économique visant à réduire le gaspillage et à maximiser l'utilisation des ressources. Contrairement à l'économie linéaire traditionnelle, qui suit un cycle "produire, consommer, jeter", l'économie circulaire cherche à boucler ce cycle en réutilisant, recyclant, et réparant les produits et matériaux autant que possible. En permettant de réintégrer les matériaux usagés dans le cycle de production, le recyclage permet ainsi de réduire la dépendance aux ressources naturelles.

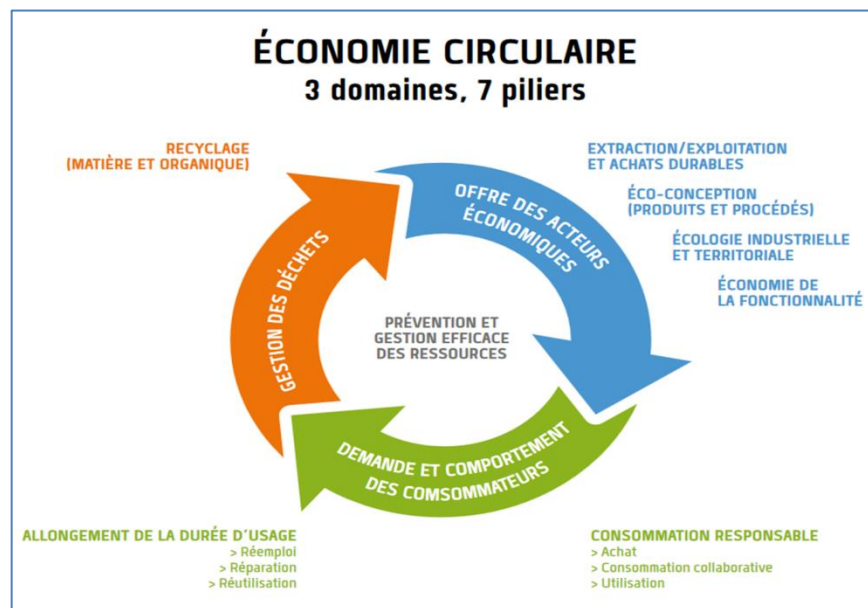


Figure 2.38 : Schéma résumant les domaines et les piliers de l'économie circulaire

- **Pilier de la protection environnementale :** En triant nos déchets, on devient le premier maillon de la chaîne du recyclage, contribuant activement au développement durable. En outre, le processus de recyclage implique l'utilisation de matières premières secondaires issues de déchets et permet ainsi d'éviter toutes les phases d'extraction et de transformation de la matière première naturelle qui sont polluantes et coûteuses en énergie.

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

- **Pilier de la préservation des ressources :** Le recyclage permet de briser la chaîne des ressources transformées en produits qui, en fin de vie, deviennent des déchets qu'il faut éliminer. Une boucle est ainsi créée par l'utilisation de matière première issue de déchets à la place de matière première naturelle. A titre d'exemple, une tonne de plastique recyclée permet d'économiser 800 kilos de pétrole brut.
- **Outil d'amélioration d'image des entreprises :** S'engager dans des pratiques de recyclage améliore leur image en démontrant leur responsabilité sociale et environnementale, ce qui peut renforcer la confiance des consommateurs.
- **Soutien à l'économie locale :** Le recyclage soutient l'économie locale en créant des emplois dans le tri, le traitement et la transformation des matériaux, contribuant ainsi au dynamisme économique des communautés.

2.8.3. Logos du recyclage

Les logos de recyclage (Tableau 2.11), présents sur de nombreux produits et emballages, jouent un rôle essentiel dans la promotion de comportements responsables en matière de gestion des déchets. Ils sont conçus pour guider les consommateurs dans le tri et le recyclage, en indiquant si un produit est recyclable, s'il contient des matériaux recyclés, ou encore comment il doit être correctement éliminé. Comprendre la signification de ces symboles est crucial pour participer activement à la préservation de l'environnement et à l'économie circulaire, en veillant à ce que les matériaux réutilisables soient effectivement recyclés et réintroduits dans le cycle de production. Ces logos contribuent ainsi à sensibiliser le public et à encourager des pratiques de consommation plus durables.

Tableau 2.11 : Logos du recyclage

Logos	Signification
	• Il indique que le producteur ou importateur a payé sa cotisation auprès d'un organisme agréé pour le recyclage du produit.
	• Ce logo, universel, indique depuis 1970 que le matériau est recyclable ou parce qu'il contient des matériaux recyclés (dans ce cas, le pourcentage est indiqué).
	• Le logo de l'APUR (Association des Producteurs et Utilisateurs de papier-cartons Recyclés) garantit un certain taux de fibres cellulosiques de récupération (indiqué en pourcentage).

Chapitre 2 : Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

	Cela indique que le verre est recyclable.
	Cela indique qu'un produit contenant de l'aluminium est recyclable.
	Cela indique que l'acier est recyclable
	Polytéréphtalate d'éthylène (PET) : Recyclé pour fabriquer des bouteilles d'eau minérale, de jus de fruits, de limonade, emballages cosmétiques etc.
	PolyEthylène Haute Densité (HDPE) : Recyclé pour produire des bouteilles de lait, bouchons, flacons pour cosmétiques, équipement de terrains de jeu....
	Polychlorure de Vinyl (PVC) : Recyclé pour faire des tuyaux, des jouets, des flacons...etc
	Polyéthylène basse densité (LDPE) : Recyclé pour faire des sacs poubelles, des barquettes, films alimentaires....
	Polypropylène (PP) : Recyclé pour pièce de voitures, géotextiles, pots de yaourt...
	Polystyrène (PS) : Recyclé pour fabriquer des accessoires de bureau, jouets, panneaux isolants....
	Autres plastiques, polycarbonates, acrylique, nylon : recyclés pour fabriquer des gourdes, des récipients alimentaires, gobelets en plastique...

2.8.4. Déchets recyclables et non recyclables

Bien que le recyclage soit un élément clé de la gestion des déchets et de la protection de l'environnement, il est important de comprendre que tous les déchets ne sont pas recyclables. Certaines matières, en raison de leur composition chimique, de leur niveau de contamination ou de l'absence de technologies appropriées, ne peuvent pas être réintroduites dans le cycle de production. D'autres déchets, même s'ils sont techniquement recyclables, peuvent ne pas être acceptés par les infrastructures locales de recyclage en raison de coûts élevés ou de limitations logistiques. Pour cette raison, il est essentiel de bien connaître les types de déchets qui peuvent être recyclés et ceux qui ne le peuvent pas, afin de maximiser l'efficacité du processus de recyclage et de minimiser l'impact environnemental (Tableau 2.12).

Tableau 2.12 : Les déchets recyclables et non recyclables

Déchets recyclables	Déchets non recyclables
Bouteilles en plastique	Mouchoirs en papier
Boîtes en carton	Couches jetables
Canettes en aluminium	Film plastique
Journaux	Styrofoam (polystyrène)
Bocaux en verre	Vaisselle en céramique
Papiers de bureau	Ampoules électriques
Sacs en plastique	Batteries
Carton ondulé	Capsules de café
Bouteilles en verre	Jouets en plastique
Magazines	Ruban adhésif
	Papier souillé
	Lingettes

2.8.5. Importance du tri sélectif dans la filière de recyclage

Le tri sélectif est une étape essentielle dans le processus de recyclage, car il permet de séparer efficacement les déchets recyclables des déchets non recyclables, assurant ainsi que les matériaux récupérables puissent être réintroduits dans le cycle de production (Figure 2.39).



Figure 2.39 : Bacs de tri sélectif porte à porte

Le tri sélectif porte à porte, où les habitants trient leurs déchets à domicile avant qu'ils ne soient collectés, joue un rôle clé en simplifiant le traitement ultérieur des matériaux recyclables. De plus, l'apport volontaire, où les citoyens déposent leurs déchets recyclables dans des points de collecte spécifiques, renforce l'engagement communautaire et permet de trier plus efficacement des matériaux comme le verre, le papier, et les emballages plastiques. Enfin, l'apport en déchetterie offre une solution pour les déchets volumineux ou spécifiques, tels que les encombrants ou les déchets électroniques, qui nécessitent un traitement particulier. Ce système combiné de tri sélectif optimise la qualité du recyclage, réduit la quantité de déchets envoyés en décharge, et contribue à un meilleur respect de l'environnement.

Conseils de lecture pour ce chapitre

- **AKUNNA, J.C., 2018.** Anaerobic Waste-Wastewater Treatment and Biogas Plants: A practical handbook. CRC Press, 152p.
- **ANTONINI, G., 2005.** Traitements thermiques des déchets - Procédés et technologies associées. Techniques de l'ingénieur.
- **BALET, J.M., 2023.** Gestion des déchets : Les différents types de déchets, les modes de collecte et de gestion, les filières de traitement. Edition Dunod, 368p.
- **BAYARD, R., GOURDON, R., 2022.** Traitement biologiques des déchets. Techniques de l'ingénieur.
- **BILLARD, H., 2001.** Centres de stockage des déchets – Conception. Techniques de l'ingénieur.
- **BILLARD, H., 2001.** Centres de stockage des déchets – Exploitation. Techniques de l'ingénieur.
- **DAMIEN, A., 2016.** Guide du traitement des déchets-Réglementation et choix des procédés. 7^{ème} édition. Edition Dunod, 480p.
- **De GUARDIA, A., 2018.** Compostage et Composts: Avancées scientifiques et techniques. Edition Lavoisier TEC&DOC, 645p.
- **EPSTEIN, E., 2011.** Industrial composting-Environmental Engineering and Facilities Management. CRC Press, 340p.
- **ESCUDE, R., CRESSON, R., 2017.** Méthanisation de la biomasse. Techniques de l'ingénieur.
- **HAUG, R.T., 2019.** Lessons in Environmental Microbiology. CRC Press, 790p.
- **KORRES, N., O'KIELY, P., BENZIE, J.A.H., WEST, J.S., 2013.** Bioenergy Production by Anaerobic Digestion Using Agricultural Biomass and Organic Wastes. CRC Press, 472p.
- **LETCHER, T.M., VALERO, D.A., 2019.** Waste: A handbook for management. Academic Press, Elsevier, 793p.
- **MOLETTA, R., 2015.** La méthanisation. 3^{ème} édition. Edition Lavoisier TEC&DOC, 513p.
- **TCHOBANOGLIOUS, G., KREITH, F., 2002.** Handbook of Solid Waste Management, 2nd Edition. The McGraw-Hill Companies, Inc, 950p.

CHAPITRE 3

Déchets industriels spéciaux

(DIS)

3. Déchets industriels spéciaux (DIS)

3.1. Définition et nomenclature

Un déchet industriel spécial (DIS) ou déchet industriel dangereux (DID) est un déchet qui présente un ou plusieurs des critères de dangerosité pour la santé humaine et l'environnement énumérés en annexe du Décret exécutif N°06-104 du 28 février 2006 du JORADP (cf.1.2.2.1). Ils sont accompagnés d'un astérisque (*) dans la nomenclature codifiée en annexe du même décret (cf.1.4). Ils peuvent être de nature solide, liquide, organique (tels que les solvants, les hydrocarbures, etc.), minérale (comme les acides, les hydroxydes métalliques, etc.) ou gazeuse.

3.2. Types et sources de production

Les déchets dangereux peuvent être générés par diverses activités. Plusieurs termes sont utilisés pour les catégoriser :

- **DDAE (Déchets Dangereux des Activités Économiques)** : Déchets dangereux issus d'activités industrielles et commerciales.
- **DDD (Déchets Dangereux Diffus)** : Déchets dangereux produits en petites quantités par des producteurs variés, dispersés sur le territoire.
- **DDM (Déchets Dangereux des Ménages)** : Déchets dangereux diffus contenus dans les déchets ménagers, tels que les aérosols, colles, détergents, insecticides, peintures, piles, etc.
- **DDS (Déchets Diffus Spécifiques)** : Déchets ménagers provenant de produits chimiques présentant un risque significatif pour la santé et l'environnement.
- **DASRI (Déchets d'Activités de Soins à Risques Infectieux)** : Déchets issus d'activités de soins, présentant un risque infectieux en raison de la présence de micro-organismes viables ou de leurs toxines, susceptibles de provoquer des maladies chez l'homme.
- **DEEE (déchets d'équipement électriques et électroniques)** : Ils contiennent des substances dangereuses : chauffe-eaux électriques, climatiseurs, radiateurs électriques, matériels électriques, panneaux photovoltaïques, ordinateurs, portables....
- **Déchets de construction dangereux** : déchets amiantés, contenant des colles, des peintures dangereuses....

3.3. Stockage

Les déchets dangereux sont admissibles dans les centres de stockage de classe 1, où les conditions d'étanchéité sont les plus strictes (cf.2.5.2). Pour qu'un déchet dangereux soit admissible en CET de classe 1, il doit satisfaire les critères stricts du test de lixiviation, qui évalue la capacité du déchet à libérer des substances toxiques ou polluantes lorsqu'il est exposé à l'eau (Tableau 3.1).

Tableau 3.1 : Valeurs limites des critères d'admission des déchets dans un centre de stockage de déchets dangereux rapportées à la masse sèche de déchet (Barna et Blanc, 2011)

Critères	Valeur limite
pH	Compris entre 4 et 13
Siccité (taux de matière sèche) (%)	> 30
Fraction soluble globale (%)	< 10
COT (mg/kg)	< 1000
Fluorures (mg/kg)	< 500
Chlorures (mg/kg)	< 25 000
Ba (mg/kg)	< 300
Cr (mg/kg)	< 70
Pb (mg/kg)	< 50
Zn (mg/kg)	< 200
Cd (mg/kg)	< 5
Sb (mg/kg)	< 5
Cu (mg/kg)	< 100
Ni (mg/kg)	< 40
As (mg/kg)	< 25
Hg (mg/kg)	< 2
Mo (mg/kg)	< 30
Se (mg/kg)	< 7

Si les concentrations des substances lixiviées sont inférieures aux seuils autorisés, le déchet peut être accepté pour le stockage en CET de classe 1. En revanche, si ces niveaux dépassent les seuils sus-mentionnés, le déchet pourrait nécessiter des traitements

supplémentaires ou être refusé de stockage pour prévenir toute contamination des eaux souterraines et de l'environnement.

3.4. Traitement des déchets dangereux

3.4.1. Traitements physico-chimiques

3.4.1.1. Neutralisation

La neutralisation d'un effluent consiste à ramener son pH (par acidification ou par alcalinisation) à une valeur proche de la neutralité.

- ❖ Pour la **désacidification**, le carbonate de calcium en poudre (CaCO_3), la soude (NaOH), la chaux (Ca(OH)_2), les amines neutralisantes et le carbonate de sodium (Na_2CO_3) sont utilisés.
- ❖ Pour l'**acidification**, on utilise le dioxyde de carbone (CO_2), l'acide sulfurique (H_2SO_4) ou l'acide chlorhydrique (HCl).

3.4.1.2. Précipitation chimique

La précipitation chimique des métaux est un procédé utilisé pour séparer les ions métalliques dissous dans une solution en les transformant en composés solides insolubles, appelés précipités. Ce processus est généralement réalisé en ajoutant un réactif chimique à la solution, appelés précipitants, qui réagissent avec les ions métalliques pour former des hydroxydes métalliques insolubles (Tableau 3.2). Ces précipités peuvent ensuite être facilement séparés de la solution par des techniques de filtration ou de décantation. La précipitation chimique est couramment utilisée dans le traitement des effluents liquides dangereux, car elle permet de réduire la concentration des métaux toxiques dans la solution à des niveaux acceptables pour l'environnement ou pour la réutilisation de l'eau.

Tableau 3.2 : Principaux précipitants chimiques utilisés dans le traitement des effluents liquides dangereux (Laforest et al., 2020)

Précipitant	Réactions
Hydroxyde de sodium (NaOH)	<i>Précipitation des métaux sous forme d'hydroxydes métalliques</i> Me(OH)_n <i>Ex :</i> $\text{Zn}^{2+} + 2 \text{OH}^- \rightarrow \downarrow \text{Zn(OH)}_2$
Chaux éteinte Ca(OH)_2	<i>Précipitation des métaux sous forme :</i> - d'hydroxydes métalliques Me(OH)_n $\text{Zn}^{2+} + 2 \text{OH}^- \rightarrow \downarrow \text{Zn(OH)}_2$ - Sulfates $\text{SO}_4^{2-} + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \downarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - Fluorures

Chapitre 3 : Les déchets industriels spéciaux (DIS)

	$2F^- + Ca^{2+} \rightarrow \downarrow CaF_2$ ▪ Phosphates $2PO_4^{3-} + 3Ca^{2+} \rightarrow \downarrow Ca_3PO_4^2$
• Carbonate de sodium (Na_2CO_3)	<i>Utilisé pour la précipitation du cadmium et du plomb (formation de carbonates métalliques).</i> $CdSO_4 + Na_2CO_3 \rightarrow Na_2SO_4 + \downarrow CdCO_3$
• Carboxylate de sodium (C_x)Na x = 7 à 10	<i>Utilisable pour les métaux di ou trivalents – Formation de carboxylates métalliques</i> $M^{n+} + nC_x^- \rightarrow \downarrow M(C_x)_n$ <i>pH de précipitation en fonction du métal et voisin de 5</i>
• Borohydrure de sodium ($NaBH_4$)	<i>Efficace sur divers ions métalliques notamment le cuivre</i> <i>Ex : $8Cu^{2+} + 2NaBH_4 + 4H_2O \rightarrow 2NaBO_2 + 16H^+ + 8Cu^{2+}$</i>
• Sels ferrique ($FeCl_3$)	<i>Précipitation des phosphates</i> $PO_4^{3-} + Fe^{3+} \rightarrow \downarrow FePO_4$
• sulfure d'hydrogène (H_2S)	<i>Formation de sulfures métalliques</i> $Zn^{2+} + S^{2-} \rightarrow \downarrow ZnS$

3.4.1.3. Oxydoréduction

Le principe d'oxydoréduction, ou réaction redox, joue un rôle clé dans le traitement des effluents dangereux. Ce processus repose sur le transfert d'électrons entre deux substances : l'une étant oxydée (perd des électrons) et l'autre étant réduite (gagne des électrons). Dans le contexte du traitement des effluents, l'oxydoréduction est utilisée pour transformer des contaminants toxiques en formes moins dangereuses ou plus facilement séparables.

Ce procédé repose sur l'utilisation d'oxydants et de réducteurs spécifiques, selon la nature des contaminants à traiter (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Principaux oxydants et réducteurs utilisés dans les procédés d'oxydoréduction des contaminants aqueux.

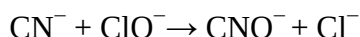
Principaux oxydants	Dérivés oxygénés	O_2	O_3	(H_2O_2)	(H_2SO_5) et $((NH_4)_2S_2O_8)$
	Dérivés chlorés	Cl_2	ClO_2	$NaClO$	NH_mCl_n
Principaux réducteurs	$NaHSO_3$	Fe^{2+}	/	/	/

Les réactions d'oxydoréduction sont très utilisées dans le domaine des déchets liquides aqueux. Parmi ces nombreuses applications, on peut citer :

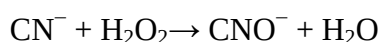
• Oxydation des solutions cyanurées

Les ions cyanure ne peuvent être rejetés dans l'environnement en raison de leur toxicité. Par conséquent, ils doivent subir un traitement visant à les oxyder, d'abord en cyanates, puis, si la réaction est menée à son terme, en dioxyde de carbone et en azote. Cette réaction peut être réalisée à l'aide des réactifs suivants:

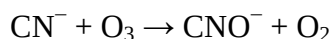
- **Hypochlorite de sodium (eau de Javel)** : C'est l'oxydant le plus couramment utilisé pour oxyder les ions cyanure. Le pH doit être supérieur à 12.



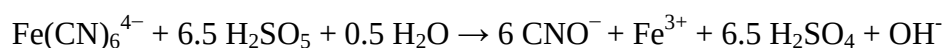
- **Eau oxygénée** : L'eau oxygénée détruit les ions cyanure par oxydation en formant de l'eau. La réaction doit être catalysée par du cuivre.



- **Ozone** : L'oxydation par l'ozone



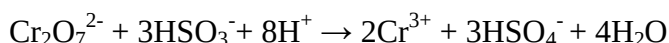
- **Acide monopersulfurique (H_2SO_5)** : Cet oxydant fort est principalement utilisé dans le cas où les ions cyanure sont complexés.



• Réduction du chrome hexavalent (Cr VI)

Le chrome hexavalent, très soluble et hautement toxique pour l'environnement, doit être réduit en chrome trivalent, qui est pratiquement insoluble et moins toxique. Ce procédé peut être utilisé aussi bien pour le traitement des effluents aqueux que pour les sols contaminés riches en Cr(VI).

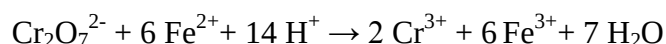
- **Réduction par le bisulfite de sodium**



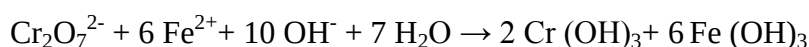
Cette réaction est pratiquement instantanée pour des valeurs de pH inférieures à 2.5. Au-delà de 3.5, la cinétique devient moins favorable. Le Cr(III) est ensuite précipité sous forme d'hydroxyde par augmentation du pH.

- **Réduction par le fer ferreux**

Cette réaction de réduction peut être réalisée à pH acide (> 2,5) :



Ou basique (>8.5):



3.4.1.4. Adsorption

L'adsorption est un processus clé pour éliminer les polluants aqueux dangereux, tels que les métaux lourds, les colorants et les produits chimiques organiques, présents dans l'eau. Ce

Chapitre 3 : Les déchets industriels spéciaux (DIS)

procédé repose sur la capacité d'un matériau adsorbant, souvent des charbons actifs, des zéolites ou des matériaux à base de carbone, à attirer et à retenir ces contaminants à leur surface. L'efficacité de l'adsorption dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature du polluant, la concentration initiale, le pH de la solution, et les propriétés de l'adsorbant, telles que sa surface spécifique et sa porosité. L'adsorption est particulièrement prisée pour sa simplicité, son efficacité et sa capacité à traiter des eaux contaminées de manière sélective et réutilisable, rendant ce procédé essentiel pour la purification de l'eau et la protection de l'environnement.

Les matériaux les plus couramment utilisés pour l'adsorption sont les charbons actifs, une forme microporeuse de carbone offrant une surface spécifique allant de 600 à 2 500 m²/g. Cependant, d'autres composés peuvent également être employés, tels que l'alumine (300 à 400 m²/g), les argiles, les gels de silice ou encore des résines spécifiques (300 à 750 m²/g).

Les charbons actifs sont produits par activation thermique ou chimique d'un charbon obtenu à partir de la carbonisation de divers matériaux tels que la tourbe, la houille bitumineuse, le lignite, le charbon de bois, ou encore la coque de noix de coco. Ces charbons se présentent sous différentes formes (Tableau 3.4).

Tableau 3.4 : Différents types de charbons actifs utilisés dans le traitement des eaux

Forme	Aspect	Utilisation
Poudre	Particules de diamètre compris entre 1 et 100 µm.	Introduit directement dans l'effluent suivi de coagulation-floculation et/ ou d'un système de filtration
Grains	Particules de 0,5 à 10 mm.	Mis en œuvre sous forme de lits parcourus par le fluide à traiter.
Feuille	Fibres tissées.	Limitée à la dépollution des effluents gazeux ou les liquides faiblement pollués avec un minimum de particules.

La régénération du charbon actif consiste à libérer les pores de la surface adsorbante en détruisant ou en éliminant la substance adsorbée. Cette régénération peut être réalisée de manière thermique, chimique, biologique, ou par l'utilisation de solvants. La méthode thermique, la plus couramment employée, combine des étapes de vaporisation et de pyrolyse de la substance adsorbée. Cette activation est effectuée à environ 800°C sous une atmosphère contrôlée, généralement de vapeur d'eau ou de gaz inerte.

3.4.1.5. Solidification et stabilisation

La solidification et la stabilisation des déchets dangereux, désignées aussi sous le terme d'**inertage** sont des procédés essentiels pour réduire la mobilité et la toxicité des contaminants, rendant ces déchets plus sûrs pour l'environnement et la santé humaine.

- **La stabilisation** se réfère à la fixation chimique des polluants, englobant l'ensemble des mécanismes qui transforment les polluants présents dans les résidus en formes stables, peu solubles et difficilement mobilisables par l'environnement.
- **La solidification** quant à elle consiste à transformer les résidus traités, qu'ils soient pulvérulents, pâteux ou granuleux, en une matrice peu poreuse et peu perméable. Cela peut se faire par réaction avec un ou plusieurs réactifs utilisés dans le procédé, ou sans réaction chimique. L'objectif principal de cette technique est de réduire l'interface entre le déchet et le milieu extérieur, limitant ainsi la libération des polluants en solution tant que la structure du matériau reste intacte. De plus, ce procédé améliore les propriétés physiques et mécaniques du déchet, le transformant en un solide massif.

En les liant ainsi à une matrice destinée à les fixer, les déchets peuvent être stockés en CET de classe 1.

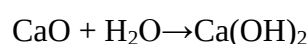
Les techniques de solidification et de stabilisation des déchets ont été initialement développées pour la gestion des déchets nucléaires avant de les étendre à d'autres types de déchets parmi lesquels :

- Résidus d'incinération, tels que les suies et cendres, les résidus d'épuration des fumées provenant de l'incinération (REFIOM et REFIDI) et des déchets, les résidus des eaux de lavage des gaz, ainsi que les mâchefers issus de l'incinération des déchets industriels, de la peinture de l'industrie automobile, et de la distillation dans l'industrie pétrolière, sans oublier les boues organiques industrielles, entre autres.
- Résidus issus de la métallurgie, déchets minéraux provenant de traitements chimiques, résidus de traitement des effluents, déchets ou sols contaminés, etc.

Il existe différentes techniques de stabilisation et/ou de solidification, faisant appel à différents liants ou réactifs.

a. Stabilisation par chaulage

La stabilisation des déchets par chaulage consiste à ajouter de la chaux (CaO) aux déchets préalablement broyés. Lors de ce mélange, la chaux réagit avec l'eau contenue dans le déchet selon la réaction suivante :



Cette réaction entraîne une augmentation du pH, ayant pour conséquence la limitation des nuisances olfactives. Le chaulage améliore les propriétés physiques des déchets, les rendant plus solides et moins perméables, ce qui facilite leur manipulation, leur transport et leur stockage en toute sécurité.

b. Stabilisation à base de liants hydrauliques

Les liants hydrauliques sont des poudres fines composées principalement de silicates et d'aluminates de calcium. Lorsqu'ils entrent en contact avec l'eau, ces matériaux subissent une hydratation, ce qui conduit à la formation de nouveaux composés et à la création d'un matériau solide. Les principaux composants des liants hydrauliques incluent :

- Le silicate tricalcique (C_3S ou $3(CaO)SiO_2$)
- Le silicate bicalcique (C_2S ou $2(CaO)SiO_2$)
- L'aluminate tricalcique (C_3A ou $3(CaO)Al_2O_3$)

Lors de l'hydratation, ces composés produisent deux types principaux de produits qui assurent la solidification :

- Les silicates de calcium hydratés (CSH) issus de la réaction de C_3S et C_2S
- L'ettringite, formée par la réaction du C_3A avec le sulfate de calcium ($CaSO_4$)

Ces produits d'hydratation contribuent également à la rétention chimique des polluants. Ils neutralisent les acides grâce à leur capacité alcaline et peuvent capturer les anions solubles par adsorption sur les CSH ou par complexation avec les phases alumineuses comme le C_3A . De plus, le C_3A peut fixer divers anions tels que les chlorures, chromates et arsénates. Les polluants métalliques sont immobilisés par complexation avec les phases alumineuses, substitution dans les cristaux de CSH ou précipitation sous forme d'hydroxydes et de sels. Les matrices à base de liants hydrauliques peuvent également capturer des polluants organiques par complexation avec les phases alumineuses ou adsorption sur les CSH. La stabilisation par liant hydraulique aboutit à un substrat solide, imperméable et facilement transportable (Figure 3.1).



Figure 3.1 : Schéma de la stabilisation d'un déchet à base de liant hydraulique

Chapitre 3 : Les déchets industriels spéciaux (DIS)

A échelle industrielle, INERTEC est l'une des sociétés développant ce type de techniques et l'un des principaux acteurs dans ce domaine en Europe.

C. Stabilisation à base de bitumes

Les bitumes ont été employés pour l'enrobage de déchets solides faiblement radioactifs. Les déchets ainsi enrobés sont contenus dans des fûts métalliques. Grâce à leur coût relativement bas et à leurs caractéristiques physico-chimiques et mécaniques, les bitumes peuvent également être intéressants pour la solidification d'autres types de déchets solides. Le procédé de solidification implique la dispersion homogène des déchets granulaires dans une matrice de bitume. La viscosité élevée du bitume à température ambiante permet d'obtenir un matériau relativement solide et imperméable, confinant les polluants contenus dans les déchets.

Le bitume est un mélange complexe d'hydrocarbures aliphatiques, naphténiques et aromatiques, obtenu par distillation des pétroles bruts. Il est utilisé pour le confinement des déchets en raison de son faible coût, de sa facilité d'application et de ses propriétés :

- Bon pouvoir agglomérant, car il adhère à la majorité des matériaux ;
- Bonne stabilité physico-chimique face à la plupart des agents chimiques courants ;
- Très faible perméabilité et hydrophobie, permettant un confinement efficace contre l'eau.

3.4.1.6. Injection en puits

L'injection en puits des déchets dangereux est une technique de gestion des déchets qui consiste à introduire ces déchets dans des formations géologiques profondes via des puits forés (Figure 3.2).

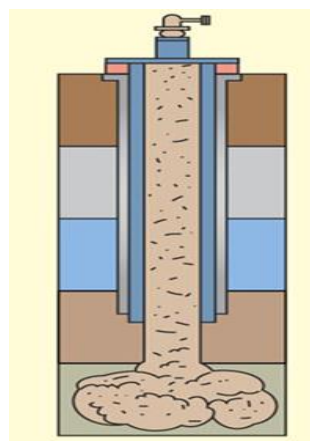


Figure 3.2 : Illustration d'un puits d'injection de déchet dangereux

L'élimination de liquides dans des formations souterraines par le biais de puits d'injection a commencé dans les années 1930 avec l'industrie pétrolière américaine, qui, de manière courante, éliminait les saumures et les boues. Depuis le début des années 1950, les

puits d'injection sont utilisés pour les fluides associés aux installations industrielles. L'injection en puits repose sur le principe que les couches géologiques profondes possèdent des caractéristiques permettant de confiner les contaminants et de les isoler de la surface. Ces formations doivent présenter une faible perméabilité et une capacité d'absorption adéquate, souvent caractérisées par des roches telles que les argiles ou les formations salines. La technique implique la perforation d'un puits jusqu'à une couche géologique appropriée, où les déchets sont injectés sous pression, assurant leur dispersion dans la matrice rocheuse. Bien que cette méthode puisse réduire les risques de contamination de l'environnement et d'exposition humaine, elle soulève également des préoccupations en matière de sécurité, notamment le potentiel de migration des contaminants vers des aquifères. Une surveillance rigoureuse et une évaluation géologique approfondie sont nécessaires pour garantir l'efficacité et la sécurité de cette méthode de gestion des déchets.

3.4.2. Traitements thermiques

3.4.2.1. Incinération

L'incinération des déchets dangereux et l'incinération des ordures ménagères présentent des différences significatives en termes de types de matériaux traités et d'objectifs des procédés. L'incinération des déchets dangereux est spécialement conçue pour traiter des substances contenant des contaminants toxiques tels que des produits chimiques industriels, des solvants, des métaux lourds, des résidus de traitement et des déchets médicaux. Ce procédé requiert des équipements spécialisés capables d'atteindre des températures élevées, souvent supérieures à 1000°C, et de mettre en œuvre des systèmes avancés de contrôle des émissions pour capturer les gaz nocifs et les particules volatiles. Un paramètre crucial de cette incinération est le DRE (Destruction and Removal Efficiency), qui mesure l'efficacité avec laquelle les composés dangereux sont détruits et éliminés du flux de gaz. Pour les déchets dangereux, un DRE minimum de 99,99% est exigé, garantissant que 99,99% des polluants sont détruits ou retirés, assurant ainsi une réduction des risques environnementaux et sanitaires.

3.4.2.2. Pyrolyse

La pyrolyse des déchets, également appelée thermolyse, est un processus thermique qui se déroule à des températures modérées (350-650°C), en absence d'air ou en atmosphère réductrice ($O_2 < 2\%$). Ce procédé décompose la fraction organique des déchets, produisant une phase gazeuse, une phase solide (coke) et une huile pyrolytique (proche du goudron). Les déchets concernés peuvent inclure des matériaux contenant des fractions inertes, tels que les métaux, qui ne sont pas oxydés pendant la pyrolyse et peuvent donc être recyclés. Ce procédé

est également adapté aux matériaux subissant des changements de phase selon la température, comme les plastiques ou les métaux fondants, et aux déchets contenant des éléments volatils comme les sels ou les métaux vaporisables ainsi que les boues biologiques.

Les réacteurs de pyrolyse sont conçus pour être étanches à l'air et maintenus en légère surpression pour éviter les entrées d'air indésirable. Un prétraitement des déchets, tel que le séchage, le criblage ou le broyage, est souvent nécessaire avant leur introduction dans le réacteur, où ils sont généralement compactés pour limiter l'apport d'air. Les fours de pyrolyse sont de taille modérée en raison du volume spécifique relativement faible des gaz produits, de l'ordre de 1 000-1500 Nm³/t de déchet traité contre 5500-7000 Nm³/t en incinération. L'apport d'énergie nécessaire à la pyrolyse peut se faire par chauffage indirect, à l'aide de la chaleur des fumées de combustion, ou par chauffage direct, en utilisant une partie de la charge ou un média inerte chauffé.

Deux principaux modes de pyrolyse existent :

- La pyrolyse lente (ou carbonisation), à température modérée.
- La pyrolyse rapide, à haute température.

En pyrolyse lente, le processus produit principalement du coke, un résidu solide carboné, ainsi qu'un gaz combustible. Le coke peut être valorisé thermiquement après un lavage à l'eau dans une cuve agitée, en utilisant des composés basiques telle que la soude pour éliminer le chlore. Une fois lavé, le coke est considéré comme un combustible secondaire. Il peut alors être transféré vers des installations de valorisation énergétique ou de co-incinération, comme les cimenteries ou les aciéries, où il peut être brûlé ou gazéifié.

En pyrolyse rapide, la production de gaz est plus élevée et le coke est réduit. Ce gaz (composé de H₂, CO, de CO₂, de CH₄ et des hydrocarbures aliphatiques essentiellement) peut être traité pour éliminer les traces de goudrons et être épuré avant d'être utilisé pour alimenter un moteur thermique ou une turbine à gaz, afin de produire de l'électricité.

Enfin, la pyrolyse génère aussi des résidus liquides (huile pyrolytique) dont la composition est proche de celle du pétrole, avec un PCI de 40MJ/kg qui permet d'envisager une valorisation énergétique, notamment dans les cimenteries.

3.4.2.3. Oxydation hydrothermale

L'oxydation hydrothermale en eau supercritique (supercritical water oxidation) est une technique de traitement thermique en milieu aqueux des déchets industriels connue depuis les années 50s. Elle consiste à oxyder la matière organique en phase aqueuse sous pression, en présence d'un oxydant (Air, O₂, H₂O₂) (Figure 3.3).

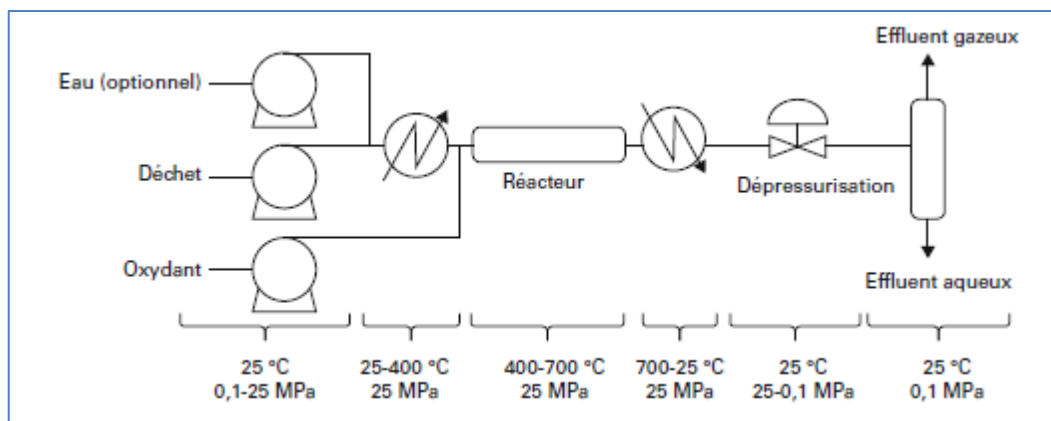


Figure 3.3 : Principe de mise en œuvre de l'oxydation hydrothermale

Elle est dite en eau supercritique car elle est mise en œuvre en milieu aqueux avec des températures et des pressions qui dépassent simultanément les valeurs critiques, c'est-à-dire au-delà de la température critique et de la pression critique. Pour l'eau, ces conditions critiques sont définies par une pression de **221 bars** et **374 °C**. Les propriétés physiques de l'eau supercritique se situent à mi-chemin entre celles de l'eau liquide et celles de la vapeur d'eau. Dans cet état, l'eau n'a ni la densité d'un liquide ni celle d'un gaz, mais possède une densité, une viscosité et une capacité de dissolution qui lui permettent d'agir à la fois comme un solvant puissant et un milieu réactionnel rendant les processus comme l'oxydation hydrothermale extrêmement efficaces pour le traitement des déchets organiques.

Les procédés d'oxydation hydrothermale sont utilisés pour traiter des charges organiques comprises entre 1 et 150 g/L. Lors de ce processus, la majorité des composés organiques sont oxydés: le carbone organique se transforme en dioxyde de carbone, l'hydrogène en eau, les halogènes en halogénures minéraux, les sulfates organiques et minéraux en sulfates, les composés phosphorés en phosphates, et l'azote en ammoniac, nitrate ou azote gazeux. Ce type de procédé est applicable pour des déchets liquides pompables avec un taux de matières sèches compris entre 1 et 15 %, une fraction minérale inerte entre 1 et 40 g/L, et des particules ne dépassant pas 500 µm. Les déchets liquides concernés incluent les effluents aqueux de synthèse chimique, les déchets de lessivage chimique, les liquides huileux, les solvants en phase aqueuse, les résidus de peinture et les boues résiduelles.

En régime supercritique, les temps de séjour dans les réacteurs sont inférieurs à la minute pour une conversion à 99 % de la charge organique totale du déchet. Plusieurs applications de ce procédé ont été développées à l'échelle industrielle, parmi lesquelles on peut citer le procédé MODAR (Figure 3.4)

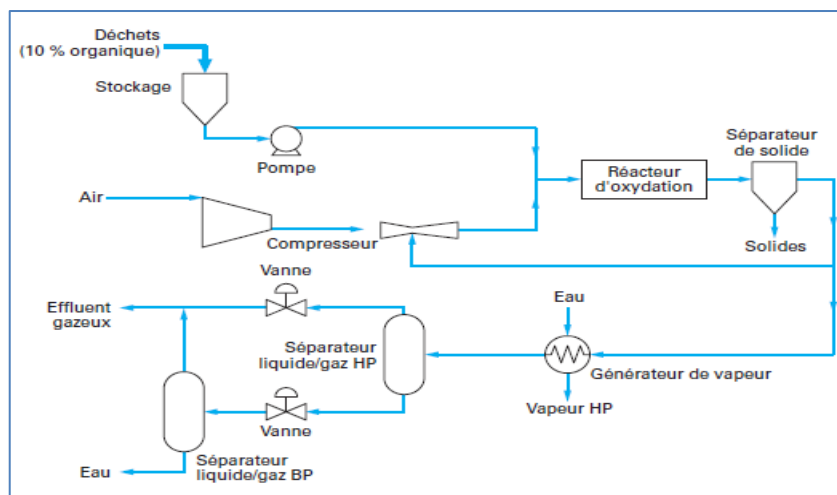


Figure 3.4 : Schéma du procédé MODAR

Les composés organiques traités par ce procédé peuvent atteindre un taux de destruction supérieur à 99,9 %. Ce procédé est efficace pour divers types de composés, tels que les chlorés aliphatiques (comme le tétrachlorure de carbone, le chloroforme, ou le trichloroéthane), les composés chlorés aromatiques ou insaturés (tels que le chlorobenzène et le 2-chlorophénol), ainsi que des huiles de transformateurs et des composés azotés (comme l'ammoniaque ou les cyanures). Les composés soufrés, comme le diméthylsulfoxyde, peuvent également être efficacement traités. De plus, avec un système de pompage haute pression, ce procédé permet de traiter efficacement les boues ou suspensions solide/liquide, où les solides organiques, solubles dans l'eau supercritique, sont aisément oxydables.

3.4.2.4. Vitrification

La vitrification est traitement de stabilisation des déchets qui consiste à chauffer ces derniers jusqu'à leur fusion (entre 1000 et 1600°C). Sous ces températures élevées, les matériaux fondent et se mélangent pour former une masse homogène qui, en refroidissant, se transforme en un verre solide et durable. Ce verre est chimiquement stable, insoluble, et résistant à la dégradation, ce qui le rend idéal pour l'encapsulation de déchets à long terme (Figure 3.5)

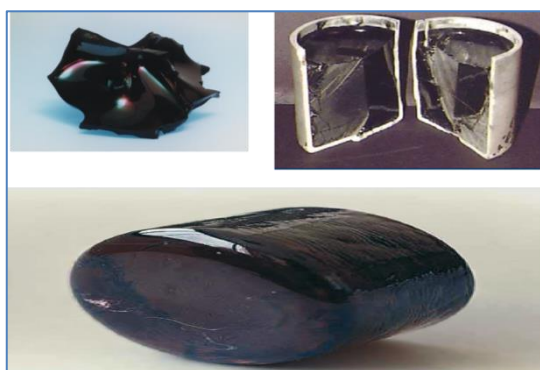


Figure 3.5 : Quelques illustrations de déchets vitrifiés

Chapitre 3 : Les déchets industriels spéciaux (DIS)

Ces procédés ont été développés au départ pour la vitrification des déchets radioactifs avant de voir leur application pour l'inertage des résidus d'incinération, des sols pollués et des déchets d'amiante.

a. Types de four pour vitrification

Il existe plusieurs types de fours utilisés pour atteindre les températures élevées, nécessaires à la fusion des déchets:

- **Four à arc** : Ce type de four utilise un arc électrique pour chauffer le bain et provoquer la fusion des déchets. L'arc est produit par deux électrodes qui génèrent une chaleur intense. Cette technique est surtout utilisée pour la vitrification des REFIOM.
- **Creuset pour fusion par induction** :
 - Dans le cas du chauffage inductif direct, un creuset en alliage métallique inoxydable est utilisé. Ce creuset reçoit l'énergie de chauffage qu'il transmet à la charge par conduction et convection.
- **Four à plasma** : Le plasma est un état de la matière caractérisé par l'ionisation d'une fraction importante des molécules d'un gaz. Un four à plasma utilise ce gaz ionisé, chauffé par un arc électrique entre deux électrodes, pour atteindre des densités énergétiques et des températures extrêmement élevées. Ce type de four est particulièrement efficace grâce à la torche à plasma placée au centre du four (Figure 3.6). Ce type de four est utilisé pour la vitrification des déchets amiantés (Procédé INERTAM).

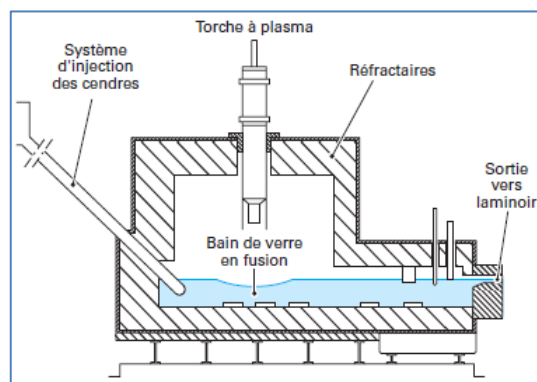


Figure 3.6 : Schéma d'un four de vitrification par torche à plasma

- **Four oxygaz ou oxyfuel** : Les techniques d'oxycombustion sont utilisées pour améliorer l'efficacité des fours. Ces brûleurs utilisent un mélange d'oxygène et de combustible (fuel ou le propane) pour produire une flamme à haute température, ce qui permet une économie de combustible et accélère la montée en température des matériaux à détruire.

Chapitre 3 : Les déchets industriels spéciaux (DIS)

La vitrification présente un avantage majeur par rapport à d'autres techniques, grâce à la nature des matériaux solidifiés obtenus. Cependant, la mise en œuvre de la vitrification rencontre des défis techniques et économiques. La composition du mélange à vitrifier doit répondre à des exigences strictes pour avoir des vitrifiats de haute qualité. Les déchets doivent contenir une quantité suffisante d'oxydes formateurs tels que SiO_2 , Al_2O_3 , et Na_2O , ainsi que des agents stabilisants comme CaO , MgO , ou Na_2SO_4 . Ces composants confèrent au verre ses propriétés physiques, mécaniques, et sa durabilité. Des prétraitements, comme le lavage pour éliminer les anions incompatibles avec le réseau d'oxydes (F, Cl, I, S...), ou des ajouts spécifiques, peuvent être nécessaires pour obtenir un mélange vitrifiable. De plus, la présence de fractions volatiles aux températures de fusion nécessite un traitement des gaz et des fumées, ce qui peut engendrer des coûts supplémentaires et entraîner un transfert de la pollution contenue dans le déchet.

b. Stockage des vitrifiats

Le stockage des vitrifiats dans un Centre d'Enfouissement Technique (CET) de classe 1, réservé aux déchets dangereux, constitue une solution sécurisée pour la gestion à long terme de ces matériaux (figure 3.7).



Figure 3.7 : Stockage des vitrifiats dans un CET de classe 1

Conseils de lecture pour ce chapitre

- **ANTONINI, G., 2005.** Traitements thermiques des déchets - Procédés et technologies associées. Techniques de l'ingénieur.
- **BALET, J.M., 2023.** Gestion des déchets : Les différents types de déchets, les modes de collecte et de gestion, les filières de traitement. Edition Dunod, 368p.
- **BARNA, R., BLANC, D., 2011.** Stabilisation-Solidification des déchets. Techniques de l'ingénieur.
- **BOUCHELAGHEM, A., MAGNIÉ, M.C., 2010.** Inertage et mise en forme des déchets industriels. Techniques de l'ingénieur.
- **DAMIEN, A., 2016.** Guide du traitement des déchets-Réglementation et choix des procédés. 7^{ème} édition. Edition Dunod, 480p.
- **LAFOREST, V., BOURGOIS, J., HAUSLER, R., 2020.** Traitements chimiques et physico-chimiques des rejets industriels dangereux liquides. Techniques de l'ingénieur
- **LETCHER, T.M., VALERO, D.A., 2019.** Waste: A handbook for management. Academic Press, Elsevier, 793p.
- **TURC, H.A., LEYBROS, A., 2023.** Oxydation hydrothermale de déchets organiques liquides. Techniques de l'ingénieur.
- **VALLERO, D.A., PEIRCE, J.J., 2003.** Engineering the Risks of Hazardous Wastes, Edition Elsevier, 306p.
- **WANG, L.K., SHAMMAS, N.K., HUNG, Y.T., 2009.** Advances in Hazardous Industrial Waste Treatment, CRC Press, 580p.

Chapitre 4

Déchets de Soins à Risque Infectieux

(DASRI)

4. Déchets d'activité de soins à risques infectieux (DASRI)

4.1. Définition et sources

Les DASRI sont des déchets générés lors des activités de soins, de diagnostics, de suivi et de prévention médicale ou vétérinaire, qui présentent un risque infectieux pour la santé humaine ou animale. Ils incluent également les déchets anatomiques humains, les objets piquants, coupants ou tranchants, ainsi que certains déchets assimilés en raison de leur nature ou de leur origine. Ils proviennent principalement de divers lieux où sont réalisés des soins médicaux et vétérinaires. Les principales sources de production des DASRI incluent les hôpitaux, les cliniques, les centres de santé, et les cabinets médicaux ou dentaires. Ces déchets proviennent également des laboratoires de recherche biomédicale, où des manipulations de produits biologiques ou des expérimentations sur animaux peuvent produire des matériaux potentiellement contaminés. En outre, les soins à domicile pour les patients atteints de maladies chroniques ou nécessitant des soins réguliers, tels que les diabétiques utilisant des seringues, sont également une source significative de DASRI. Les centres de soins vétérinaires et les établissements de soins pour animaux génèrent également des DASRI similaires. Ils sont classés comme déchets dangereux sous la nomenclature suivante dans le JORADP **18 01 03***. Par conséquent, ces déchets doivent être collectés, stockés, transportés et éliminés selon des procédures strictes pour éviter tout risque de contamination.

4.2. Types de DASRI

Les DASRI comprennent plusieurs types de déchets:

4.2.1. Déchets piquants, coupants ou tranchants (PCT)

Ce type inclut les aiguilles, seringues, scalpels, bistouris, lames, et autres objets susceptibles de provoquer des coupures ou des piqûres. Ces déchets présentent un risque de blessure et de transmission d'agents pathogènes.

4.2.2. Déchets contaminés ou potentiellement contaminés

Ces déchets comprennent les compresses, pansements, gants, cotons, et tout autre matériel ayant été en contact avec du sang, des sécrétions, ou des excréments de patients. Ils sont considérés comme contaminés ou potentiellement contaminés par des agents infectieux.

4.2.3. Déchets infectieux et hautement infectieux

Ce type de déchets comprend tout matériel ou substance qui peut contenir des agents pathogènes susceptibles de provoquer des infections. Cela inclut les résidus de cultures microbiologiques des laboratoires, les tissus ou fluides corporels infectés, ainsi que les produits ayant été en contact avec des patients présentant des maladies contagieuses.

4.2.4. Déchets anatomiques humains

Il s'agit de parties du corps humain, de tissus, d'organes, ou de prélèvements chirurgicaux qui sont éliminés après une intervention médicale.

4.2.5. Déchets assimilés aux DASRI

Ce sont des déchets qui, bien que n'étant pas strictement DASRI, sont gérés comme tels en raison de leur similitude en termes de risque. Il peut s'agir de certains déchets issus de soins vétérinaires ou de recherche.

4.3. Législation

La politique nationale de gestion des déchets s'inscrit dans le Plan national d'actions environnementales et du développement durable (PNAE-DD) qui s'est concrétisée par la promulgation de la **loi 01-19 du 12 décembre 2001** relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, et consolidée dans la **loi n° 03-10 du 19 juillet 2003** relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.

- **La loi 01-19 du 12 décembre 2001** qui a fixé les principes devant régir la gestion des déchets à travers le pays a défini les déchets d'activités de soins (DASRI) comme faisant partie de la classe des déchets dits spéciaux.
- **Le décret exécutif n° 03-478 du 09 décembre 2003** définissant les modalités de gestion des déchets d'activités de soins.
- **Le décret exécutif n° 06-104 du 28 février 2006** a fixé la nomenclature des déchets spéciaux, comprenant les déchets spéciaux dangereux, lesquels incluent les déchets d'activités de soins à risque infectieux (DASRI).
- **L'arrêté interministériel du 04 avril 2011** fixe les modalités de traitement des déchets anatomiques humains
- **Instruction ministérielle n°04 MSPRH/MIN du 12 mai 2013** Cette instruction Précise la définition des différents types des déchets d'activités de soins ainsi que les générateurs de DAS.

4.3. Gestion des DASRI

Le parcours d'un DASRI commence dès sa production, généralement dans des établissements de santé, laboratoires de recherche, ou chez les personnes à domicile. La figure 4.1 illustre les principales étapes de ce parcours.

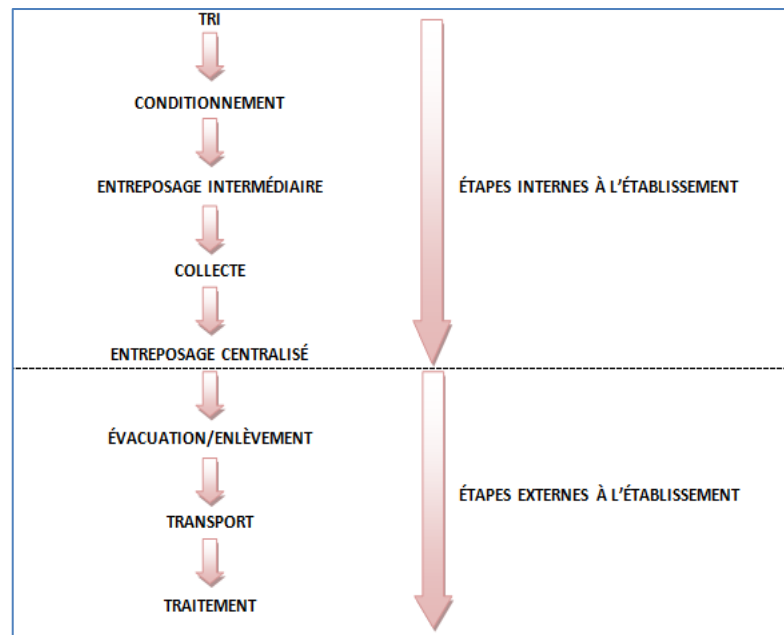


Figure 4.1 : Principales étapes de la gestion des DASRI

4.3.1. Tri

Le tri à la source consiste à instaurer un système de séparation des déchets selon leur type directement sur le lieu de production, au moment où les soins sont effectués. Cette démarche permet de diriger chaque catégorie de déchets vers la filière d'élimination adéquate, en utilisant un conditionnement spécifique. Elle assure la sécurité des personnes et la gestion des risques tout en respectant les normes d'hygiène. De plus, ce tri contribue à la réduction des coûts liés à l'élimination des DASRI.

Cette étape requiert une identification précise des différentes catégories de déchets. Elle doit respecter les principes suivants : séparer les déchets en fonction du type de risque (infectieux, chimique et/ou toxique, radioactif, etc.) en utilisant un conditionnement adapté aux caractéristiques physiques du déchet (objets perforants, solides, mous, liquides). Un code couleur correspondant à chaque typologie de déchet doit être appliqué et maintenu tout au long de la gestion du déchet, comme suit :

- Déchets ménagers et assimilés (couleur noire)
- Déchets d'activités de soins à risque infectieux (couleur jaune)
- Déchets à risque chimique et toxique (couleur rouge)
- Déchets anatomiques (couleur verte)
- Déchets à risque radioactif (couleur blanche).

4.3.2. Conditionnement et étiquetage

Pour assurer la sécurité des personnes exposées, notamment le personnel soignant, et les acteurs de la gestion, les DASRI sont conditionnés dans des conteneurs adaptés à leur nature physique (Tableau 4.1). Ces contenants sont ensuite étiquetés avec des informations précises concernant le type de déchet, la date de production, et l'établissement d'origine, la destination finale du déchet ainsi que le pictogramme associé au DASRI. Le conditionnement des DASRI doit être à usage unique. Le volume du conditionnement doit être adapté à la quantité de déchets produits, avec une limite de remplissage ne devant pas dépasser les deux tiers (2/3) de sa capacité. Les sacs utilisés doivent avoir des soudures latérales et un fond sans soudure, et être fermés par un nœud à l'aide d'une cordelette en plastique. Les conditionnements pour PCT doivent être rigides et équipés d'un système de fermeture intermédiaire et définitive.

Tableau 4.1 : Les différents conditionnements des DASRI en fonction de leurs types

Types de conditionnement	Types de DASRI à conditionner			Illustration	Pictogramme DASRI
	Perforant	Solide ou mou	Liquide		
Sacs en plastiques ou en papier doublés intérieurement en matière plastique		X			
Caisses en carton avec sac intérieur		X			
Fûts ou jerricans en plastique	X	X			
Mini collecteurs et boîtes pour PCT	H				
Fûts et jerricans pour déchets liquides			X		

4.3.3. Collecte

Le déplacement des déchets de leurs lieux de production jusqu'au lieu de stockage intermédiaire doit se faire en respectant des règles strictes. Il est impératif de ne jamais traîner les sacs ou autres moyens de conditionnement directement sur le sol. Un programme de collecte quotidien et un circuit spécifique doivent être établis pour chaque service ou unité. Les déchets doivent être collectés régulièrement, au moins une fois par jour, et rapidement transportés vers le local d'entreposage intermédiaire. Il est crucial de séparer la collecte des déchets dangereux de celle des déchets non dangereux. Les sacs ne doivent jamais être tassés, vidés, ou transvasés. Ils doivent être manipulés par le haut, avec des gants de protection. Après l'évacuation, les conditionnements doivent être immédiatement remplacés.

4.3.4. Stockage

Les établissements de santé doivent être équipés de locaux centralisés pour l'entreposage des DASRI avant leur évacuation pour traitement. Chaque service et unité de soins devrait également disposer, lorsque cela est possible, de lieux d'entreposage intermédiaire. La capacité de stockage et la fréquence d'évacuation des DASRI doivent être adaptées à la quantité de déchets produits. Les déchets cytotoxiques, pharmaceutiques (hors cytotoxiques), chimiques et toxiques, ainsi que les déchets radioactifs, doivent être stockés séparément des DASRI et des déchets anatomiques. Les locaux doivent être réservés exclusivement à l'entreposage des déchets d'activités de soins, ventilés, éclairés, protégés des intempéries et de la chaleur, et équipés d'un système d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées. Ils doivent être nettoyés après chaque enlèvement et désinfectés périodiquement. Ces espaces doivent être fermés et sécurisés pour empêcher l'accès à toute personne non autorisée.

La durée de stockage des DASRI dépend directement de la quantité de déchets produits par l'établissement. Pour les établissements générant une quantité inférieure à 5 kg par mois, la durée maximale de stockage peut atteindre **1 mois**. En revanche, pour ceux produisant entre 15 kg/mois et 100 kg par semaine, la durée de stockage est limitée à **7 jours**. Enfin, pour les établissements produisant plus de 100 kg de DASRI par semaine, les déchets doivent être évacués dans un délai maximum **72 heures**.

La durée de stockage des DASRI varie aussi en fonction des conditions climatiques. Dans un climat tempéré, les déchets peuvent être stockés jusqu'à 72 heures en hiver et 48 heures en été. En revanche, dans un climat chaud, où les températures sont plus élevées, le stockage des DASRI doit être limité à 48 heures durant la saison fraîche et à 24 heures durant

la saison chaude. Ces ajustements sont nécessaires pour éviter la dégradation rapide des déchets et pour maintenir des conditions de stockage sécurisées et hygiéniques.

4.3.5. Transport

Le transport des DASRI doit respecter des normes de sécurité rigoureuses adaptées à la nature des déchets. Ce transport doit être réalisé à l'aide de camions spécialement conçus pour cet usage. Ces véhicules doivent présenter des parois pleines et lisses, être étanches et équipés de couvercles, tout en respectant le code couleur et le pictogramme de danger correspondant. Ils doivent également être lavés et désinfectés systématiquement après chaque utilisation. Les déchets de types différents doivent être transportés séparément. Lorsqu'ils sont transportés sur la voie publique, les déchets doivent être acheminés par des opérateurs agréés par le Ministère de l'Environnement et des Énergies Renouvelables, conformément à la réglementation en vigueur.

4.3.6. Traitement

Le traitement et l'élimination des Déchets d'Activités de Soins à Risques Infectieux (DASRI) dépendent de leur typologie spécifique. Trois modes de traitement principaux sont utilisés :

- **L'incinération** : Cette méthode consiste à brûler les DASRI à haute température, assurant une destruction efficace des agents pathogènes et des substances toxiques tout en réduisant le volume des déchets.
- **Le prétraitement par désinfection (banalisation)** : Cette technique, également connue sous le nom de banalisation, implique l'utilisation de procédés de désinfection, par autoclavage, par microonde ou par désinfection chimique. Cette banalisation a pour objectif de neutraliser les risques biologiques des déchets avant leur élimination ultérieure.
- **L'enfouissement** : Les DASRI peuvent également être enfouis dans des CET.

4.3.6.1. Incinération

L'incinération des DASRI est une méthode de traitement efficace pour détruire ces déchets tout en minimisant les risques pour la santé publique et l'environnement. Ce processus thermique implique la combustion des déchets à des températures élevées, généralement comprises entre 800 et 1 200°C, dans des fours spécialement conçus pour cette tâche. L'incinération permet une destruction quasi complète des agents pathogènes et des substances toxiques, transformant les déchets en cendres, gaz et chaleur. Les installations d'incinération de DASRI doivent être équipées de systèmes de contrôle avancés pour filtrer les émissions et traiter les gaz résiduels afin de réduire les impacts environnementaux.

Depuis 2013 en Algérie, l'incinération sur site des DASRI a été abandonnée. Les incinérateurs installés avant cette date peuvent encore être utilisés à condition qu'ils ne présentent aucune nuisance ni gêne pour le voisinage. Cependant, aucun nouvel incinérateur ne peut être installé en milieu hospitalier, et ceux en place ne doivent pas être remplacés. Par ailleurs, les établissements de santé peuvent conclure des conventions avec des centres d'incinération agréés.

4.3.6.2. Banalisation

a. Désinfection chimique

La désinfection chimique des DASRI est une méthode utilisée pour neutraliser les risques biologiques avant leur élimination finale. Parmi les agents chimiques couramment utilisés, l'hypochlorite de sodium (NaClO) est efficace pour détruire les micro-organismes grâce à ses propriétés oxydantes puissantes ou encore l'acide paracétique ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_3$). Avant la désinfection chimique, les DASRI peuvent être broyés pour réduire leur volume et faciliter le contact des agents désinfectants avec l'ensemble du déchet. Le broyage permet également de transformer les déchets en particules plus petites, augmentant ainsi l'efficacité des traitements ultérieurs en assurant une meilleure homogénéité du mélange.

b. Stérilisation par autoclavage

La stérilisation par autoclave est une méthode efficace pour détruire les agents pathogènes présents dans les DASRI. Cette technique repose sur l'utilisation de vapeur sous haute pression à des températures élevées, généralement autour de 121 à 134°C et 5 bars de pression pendant 60 minutes. La figure 4.2 illustre un modèle d'autoclave utilisé dans les établissements hospitaliers.

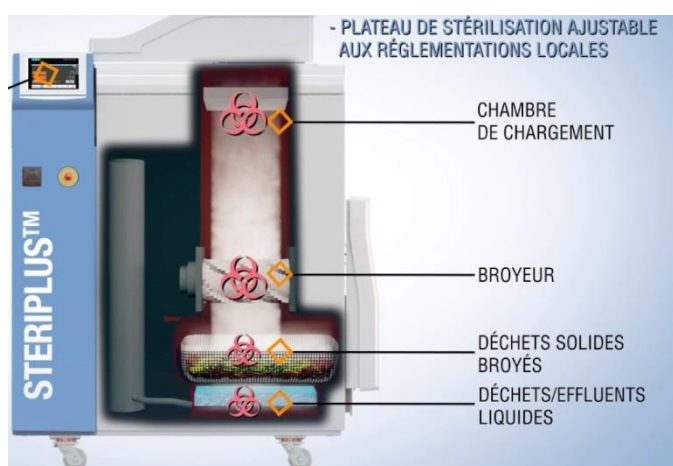


Figure 4.2 : Autoclave pour stérilisation humide des DASRI

La capacité d'autoclavage de ces modèles est de l'ordre de 240 à 300 kg/heure selon la densité des déchets. Les DASRI broyés et autoclavés sont généralement enfouis en décharge.

C. Stérilisation par microonde

La désinfection des DASRI par micro-ondes est une méthode innovante qui utilise des ondes électromagnétiques pour traiter les déchets infectieux. Cette technologie repose sur le principe de l'absorption des micro-ondes par les matériaux organiques des déchets, générant une chaleur interne suffisante pour détruire les agents pathogènes. Lors du processus, les déchets sont exposés à des micro-ondes à haute fréquence dans un équipement spécifique, ce qui provoque un échauffement rapide des particules d'eau contenues dans les déchets. Cette chaleur intense détruit efficacement les bactéries, virus, et autres microorganismes, tout en réduisant la quantité de déchets à gérer. La désinfection par micro-ondes présente l'avantage de ne pas nécessiter de produits chimiques, ce qui minimise les risques environnementaux et améliore la sécurité du processus. Un modèle d'appareil utilisé dans les hôpitaux est présenté dans la figure 4.3.



Figure 4.3 : Modèle d'appareil à microonde utilisé pour stériliser les DASRI

4.3.6.3. Enfouissement

L'enfouissement des DASRI, y compris les déchets anatomiques, est une méthode de gestion qui consiste à enterrer ces déchets dans des CET. Les déchets anatomiques, tels que les parties du corps humain et les tissus biologiques, sont souvent prétraités avant l'enfouissement (chaulage essentiellement) pour garantir leur innocuité. L'enfouissement doit se faire selon des normes strictes pour éviter toute contamination du sol et des nappes phréatiques.

Conseils de lecture pour ce chapitre

- **AGENCE NATIONALE DES DECHETS, 2019.** Gestion des déchets d'activités de soins, guide national.
- **DAMIEN, A., 2016.** Guide du traitement des déchets-Réglementation et choix des procédés. 7^{ème} édition. Edition Dunod, 480p.
- **LETCHER, T.M., VALERO, D.A., 2019.** Waste: A handbook for management. Academic Press, Elsevier, 793p.
- **REINHARDT, P.A., 1991.** Infectious and Medical Waste Management. CRC Press, 294p.
- **VALLERO, D.A., PEIRCE, J.J., 2003.** Engineering the Risks of Hazardous Wastes, Edition Elsevier, 306p.
- **WANG, L.K., SHAMMAS, N.K., HUNG, Y.T., 2009.** Advances in Hazardous Industrial Waste Treatment, CRC Press, 580p.
- **WINDFELD, E. S., BROOKS, M. S.-L., 2015.** Medical waste management – a review. Journal of Environmental Management 163, 98–108.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.013>.