



Université des Sciences et de la Technologie d'Oran « Mohamed Boudiaf »

Faculté de Chimie – Département de Génie Chimique



« Les bases de traitement des déchets solides »

> Polycopié de Cours >

Conçu et réalisé par :

Dr. BENNAMA Tahar

*A l'usage des étudiants de Master & Licence
en Génie des Procédés, Génie de l'Environnement
et Chimie de l'Environnement*

Janvier 2016

Avant-propos

Le monde des déchets, complexe et souvent méconnu, est depuis quelques années un domaine en pleine expansion. Le traitement des déchets continuera d'évoluer, ainsi que sa réglementation, au fil de l'amélioration des connaissances.

Créer un enseignement dans le domaine des déchets solides est quelque chose de nouveau qui est la conséquence de notre mode de vie.

Ce support de cours, à caractère pédagogique et didactique, sur les bases de traitement des déchets solides s'adresse aux étudiants des filières de génie des procédés, génie de l'environnement, chimie de l'environnement et diverses spécialités liées à l'environnement. C'est l'expérience de plusieurs années d'enseignement de cette discipline « Déchets solides » dans le système universitaire classique (magister et ingéniorat) et le nouveau système LMD (Master 2 et Licence 3).

Dans ce support, le thème des déchets est abordé de manière simple avec une vision globale en partant de création des déchets jusqu'à leur traitement en filières adaptées, en passant par les collectes et différentes installations liées à ces déchets. Technique et largement illustré, ce support de cours apporte à l'étudiant toutes informations scientifiques et techniques utiles et immédiatement utilisables pour pouvoir maîtriser et développer les différentes méthodes et techniques de traitement des déchets solides.

Dans un enchaînement logique, le lecteur est ainsi amené à mieux comprendre ce qu'est un déchet, son cycle de vie, ses sources de production, son environnement, sa classification, ses propriétés, les procédés de traitement et de sa transformation et son impact sur la santé humaine et sur l'environnement.

Le contenu de ce support de cours n'est certainement pas parfait et devra être amélioré dans le futur car des changements permanents se produisent dans ce domaine.

« Désormais, les déchets de toute phase et de toute origine, objets obsolètes, résidus boueux ou polluants infimes, de nature urbaine, industrielle, agricole ou minière, ne seront plus tenus secrets, tabous, parias, mais réinsérés dans l'écosystème industriel moderne » (d'après Michel MAES dans son ouvrage "Options déchets").

Table des matières

Avant-propos	i
Table des matières	ii

Chapitre I : Définitions et notions de base sur les déchets

1.1 Étymologie du concept déchet	1
1.2 Synonymes	1
1.2.1. Exemples de sous-produits.....	1
1.3. Définitions du concept déchet	2
a. Concept littéraire	2
b. Concept environnemental.....	2
c. Concept économique	2
d. Concept juridique	2
1.4. Origine de la production des déchets	3
a. Biologique	3
b. Chimique	3
c. Technologique	3
d. Économique.....	3
e. Écologique.....	3
f. Accidentelle	3
1.5. Rudologie ou science des déchets	4
1.6. Cycle de vie d'un déchet	4
1.6.1. Qu'est ce qu'un déchet ultime ?	5
1.6.2. Procédé d'inertage d'un déchet ultime	5
1.6.3. Classification générale des procédés d'inertage.....	6
1.7. Classification des déchets solides	6
1.7.1 Classification en fonction de l'origine du déchet	6
1.7.2 Classification en fonction de la nature du danger	7
1.8. Caractéristiques analytiques des déchets.....	7
1.9. Nomenclature des déchets	9
1.9.1. A quoi sert la nomenclature des déchets ?	9
1.9.2. A qui est destinée la nomenclature des déchets ?.....	9
1.9.3. Veille réglementaire (JORADP)	9
1.9.4. Classification des déchets à l'aide de la nomenclature	9
a. Structure de la nomenclature	9
b. Comment trouve-t-on le code d'un déchet ?	9
1.9.5. Exemples de lecture de la nomenclature des déchets.....	10
1.9.6. Catégories de déchets selon la nomenclature	11
1.10. Actions gouvernementales en matière de gestion intégrée des déchets	12
1.10.1. Adaptation du programme PROGDEM	12
1.10.2. Création de l'Agence Nationale des Déchets (AND).....	12
1.10.3. Système national de reprise et de valorisation des déchets d'emballages (Eco-Jem)...	12
1.11. Législation algérienne en matière de gestion des déchets	12
1.12. Impacts des déchets solides sur la santé et l'environnement	13
1.12.1. Impacts sur la santé humaine	13

1.12.2. Impacts sur l'environnement	14
Fiche d'identification de déchet	15

Chapitre II : Déchets ménagers et assimilés : Composition, Caractérisation physico-chimique & Gestion

2.1. Déchets ménagers et assimilés : Définitions	17
2.2. Mesure de la production des déchets ménagers et assimilés.....	17
2.2.1. Calcul du ratio journalier (R)	17
2.3. Composition des déchets ménagers et assimilés	18
2.3.1. Composition des déchets ménagers et assimilés	18
2.3.1.1. Exemples de quelques villes Algériennes	19
2.3.1.2. Variabilité de la composition physique des déchets ménagers et assimilés.....	19
2.3.2. Composition chimique des déchets ménagers et assimilés	20
2.3. Caractéristiques physico-chimiques des déchets ménagers et assimilés.....	21
2.3.1. Granulométrie.....	21
2.3.2. Poids volumique ou Densité.....	21
2.3.3. Taux d'humidité ou teneur en eau (Hu)	22
2.3.4. Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	22
2.3.5. Rapport carbone/azote (C/N)	23
2.3.6. Teneur en volatils et en cendres	24
2.3.7. Teneur en métaux lourds	24
2.4. Gestion des déchets ménagers et assimilés	24
2.4.1. Comment peut-on minimiser la production des déchets solides ?	24
2.4.2. Organigramme de la chaîne de gestion des déchets ménagers et assimilés (DMA)	29
2.4.3. Système de collecte des déchets ménagers et assimilés	29
2.4.3.1. Définitions.....	29
2.4.3.2. Types de collecte	29
2.4.4. Qu'est ce qu'une déchetterie ?	32
2.4.4.1. Types de déchetterie	33
2.4.4.2. Déchetterie industrielle	33
2.4.5. Prétraitement des déchets ménagers et assimilés (broyage et tri)	34
2.4.5.1. Broyage des déchets ménagers et assimilés	34
2.4.5.2. Types de broyeurs	34
2.4.5.2. Tri (ou séparation) des déchets ménagers et assimilés.....	36
2.4.5.2.1. Centres de tri	36
2.4.5.2.1. Principaux procédés de séparation	36
I. Procédés de séparation par voie sèche	36
I. Procédés de séparation par voie humide	38

Chapitre III : Mise en décharge des déchets ménagers et assimilés

3.1. Décharge classique ou incontrôlée	40
Exemples de quelques décharges Algériennes.....	40
3.2. Une décharge est un bioréacteur à gérer	41
3.3. Les effluents de décharge : lixiviats et biogaz	41
3.3.1. Les lixiviats de décharges	41
3.3.2. Le biogaz de décharges	42
3.3.2.1. Estimation de la production de biogaz par réaction stœchiométrique	43

3.3.2.2. Captage du biogaz	43
3.3.2.3. Techniques d'extraction et de destruction du biogaz	45
3.3.2.4. Valorisation du biogaz	45
3.4. Décharge contrôlée (CET ou CSD).....	46
3.4.1. Classification des centres d'enfouissement techniques.....	46
3.4.2. Structure d'un centre d'enfouissement technique de classe 2 (CET 2).....	48

Chapitre IV : Traitement biologique des déchets ménagers et assimilés : Biométhanisation & Compostage

4.1. Biométhanisation.....	50
4.1.1. Définition	50
4.1.2. Les grandes étapes de la biodégradation des déchets.....	50
4.1.3. Principaux déchets concernés par la biométhanisation	51
4.1.4. Intérêt technologique de la biométhanisation.....	52
4.1.5. Avantages et inconvénients de la biométhanisation.....	52
4.1.6. Paramètres à contrôler dans une installation de biométhanisation.....	53
4.1.7. Exemple de réalisation industrielle : Procédé Valorga	53
4.2. Compostage.....	55
4.2.1. Définitions.....	55
4.2.2. Qualité du compost.....	56
4.2.3. Paramètres à contrôler lors du compostage.....	56
4.2.4. Les quatre phases du compostage	57
4.2.5. Procédés de compostage.....	58
4.2.5.1. Compostage en andains à l'air libre (lent)	58
4.2.5.2. Compostage en bioréacteur (accéléré)	59

Chapitre V : Traitement thermique des déchets ménagers et assimilés : Incinération & Pyrolyse

5.1. Incinération.....	61
5.1.1. Définitions	61
5.1.2. Réactions chimiques intervenant au cours de la combustion.....	62
5.1.3. Règle des 3 T.....	62
5.1.3.1. La température.....	62
5.1.3.2. Le temps de séjour.....	63
5.1.3.3. La turbulence.....	63
5.1.4. Volume d'air et air en excès.....	63
5.1.5. Conditions physiques pour une incinération avec valorisation énergétique	64
5.1.5.1. PCI.....	64
5.1.5.2. Teneur en eau	64
5.1.5.3. Teneur en cendres (ou inertes)	64
5.1.5.4. Teneur en matières combustibles	64
5.1.6. Diagramme de combustion et diagramme ternaire de Tanner	64
5.1.7. Les différentes phases du processus d'incinération	66
5.1.8. Structure d'une installation d'incinération des ordures ménagères	66
5.1.9. Types de fours d'incinération des ordures ménagères	67
5.1.9.1. Fours à grilles mobiles	67
5.1.9.2. Fours tournants et/ou oscillants.....	67

5.1.9.3. Fours à lit fluidisé.....	69
5.1.9.3.1. Four à lit fluidisé dense (LFD).....	69
5.1.9.3.2. Four à lit fluidisé rotatif (LFR)	69
5.1.9.3.3. Four à lit fluidisé circulant (LFC)	69
5.1.10. Traitement des gaz de combustion et des fumées	70
5.1.10.1. Dispositifs de dépoussiérage	70
5.1.10.2. Dispositifs de neutralisation des fumées	70
5.1.11. Résidus solides de l'incinération des ordures ménagères	72
5.1.11.1. Mâchefers (MIOM)	72
5.1.11.2. Résidus d'épuration des fumées d'incinération des ordures ménagères	72
5.2. Pyrolyse.....	72
5.2.1. Principe de la pyrolyse	72
5.2.2. Principe de décomposition thermique sous atmosphère de gaz ou sous vide	73
5.2.2.1. En atmosphère neutre dépourvue d'oxygène	73
5.2.2.2. En présence d'oxygène.....	74
5.2.3. Types de pyrolyse.....	74
5.2.4. Valorisation des produits de pyrolyse	75
5.2.5. Types de fours utilisés en pyrolyse	75
5.2.6. Principales différences entre incinération et pyrolyse.....	76
5.2.6.1. Incinération.....	76
5.2.6.2. Pyrolyse.....	76
Références bibliographiques	77

Chapitre I

Définitions et notions de base sur les déchets

1.1. ÉTYMOLOGIE DU CONCEPT DECHET

Le terme déchet vient du verbe «*déchoir*» qui traduit la diminution de la valeur d'un bien, d'une matière ou d'un objet jusqu'au point où il devient inutilisable en un lieu et en moment donné.

1.2. Synonymes

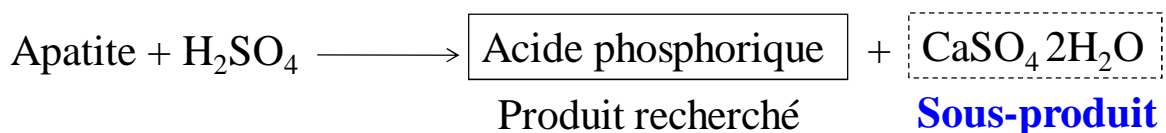
Rognure, copeau (Figure 1), chute, scorie, le reste, loupé de fabrication, rejet, résidu, effluent, détritus, immondices, sous-produit, co-produit, produit annexe, produit hors-usage, matière première secondaire, etc.



Figure 1. Copeaux d'acier dans un atelier de maintenance mécanique.

1.2.1. Exemples de sous-produits

1. Fabrication industrielle de l'acide phosphorique par attaque acide des apatites (phosphates de calcium) conduit à un sous-produit qui est le phosphogypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) :



2. La fabrication de la fonte donne comme sous-produit ou co-produit le laitier ou scorie (silico-aluminate) de haut-fourneau.

1.3. DEFINITIONS DU CONCEPT DECHET

a. Concept littéraire (selon le dictionnaire le petit Robert)

- Perte, diminution qu'une chose subit dans l'emploi qui en est fait.
- Ce qui reste d'une matière qu'on a travaillée.
- Résidu impropre à la consommation, inutilisable (et en général sale ou encombrant).

b. Concept environnemental

Du point de vue de l'environnement, un déchet constitue une menace à partir du moment où l'on envisage un contact avec l'environnement. Ce contact peut être *direct* ou le résultat d'un traitement.

c. Concept économique

Sur le plan économique, un déchet est une matière ou un objet dont la **valeur économique** est **nulle** ou **négative** pour son détenteur à un moment et dans un lieu donné. Cette définition exclut une bonne part des déchets recyclables, qui possèdent une valeur économique, même faible.

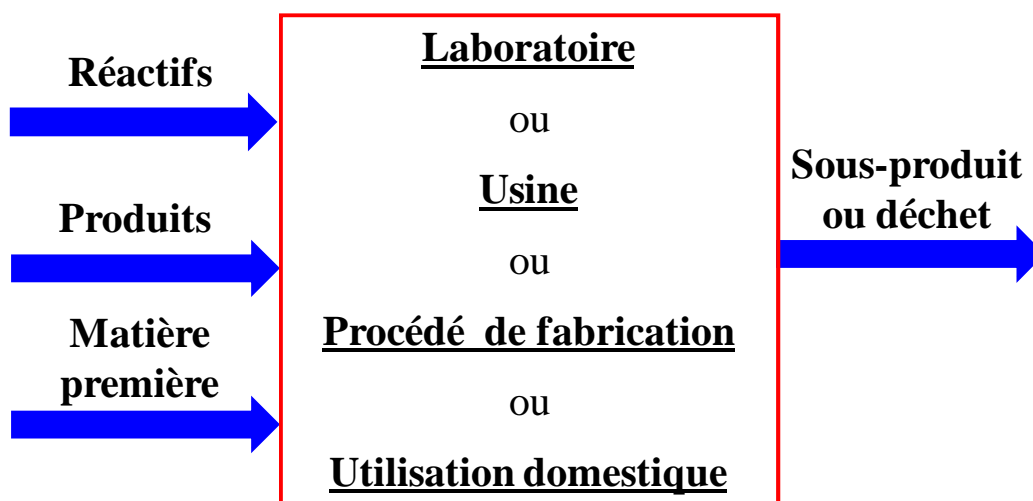
d. Concept juridique (extrait du JORADP*)

L'article 3 de la loi 01/19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets définit le déchet 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”.

La figure 2 ci-après illustre le concept déchet; ses sources habituelles de production et son statut (nuisance ou gisement de matière première).

(a)



* JORADP : Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire

(b)

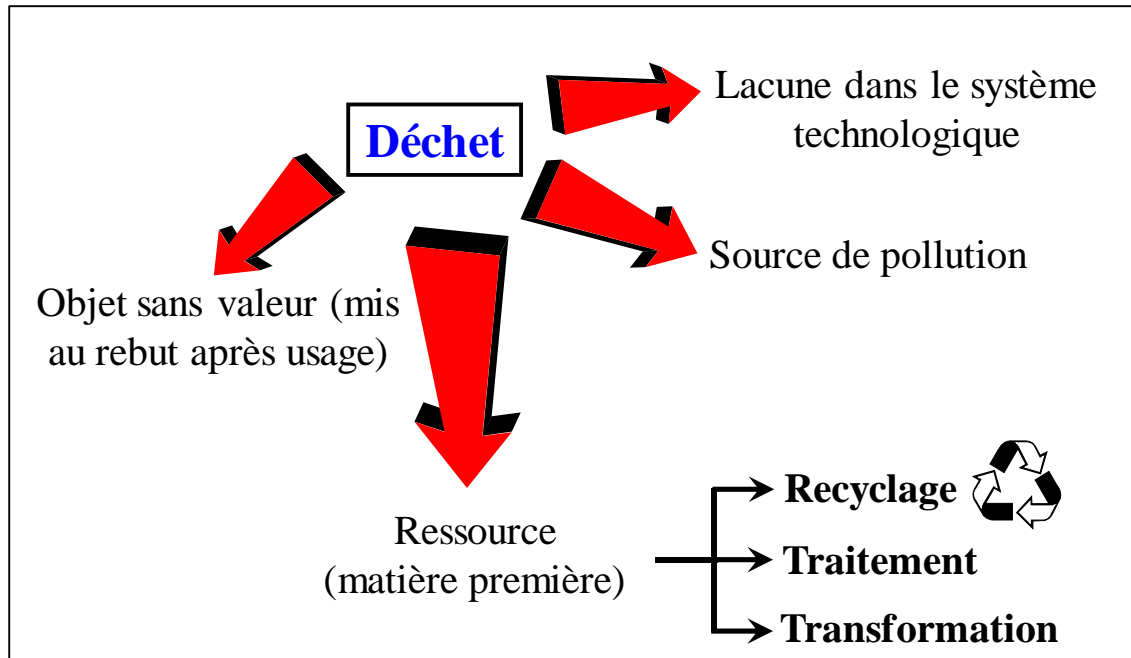


Figure 2: Schématisation du concept déchet : (a) Sources habituelles de production du déchet ou sous-produit, (b) Statut du déchet : nuisance ou gisement de matière première.

1.4. ORIGINE DE LA PRODUCTION DES DECHETS

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

a. Biologique : Les déchets d'origine biologique sont définis par le fait que tout cycle de vie produit des métabolites (matière fécale, cadavre...).

b. Chimique : Toute réaction chimique est régie par les principes de la conservation de la matière et dès lors si l'on veut obtenir un produit **C** à partir des produits **A** et **B** par la réaction $A + B \rightarrow C + D$; **D** sera un sous-produit qu'il faut gérer si on n'en a pas l'usage évident.

c. Technologique : Quelles que soient la fiabilité et la qualité des outils et procédés de production, il y a inévitablement des rejets qu'il faut prendre en compte tels que chutes, copeaux, solvants usés, emballage, etc.

d. Économique : La durabilité des produits, des objets et des machines a forcément une limite qui les conduit, un jour ou l'autre à leur élimination ou leur remplacement.

e. Écologique : Les activités de dépollution (eau, air, déchets) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront eux aussi une gestion spécifique, ... et ainsi de suite.

f. Accidentelle : Les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont à l'origine des déchets.

1.5. RUDOLOGIE OU SCIENCE DES DECHETS

Selon le petit Robert :

Rudologie (du latin rudus, ruderis: décombres ; terme introduit en 1985) : La rudologie est une science qui étudie les déchets, leur gestion et leur élimination. La rudologie ou science des résidus est née en **1884** lorsque **Eugène-René POUBELLE** (Figure 3) décréta que les Parisiens ne jetteraient plus leurs ordures par les fenêtres.

Un peu d'histoire...

1884 : invention de la poubelle

Eugène POUBELLE (1831-1907)

Préfet de la Seine (Paris) qui, par arrêté du 16 janvier 1884, imposa aux Parisiens, l'usage de la boîte à ordures. Cette boîte à ordures en tôle galvanisée a pris le nom de poubelle et l'a conservé lorsque le plastique a remplacé la tôle.



Figure 3 : Eugène POUBELLE (1831-1907).

Le *rudologue*, spécialiste de la gestion des déchets industriels ou ménagers et de la prévention des pollutions de l'environnement, travaille généralement pour les organismes publics et parapublics. Il analyse la production des déchets et les nuisances qu'ils génèrent, pour proposer des solutions de traitement des déchets.

1.6. CYCLE DE VIE D'UN DECHET

Selon Debray (1997), le cycle de vie d'un déchet peut être présenté comme suit (Figure 4) :

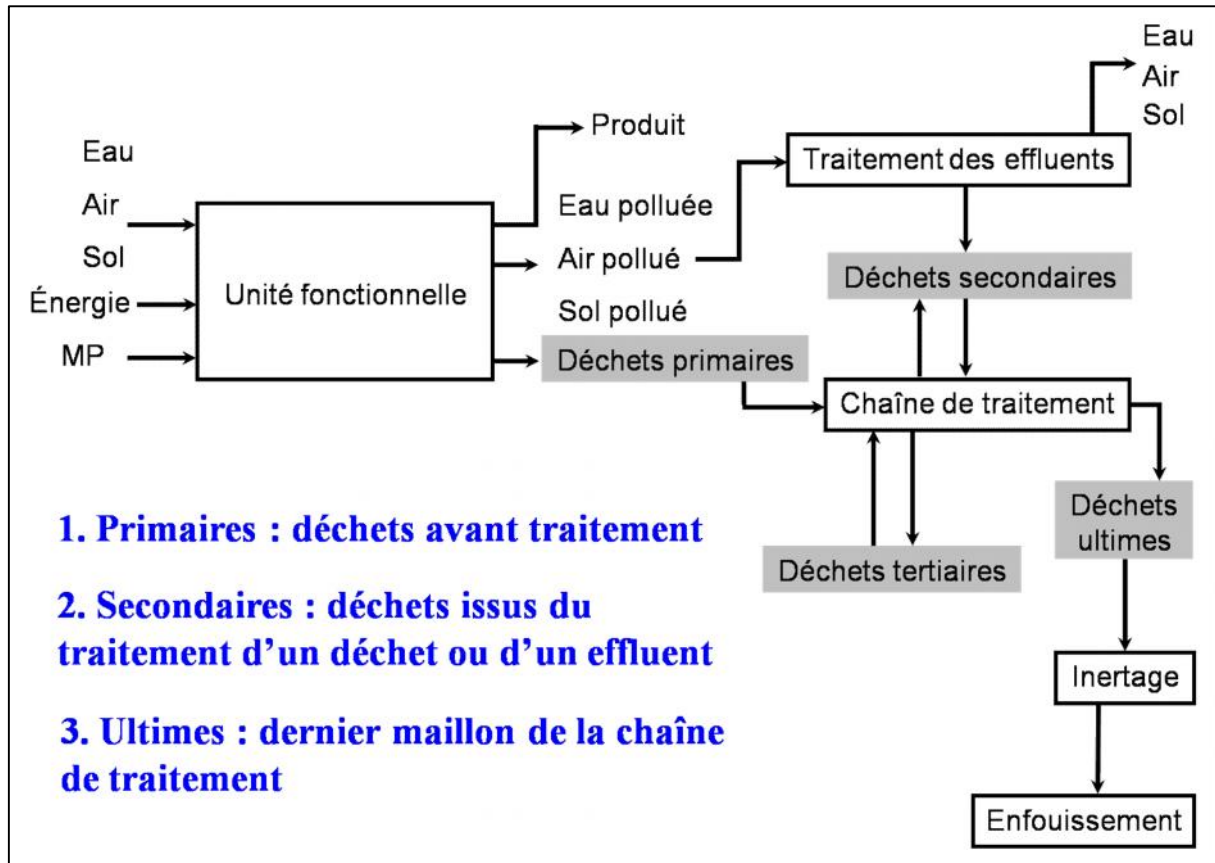


Figure 4 : Cycle de vie d'un déchet (d'après Debray, 1997).

1.6.1. Qu'est ce qu'un déchet ultime ?

Est *ultime* un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux.

1.6.2. Procédé d'inertage d'un déchet ultime (Encadré 1)

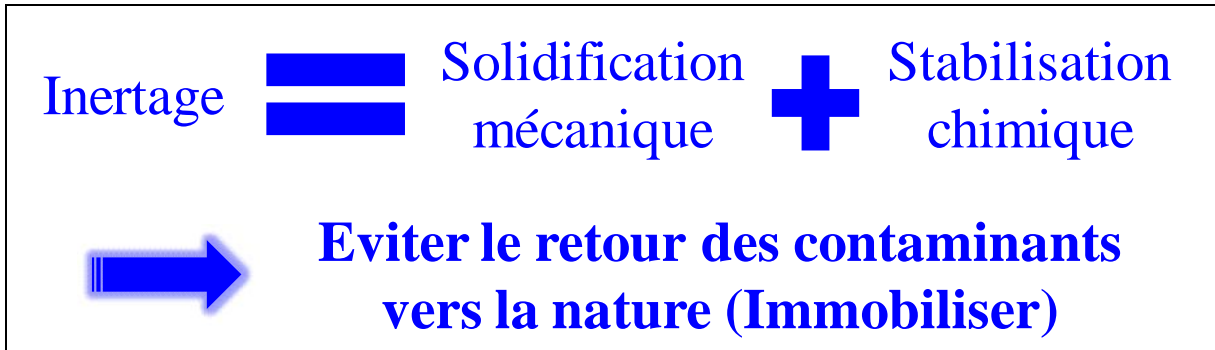
1. Solidification

Transformer le déchet en une forme stable et durable possédant certaines propriétés physiques, qui permettent de le stocker, de le mettre en décharge ou de l'utiliser.

2. Stabilisation

Fixer chimiquement ou physiquement les contaminants du déchet en diminuant leur mobilité (tend vers 0) pour éviter leur dispersion et donc le risque qu'ils contaminent l'environnement par de nombreux mécanismes :

- Absorption ou adsorption physique.
- Précipitation.
- Hydratation.
- Hydrolyse alcaline.
- Échange ionique.
- Encapsulage.



Encadré 1 : Principe du procédé d'inertage d'un déchet ultime.

1.6.3. Classification générale des procédés d'inertage

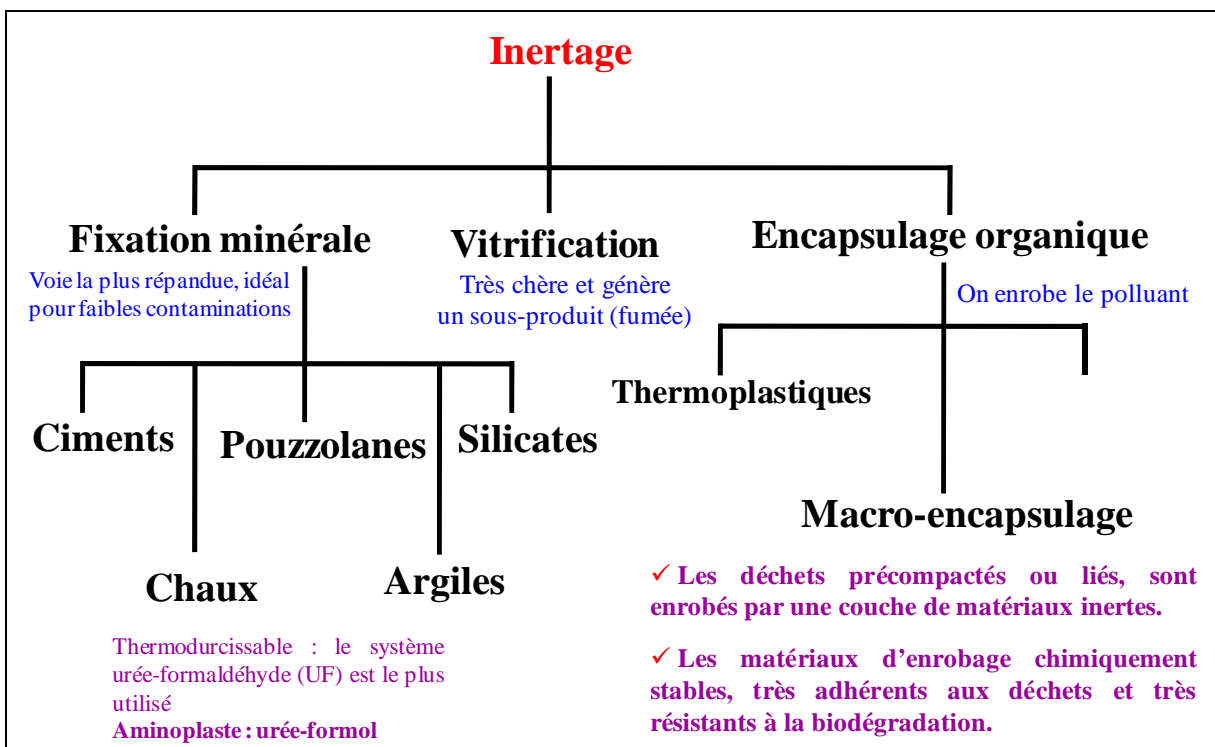


Figure 5 : Organigramme représentatif des différents procédés d'inertage d'un déchet ultime.

1.7. CLASSIFICATION DES DECHETS SOLIDES

Les déchets peuvent être classés en 2 grandes catégories :

1. selon l'*origine* du déchet ;
2. selon la nature du *danger*.

1.7.1. Classification en fonction de l'origine du déchet

- ❖ Déchets ménagers et assimilés (DMA).
- ❖ Déchets industriels banals (DIB) et spéciaux (DIS).
- ❖ Déchets de l'agriculture.
- ❖ Déchets de la construction et de la démolition (déchets inertes).

- ❖ Déchets d'activité de soins (DAS) ou déchets infectieux (DASRI).
- ❖ Déchets des équipements électriques et électroniques (DEEE).
- ❖ Déchets de l'automobile.

1.7.2. Classification en fonction de la nature du danger

- ❖ Déchets radioactifs.
- ❖ Déchets dangereux.
- ❖ Déchets inertes.
- ❖ Déchets ultimes.
- ❖ Déchets non dangereux.

1.8. CARACTERISTIQUES ANALYTIQUES DES DECHETS

Le choix d'une *filière* de traitement d'un déchet ou d'un sous-produit nécessite la bonne connaissance de ses caractéristiques analytiques.

À l'origine, la notion de filière désigne un *enchaînement d'opérations*. Dans le domaine du traitement des déchets, il s'agit de l'ensemble des *opérations* à mettre en œuvre pour aboutir aux résultats souhaités :

- ❖ **valorisation** du déchet ;
- ❖ et/ou rejet **éco-compatible** d'effluents dépollués ;
- ❖ et/ou **stockage** d'un déchet ultime.

Les différentes données suivantes sont nécessaires à la bonne connaissance d'un déchet ou d'un sous-produit :

(a) Composition (pour tout déchet) :

- ☛ Composition **chimique élémentaire** (Métaux, C, H, N, P, S, Cl...) et **moléculaire** (Benzène, phénols, protéines, sucres... ; sels minéraux, oxydes, polymères...).
- ☛ Composition **minéralogique** (nature des minéraux constitutifs) dans le cas des déchets solides.
- ☛ Nature des différentes **phases** constituant un déchet polyphasique (gaz résiduaire, mélanges liquide-liquide, liquide-solide, solide-solide) et composition chimique de ces phases.

(b) Propriétés physico-chimiques

- **Pouvoir calorifique inférieur (PCI)** correspondant à la chaleur dégagée par la combustion d'une unité de masse de déchet (ou enthalpie de combustion, changée de signe), l'eau étant formée à l'état de *vapeur*.
- **Pouvoir calorifique supérieur (PCS)** : idem, mais l'eau formée à l'état *liquide*.

Les pouvoirs calorifiques d'un produit de composition chimique donnée sont obtenus par le calcul à partir des enthalpies standards de formation de ce produit, de CO₂ et de H₂O (Encadré 2) :

$$\Delta H^0_{298} \text{CO}_2 = - 94,05 \text{ kcal/mol} = - 393,1 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H^0_{298} \text{H}_2\text{O}_{(v)} = - 57,80 \text{ kcal/mol} = - 241,6 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H^0_{298} \text{H}_2\text{O}_{(l)} = - 68,31 \text{ kcal/mol} = - 285,5 \text{ kJ/mol}$$

Encadré 2 : Calcul des pouvoirs calorifiques à partir des enthalpies standards de formation.

Le **PCI** est déterminé à partir du **PCS** mesuré par combustion en bombe calorimétrique. On a alors (Equation 1) :

$$PCI = PCS - 25,1 \left(9H\% \cdot \left(1 - \frac{eau\%}{100} \right) + eau\% \right) \quad (1)$$

où PCI et PCS sont en kJ/kg, H% est le pourcentage massique d'hydrogène contenu dans le déchet et Eau% sa teneur en eau (% en masse).

- Inflammabilité, capacité thermique, point éclair et tension de vapeur.
- Points de fusion et d'ébullition.
- Solubilité, viscosité, conductivité, propriétés rhéologiques.
- pH, DCO, DBO₅, MES (cas des effluents ou déchets liquides).

(c) Propriétés physico-mécaniques, minéralogiques et structurales (pour tous les déchets solides)

- État physique : solide, liquide, pâteux, gazeux, mélange de phases.
- Masse volumique.
- Granulométrie, finesse, porosité, surface spécifique.
- État structural (amorphe, vitreux, cristallisé).
- Indice de plasticité, qualité de compactage, teneur optimale en eau.
- Propriétés mécaniques (dureté, broyabilité, résistances mécaniques).

(d) Propriétés spécifiques

- Taux de cendres, rapport C/N, couleur, biodégradabilité...
- Toxicité pour les êtres vivants (cyanures, phénols, chromates, chlore, soufre, H₂S, CO, sels de métaux lourds : Pb, Cd, Hg, Cu,...) ou pour les installations (alcalins, chlore, silice, métaux volatils).
- Réactivité chimique et agressivité.
- Comportement en lixiviation (Comment ils peuvent être emportés par le milieu environnant les déchets une fois solidifiés ?).
- Pouvoir fertilisant.

➤ Évolution dans le temps.

➤ Radioactivité

- **Période** (cas des déchets radioactifs) : Temps au bout duquel la moitié des atomes, contenus dans un échantillon de substance radioactive, se sont naturellement désintégrés. La radioactivité de la substance a donc diminué de moitié.

Exemples : Iode 131 : 8j ; Cobalt 60 : 5 ans ; Radium 226 : 1260 ans ; Plutonium 239 : 24.10^3 ans ; Uranium 238: $4,5.10^9$ ans.

- **Nature du rayonnement émis** (α , β , γ).

➤ Facteur qualité (pureté du déchet) et contenu énergétique.

1.9. NOMENCLATURE DES DECHETS

1.9.1. A quoi sert la nomenclature des déchets ?

La nomenclature des déchets est une classification qui comprend les déchets spéciaux y compris les déchets spéciaux dangereux, les déchets ménagers assimilés et les déchets inertes. Elle sert à désigner les déchets afin que les différents partenaires concernés par l'élimination des déchets parlent un langage commun.

La nomenclature est un code européen à 6 chiffres qui identifie les déchets (de 01 à 20 03 99). Cette codification indique quels sont les déchets classés dangereux : ceux-ci sont repérés par un astérisque (*).

1.9.2. A qui est destinée la nomenclature des déchets ?

La nomenclature doit être utilisée par toute personne physique ou de droit moral qui est concernée par l'élimination des déchets, à savoir :

- ❖ l'administration ;
- ❖ les établissements publics ;
- ❖ les collectivités locales (wilaya, commune) ;
- ❖ les entreprises qui produisent, importent, exportent des installations d'incinération, de co-incinération, de traitement physico-chimique ou biologique, collectent, transportent, se livrent à des opérations de courtage ou de négoce de déchets.

1.9.3. Veille réglementaire (JORADP)

Décret exécutif N°06-104 du 28 février 2006 fixant la *nomenclature des déchets*, y compris les déchets spéciaux dangereux.

1.9.4. Classification des déchets à l'aide de la nomenclature

a. Structure de la nomenclature

La nomenclature des déchets est structurée en forme de pyramide à 3 étages (Figure 6) :

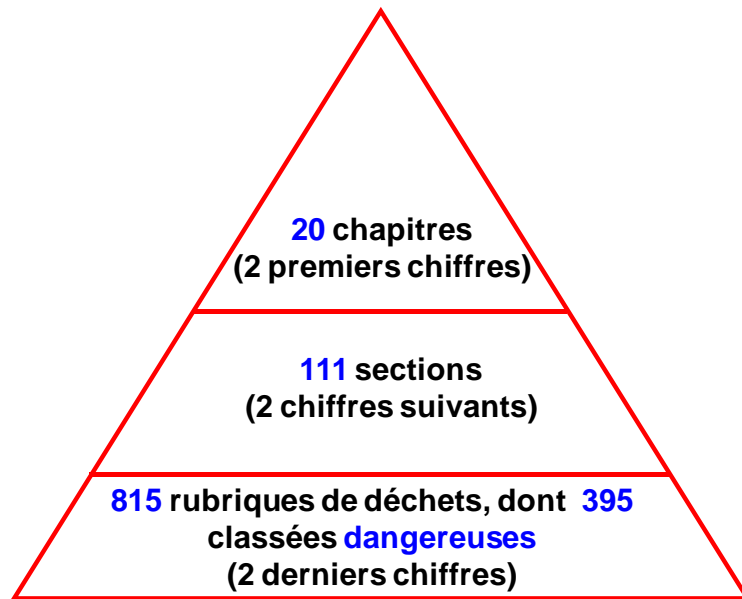


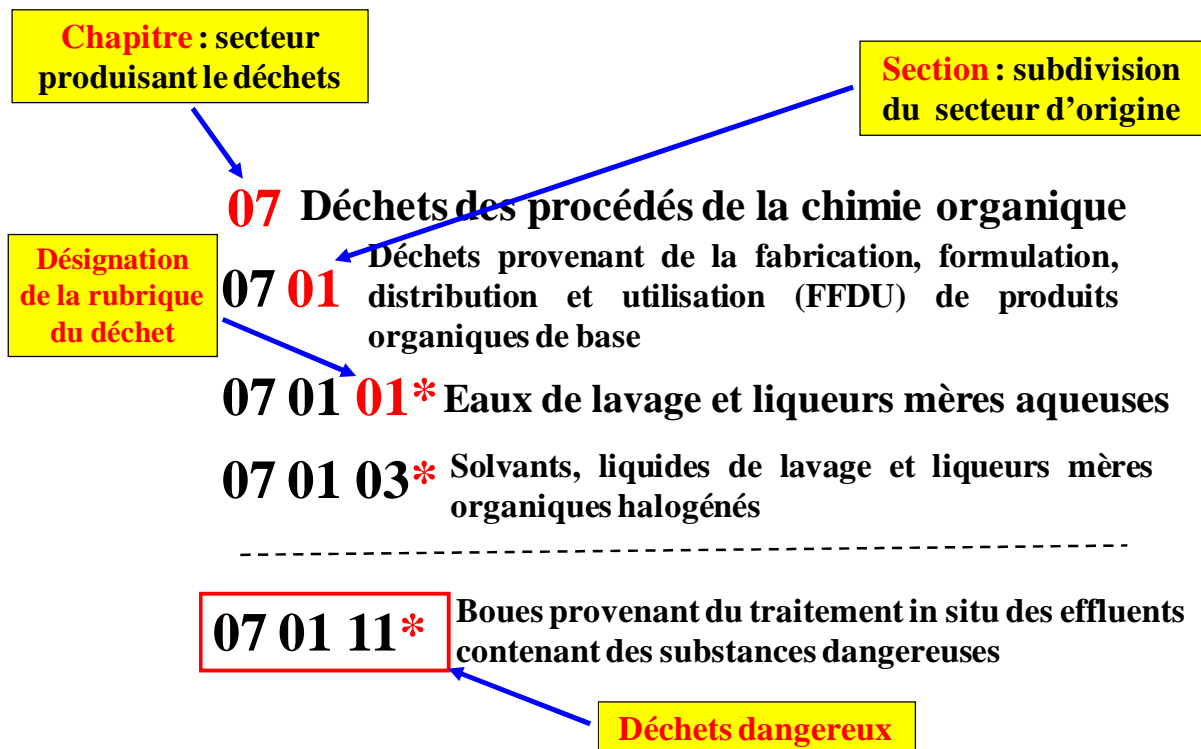
Figure 6 : Structure pyramidale de la nomenclature des déchets.

b. Comment trouve-t-on le code d'un déchet ?

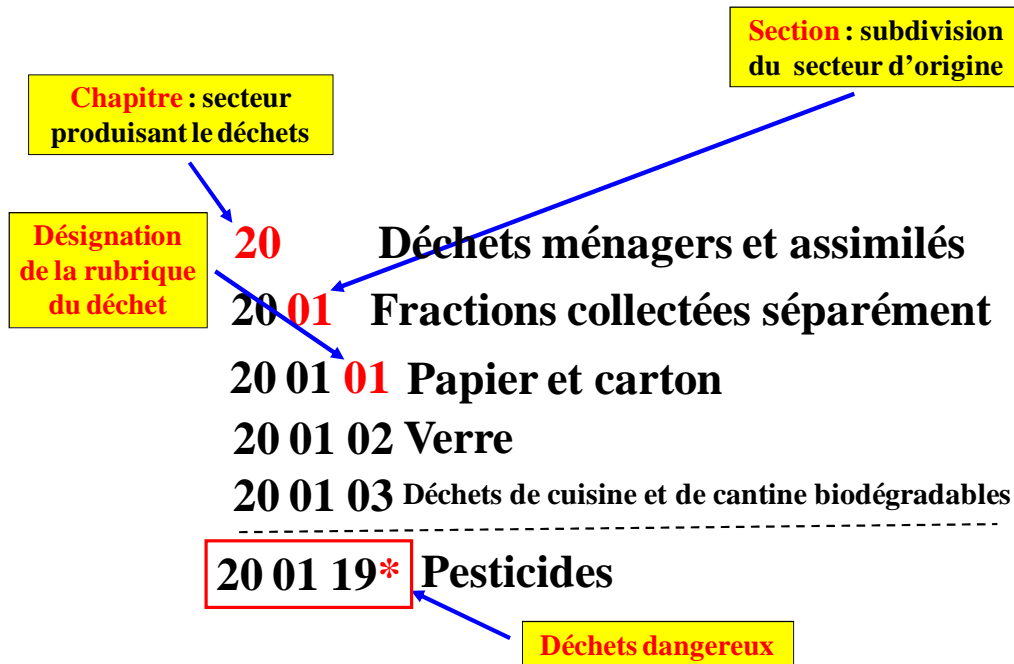
- ❖ Chapitres (ou catégories) **01 à 12** ou **17 à 19** pour un déchet de type industriel.
- ❖ Chapitre **20** pour un déchet ménager.

1.9.5. Exemples de lecture de la nomenclature des déchets

Exemple 1 : Cas des déchets industriels



Exemple 2 : Cas des déchets ménagers et assimilés



1.9.6. Catégories de déchets selon la nomenclature (Tableau 1)

Tableau 1 : Catégories (ou chapitres) de déchets selon la nomenclature.

01	Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux
02	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
03	Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton
04	Déchets provenant des industries du cuir, de la fourrure et du textile
05	Déchets provenant du raffinage du pétrole, de la purification du gaz naturel et du traitement pyrolytique du charbon
06	Déchets des procédés de la chimie minérale
07	Déchets des procédés de la chimie organique
08	Déchets provenant de la fabrication, de la formulation, de la distribution et de l'utilisation (FFDU) de produits de revêtement (peintures, vernis et émaux vitrifiés), mastics et encres d'impression
09	Déchets provenant de l'industrie photographique
10	Déchets provenant de procédés thermiques
11	Déchets provenant du traitement chimique de surface et du revêtement des métaux et autres matériaux, et de l'hydrométallurgie des métaux non ferreux
12	Déchets provenant de la mise en forme et du traitement physique et mécanique de surface des métaux et matières plastiques
13	Huiles et combustibles liquides usagés (sauf huiles alimentaires et huiles figurant aux chapitres 05, 12 et 19)
14	Déchets de solvants organiques, d'agents réfrigérants et propulseurs (sauf chapitres 07 et 08)
15	Emballages et déchets d'emballages, absorbants, chiffons d'essuyage, matériaux filtrants et vêtements de protection non spécifiés ailleurs
16	Déchets non décrits ailleurs dans la liste
17	Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)
18	Déchets provenant des soins médicaux ou vétérinaires et/ou de la recherche associée (sauf déchets de cuisine et de restauration ne provenant pas directement des soins médicaux)
19	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel
20	Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets assimilés provenant des commerces, des industries et des administrations) y compris les fractions collectées séparément

1.10. ACTIONS GOUVERNEMENTALES EN MATIERE DE GESTION INTEGREE DES DECHETS

1.10.1. Adaptation du programme PROGDEM

PROGDEM : Programme National pour la Gestion Intégrée des Déchets Municipaux pour les 40 grandes villes Algériennes.

Principaux objectifs du PROGDEM

- Élimination saine et écologiquement rationnelle des déchets.
- Valorisation des déchets recyclables.
- Mettre en place du système de reprise des déchets d'emballages « **Eco-Jem** ».
- Création d'emplois verts.
- Réduction de la production des déchets à la source.

1.10.2. Création de l'Agence Nationale des Déchets (AND)

Statut de l'agence : établissement à caractère industriel et commercial (EPIC).

Domaines d'intervention de l'agence

- Traiter les données et les informations sur les déchets.
- Constituer et actualiser la banque nationale des données sur les déchets.
- Vulgariser les techniques de gestion et de valorisation des déchets.

1.10.3. Système national de reprise et de valorisation des déchets d'emballages (Eco-Jem)

Les résultats de l'enquête réalisée par les services du Ministère de l'Environnement (MATE) font état d'un recensement préliminaire de 192 unités produisant plus de 2 millions de tonnes d'emballage plastique dont seule 4000 tonnes sont récupérées (soit 0,0002 %).

Objectifs du système « Eco-Jem »

- Promotion des activités de traitement, recyclage et de valorisation des déchets.
- Réduction du volume des déchets générés (soustraction à la source des déchets d'emballages).
- Économie des matières premières (réutilisation des sous-produits).

1.11. LEGISLATION ALGERIENNE EN MATIERE DE GESTION DES DECHETS

Recueil de quelques textes juridiques (JORADP)

- Loi N°01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- Décret exécutif N°02-175 du 20 mai 2002 portant création, organisation et fonctionnement de l'Agence Nationale des Déchets (AND).
- Décret exécutif N°02-372 du 11 novembre 2002 relatif aux déchets d'emballages.

- ☛ 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'agrément 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.

1.12. Impacts des déchets solides sur la santé et l'environnement

1.12.1. Impacts sur la santé humaine

a. Pathologies liées à des conditions environnementales favorables et maladies spécifiques de la manipulation des déchets (agents de nettoyage, chiffonniers...)

- ❖ Hépatites épidémiques et sériques.
- ❖ Conjonctivites épidémiques.
- ❖ Tétanos.
- ❖ Proéminence de la tuberculose.
- ❖ Effets multiples des substances radioactives.
- ❖ Intoxications aux produits dangereux.
- ❖ Maladies de contact de la peau et des muqueuses.

b. Impacts sanitaires des décharges non contrôlées (Figure 7)

- ❖ Multiplication des maladies infectieuses et parasitaires (MTH virales par altération des ressources en eau, hépatites infectieuses, maladies parasitaires de la peau et autres).
- ❖ Multiplication des rongeurs qui sont à l'origine de la peste.
- ❖ Prolifération des chiens errants (zoonoses (la rage) et parasitoses (maladies liées à la tique des chiens)).
- ❖ Prolifération des vecteurs nuisibles (mouches, moustiques,...).

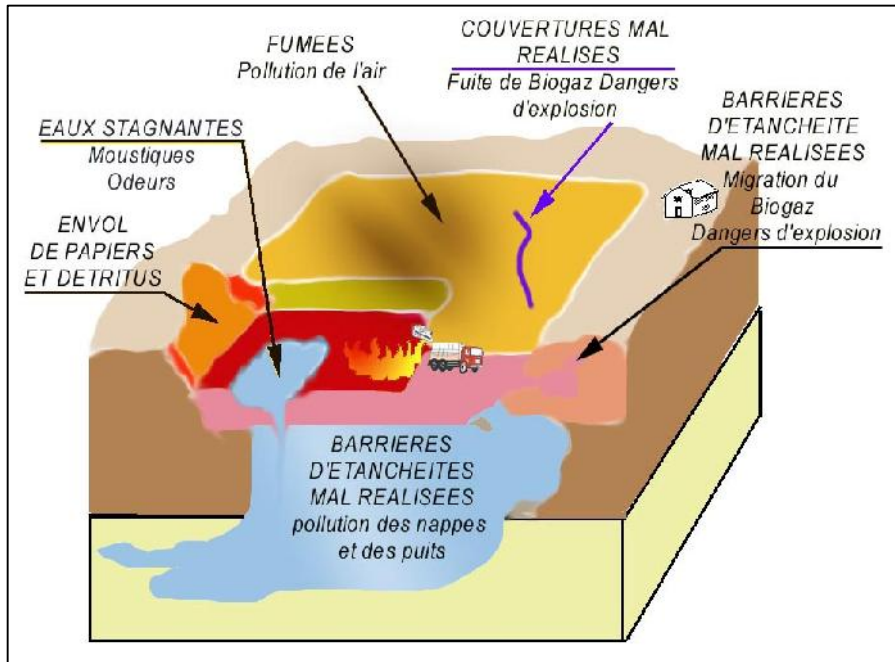


Figure 7 : Impacts d'une décharge incontrôlée sur l'environnement.

1.12.2. Impacts sur l'environnement

Les déchets solides ont un impact environnemental sévère qui se manifeste par une (Figure 8) :

- ❖ altération de la qualité de l'air (gaz, fumées et poussières) ;
- ❖ altération des sols et des paysages par des polluants chimiques ;
- ❖ pollution des ressources en eau par les infiltrats et les eaux usées.

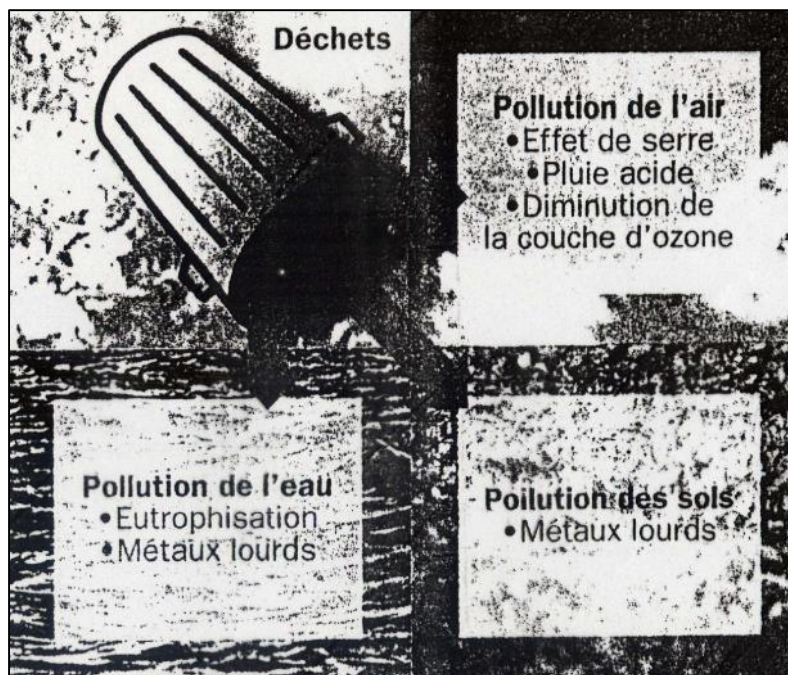


Figure 8 : Types de pollution générée par les déchets solides (d'après Navarro, 1999).

Fiche d'identification de déchet.

Nom du déchet :

Site producteur :
 Certificat d'acceptation préalable :

Production - Origine du déchet :

A.

- Atelier producteur : N° téléphone responsable :
 - Quantité et fréquence production : N° compte imputation :
 - Code nomenclature C ... N° code atelier :
 A ... Opération d'origine :

Information Sécurité : (Etiquetage C.E.E.)

B.

Danger : - Lettre symbole: ...
 Contient :

- Phrases R : _____

 - Phrases S : _____

Conditionnement :

C.

- Conditionnement habituel : - Matériaux préconisés :
 - Volume habituel : - Matériaux incompatibles :
 - Observations :

Transport :

D.

- Assimilation matière :
 Classe : N° de groupe :
 - Code danger : Code matière : N° étiquette :

Recommandations pour interventions :

E.

- Premiers soins : _____

 - Moyens d'extinction appropriés :
 - Moyens d'extinction incompatibles :
 - Epandage :

Fiche d'identification de déchet (suite)

2

Aspect physique :

F.

.....
 Odeur :

Composition du déchet :

G.

Par substance

* : %
 * : %
 * : %
 * : %
 * : %
 * : %
 * : %
 * : %
 * : %
 * : %
 * : %

Par élément chimiques

- Chlore total :
 - Fluor total :
 - Autres halogènes totaux :
 - Soufre total :
 - Azote total :
 - Résidus de calcination à 800°C :
 - Métaux lourds :
 - D.C.O. : mg d' O₂/l
 - C.O.T. : mg/l

Caractéristiques du déchet :

H.

- Constantes physiques :

. température de cristallisation : °C
 . température de fusion : °C
 . température d'ébullition : °C
 . température d'autoinflammation : °C
 . point d'éclair (coup. fermée) : °C

. Densité : à °C
 . Viscosité : à °C
 . Solubilité : à °C
 (solvant :)
 . PCI : kcal /kg
 . pH :

- Stabilité du déchet :

. Réactions dangereuses :

A la chaleur
 Avec l'eau
 Avec un acide
 Avec un alcalin
 Avec un oxydant
 Avec un réducteur
 Avec un autre produit

	1	2	3	4	5	6
A la chaleur						
Avec l'eau						
Avec un acide						
Avec un alcalin						
Avec un oxydant						
Avec un réducteur						
Avec un autre produit						

1 Emissions de vapeurs et/ou dégagement gazeux (nature :)
 2 Inflammation
 3 Explosion
 4 Risque de polymérisation
 5 Prise en masse
 6 A chaud

Lequel?

. Evolution de la stabilité du produit dans le temps :

. Analyse thermique différentielle (ATD) - graphique joint : oui non

(Nom du composant)

- Toxicité : DL 50 voie orale rat : mg/kg
 DL 50 voie cutanée lapin : mg/kg
 CL 50 inhalation (exposition 4 heures) : mg/l

- Ecotoxicité : CI 50 daphnie : mg/l

- Test de lixiviation :

Feuilles additives à cette fiche: oui non

I.

- Si oui, nombre de feuilles additives :

Signature habilitée et tampon société :

J.

Date : ___/___/___ Nom :

Fonction :

Signature :

Chapitre II

Déchets ménagers et assimilés : Composition, Caractérisation physico-chimique & Gestion

2.1. DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES : DEFINITIONS

a. Cette catégorie de déchets solides recouvre les *ordures ménagères* (OM), les *déchets municipaux* (DM) ou urbains, les *résidus urbains* (déchets de nettoyage).

Le terme « *assimilés* » désigne les déchets des entreprises industrielles, des artisans, des commerçants, des écoles, des services publics, et des hôpitaux qui présentent des caractéristiques physico-chimiques ou de toxicité équivalentes à celles des ordures ménagères.

b. Selon la législation algérienne relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, article 03 de la loi 01/19 du 12 décembre 2001 (JORADP), les déchets ménagers sont définis comme suit :

❖ *Déchets ménagers et assimilés* : tous déchets issus des ménages ainsi que les déchets similaires provenant des activités industrielles, commerciales, artisanales et autres qui, par leur nature et leur composition, sont assimilables aux déchets ménagers.

❖ *Déchets encombrants* : tous déchets issus de ménages qui en raison de leur caractère volumineux, ne peuvent être collectés dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés.

2.2. MESURE DE LA PRODUCTION DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES

Les quantités de déchets ménagers produites peuvent s'exprimer en poids ou en volume. Cependant, en raison de la compressibilité des déchets ménagers et assimilés, seul le poids constitue une donnée fiable et mesurable sur un pont-bascule. On mesure alors les quantités de déchets ménagers en kg/habitant/jour ou par année. Par contre pour définir la taille des récipients, l'estimation des volumes est nécessaire.

Selon le Ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire (MATE, 2011), chaque Algérien en produit en moyenne 0,65 kg de déchets par jour. Mais dans les grandes villes comme Alger, un citoyen génère environ 1,7 kg de déchets par jour.

2.2.1. Calcul du ratio journalier (R)

Il suffit de diviser le poids total des déchets ménagers collectés en une journée par le nombre d'habitants selon la méthode qui suit :

$$R = \frac{P}{H} \quad (2)$$

où,

R : ratio journalier (kg/habitant/jour).

P : poids de déchets collectés en une journée (tonnes, kg).

H : nombre d'habitants de la commune ou l'agglomération traitée.

Prenons l'exemple d'une agglomération de 100000 habitants où on collecte 42 tonnes de déchets par jour : **R = 42.000 kg / 100.000 habitants = 0,42 kg/habitant/jour.**

2.3. COMPOSITION DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES

La connaissance de la composition des DMA est un préalable indispensable pour une bonne gestion et ce pour plusieurs raisons à savoir :

- estimer la quantité des matériaux produits ;
- identifier leur source de génération ;
- faciliter le design des équipements des procédés de traitement ;
- définir les propriétés physiques, chimiques et thermiques des déchets ;
- et veiller sur la conformité avec les lois et règlements en vigueur.

2.3.1. Composition physique des déchets ménagers et assimilés

Les principales composantes d'une poubelle ménagère restent celles répertoriées par la norme française **AFNOR** (1996). Les principales familles de déchet rencontrées sont les suivantes (Encadré 3) :

- Fines (< 20 mm).
- Putrescibles.
- Papiers-cartons.
- Complexes (Tetra brick).
- Textiles (emballages textiles).
- Textiles sanitaires (couches, coton hygiénique...).
- Plastiques.
- Combustibles non classés (CNC : bois, caoutchouc...).
- Incombustibles non classés (INC : pierres, gravats...).
- Verre,
- Métaux,
- Déchets ménagers spéciaux (batteries, piles, aérosols...).

Encadré 3 : Composition physique des déchets ménagers et assimilés selon la norme AFNOR (1996).

2.3.1.1. Exemples de quelques villes Algériennes

Le tableau 2 suivant donne la composition des déchets ménagers et assimilés de quelques villes Algériennes et montre que ces déchets sont principalement constitués de matières organiques putrescibles et de papiers-cartons. Ces derniers représentent plus de 85% du poids humide des déchets.

Tableau 2 : Composition physique moyenne des déchets ménagers et assimilés de quelques villes Algériennes (% masse humide).

Ville	Matières organiques	Papier-Carton	Plastiques	Métaux	Textiles	Verre	Cuir	Bois	Autres
Alger	70,0	16,0	2,0	2,5	3,6	1,1	1,2	1,0	2,60
Blida	80,0	7,5	3,1	4,9	2,2	0,6	0,6	0,4	/
Mascara	75,0	11,4	2,7	2,4	3,3	1,3	0,6	/	2,00
Tlemcen	69,8	16,8	2,9	2,5	3,0	1,4	1,0	0,2	0,20
Chlef	85,7	7,5	2,1	1,6	/	/	/	0,45	0,44
Annaba	85,0	7,5	1,9	3,0	1,0	0,1	0,3	/	0,39
Skikda	73,8	9,1	2,1	3,3	1,5	1,2	1,5	/	/
Batna	77,0	7,0	2,8	4,0	2,8	1,5	0,5	0,2	0,30
Sidi Bel Abbes	80,6	3,8	3,3	2,9	1,3	0,7	/	/	0,48
Mostaganem	78,0	12,0	2,8	2,2	3,9	1,1	/	/	/
Oran	69,6	14,0	7,2	3,4	3,0	2,8	/	/	/

/ : Non identifiée.

2.3.1.2. Variabilité de la composition physique des déchets ménagers et assimilés

Le gisement de déchets ménagers et assimilés a une composition assez diverse et varie en fonction de nombreux facteurs :

- Le **type d'habitat** (urbain ou rural; avec un taux généralement plus faible en milieu rural).
- La **saison** (tonte de gazon au printemps, feuilles mortes à l'automne, papiers d'emballage) et les jours de la semaine (déchets de jardin après le week-end, etc.).
- La **géographie** : à l'échelle d'une région et d'un pays (alimentation et habitudes différentes).
- La **réglementation** locale et/ou nationale par rapport aux types de déchets admis : déchets ménagers, boues, déchets industriels banals.
- Les **méthodes de gestion des déchets** (collectes sélectives, tri préalable des déchets ménagers spéciaux, des déchets verts, admission de déchets industriels, etc.).

2.3.2. Composition chimique des déchets ménagers et assimilés

Cette caractérisation a pour principal objectif l'évaluation du potentiel polluant de ces déchets ou la mise en évidence de l'existence des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement.

Le tableau 3 suivant donne la composition chimique élémentaire des déchets ménagers et assimilés en France (Agence ADEME, 1998).

Tableau 3 : Composition chimique d'un déchet ménager et assimilé Français.

Paramètre analysé	Teneur moyenne
Taux d'humidité	35% MH
Matière Organique Totale (COT)	59,2% MS
Carbone	33,4 % MS
Chlore	14 g/kg (MS)
Soufre	2,8 g/kg (MS)
Azote organique	7,3 g/kg (MS)
Fluor	58 mg/kg (MS)
Bore	14 mg/kg (MS)
Cadmium	4 mg/kg (MS)
Cobalt	113 mg/kg (MS)
Chrome	183 mg/kg (MS)
Cuivre	1048 mg/kg (MS)
Manganèse	412 mg/kg (MS)
Mercuré	3 mg/kg (MS)
Nickel	48 mg/kg (MS)
Plomb	795 mg/kg (MS)
Zinc	1000 mg/kg (MS)

MS : matière sèche ; MH : matière humide.

Il en ressort que la pollution contenue dans ces déchets est d'origine *organique, minérale* et *métallique*. La matière organique est apportée en grande partie par les déchets putrescibles et papiers-cartons (matière organique non synthétique) et par les plastiques (matière organique synthétique).

Bien que cette composition chimique des déchets ne soit pas exhaustive, elle montre néanmoins déjà le risque sur la santé et l'environnement que les déchets peuvent représenter et la nécessité de traiter ces refus.

2.3. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES

La connaissance des caractéristiques physico-chimiques des déchets est essentielle dans la gestion (valorisation, récupération, etc.) et le traitement des rejets, et pour prédire les risques potentiels de pollution pour l'environnement. Elle permet donc de mettre en place des procédures de contrôle et de réduction des émissions polluantes dans le milieu récepteur.

Ces caractéristiques physico-chimiques sont : la granulométrie, le poids volumique, le taux d'humidité, le pouvoir calorifique inférieur (PCI), le rapport C/N, les teneurs en volatils et en cendres et la teneur en métaux lourds.

2.3.1. Granulométrie

Les déchets peuvent être caractérisés par leurs tailles granulométriques. On classe en général ces tailles en trois granulométries distinctes lors d'un tri :

- les **fines** (< 20 mm) ;
- les **moyens** (20 mm < taille < 100 mm) ;
- et les **gros** (> 100 mm).

Les fines sont les plus étudiées, notamment pour leur caractère biodégradable.

2.3.2. Poids volumique ou Densité

Dans la littérature, il est question parfois de masse volumique qui fixe la relation entre le poids et le volume de déchets, certains auteurs utilisent préférentiellement le poids volumique, ou encore la densité. Cette caractéristique est d'une grande influence sur les capacités des moyens de collecte et de mise en décharge des ordures.

On détermine donc une "**densité en poubelle**", une "**densité en benne tasseuse**", une "**densité en décharge avec ou sans tassement** " ... Il convient d'ailleurs de souligner qu'il s'agit de toute façon de *densités apparentes* étant donné l'extrême hétérogénéité des ordures ménagères.

Expression de la densité des déchets ménagers

$$d = \frac{\dots_d}{\dots_e} \quad (3)$$
$$\dots_e = 1000 \text{ kg/m}^3$$

où,

d : densité des déchets ménagers.

\dots_d : poids volumique des déchets (kg/m^3).

\dots_e : poids volumique de l'eau (kg/m^3).

Le tableau 4 ci-après montre les plages de variation des densités des déchets ménagers et assimilés des villes Algériennes.

Tableau 4 : Fourchettes de densités des déchets ménagers et assimilés des villes Algériennes.

Densité en poubelle	Densité en benne tasseuse	Densité en décharge après tassement
0,22–0,3	0,45–0,55	0,28–0,32

D'après une étude réalisée par les services du ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement (MATE, 2012), la densité apparente dans le cas des villes Algériennes se situe entre 0,2 et 0,6.

2.3.3. Taux d'humidité ou teneur en eau (Hu)

La teneur en eau pondérale (Hu) d'un échantillon de déchets donné représente le rapport entre la masse d'eau présente dans un échantillon et la masse sèche de cet échantillon. Pour des ordures fraîches et stockées à l'abri des intempéries, l'humidité varie entre (% en masse):

- (35–40) % : Europe, avec un maximum en été et un minimum en hiver ;
- (60–62) % : pour une grande ville Algérienne ;
- (65–70) % et plus : pour les pays tropicaux.

On retiendra que le pourcentage d'eau dans les ordures est autant plus élevé qu'elles sont plus riches en matières organiques, dont l'humidité moyenne est aux alentours de 80% en masse.

2.3.4. Pouvoir calorifique inférieur (PCI)

Le PCI (exprimé en kcal/kg en masse sèche) des déchets solides est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de masse du combustible en supposant que toute l'eau, provenant de ce dernier ou formée au cours de la combustion, reste au stade final à l'état de vapeur dans les produits de combustion. Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer le PCI :

a. Il peut être calculé à partir du *pouvoir calorifique supérieur* (PCS) mesuré à l'aide d'une *bombe calorimétrique*. On a alors dans les conditions standards :

$$PCI = PCS \left(1 - \frac{Hu}{100} \right) - C_v (Hu + 9H) \quad (4)$$

où,

PCI et PCS sont en kJ/kg.

Hu : % en masse de la teneur en eau des déchets.

Cv : chaleur latente de vaporisation de l'eau égale à 583 kcal/kg.

H : % en masse de la teneur d'hydrogène des déchets.

b. D'autres méthodes le déterminent à partir de la *composition élémentaire* des déchets; elles utilisent des formules de calcul simplifiées en fonction des teneurs des déchets en catégories et de l'humidité.

C'est ainsi, que pour le calcul du PCI, le modèle suivant a été choisi et qui prend en compte toutes les fractions susceptibles d'avoir un apport dans le PCI :

$$PCI = 40.(P + T + B + F) + 90.R - 46.Hu \quad (5)$$

avec,

Hu : humidité moyenne des déchets (% poids sec).

P, T, B, F et R : teneurs respectivement des fractions papier, textile, déchets verts, fermentescibles et plastique (% poids sec).

Le PCI est un paramètre essentiel pour définir l'habilitation des déchets au traitement par incinération. Sans apport extérieur d'énergie, les déchets peuvent être incinérés lorsqu'ils ont un PCI supérieur à 1200 kcal/kg. En règle générale, le PCI est inversement proportionnel à l'humidité :

- ❖ Si **Hu** \geq **50%**, alors l'incinération des ordures est non recommandable.
- ❖ Si **45% \leq Hu \leq 70%**, alors le compostage des ordures est recommandable (cas des ordures ménagères Algériennes).

Donc la connaissance des deux paramètres (PCI et Hu) sont étroitement liés et leur connaissance est essentielle pour le choix du mode de traitement (incinération ou compostage...).

2.3.5. Rapport carbone/azote (C/N)

Afin de pouvoir calculer le rapport carbone/azote (C/N), il est nécessaire de connaître les teneurs en azote et en carbone. Ce paramètre permet d'apprécier aussi bien l'aptitude des ordures au compostage que la quantité du compost obtenu (C/N < 12 en phase solide indique la maturité du compost). Un compost est valable à partir du rapport C/N < 35 au départ de la fermentation aérobie et contrôlée et en obtenant un rapport de $18 \leq C/N \leq 20$ en fin de fermentation. Pour le cas de l'Algérie, le rapport C/N dépasse rarement 15.

Le tableau 5 suivant donne des ordres de grandeur de rapports C/N de quelques matières organiques.

Tableau 5 : Rapport C/N de quelques matières organiques compostables.

Matières	Rapport C/N
Ordures ménagères brutes	15 à 25
Boues activées	6
Gazon	10 à 20
Feuilles mortes	20 à 50
Fanes de pomme de terre	26
Papiers-cartons	120 à 170
Déchets de légumes	11 à 12
Paille des céréales	90 à 120

2.3.6. Teneur en volatils et en cendres

Outre la teneur en eau et la valeur calorifique des déchets ménagers, il existe un paramètre physico-chimique déterminant dans l'interprétation des propriétés de combustion de ces derniers : leur **teneur en volatiles**, qui se transforment en gaz lors de la combustion (comme les COV). Ce phénomène est étroitement lié à la part minérale des déchets, désignée généralement sous le nom de **teneur en cendres**.

Puisqu'il s'agit ici de parts non combustibles des déchets, il en résulte la relation mathématique suivante entre la teneur en volatiles (**V** : composants combustibles) et en cendres (**C** : composants non combustibles) :

$$C + V = 100\% \quad (6)$$

En considérant la part d'eau évaporée par séchage (**Hu**), alors la formule générale sera :

$$C + V + Hu = 100\% \quad (7)$$

2.3.7. Teneur en métaux lourds

Les 12 fractions principales des déchets ménagers contenant des métaux lourds sont sélectionnées comme suit : Matières plastiques, Piles et accumulateurs, Capsules de surbouchage, Ferrailles, Papier, Cartons, Bois, Caoutchoucs, Cuirs, Verres, Textiles, Fines < 20 mm, Déchets spéciaux.

Les concentrations en métaux lourds dans les ordures ménagères sont mesurées au laboratoire à l'aide d'un **spectrophotomètre d'absorption atomique flamme**.

Les principales sources de métaux lourds dans les ordures ménagères standards sont les suivantes :

- ⇒ les **piles** apparaissent comme des porteurs importants des métaux lourds : 90 % du Hg, 45 % du Zn, 20 % du Ni.
- ⇒ les **ferrailles** contiennent environ 40 % du Pb, 30 % du Cu et 10 % du Cr présents dans les ordures ménagères.
- ⇒ les **fines** (< 20 mm) sont des vecteurs de pollution en ce qui concerne le Cu, le Pb, le Ni et le Zn.
- ⇒ le **papier** est une source notable de Pb et de Cr puisque des pourcentages respectifs de 20 % et de 10 % de ces 2 métaux peuvent être apportés par ce constituant.

2.4. GESTION DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES

2.4.1. Comment peut-on minimiser la production des déchets solides ?

La nouvelle notion à appliquer dans la gestion des déchets est basée sur le principe connu actuellement sous l'appellation des « **3RV-E** » avec, par ordre de priorité :

- la *réduction à la source* ;
- le *réemploi* ;
- le *recyclage* ;
- la *valorisation* ;
- l'*élimination*.

Cette nouvelle conception de la gestion des déchets vise l'économie de ressources, leur mise en valeur avec un impact minimum sur l'environnement et la santé humaine.

❑ **Réduction à la source**

Elle consiste à générer le moins de déchets lors de la fabrication, de la distribution et de l'utilisation du produit. Le citoyen peut contribuer à cette réduction en diminuant la quantité de déchets produits par l'utilisation de produits en *vrac* plutôt qu'*emballés*, des produits *durables* plutôt que *jetables*, etc.

❑ **Réemploi ou réutilisation**

On définit maintenant la *réutilisation* ou le *réemploi* par « l'*utilisation répétée* du produit sans modification de son apparence ou de ses propriétés ». C'est une méthode qui consiste à *prolonger la durée de vie* d'un produit en l'utilisant plusieurs fois. Par exemple, les bouteilles consignées qui peuvent être de nouveau utilisées après nettoyage.

❑ **Recyclage**

La notion de recyclage consiste à réintroduire les matériaux provenant de déchets dans un cycle de production ou processus de fabrication en remplacement total ou partiel d'une matière première vierge (Figure 9).

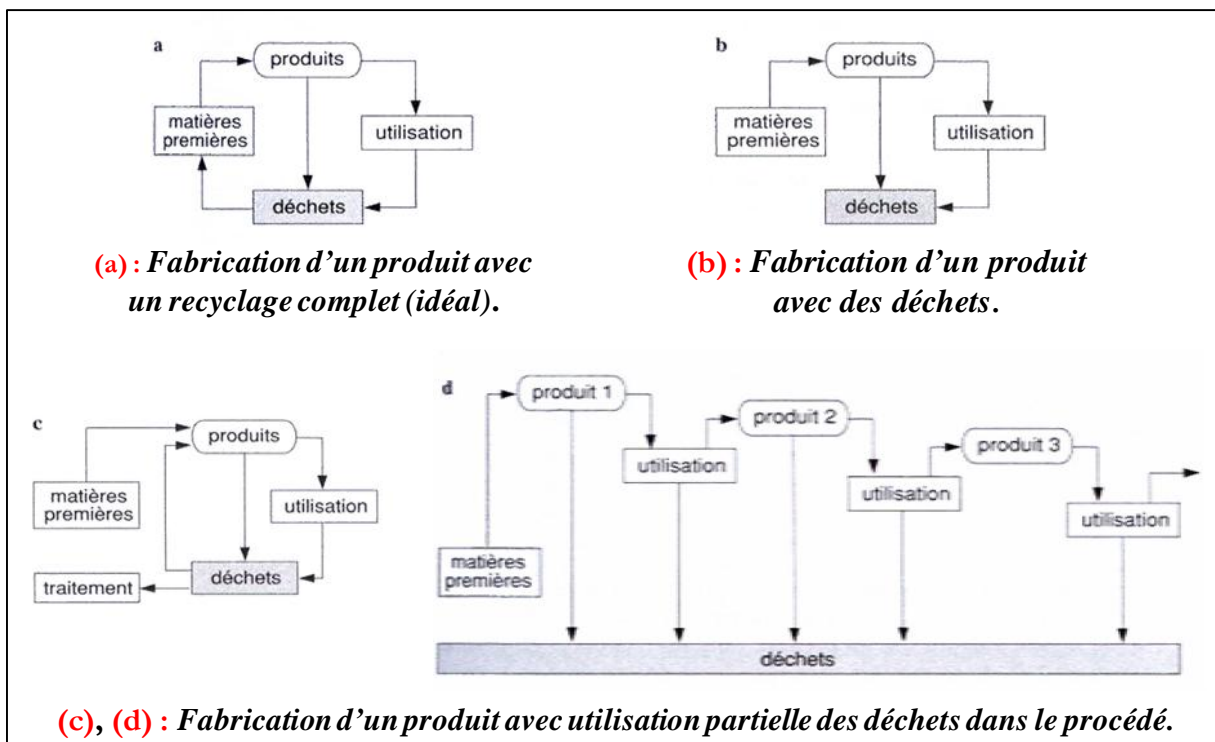


Figure 9 : Schématisation des différents modes de recyclage des déchets.

□ Valorisation

La valorisation des déchets est définie comme un mode de traitement qui consiste dans « le réemploi, le recyclage ou autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie ».

Types de valorisation (Figure 10)

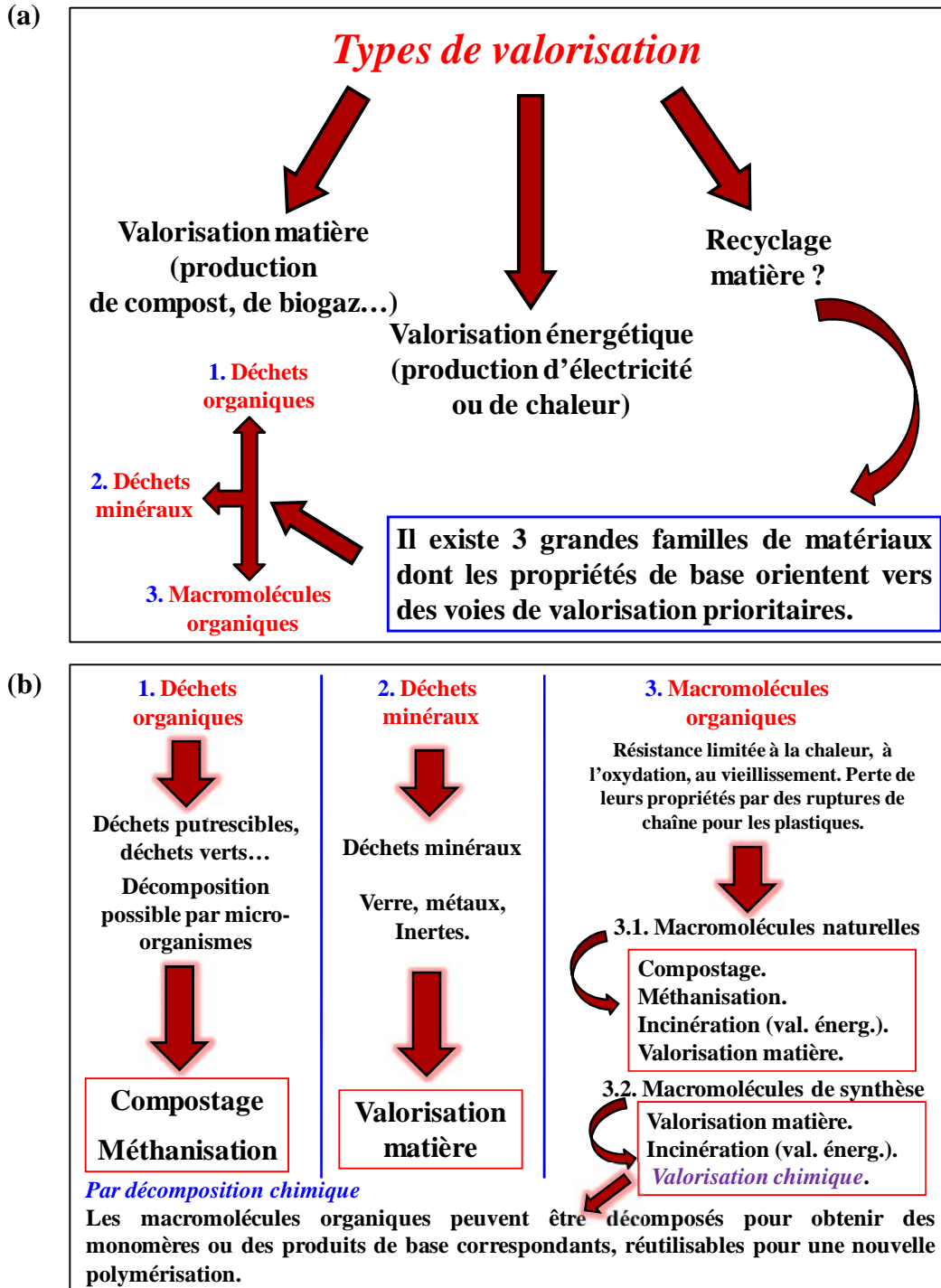


Figure 10 : (a) Types de valorisation, (b) Matériaux recyclables (plastiques, déchets minéraux et déchets organiques).

Exemples

a. Recyclage matière des déchets plastiques

Un matériau plastique est apte à être recyclé selon sa nature et ses propriétés physiques et physico-chimiques. On entend par produit plastique recyclable celui qui est susceptible d'être refondu et moulé ou injecté à nouveau.

Ce sont les produits *thermoplastiques* qui se prêtent à cette pratique, contrairement aux plastiques *thermorigides*, ou *thermodurcissables*, tels que le polyuréthane et le polyester. Les déchets thermoplastiques sont traités et transformés en *granulés* par triage, broyage, lavage, séchage et fonte dans une extrudeuse pour être régénérés.

Parmi les produits thermoplastiques répandus que l'on rencontre sur le marché national et qui sont recyclables, figurent :

- le PET (PolyEthylène Téréphtalate) ;
- le PE (PolyEthylène) ;
- le PVC (PolyChlorure de Vinyle) ;
- le PP (PolyPropylène) ;
- et les matériaux caoutchouteux.

La figure 11 suivante montre le cycle de vie des produits plastiques :



Figure 11 : Cycle de vie des produits plastiques.

b. Valorisation énergétique des matières plastiques

- ❖ Le PCI des matières plastiques (dans les ordures ménagères) est de l'ordre de 36,5 GJ/T
- ❖ Le PCI des ordures ménagères dans leur ensemble est de l'ordre de 8,5 GJ/T
- ❖ 10% de matières plastiques apportent 48,6% de l'énergie récupérable.

Le tableau 6 suivant donne la valeur du PCI de quelques matières plastiques.

Tableau 6 : PCI de quelques matières plastiques.

Plastique utilisé	PCI (GJ/T)
PVC rigide	18,4
Polyéthylène	46
Polypropylène	46
Polyester	21 à 33
Polystyrène	41

c. Valorisation énergétique des ordures ménagères (Figure 12)

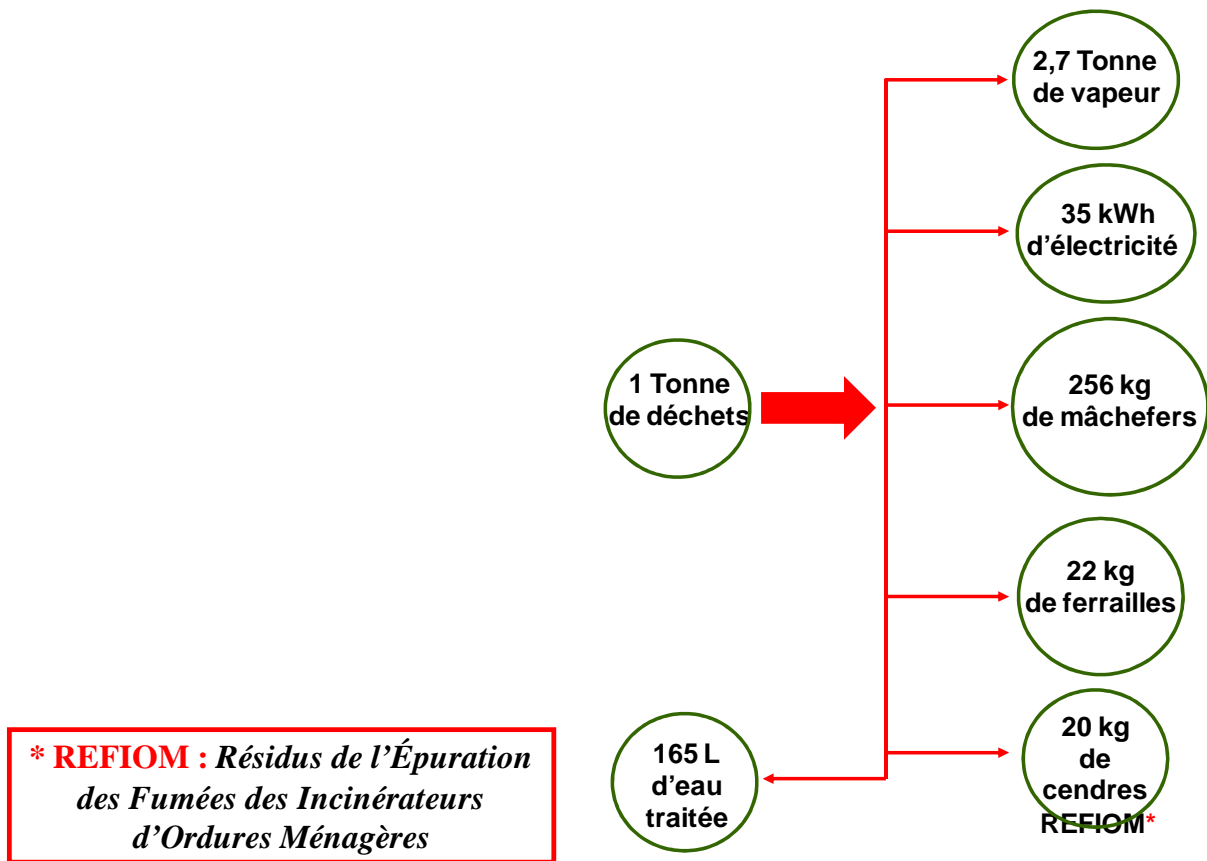


Figure 12 : Valorisation énergétique d'une tonne d'ordures ménagères (Production de vapeur et d'électricité).

❑ *Elimination*

- ❖ Toute opération ou traitement qui aboutit à des substances qui peuvent être soit restituées sans effet nocif au milieu naturel (air, eau, sol), soit réinsérées dans les circuits économiques à des fins de valorisation (cas des déchets solides).
- ❖ Dépollution, enlèvement, réduction du pouvoir toxique ou stockage.

2.4.2. Organigramme de la chaîne de gestion des déchets ménagers et assimilés (DMA)

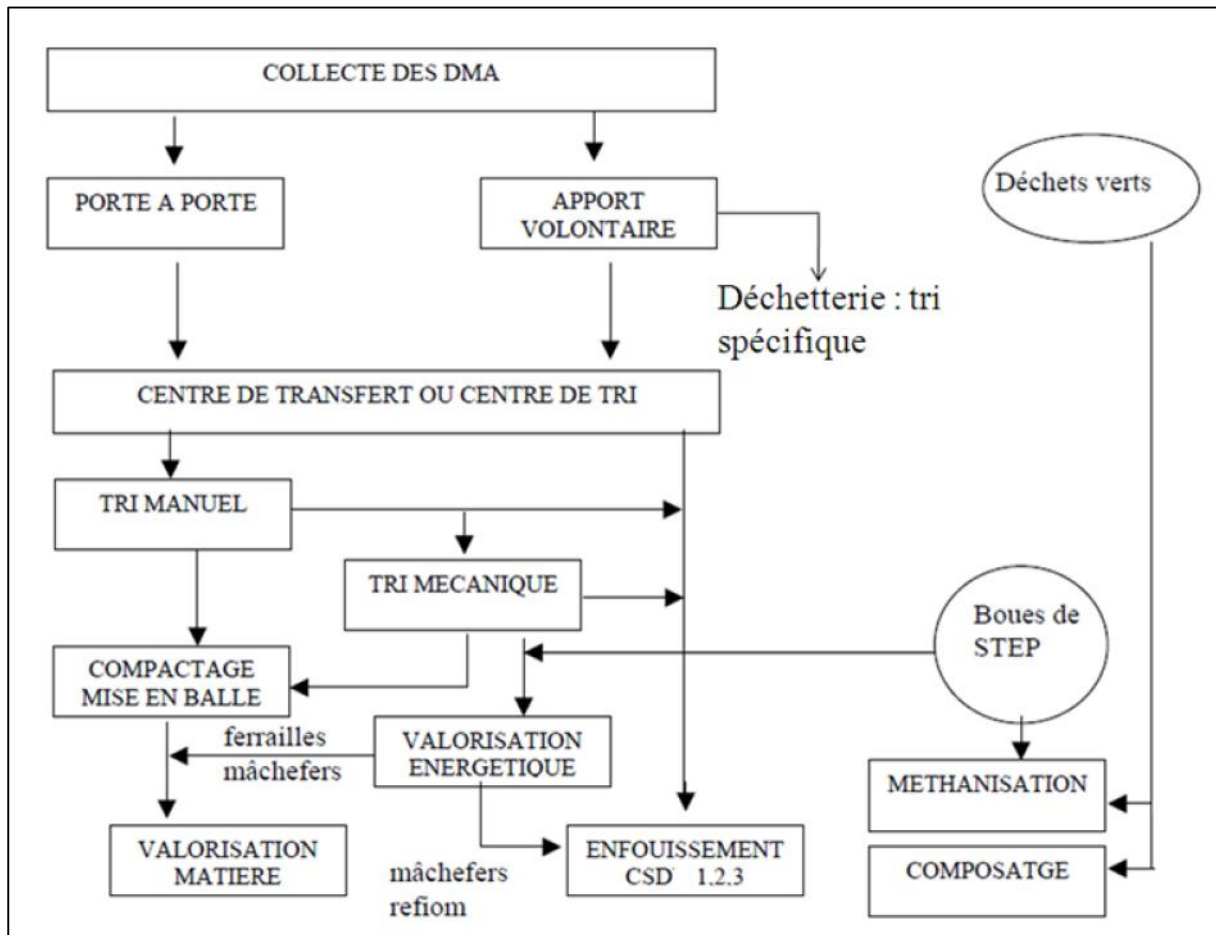


Figure 13 : Organigramme de la chaîne de traitement des déchets ménagers et assimilés.

2.4.3. Système de collecte des déchets ménagers et assimilés

2.4.3.1. Définitions

La collecte désigne l'ensemble des opérations qui consistent à regrouper les déchets, depuis leurs sources de production (maisons et appartements des habitants d'une commune) puis à les transporter jusqu'aux centres de traitement.

C'est aussi l'ensemble des opérations d'évacuation des déchets de l'entreprise vers un lieu de tri, de regroupement, de valorisation.

2.4.3.2. Types de collecte

On distingue deux manières de collecter les déchets ménagers :

- La collecte traditionnelle** : Ramassage de tous les déchets mélangés.
- La collecte sélective (ou séparative)** : Ramassage de certains déchets récupérables préalablement séparés (papiers et cartons, métaux, verre, ...), en vue d'une valorisation ou d'un traitement spécifique.

* CSD 1, 2, 3 : Centre de stockage des déchets de classe 1 ou 2 ou 3 selon la perméabilité du sol.

La figure 14 suivante illustre les deux types de collecte des déchets ménagers et assimilés ou ordures ménagères.

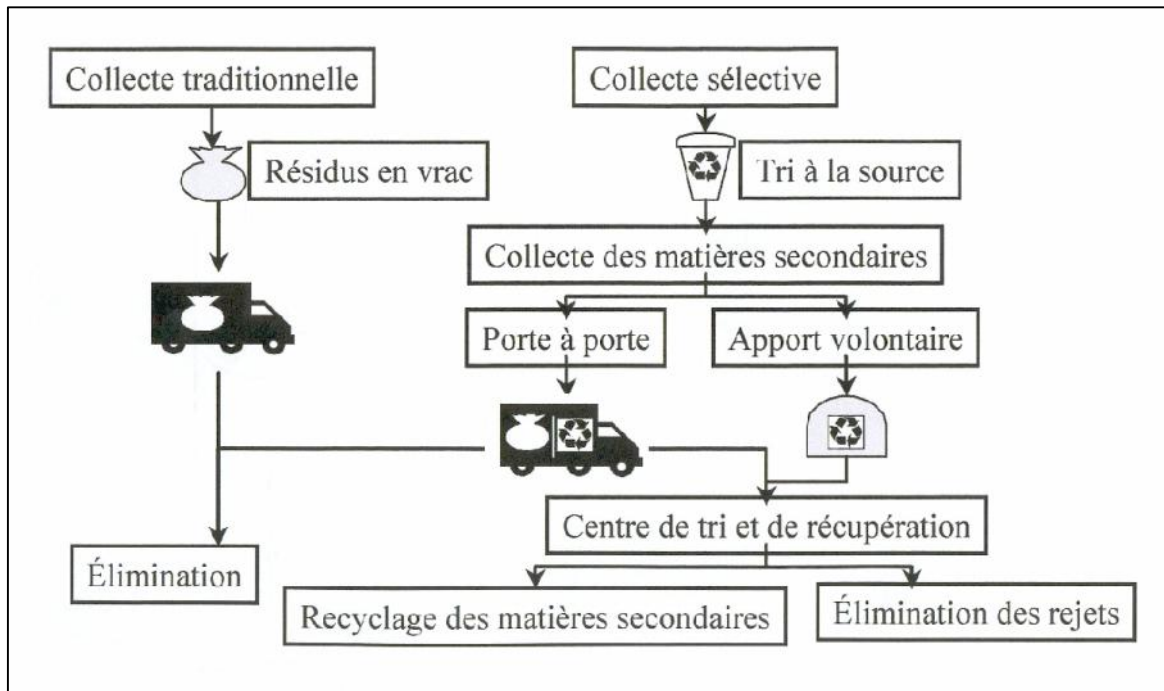


Figure 14 : Types de collecte des déchets ménagers et assimilés.

a.1. Caractéristiques de la collecte traditionnelle

- Ramassage régulier : hebdomadaire.
- Ramassage au porte à porte.
- Bennes ou camions de collecte spécialisés (Figure 15) pour :
 - le *tassement* des ordures ;
 - ou la collecte *hermétique* (par emploi de poubelles à fermeture étanche et exactement adaptable à l'orifice d'alimentation de la benne de transport) ;
 - ou la collecte *pneumatique*.

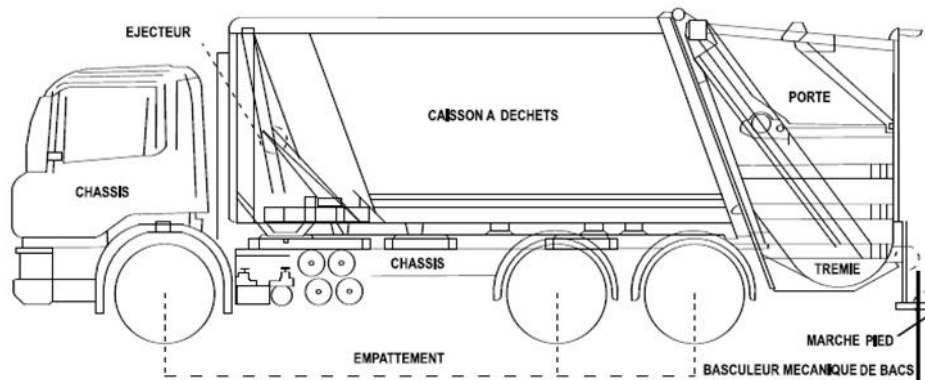


Figure 15 : Schématisation d'un véhicule à benne tasseuse pour le transport des ordures.

La benne est la partie du véhicule en contact avec les déchets. Elle se compose des éléments suivants : une trémie de réception des déchets, un système de compaction, un compartiment étanche et un dispositif de vidage.

a.2. La collecte pneumatique

Ce système d'origine suédoise (procédé CENTRALSUG) consiste en un transport des déchets depuis le vide-ordures jusqu'au lieu de stockage et de traitement par conduites pneumatiques (par jet d'air comprimé) souterraines (Figure 16). Ce procédé exclut toute intervention humaine : il a des répercussions bénéfiques sur l'hygiène et permet une diminution des inconvénients au trafic routier. Néanmoins, ce procédé coûte évidemment très cher, de plus il est quasi impossible à réaliser dans des constructions existantes.



Figure 16 : Schéma de principe de la collecte pneumatique des ordures ménagères.

a.3. Contenants des déchets ménagers et assimilés

- Déchets en vrac.
- Sacs perdus.
- Poubelles.
- Bacs roulants de 120 à 1100 litres.

a.4. Volume et nombre de poubelles

Le volume V du récipient nécessaire pour la production d'ordure d'un immeuble par exemple est donné par la formule (8) suivante :

$$V = \frac{N_H \cdot Q}{\dots} \cdot t \quad (8)$$

où,

N_H : nombre de personnes habitant l'immeuble.

Q : quantité de déchets produite par habitant et par jour (kg/hab/j).

\dots : poids volumique des ordures contenues dans la poubelle (kg/L).

t : intervalle de temps entre deux collectes (j).

Pour connaître le nombre de récipients, il suffit de savoir la capacité de la poubelle (ou récipient). Soit V le volume de la poubelle choisie, le nombre m de poubelles nécessaire se détermine comme suit :

$$m = \frac{V}{V'} \quad (9)$$

b. Modes de collecte sélective

Actuellement, il existe deux grands de collecte sélective : le porte à porte (PAP) et l'apport volontaire (AP).

b.1. Collecte sélective en porte à porte

Elle repose sur un tri à la source effectué par l'habitant et sur la mise en place de contenants spécifiques (sacs ou bacs). Elle est en général multi-matériaux. Elle a pour cible soit les déchets recyclables propres et secs (*poubelle bleue*) en vue d'une valorisation matière, soit les fermentescibles (*poubelle verte*) en vue d'une valorisation organique.

b.2. Collecte sélective par apport volontaire (ou points de regroupement)

C'est une collecte mono-matériaux : l'utilisateur doit déposer des déchets préalablement séparés des autres dans un conteneur, ou un caisson métallique (cas d'une *déchetterie*), prévu spécialement à cet effet et installé dans un lieu public. C'est le cas par exemple quand un usager vient déposer ses bouteilles de verre dans un conteneur à verre.

2.4.4. Qu'est ce qu'une déchetterie ?

Une *déchetterie*, ou *déchèterie*, est un espace aménagé, gardienné et clôturé pour l'apport volontaire de déchets (Figure 17). Cet apport volontaire permet de trier les déchets *valorisables*, les déchets *spéciaux* et d'éviter les *dépôts sauvages*. La déchetterie permet également aux habitants de se débarrasser de certains déchets qui sont trop *encombrants* ou ne pouvant être mis dans les poubelles.

Étant un lieu de dépôt sélectif et épisodique, elle joue un rôle de collecte, de transit et d'orientation des déchets vers une destination adaptée à leur nature : *valorisation*, *compostage*, *incinération* ou *traitement*.



Figure 17 : Vue d'une déchetterie.

La figure 18 ci-après illustre les différents types de déchets qui sont admis dans une déchetterie.

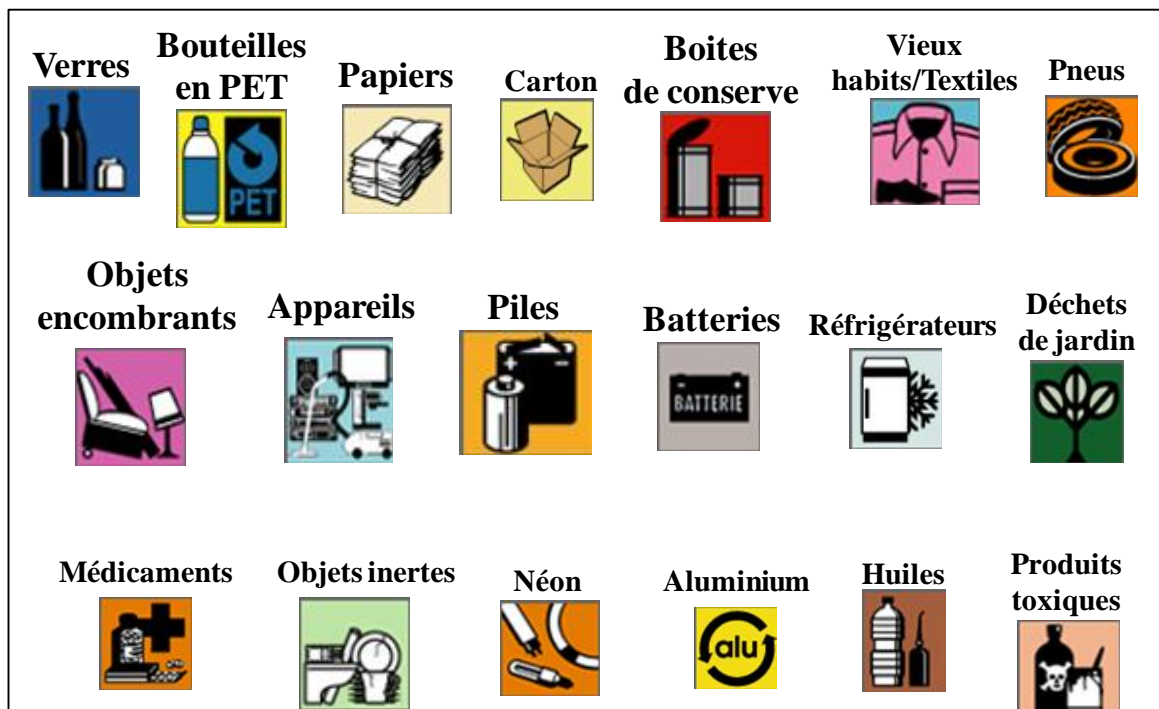


Figure 18 : Types de déchets admis dans une déchetterie.

2.4.4.1. Types de déchetterie

On distingue trois types de déchetterie :

- ❖ les « **petites** » déchetteries rurales (750 m², 4 bennes, pour 10.000 habitants) ;
- ❖ les déchetteries « **moyennes** » implantées en périphérie de commune urbaine (1750 m², 8 bennes, pour 15.000 habitants) ;
- ❖ les « **grandes** » déchetteries urbaines créées pour une population urbaine dense (3500 m², 12 bennes, pour 30.000 habitants).

2.4.4.2. Déchetterie industrielle

Contrairement à une déchetterie habituelle, une déchetterie industrielle ressemble à un « chantier de récupération » où l'espace est ouvert. Vu la nature, le volume et l'hétérogénéité des déchets industriels, le site est aménagé en box avec une large aire de manœuvre pour le déchargement et le rechargement des matériaux (Figure 19).

La déchetterie industrielle peut également contenir des bennes qui seront directement retirés par les récupérateurs. Le dimensionnement de ce type déchetterie dépend étroitement des quantités attendues de déchets, des besoins et spécificités de la zone géographique couverte.

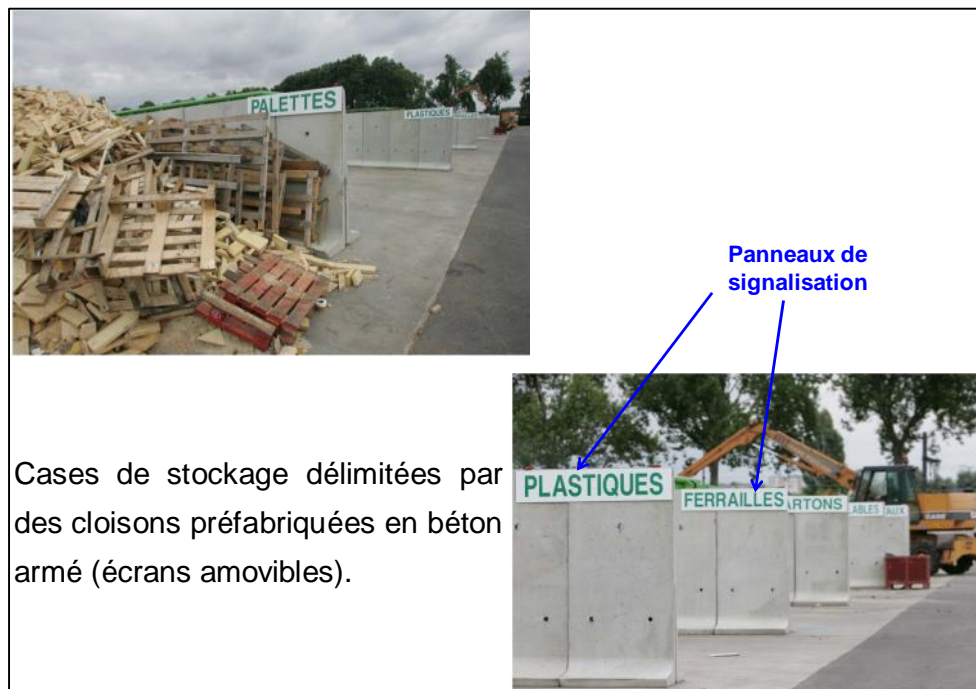


Figure 19 : Répartition des déchets dans une déchetterie industrielle.

Exemple de déchetterie industrielle

La déchetterie industrielle de **Blida** en activité depuis *juillet 2004* et spécialisée dans le recyclage et la valorisation des déchets industriels.

2.4.5. Prétraitement des déchets ménagers et assimilés (broyage et tri)

2.4.5.1. Broyage des déchets ménagers et assimilés

Le broyage permet de transformer une masse hétérogène et volumineuse de déchets en particules plus fines et plus homogènes, ce qui a pour effet de réduire l'encombrement, de faciliter le transport vers le milieu de stockage ou de traitement, d'améliorer le rendement de certains traitements ultérieurs (épandage, compostage, incinération, ...).

2.4.5.2. Types de broyeurs

a. Broyeurs à marteaux

Ce type de broyeur, très répandu, utilise l'énergie cinétique de marteaux métalliques montés sur un axe tournant à très grande vitesse (1000 à 2300 tours/min). Les déchets sont introduits au sommet du broyeur par un entonnoir de chargement. L'écrasement produit par l'impact du marteau sur les déchets, provoque la réduction de ceux-ci (Figure 20).

b. Tambours à criblage

L'organe principal de ce type de broyeur est un tambour rotatif cylindrique couché presque horizontalement, tournant à vitesse réduite dans un deuxième cylindre évoluant à vitesse plus faible. Le cylindre intérieur comporte alternativement des zones à parois percées de trous (cribles) et des zones à parois pleines (zones de broyage). L'appareil utilise le caractère abrasif des ordures ménagères et les réduit par frottement (Figure 21).

c. Râpes

Cet appareil, conçu et utilisé aux Pays-Bas est constitué d'un cylindre fixe à double fond (Figure 22). Le fond supérieur est divisé en sections pourvues alternativement soit de trous (cribles), soit de pointes d'acier-manganèse d'environ 5 cm de long (zones de déchiquetage).

Dans l'axe du cylindre est monté un arbre tournant, portant des bras horizontaux en acier. Ces bras entraînent les déchets et les pressent contre les pointes d'acier où ils seront déchiquetés. Les déchets bruts sont introduits dans la partie supérieure du broyeur. Le broyat passe par les mailles des cribles et tombe sur le fond inférieur d'où il est évacué, de façon continue, par raclage.

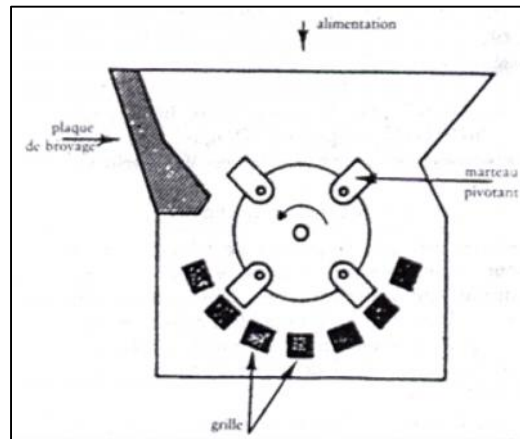


Figure 20 : Broyeur à marteaux.

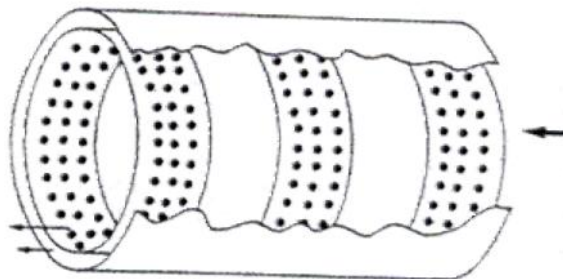


Figure 21 : Tambour à criblage.

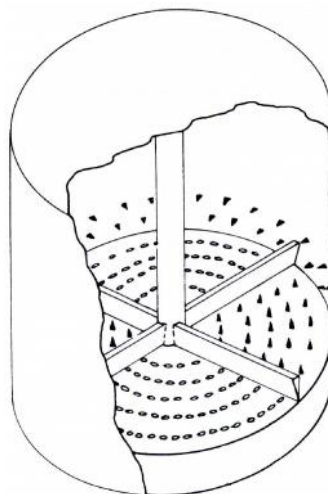


Figure 22 : Râpe de criblage.

2.4.5.3. Tri (ou séparation) des déchets ménagers et assimilés

Le tri des déchets est intéressant à divers titres :

- La récupération et recyclage de certains composants (verre, métaux, papier matières plastiques, etc.) ;
- L'élimination de matières gênantes pour les procédés de traitement ultérieurs.

2.4.5.3.1. Centres de tri

Un centre de tri comporte quatre parties :

- une zone de réception des déchets et de chargement sur les chaînes de tri ;
- une zone de tri mécanisé ;
- une zone de tri manuel ;
- une zone de conditionnement des produits à valoriser.

2.4.5.3.2. Principaux procédés de séparation

Les procédés de triage mettent à profit les différences d'une propriété, généralement physique, caractérisant les composants des déchets : taille, densité, susceptibilité magnétique, conductivité électrique... Dans la quasi-totalité des cas, les déchets bruts sont d'abord broyés grossièrement avant de subir les diverses étapes du triage en catégories.

On distingue deux types de procédés :

I. Procédés de séparation par voie sèche (cribles, éjecteurs balistiques, séparateurs pneumatiques, cyclones, séparateurs électrostatiques et séparateurs optiques).

II. Procédés de séparation par voie humide (pulpeurs, séparateurs par liqueur dense et séparateurs par flottation).

I. Procédés de séparation par voie sèche

I.1. Cribles

Ce procédé utilise les différences existant dans la taille des composants. Les appareils comportent des tamis dont les mailles sont choisies en fonction des dimensions des matières à séparer. Il existe des cribles rotatifs ou les trommels (Figure 23) et des cribles vibrants ou les tamis (Figure 24).

I.2. Éjecteurs balistiques (par jet d'air)

L'éjection balistique des constituants lourds de grande inertie (métaux, verre) est réalisée en appliquant aux déchets, un mouvement rotatif de vitesse suffisante (Figure 25). Cette séparation est mise en pratique dans de nombreux broyeurs (broyeurs à marteaux).

Le principe de son fonctionnement se base sur de multiples secousses et projections :

- Les matériaux plats et lourds (cartons) restent collés et remontent progressivement dans la partie supérieure de l'équipement.
- Les matériaux creux et légers (emballages plastiques (PEHD, PET) et emballages métalliques) rebondissent et chutent progressivement au fur et à mesure des secousses dans la partie inférieure de l'équipement, Les fines sont séparées par la suite du flux.

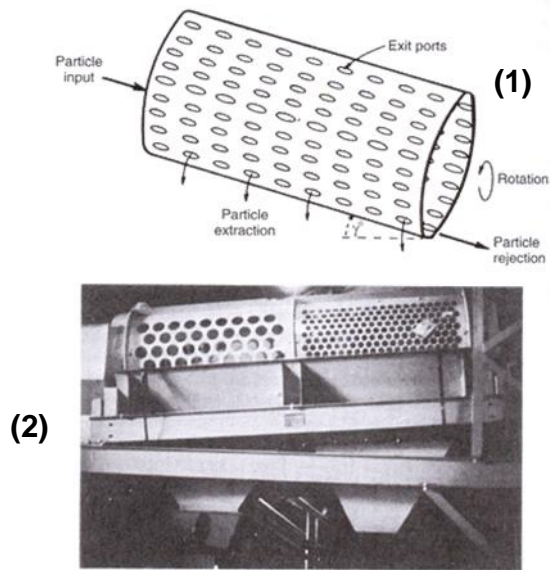


Figure 23 : (1), (2) Crible rotatif « Trommel ».

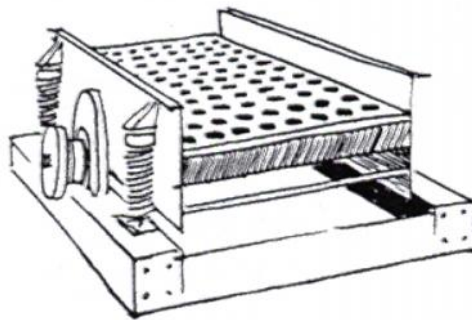


Figure 24 : Crible vibrant « tamis ».

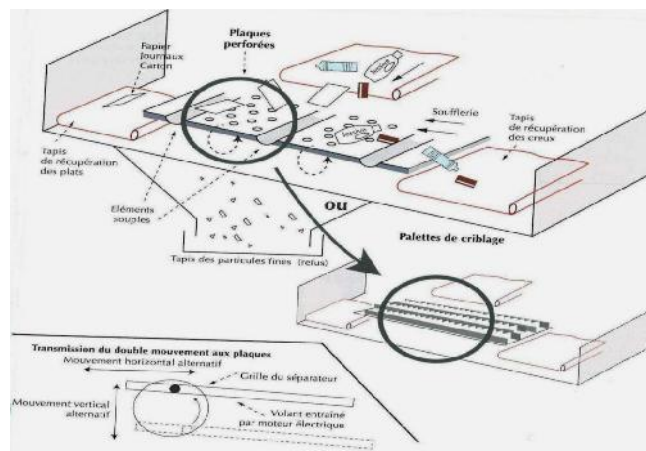


Figure 25 : Schéma de principe du séparateur balistique.

I.3. Séparateurs pneumatiques

Dans ce procédé très utilisé, les déchets sont déversés au sommet d'une tour où circule un flux d'air à contre-courant. Les matériaux denses et/ou dont la forme présente le moins de résistance à l'écoulement de l'air arrivent les premières au bas de la tour. Les matières plus légères sont évacuées par des canalisations latérales placées à diverses hauteurs de la colonne.

I.4. Cyclones

Cet appareil ne s'applique pas directement aux déchets bruts mais à des fractions légères déjà séparées. L'effluent est mis en rotation dans un cylindre, les poussières et les particules fines de verre, sable, etc. s'écoulent dans l'espace annulaire et sont ainsi séparées des autres constituants légers (papiers, matières plastiques, ...) de plus grandes dimensions.

I.5. Séparateurs magnétiques

Ces appareils permettent la séparation des métaux ferreux en mettant à profit la susceptibilité magnétique de ceux-ci. Le champ magnétique est obtenu par un électro-aimant ou un aimant magnétique.

I.6. Séparateurs électrostatiques

Destinés à séparer les fractions lourdes minérales, ces trieurs créent une charge électrostatique à la surface des matériaux cristallins placés dans leur champ : métaux, roches, pierres, etc.

I.7. Séparateurs optiques

La technologie de tri optique se base sur le principe de détection des couleurs dans le domaine du visible où la longueur d'onde est située entre 400 et 800 nm.

La spectrométrie dans le visible est bien adaptée au tri des matières plastiques par couleur, par exemple le tri du PET clair/azuré et coloré, des papiers cartons (détection des couleurs brunes fortement présentes dans les emballages et des couleurs grises plutôt présentes dans les journaux) et des métaux.

II. Procédés de séparation par voie humide

II.1. Pulpeurs

Les déchets sont introduits dans une cuve remplie d'eau dont le fond est garni d'une grille perforée. Sous l'action de l'eau et de l'agitation à grande vitesse, tous les matériaux friables et pulpables sont réduits à des dimensions très faibles, le refus (verre, métaux, ...) retenu sur le crible est éliminé. La pâte obtenue traverse le tamis, elle est pompable, elle contient presque toute la matière organique (papier, textiles, matières plastiques, caoutchouc, bois, déchets alimentaires et végétaux). Ce procédé particulièrement bien adapté aux déchets ménagers très riches en papiers est d'origine américaine (procédé Black-Clawson).

II.2. Séparateurs par liqueur dense

Ces procédés sont adaptés non aux déchets bruts mais à des fractions déjà séparées : verre, céramique, métaux non ferreux. Ils consistent à immerger la fraction de déchets dans une solution dont le poids spécifique se situe entre ceux des constituants à séparer : les matériaux

plus légers (verre) dans ce milieu, flottent et sont récupérés par raclage ou débordement; les lourds tombent au fond de la cuve.

II.3. Séparateurs par flottation

La flottation convient pour la séparation des verres, céramiques, pierres, matières inertes de petites dimensions. En milieu aqueux, un traitement chimique superficiel rend certains composés (verre) hydrofuges et favorise leur accrochage à des bulles d'air. Celles-ci se rassemblent à la surface de l'eau et forment une mousse aisément récupérable.

L'appareillage consiste en une grande cuve munie d'un agitateur destiné à maintenir les matières en suspension. Les bulles de gaz sont créées par injection d'air.

Chapitre III

Mise en décharge des déchets ménagers et assimilés

3.1. DECHARGE CLASSIQUE OU INCONTROLEE

La décharge classique (Figure 26) a été mise au point vers 1920 par deux ingénieurs Anglais : J.C. Dawes et M. Call. Le principe consiste à entasser, de façon rationnelle, les déchets au sein de l'ouvrage. L'entassement se fait progressivement en superposant alternativement couches de déchets et matières inertes (sable, mâchefer, cendre...). Le tout est recouvert par de la terre.



Figure 26 : (a), (b) Décharge classique ou incontrôlée.

Ce type de décharge est sans doute le mode d'élimination terrestre le plus couramment appliqué dans les pays en développement. Il n'est précédé d'aucune étude d'impact ni analyse environnementale et les déchets sont mélangés sans tri d'où le nom de la « *décharge incontrôlée* » ou « *décharge à ciel ouvert* » ou « *décharge sauvage* ».

Exemples de quelques décharges Algériennes

L'évolution qu'a connue l'Algérie, notamment en matière d'industrialisation, de mode de vie et de la consommation s'est répercutée sur l'apparition de plusieurs décharges parmi lesquelles, on cite celle de :

- ❖ Oued Smar d'Alger.
- ❖ Chiffa de Blida.
- ❖ Hcheme de Mostaganem.
- ❖ El Kerma d'Oran.
- ❖ Safsaf de Tlemcen.

3.2. UNE DECHARGE EST UN BIOREACTEUR A GERER

Le bioréacteur est le siège d'une activité microbiologique. Il est caractérisé par les flux entrants, les flux sortants, ainsi que par la population microbienne. Le développement de celle-ci dépendra aussi de paramètres tels que la température, le pH, le potentiel redox, l'humidité, ainsi que la présence d'inhibiteurs.

La décharge est un très vaste réacteur biochimique où se retrouvent mélangés des millions de composés chimiques, organiques et minéraux, interagissant les uns avec les autres sous l'influence d'agents naturels (pluies, micro-organisme). Ces réactions aboutissent à une transformation biologique, physique et chimique des déchets avec libération (et consommation) de liquides et de gaz. Cette transformation se trouve presque achevée en un siècle.

Très schématiquement, une décharge peut être caractérisée comme indiqué (Figure 27) par un flux entrant (eau de pluie et déchets), un flux sortant (biogaz et lixiviats) et une population microbienne.

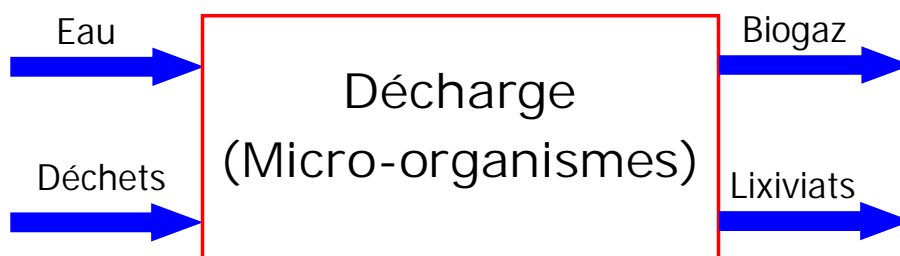


Figure 27 : Représentation schématique d'une décharge.

3.3. LES EFFLUENTS DE DECHARGE : LIXIVIATS ET BIOGAZ

3.3.1. Les lixiviats de décharges

On désigne par lixiviats, eaux usées appelées encore *percolats*, *lessivats* ou *jus de décharge*, les eaux qui ont percolé à travers les déchets en se chargeant physiquement et surtout chimiquement de substances minérales et organiques. Les lixiviats sont produits par le contact entre les déchets et l'eau : essentiellement l'eau de pluie et l'eau contenue dans les déchets.

Les lixiviats peuvent atteindre la nappe phréatique et ainsi se propager dans d'autres milieux. Ils peuvent donc engendrer des pollutions et des dysfonctionnements dans les écosystèmes voisins (notamment en intégrant la chaîne alimentaire par leur accumulation dans les végétaux).

Les jus de décharge sont souvent assimilés à des rejets industriels complexes contenant à la fois des polluants toxiques : organiques et minérales. Si leur présence risque d'entraîner la contamination de sources d'eau potable ou une pollution de surface, ils doivent nécessairement subir un traitement avant leur rejet dans le milieu naturel.

Les procédés de traitement appliqués aux percolats de décharge sont nombreux, à savoir :

a. Traitement biologique aérobie ou anaérobie

C'est le procédé le plus utilisé pour l'élimination de la pollution organique. Toutes les techniques de traitement des eaux usées sont applicables aux lixiviats : lagunage; boues activées, lits bactériens,...

b. Oxydation chimique

Les principaux oxydants sont l’ozone, le peroxyde d’hydrogène, le chlore, l’hypochlorite de calcium et le permanganate de potassium.

c. Adsorption

Le charbon actif est le matériau le plus utilisé pour le traitement physico-chimique des lixiviats. Néanmoins, en raison de son coût relativement élevé et de la forte charge organique du jus de décharge, il est conseillé de l’utiliser conjointement à d’autres procédés.

d. Coagulation-floculation

Les réactifs les plus employés, pour la coagulation-floculation des lixiviats, sont le sulfate d’alumine ou alun, le sulfate ferreux, le chlorure ferrique et le chlorosulfate ferrique.

e. Procédés à membrane : osmose inverse

C’est un procédé connu et d’une utilité certaine dans beaucoup de secteurs de l’industrie et dans le traitement des effluents les plus pollués. Les résidus organiques et les solides dissous y sont concentrés (concentrât) et le procédé engendre un flux d’eau traitée (perméat) ne contenant plus que de minimales concentrations de contaminants et possédant les normes d’une eau pouvant être rejetée dans un milieu aquatique naturel.

3.3.2. Le biogaz de décharges

Le biogaz est produit par la décomposition anaérobie des déchets organiques. On ne le trouve donc que dans des centres de stockage de classe II ou dans d’anciennes décharges recevant des déchets mélangés. La production s’effectue comme dans un biodigester avec quatre phases : *hydrolyse*, *acidogenèse*, *acétogenèse* et *méthanogenèse* (cf. Chapitre IV). Ces réactions biochimiques s’opèrent à une température inférieure à celle des biodigesteurs.

Le tableau 7 suivant donne la composition moyenne du biogaz de décharge constitué essentiellement de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂), considérés comme gaz majoritaires résultant de la digestion anaérobie des déchets.

Tableau 7 : Composition moyenne du biogaz de décharge (% volumique).

Gaz	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 %
NH ₃	0	0,35.10 ⁻⁶ vol.
H ₂ O	4 % environ	

Dans une décharge, la composition du biogaz émis varie au cours du temps, en fonction des réactions biochimiques dominantes. Le diagramme typique d'évolution de la composition du biogaz est présenté sur la figure 28. En régime stable, le biogaz contient entre 50 et 70 % de CH₄ et entre 30 et 50 % de CO₂.

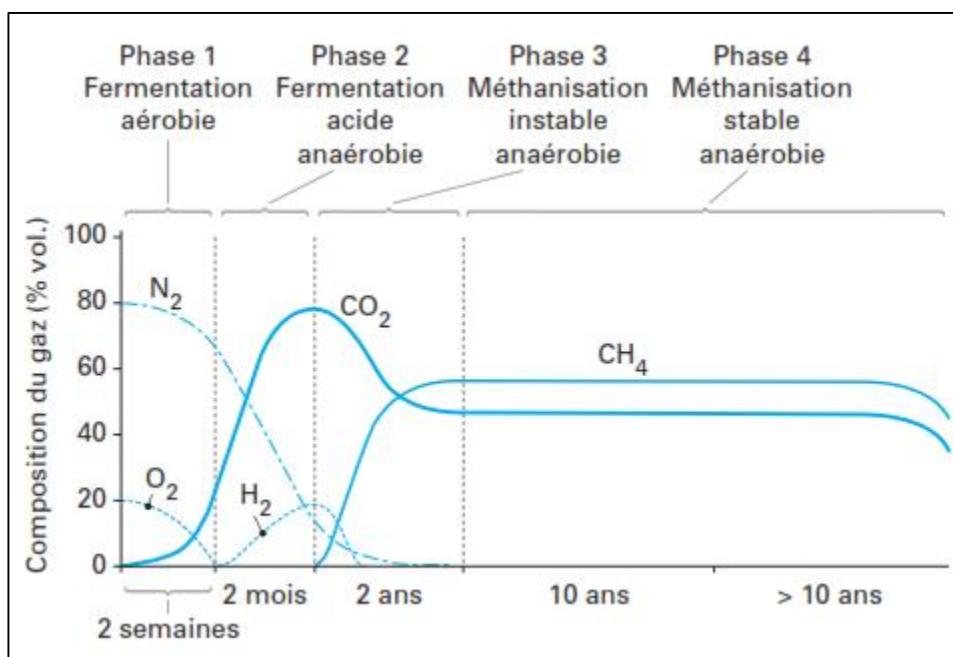
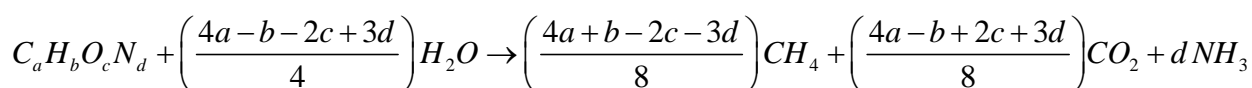


Figure 28 : Schéma d'évolution de la production gazeuse dans une décharge.

3.3.2.1. Estimation de la production de biogaz par réaction stœchiométrique

Le volume total de biogaz produit par voie anaérobie peut être estimé par réaction stœchiométrique. En supposant que la composition des déchets organiques est connue et qu'il s'agit d'une conversion totale des réactifs en produits, l'on peut estimer la quantité des gaz produits par la réaction chimique suivante :



En observant les différentes phases de production de gaz, on remarque que de manière générale on trouve deux sortes de matériel dégradable, celui à dégradation rapide et un autre à dégradation lente. Par exemple, ceux à dégradation rapide incluent: les déchets de table, les journaux et le papier. Par contre, ceux à dégradation lente comprennent: le caoutchouc, le cuir, le bois et le plastique. Empiriquement, la formule **C₆₈H₁₁₁O₅₀N** peut décrire les déchets rapidement décomposables, tandis que la formule **C₂₀H₂₉O₉N** peut être utilisée pour les déchets lentement biodégradables.

3.3.2.2. Captage du biogaz

La migration du biogaz au sein du massif de déchets est régie par la perméabilité du milieu et son caractère hétérogène lié à la nature même des déchets et à leur mode d'exploitation en couches. Les gaz diffusent suivant des mécanismes de gradient de pression entre l'atmosphère et l'intérieur du massif.

Le biogaz est capté pour plusieurs raisons :

- ❖ pour réduire les émissions de gaz toxiques dans l'atmosphère ;
- ❖ pour réduire la migration de gaz dans le sous-sol ;
- ❖ pour diminuer les odeurs ;
- ❖ et pour faciliter la valorisation de l'énergie à partir des gaz.

La conception du système de captage du biogaz, désignant en fait le système de drainage des gaz internes au massif de déchets, dépend des choix pris pour le mode d'exploitation du site. Il existe deux méthodes pour le contrôle et le captage du biogaz (Figure 29) : le contrôle passif (sans apport d'énergie) et le contrôle actif (avec apport d'énergie).

1. **Contrôle passif** : puits d'extraction par l'installation des tubes perforés en PVC de diamètre entre 10 et 15 cm et des hauteurs allant jusqu'à 2/3 de l'hauteur totale du site. Une ceinture ou pipeline fermée et non-perforée relié en surface les puits d'extraction verticaux. La densité recommandée de puits d'extraction est de 1/5 m².

2. **Contrôle actif** : le même système mais avec un mécanisme de pompage à vide qui extrait le biogaz collecté à l'aide des puits d'extraction profonds reliés par un tuyau collecteur à une soufflerie qui fournit le gaz à des fins énergétiques ou à un bruleur sur le site ou tout simplement le rejette dans l'atmosphère. Les paramètres qui influencent cette méthode sont : le nombre et la capacité des pompes, la densité/m² de puits d'extraction, la perte de charge dans le système de collection, la pression des gaz due à l'hausse de température (50 °C et plus).

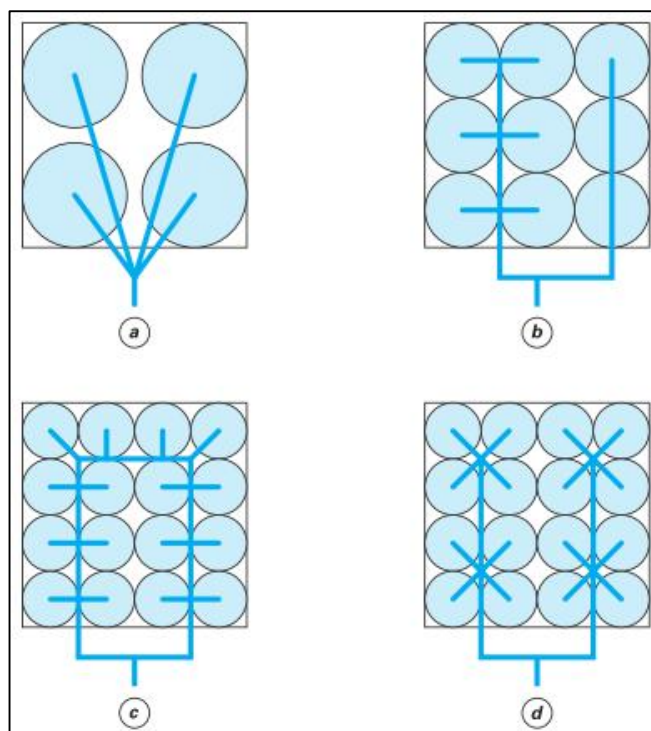


Figure 29 : Dispositifs de collecte du biogaz : (a) puits connectés à une installation d'extraction par un tuyau séparé, (b) puits connectés à une ou plusieurs conduites (dispositif assez fréquent), (c) puits connectés à une conduite en anneau, (d) puits connectés entre eux, puis reliés par groupe à l'unité d'extraction (dispositif utilisé lorsque le nombre de puits est important).

3.3.2.3. Techniques d'extraction et de destruction du biogaz

Le traitement et le conditionnement du biogaz comportent plusieurs étapes. Le biogaz est tout d'abord aspiré au moyen d'un système d'extraction dont le débit fait l'objet d'une régulation qui conditionne le taux de captage et la qualité du gaz. Les gaz sont ensuite injectés dans une unité d'incinération.

Cette unité d'incinération a pour fonction de convertir les composés inflammables ou toxiques du gaz en composés inertes. Il s'agit principalement d'un système constitué par une **torchère** dont les performances sont liées à la température de la flamme et à la qualité de combustion.

L'ensemble d'une installation type de collecte, transport et élimination du biogaz est représenté sur la figure 30.

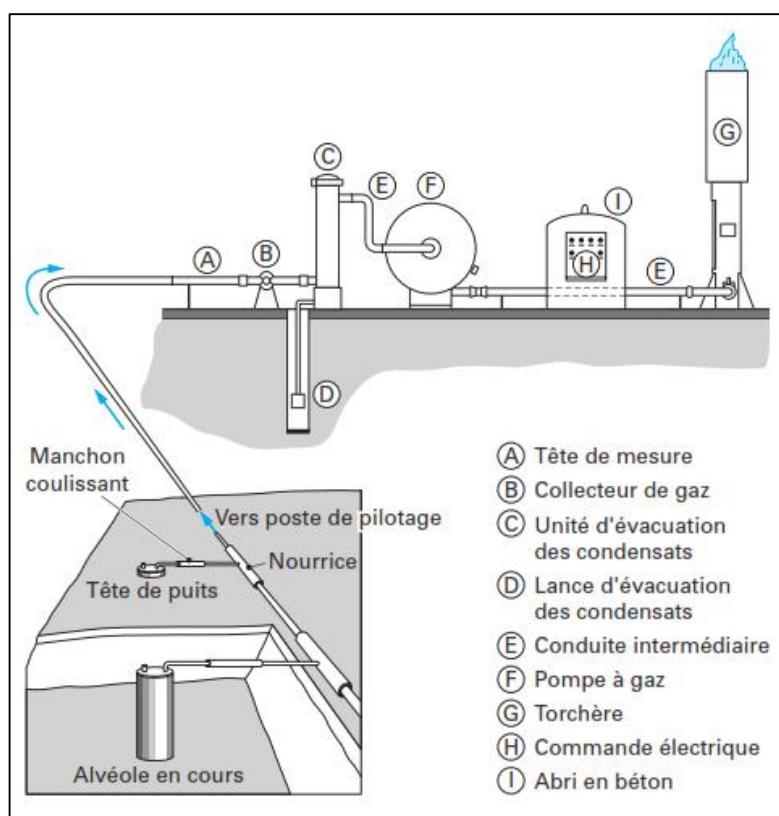


Figure 30 : Installation type de collecte, transport et élimination du biogaz.

3.3.2.4. Valorisation du biogaz

Compte tenu des propriétés énergétiques du biogaz, il peut être plus intéressant de le valoriser que de l'éliminer. Les principaux modes de valorisation du biogaz sont les suivants :

❖ La production d'énergie électrique

Une option de réutilisation du gaz peut être de produire l'électricité. Dans ce cas, les gaz servent comme carburant pour le générateur. L'électricité produite est utilisée soit sur place ou vendue au système local ou régional de distribution d'énergie. Le biogaz est converti en énergie avec une efficacité de 35 %.

❖ **La production de vapeur ou d'eau chaude**

Le biogaz peut être brûlé dans une chaudière à vapeur. Cette technique a un rendement plus élevé, jusqu'à 85 %. En outre, le biogaz peut être utilisé pour la production d'eau chaude (rendement jusqu'à 90 %).

❖ **Le nettoyage et la conversion de biogaz en gaz naturel**

Une autre option peut être de nettoyer et comprimer le gaz naturel comme source d'approvisionnement de carburant pour une utilisation sur ou hors site. En raison du coût d'investissement élevé, cette approche n'est utile que dans le cas de la grande production de biogaz.

❖ **La co-génération (production d'électricité et de chaleur)**

3.4. DECHARGE CONTROLEE (CET OU CSD)

Ce type de décharge est appelé centre d'enfouissement technique (CET) ou centre de stockage des déchets (CSD) par les francophones et « *sanitary landfill* » par les Anglo-saxons. Le principe reste cependant similaire à celui de la décharge classique. La différence se situe au niveau de la conception de l'ouvrage. Avant le démarrage de l'enfouissement des déchets, le fond et les côtés de la décharge sont recouverts successivement de couches de sable, de bentonite et/ou d'argile, de polyéthylène (PEHD) étanche et de sable (couche drainante).

3.4.1. Classification des centres d'enfouissement techniques

Un Centre d'Enfouissement Technique (CET) est une installation permettant de stocker les déchets acceptés en les isolant du milieu qui les entoure et d'éviter toute contamination du sol et de la nappe phréatique. Créer un site d'enfouissement répond à des critères techniques incontournables : nature géologique des sols, absence de nuisances pour les riverains, accessibilité, maîtrise foncière par les collectivités publiques. Il existe une classification des installations de stockage de déchets, réparties en 3 classes (Figure 31) :

- ❖ **CET de classe 1** : destiné à accueillir les déchets industriels dangereux (cf. Chapitre VII).
- ❖ **CET de classe 2** : reçoit les ordures ménagères et déchets assimilés.
- ❖ **CET de classe 3** : reçoit les déchets inertes : terres, gravats, béton concassé, etc.

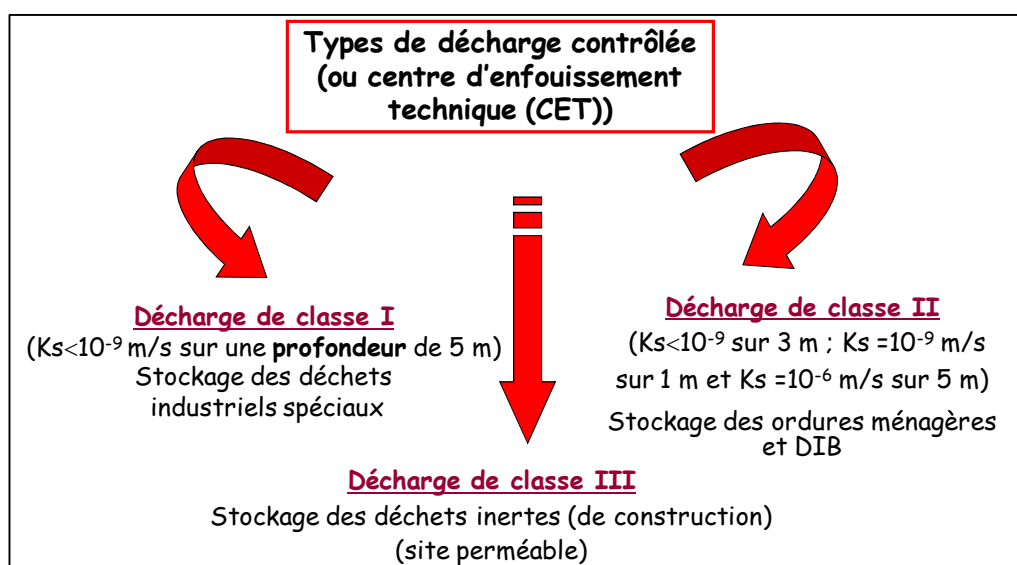


Figure 31 : Classification des centres d'enfouissement techniques (CET) en fonction de la perméabilité du sol.

Cette classification des centres d'enfouissement repose sur la valeur du coefficient de perméabilité (K_s) du sol choisi pour accueillir une décharge. Ce coefficient définit la vitesse de percolation des eaux dans un sous-sol et est exprimé en m/s ou cm/s et calculé à partir de la loi de Darcy comme suit :

$$K_s = 2,3 \cdot \frac{S_1}{S_2} \cdot \left(\frac{H - \Delta h}{t_1 - t_0} \right) \cdot \left(\log \frac{h_0}{h_1} \right) \quad (10)$$

où,

K_s : coefficient de perméabilité (cm/s).

S_1 : section du tube capillaire du perméamètre (cm²).

S_2 : section de l'éprouvette (cm²).

h : variation de hauteur de l'éprouvette (cm).

H : épaisseur de l'éprouvette (cm).

$t_1 > t_0$: intervalle de temps entre les lectures des niveaux de charge h_0 et h_1 (s).

h_0 et h_1 : lectures des niveaux de charge sur la règle graduée aux temps t_0 et t_1 (cm).

La figure 32 suivante montre le dispositif expérimental nécessaire aux essais de mesure de la perméabilité du sol d'une décharge.

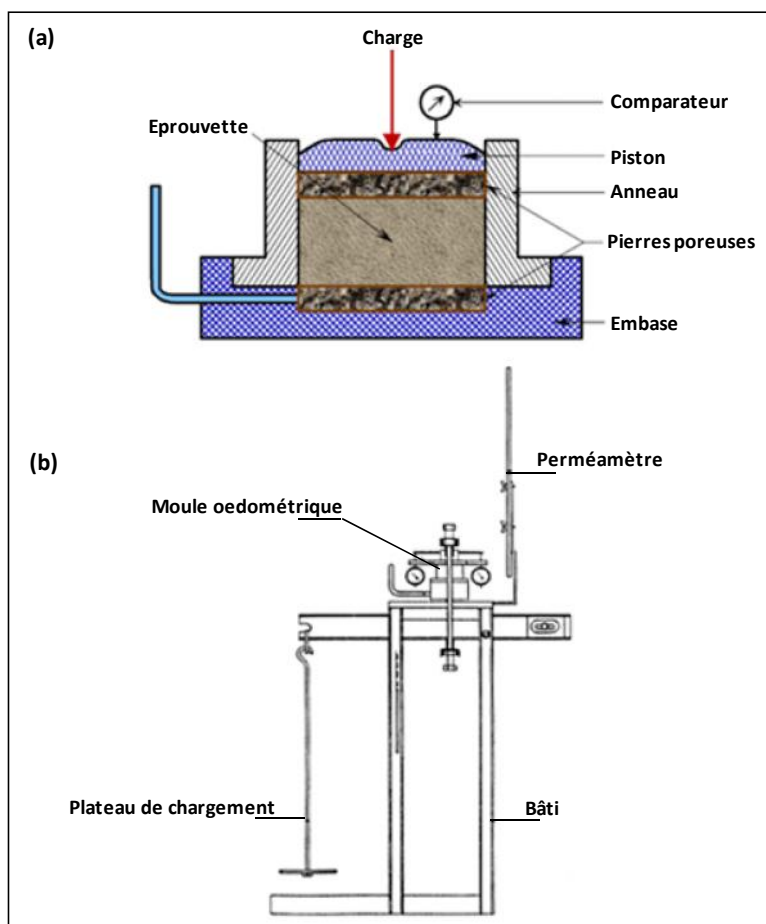


Figure 32 : Dispositif expérimental pour la mesure de la perméabilité du sol d'une décharge : (a) Moule oedométrique, (b) Système oedomètre + perméamètre.

3.4.2. Structure d'un centre d'enfouissement technique de classe 2 (CET 2)

Un centre d'enfouissement de classe 2 est essentiellement réservé aux déchets ménagers et assimilés (Figure 33). Dans ce cas, le coefficient de perméabilité K_s est compris entre les deux valeurs suivantes : $10^{-9} < K_s < 10^{-6}$ m/s sur une épaisseur supérieure à 5 m. Des sols en grès ou les milieux sablo-argileux conviennent à ce type de site.

Ce centre de stockage comprend une surface de stockage de plusieurs dizaines d'hectares composé de casiers, indépendants, sur le plan hydraulique, constitué d'alvéoles, dans lesquelles sont entreposés les déchets, dont la hauteur doit être déterminée de façon à ne pas dépasser la limite de stabilité des digues. En pratique, les casiers ont fréquemment des surfaces maximales allant de 5000 m pour une petite décharge de 1,5 ha pour une grande décharge. Les casiers sont entourés de digues étanches et l'ensemble des casiers est entouré d'une digue périphérique pouvant avoir des pentes internes de 2/1 et des pentes externes de 3/1. Les déchets sont entreposés dans un lieu confiné, sans échange avec les milieux environnant (eaux souterraines, sol et atmosphère). Entre le stockage de déchets et ces différents lieux, des dispositifs de sécurité sont aménagés sous forme de "*barrières*", *passives* et *actives* (Figure 34) :

- *Barrière passive (étanchéité naturelle)* constituée par la couche géologique naturelle et doit présenter de haut en bas, une perméabilité (K_s) inférieure à 10^{-9} sur au moins 1 m et inférieure à 10^{-6} sur au moins 5 m. Une couche d'argile ou des matelas de bentonite sont des moyens qui permettent de réaliser une étanchéité naturelle.

- *Barrière active (étanchéité artificielle)* constituée du bas vers le haut : d'une géomembrane, ou tout dispositif équivalent. Elle constitue la meilleure prévention des transferts advectifs, surmontée d'une couche de captage et d'un réseau de drainage pour les lixiviats. Seules les géomembranes en PEHD (Polyéthylène à Haute Densité) seraient chimiquement résistantes aux lixiviats, si elles sont bien installées et le retour d'expériences après leur utilisation en fond de décharge serait de 20 ans. En effet, le PEHD a réussi à s'imposer comme matériau d'étanchéité des décharges ; de grandes bandes de plusieurs mètres de large sont déroulées sur le fond de la décharge puis soudées thermiquement entre elles.

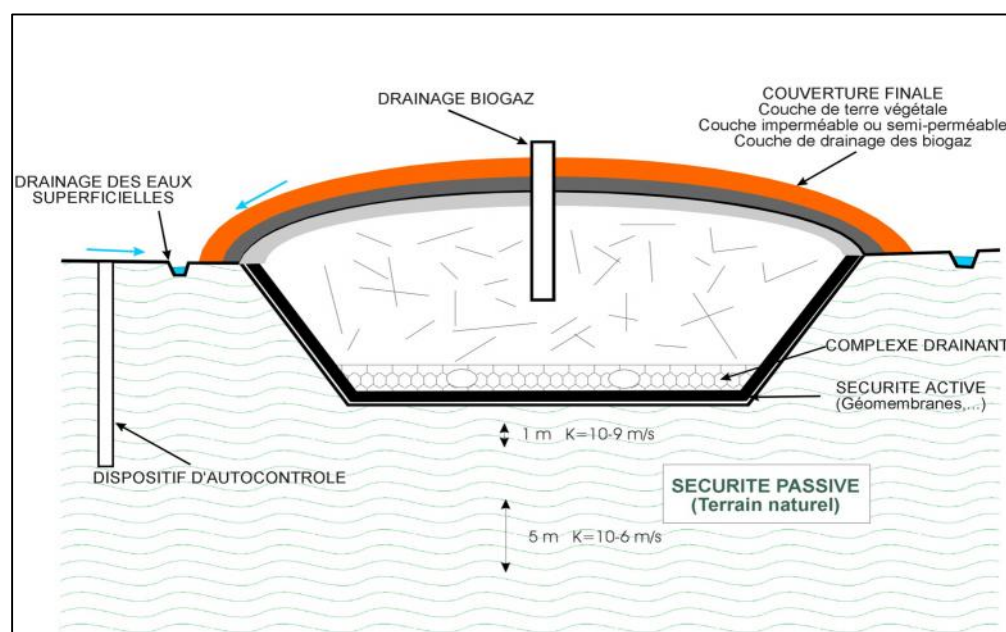


Figure 33 : Schéma du principe de fonctionnement d'un CET de classe 2.

(*) *Sécurité active* : pour éviter les entrées d'eaux et évacuer les lixiviats.

Sécurité passive : pour assurer la pérennité au système de confinement.

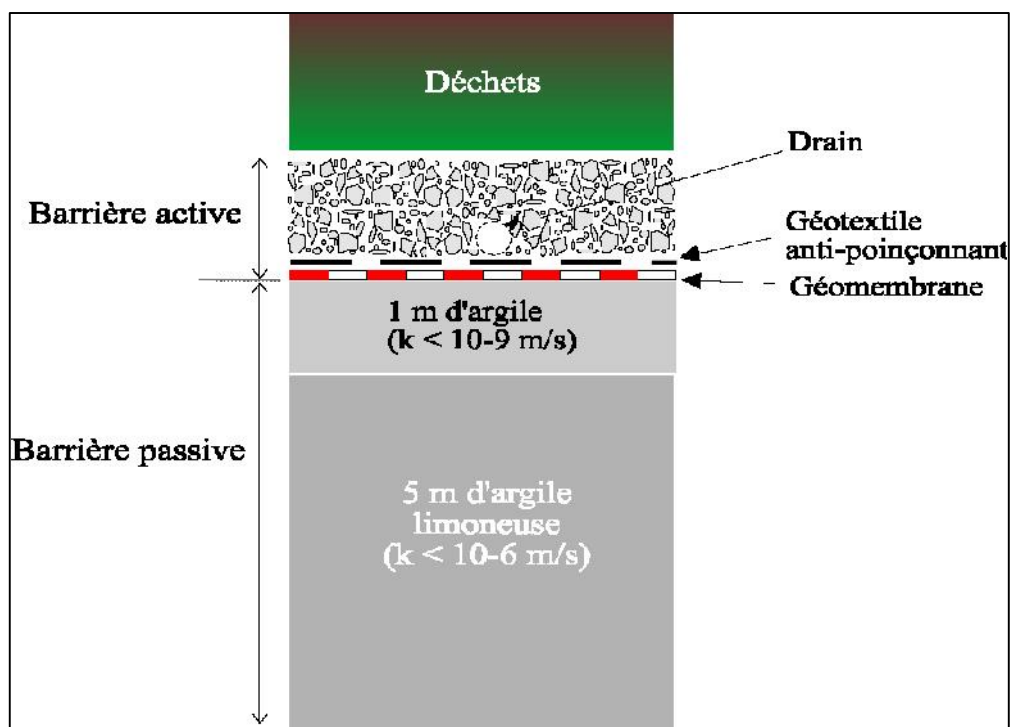


Figure 34 : Fond de CET de Classe 2.

Un CET de classe 2 reçoit habituellement les déchets ménagers et assimilés. Ces déchets sont répartis en six catégories :

- **catégorie D** : déchets dont le comportement est fortement évolutif conduisant à la formation des lixiviats chargés et de biogaz. La plupart des déchets ménagers et assimilés bruts non triés et des déchets d'activités industrielles ou artisanales appartiennent à cette catégorie : ordures ménagères, déchets de voirie, encombrants domestiques avec composants fermentescibles, déchets verts, boues, bois, papiers, cartons ;
- **catégorie E** : déchets dont le comportement est peu évolutif, dont la capacité de dégradation biologique est faible et présente un caractère polluant modéré. Ils sont subdivisés en :
 - **E1** : déchets peuvent être valorisés (plastiques, métaux, ferrailles, verre, refus de tri, DIB non fermentescibles,...).
 - **E2** : déchets valorisables avec un caractère minéral (mâchefers, cendres issus de la combustion, sables de fonderie).
 - **E3** : ni E1, ni E2, déchets peu valorisables avec un caractère minéral (boues, poussières, sels non fermentescibles et non DIS, déchets minéraux non DIS).
 - **E4** : déchets contenant de l'amiante.
 - **E5** : autres déchets de la catégorie E.

Chapitre IV

Traitement biologique des déchets ménagers et assimilés : Biométhanisation & Compostage

4.1. BIOMETHANISATION

4.1.1. Définition

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

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

4.1.2. Les grandes étapes de la biodégradation des déchets

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

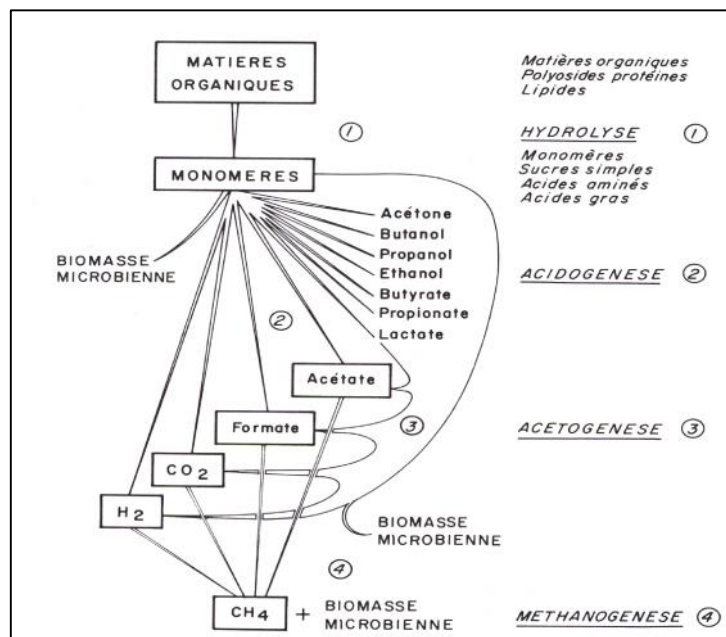


Figure 35 : Etapes biochimiques de la dégradation anaérobie de la matière organique.

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

(1) L'hydrolyse

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

(2) L'acidogénèse

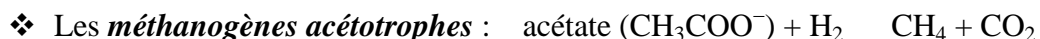
Au cours de cette étape, les composés obtenus lors de l'hydrolyse sont transformés en acides gras volatils (AGV) (acétiques, propioniques), en alcools (éthanol), en acides organiques (lactiques) en hydrogène et en dioxyde de carbone.

(3) L'acétogénèse

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

(4) La méthanogénèse

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



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

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

4.1.3. Principaux déchets concernés par la biométhanisation

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

1. Déchets ménagers et assimilés : fraction fermentescible des déchets ménagers (déchets de plantes, gazon, déchets de fruits et légumes, restes de repas, etc.), sous-produits de l'assainissement urbain (boues d'épuration, refus de dégrillage) ;

2. Déchets agricoles : résidus de grandes cultures (paille, ensilage "conservation des fourrages verts dans des silos", refus...), déjections animales (excréments : fumier, lisier) ;

3. Déchets industriels, qui peuvent être classés en trois catégories distinctes :

- ☛ Biodéchets industriels, notamment les déchets de restauration.
- ☛ Fraction fermentescible des DIB résiduels (part restante après tri des emballages et divers recyclables).
- ☛ Boues et effluents des industries agroalimentaires, déchets de processus des industries transformatrices de matières végétales et animales.

4.1.4. Intérêt technologique de la biométhanisation

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

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

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

4.1.5. Avantages et inconvénients de la biométhanisation

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

- mise en œuvre aisée du procédé ;
- possibilité de traiter des charges organiques élevées allant de 2 à 40 kg de DCO/m³ de réacteur et par jour avec des taux d'épuration pouvant atteindre 80 à 98% sur la DCO ;
- production d'un biogaz propre et renouvelable ;
- économie d'énergie par diminution de la consommation des énergies fossiles ;
- dépollution des effluents ;
- traitement des déchets et élimination des odeurs ;
- réduction du nombre de micro-organismes pathogènes ;
- protection de l'environnement par réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- durabilité du procédé.

Cependant, cette technologie présente quelques inconvénients :

- forte sensibilité aux variations de la charge entrante et aux composés toxiques ;
- dégradation plus lente que celle réalisée au moyen des procédés aérobies ;
- coûts d'investissement assez élevés ;

- faible vitesse de croissance des bactéries et par conséquent une cinétique d'épuration lente ;
- les populations microbiennes sont sensibles à la présence dans le milieu de l'oxygène et de métaux lourds ;
- le traitement par digestion anaérobie est souvent insuffisant pour rejeter directement les effluents dans le milieu naturel : un post-traitement aérobie est souvent indispensable pour éliminer certains éléments tels que : le carbone, l'azote et le phosphore.

4.1.6. Paramètres à contrôler dans une installation de biométhanisation

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

4.1.7. Exemple de réalisation industrielle : Procédé Valorga

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

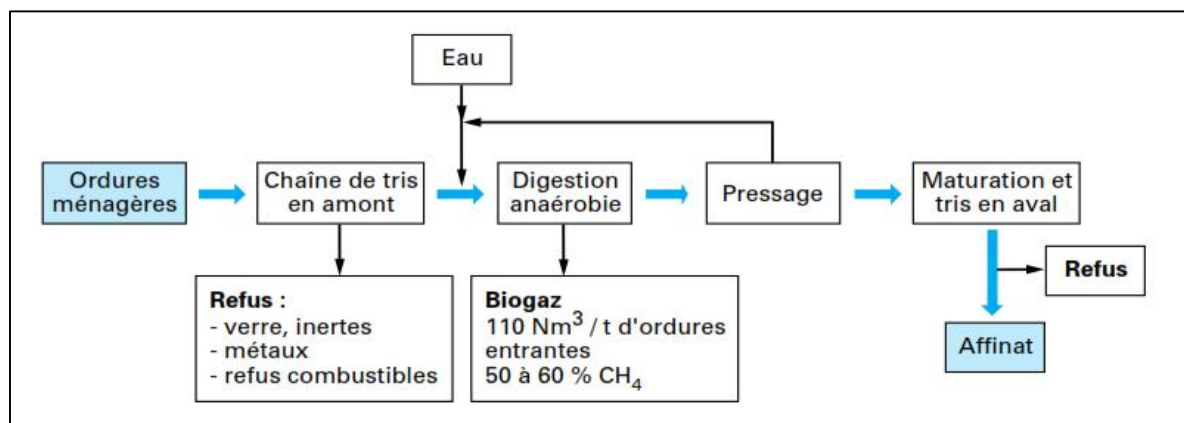


Figure 36 : Diagramme synoptique du procédé Valorga de méthanisation des ordures Ménagères.

1. Le tri

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

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

2. La digestion

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

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

3. Le pressage de la matière digérée

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

4. L'affinage

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

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

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

4.2. COMPOSTAGE

4.2.1. Définitions

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

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

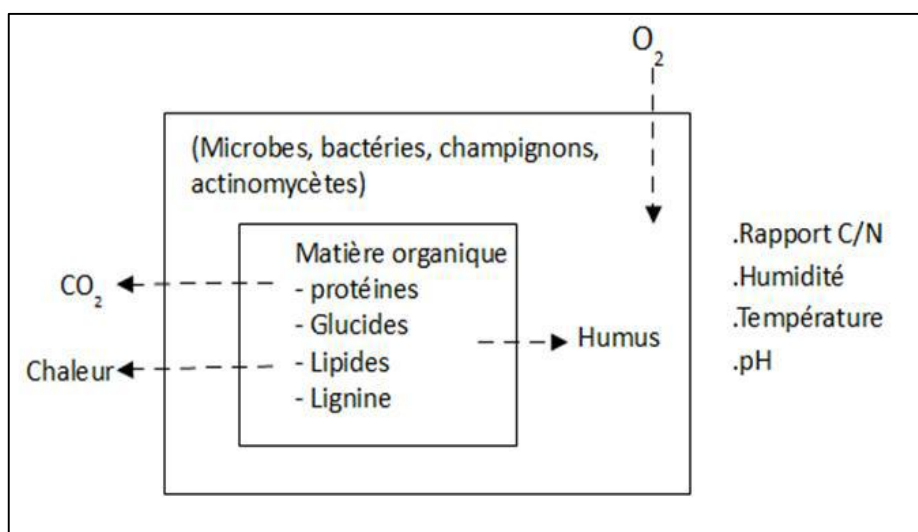
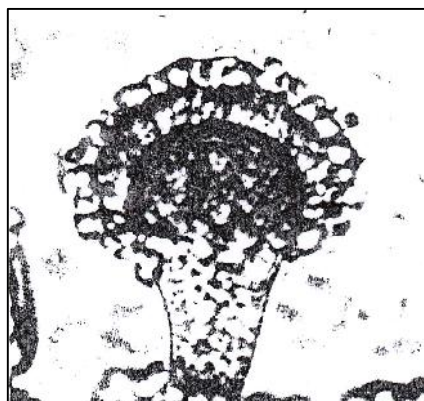


Figure 37 : Schéma descriptif du principe de compostage.

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



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

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

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



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

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

4.2.2. Qualité du compost

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

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

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

- ☛ *Compost frais* (température de 60°C pendant au moins 4 jours) : **MO/N 0 30**
- ☛ *Compost mûr* (stabilisation de la courbe de température) : **25 M MO/N M 30**
- ☛ *Compost demi-mûr* (état de maturité intermédiaire) : **MO/N M 25**

4.2.3. Paramètres à contrôler lors du compostage

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

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

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

4.2.4. Les quatre phases du compostage

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

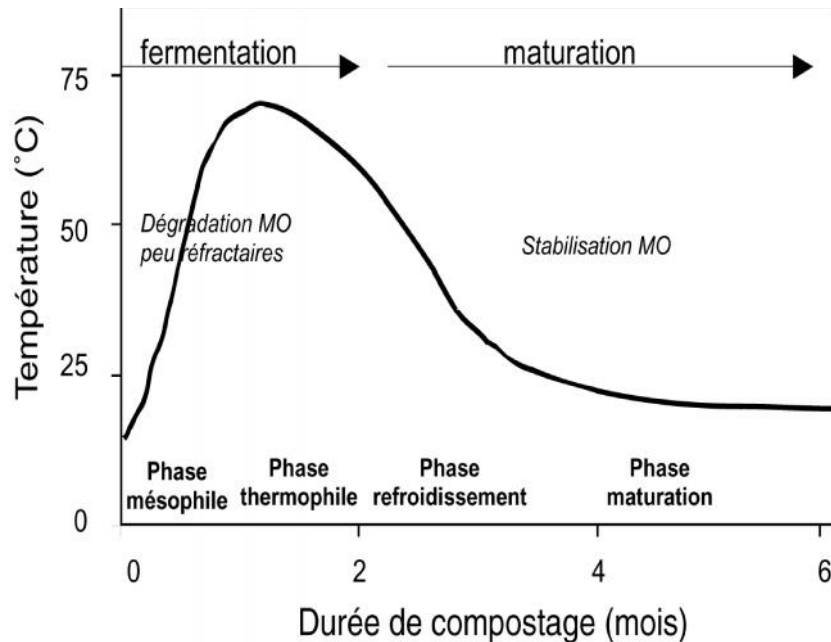


Figure 39 : Courbe théorique de l'évolution de la température au cours du compostage.

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

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

4.2.5. Procédés de compostage

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

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

- soit en une seule étape de traitement (réservé au domaine agricole sur des tas ou andains présentant un rapport surface/volume important (de l'ordre de $2,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$ de déchet) ;
- soit après une étape de fermentation chaude en substitution de l'étape classique de maturation (ce qui évite le problème d'échauffement) dans des systèmes plus compacts (rapport surface/volume faible). Le compost obtenu (lombricompost) est alors constitué par les excréments des vers qui ingèrent et digèrent la matière organique résiduelle.

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

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

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

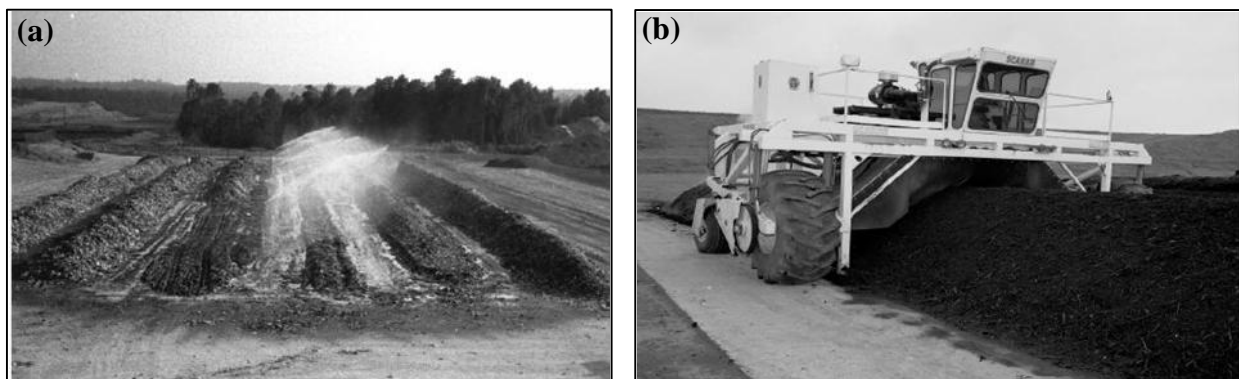


Figure 40 : (a) Opération de compostage en andains, (b) Engin utilisé pour aérer le compost mis en andains.

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

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

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

Matériels utilisés

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



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

4.2.5.2. Compostage en bioréacteur (accélééré)

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

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

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

Le compostage en bioréacteur présente des avantages multiples :

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

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

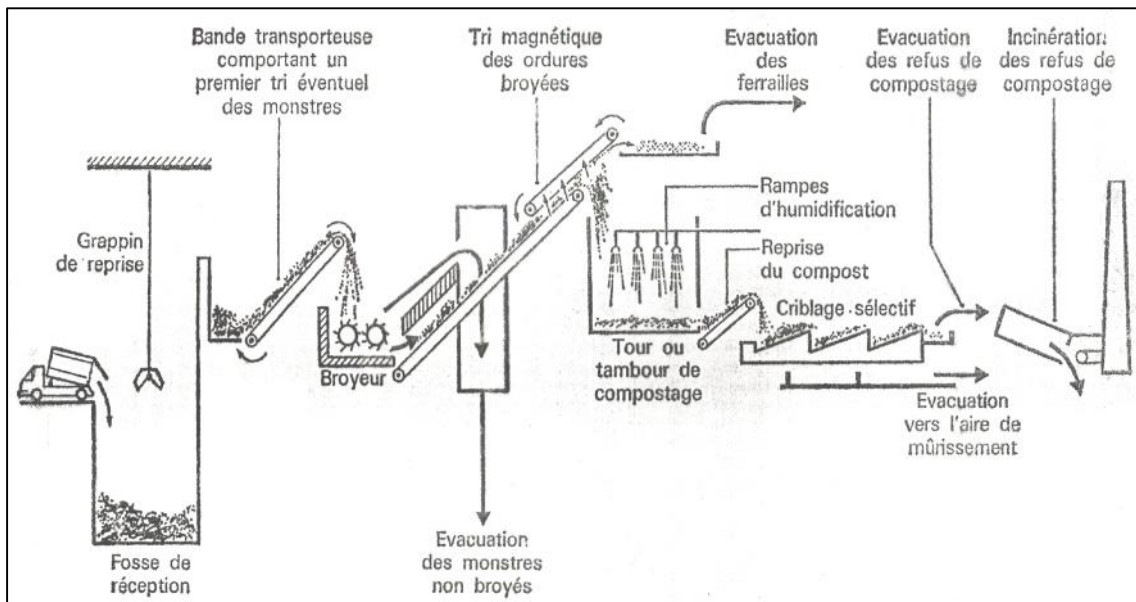


Figure 42 : Schéma d'une installation industrielle de compostage.

Chapitre V

Traitement thermique des déchets ménagers et assimilés : Incinération & Pyrolyse

5.1. INCINERATION

5.1.1. Définitions

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

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

Les gaz formés contiennent essentiellement l'air en excès, la vapeur d'eau, le CO₂, les NO_x, des cendres volantes et, en faibles quantités, des produits divers issus de la combustion : CO, H₂, CH₄, SO₂, etc. La chaleur dégagée est fonction du pouvoir calorifique des déchets. Le PCI moyen des déchets ménagers se situe entre 1200 et 2500 kcal/kg.

Les cendres et les mâchefers sont les solides et inertes provenant des matières minérales contenues dans les déchets ménagers (verre, métaux, terres...). Ils représentent 15 à 40% du poids des déchets. Les mâchefers (Figure 43) sont constitués des scories essentiellement siliciques (80 à 90%), de métaux (10 à 15%) et d'imbrûlés (1 à 5%). Les cendres ont une composition analogue à celle des mâchefers, elles sont toutefois plus riches en alumine et en magnésie, que ceux-ci.

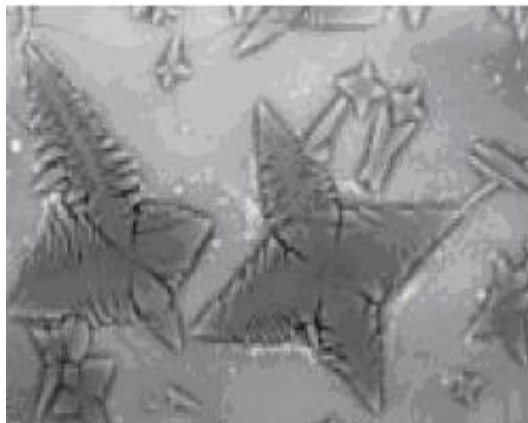
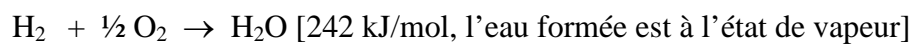
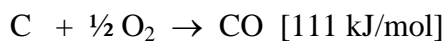


Figure 43 : Fragment de mâchefers issu de l'incinération des ordures ménagères vu au MEB (Microscope Electronique à Balayage).

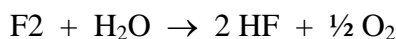
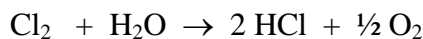
Actuellement, en technique routière, les mâchefers issus de l'incinération des ordures ménagères (MIOM) sont essentiellement utilisés en couche de forme (ronds points, parking, autoroute) ou remblai (bords d'autoroute, remblais de quais des voies ferroviaires, comblement de mines) pour des chantiers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

5.1.2. Réactions chimiques intervenant au cours de la combustion

La combustion (ou l'incinération) désigne la réaction d'oxydation complète des déchets solides avec l'air préchauffé injecté dans le four. Les réactions de combustion des déchets ménagers sont multiples et extrêmement variées, nous ne citerons que les principales dont l'aspect exothermique est prépondérant dans la formation et l'entretien de la flamme :

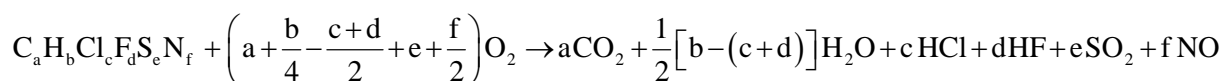


L'hydrogène disponible réagit en partie avec le chlore issu de la décomposition des déchets plastiques (PVC ou autres) pour former de l'acide chlorhydrique gazeux. Il en est de même pour le fluor qui génère de l'acide fluorhydrique en proportion nettement inférieure selon le mécanisme réactionnel décrit ci-dessous :



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

L'ensemble de ces réactions de combustion peuvent être figuré par une seule équation chimique théorique suivante :



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

5.1.3. Règle des 3 T

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

5.1.3.1. La température

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

5.1.3.2. Le temps de séjour

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

$$T = \frac{V}{Q} \quad (11)$$

où,

V représente le volume de la chambre de combustion et Q le débit en volume de gaz produit par la charge incinérée.

5.3.3.3. La turbulence

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

5.1.4. Volume d'air et air en excès

Le volume en m^3 de l'air théorique nécessaire à la combustion de 1 kg de déchets ménagers est calculé à partir de la teneur en pourcentage des composantes élémentaires principales (C, H, O, S), soit :

$$V_a (\text{Nm}^3 / \text{kg déchet}) = 0,0895C + 0,2685H + 0,0335(S - O) \quad (12)$$

où,

C, H, S et O représentent la fraction massique de ces constituants dans le déchet, en pourcentage. Le signe (-) pour le terme d'oxygène tient compte de l'apport direct d'oxygène de la part du combustible et vient donc réduire le besoin en air comburant.

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

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

$$e(\%) (\text{excès d'air}) = \frac{V_a \ll \text{réel} \gg - V_a}{V_a} \cdot 100 \quad (13)$$

tel que V_a « réel » étant la quantité d'air réellement utilisée.

En plus d'assurer la combustion complète, l'excès d'air a pour effet direct d'abaisser la température des gaz de combustion; par conséquent, c'est un paramètre important dans le contrôle du procédé. L'excès d'air se mesure par la teneur en CO₂ ou en O₂ dans les gaz de combustion. Dans les installations courantes, l'excès d'air est de l'ordre de 70 à 100%.

5.1.5. Conditions physiques pour une incinération avec valorisation énergétique

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

5.1.5.1. PCI

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

5.1.5.2. Teneur en eau

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

5.1.5.3. Teneur en cendres (ou inertes)

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

5.1.5.4. Teneur en matières combustibles

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

5.1.6. Diagramme de combustion et diagramme ternaire de Tanner

Le *diagramme de combustion* traduit suivant un système d'axes orthonormés (x, y) la zone de fonctionnement du four (Figure 44). En abscisses le *débit des déchets* exprimée en tonnes/heure et en ordonnées la *puissance thermique* exprimée en thermies/heure (1 thermie = 10³ calorie). Les différentes valeurs du PCI s'expriment dans ce diagramme suivant un faisceau de droites linéaires (*valeur minimale* : 1200 kcal/kg et *valeur maximale* : 2500 kcal/kg).

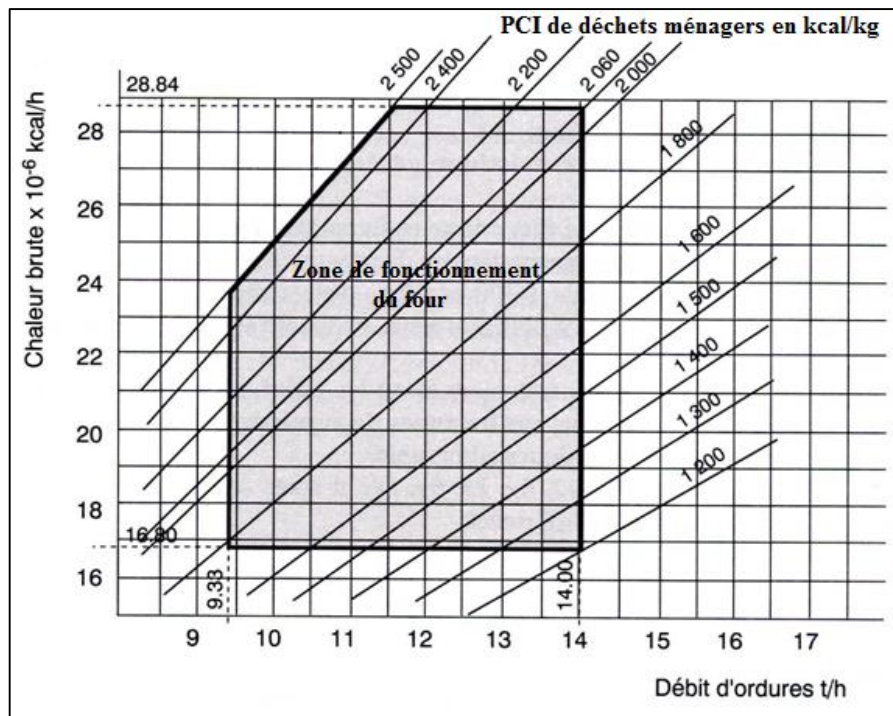


Figure 44 : Diagramme de combustion.

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

Le *diagramme ternaire de Tanner* ou le *triangle d'ordures* (Figure 45) exprime aussi l'aptitude à la combustion des ordures en fonction de leur teneur en cendres et en eau ainsi que de leur teneur en matières combustibles. La *surface grise* marque le domaine de combustion des ordures sans combustibles supplémentaires (déchets auto-combustibles).

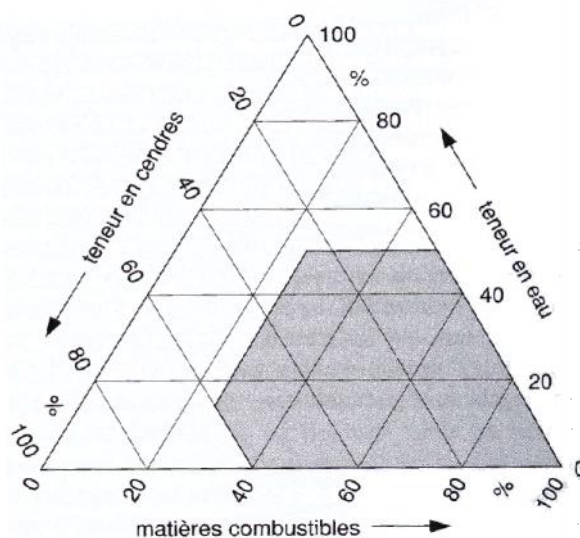


Figure 45 : Diagramme ternaire de Tanner.

5.1.7. Les différentes phases du processus d'incinération

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

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

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

5.1.8. Structure d'une installation d'incinération des ordures ménagères

Une usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM) comporte généralement les éléments suivants, comme représenté sur la figure 46 :

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

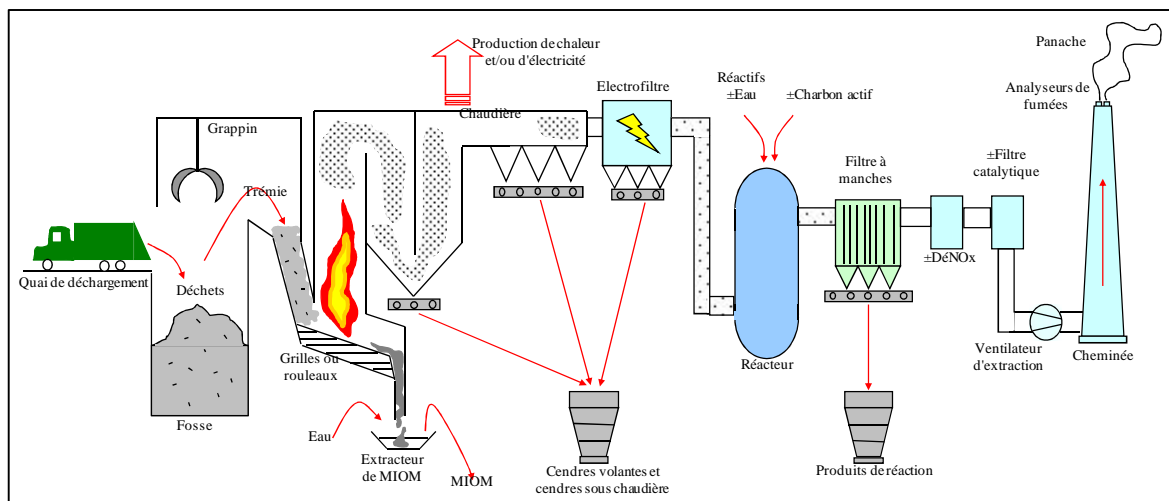


Figure 46 : Schéma descriptif d'une usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM).

Les procédés semi-humide, semi-sec et sec sont représentés par cette configuration. Le procédé humide ne comporte pas de filtre à manches, le réacteur est remplacé par une tour de lavage des fumées et les effluents liquides issus de ce lavage sont traités afin d'obtenir un gâteau de filtration. Les signes "±" correspondent aux variantes (selon le procédé de neutralisation des gaz acides, la technologie et le taux de dépollution désiré).

5.1.9. Types de fours d'incinération des ordures ménagères

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

5.1.9.1. Fours à grilles mobiles

L'incinération a connu sa première et grande révolution technologique dans les années trente avec l'utilisation des fours à grilles mobiles inventés en 1925 par l'ingénieur allemand Joseph MARTIN. C'est le procédé d'incinération le plus utilisé pour les déchets urbains. Le schéma de principe est représenté sur la figure 47. Dans ce type de four, la combustion des déchets a lieu sur un support mobile, en général une grille, constituée soit de barreaux (mouvements de translation du déchet), soit de rouleaux (mouvements de rotation). Les fumées produites sont extraites, en partie haute, vers une enceinte verticale revêtue de matériaux réfractaires, couplée ou non à une chaudière de récupération (postcombustion).

Les éléments de la grille (barreaux et rouleaux) forment un ensemble de pièces mobiles animées de mouvements alternatifs, permettant l'avancement des déchets, ainsi que leur brassage. Cette grille est soit inclinée, soit horizontale. L'air primaire de combustion, en excès, est reparti sous la grille via des caissons de distribution. Ce mode d'aération permet non seulement le refroidissement de la grille, mais aussi une aération des déchets en cours de combustion. La combustion est organisée le long de la grille de façon à réaliser :

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

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

5.1.9.2. Fours tournants et/ou oscillants

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

En *four tournant* (Figure 48), les fumées sont extraites au niveau de l'introduction des déchets, en face avant, les fumées progressant dans ce cas à contre-courant de la charge.

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

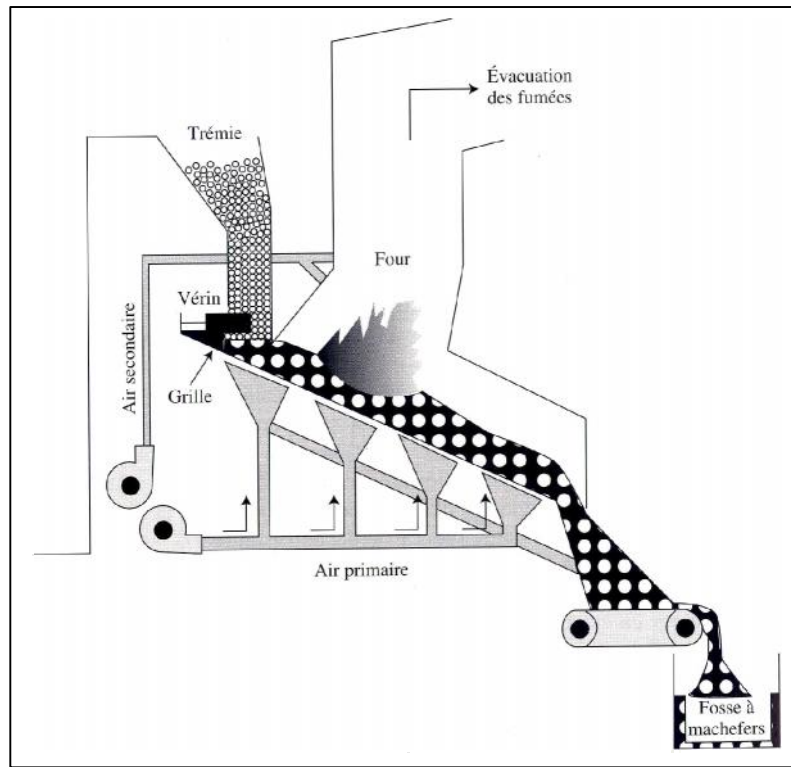


Figure 47 : Four à grilles mobiles.

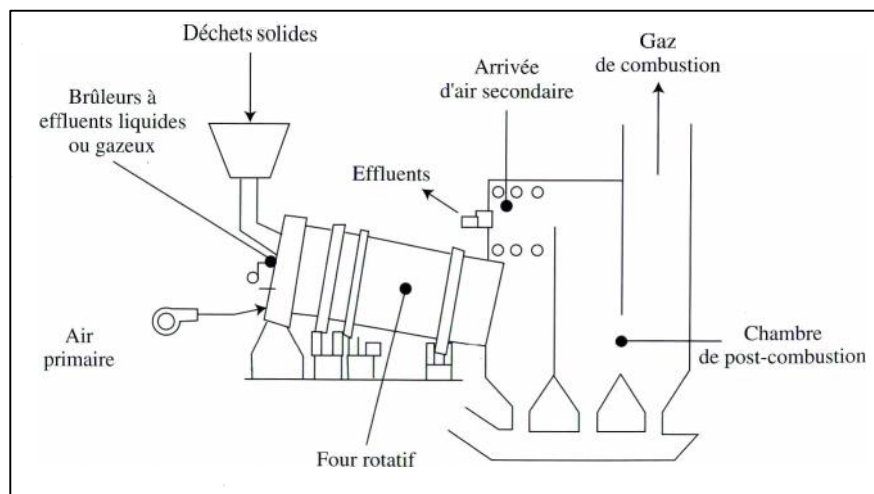


Figure 48 : Four tournant.

5.1.9.3. Fours à lit fluidisé

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

Les fours à lit fluidisé sont de trois types (Figure 49) : *dense*, *circulant* et *rotatif*, qui se différencient principalement sur le moyen d'assurer la meilleure combustion afin de réduire les imbrûlés.

5.1.9.3.1. Four à lit fluidisé dense (LFD)

Dans le four à lit fluidisé dense (Figure 49a), les particules minérales et l'air sont injectées à la base du four. La vitesse de l'air ascendant est alors de l'ordre de 1 à 3 m/s. La densité moyenne du lit est importante, d'où le nom donné à cette technologie. Le mélange avec les déchets (granulométrie de 150 mm), est concentré en partie inférieure. Les déchets sont portés à 700°C et la combustion est très bonne. Il s'agit de la technologie la plus simple techniquement, adaptée à des installations de petites capacités (2 à 10 t/h), et à une large gamme de déchets (après broyage), avec une plage de PCI comprise entre 1500 et 6000 kcal/kg.

5.1.9.3.2. Four à lit fluidisé rotatif (LFR)

La figure 49b représente un lit fluidisé rotatif qui est une variante du lit fluidisé dense. A la différence du procédé classique où l'air suit un mouvement ascendant, le lit fluidisé rotatif opère avec des injections d'air latérales réparties sur la hauteur du four. L'écart de densité du lit entre la zone centrale et les zones extérieures crée des mouvements rotatifs. En plus, la géométrie du four présente une sorte de goulot d'étranglement en son milieu qui accélère la circulation du lit.

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

5.1.9.3.3. Four à lit fluidisé circulant (LFC)

Le four à lit fluidisé circulant (Figure 49c) présente deux caractéristiques. D'une part, l'injection d'air à la base du four se fait à une vitesse supérieure, de façon à ce que les particules soient en suspension sur l'ensemble de la hauteur du four. D'autre part, les particules de sable (auxquelles est ajoutée une injection de carbonate de calcium afin de traiter en même temps le SO₂ et le HCl) qui sont évacuées avec les gaz de combustion en partie haute du four, sont récupérées dans un cyclone, puis réinjectées dans le foyer de combustion jusqu'à ce que tous les déchets soient brûlés.

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

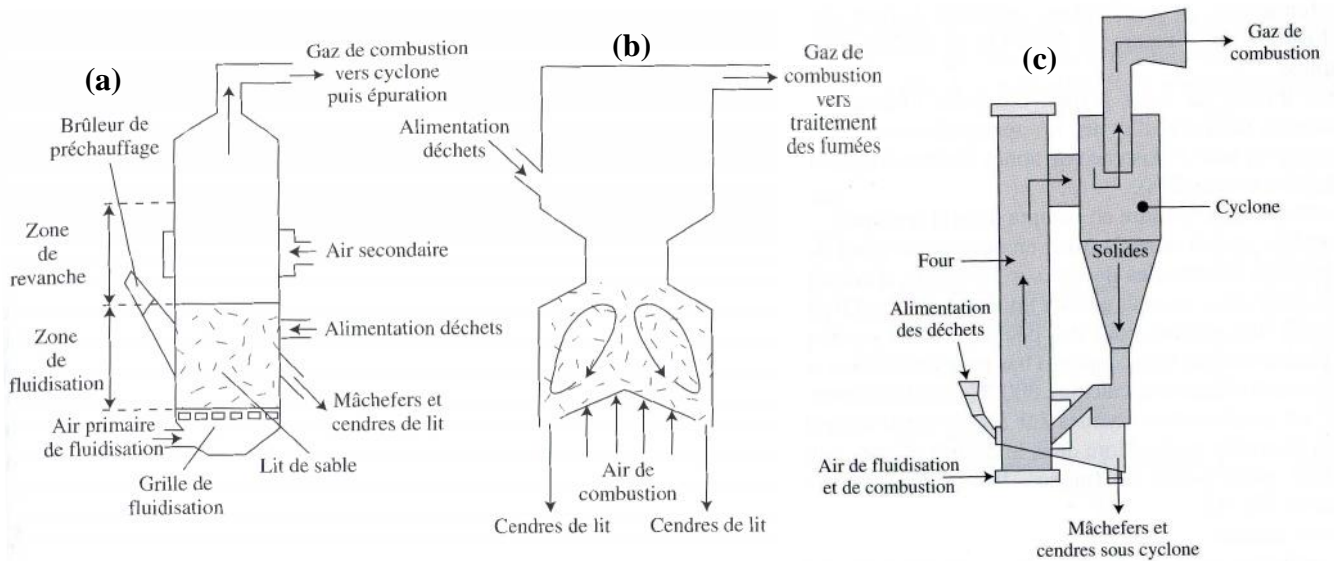


Figure 49 : Fours à lit fluidisé : (a) dense (LFC), (b) rotatif (LFR), (c) circulant (LFC).

5.1.10. Traitement des gaz de combustion et des fumées

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

5.1.10.1. Dispositifs de dépoussiérage

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

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

5.1.10.2. Dispositifs de neutralisation des fumées

Différents procédés d'abattage ou de neutralisation des fumées sont actuellement disponibles (Figure 50).

- **Épuration par voie sèche et réactif alcalin** : l'épuration des fumées par voie sèche consiste à injecter dans les fumées un réactif (chaux ou bicarbonate de sodium), sous forme de solide pulvérulent sec, pour assurer la neutralisation des gaz acides (SO_2 , HCl , HF). Ces réactifs sont, éventuellement, injectés dans un réacteur en amont d'un système de dépoussiérage (électro-filtre ou filtre à manches), placé en aval. Ceci permet de capter les poussières, mais aussi les sels calciques formés lors du contact réactionnel avec le réactif en excès.
- **Épuration par voie semi-humide** : comme dans le cas du procédé sec, le principe du procédé semi-humide consiste à neutraliser les gaz acides par injection de chaux, celle-ci étant, dans ce cas, préalablement mélangée à de l'eau, pour former un lait de chaux.
- **Épuration en voie humide** : le procédé s'apparente à un procédé de lavage de gaz, à l'eau additionnée d'un réactif basique (soude, chaux). Les gaz doivent d'abord être dépoussiérés à l'aide d'un électro-filtre ou d'un filtre à manches, suivi d'un refroidissement par *quench* à l'eau, jusqu'à une température de 65°C .

Pour améliorer la captation des gaz acides, on dispose en général de deux étages de captation : un premier étage dit acide pour la captation de HCl et des métaux lourds par lavage à l'eau, suivi d'un deuxième étage, dit basique, pour la captation du SO_2 et finition de la captation de HCl par lavage avec une solution de soude.

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

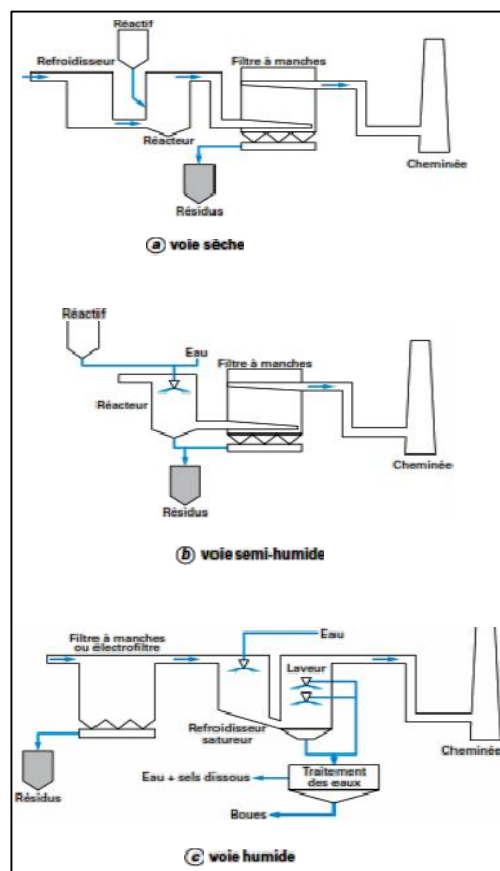


Figure 50 : Schémas de principe du procédé d'épuration des fumées.

5.1.11. Résidus solides de l'incinération des ordures ménagères

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

5.1.11.1. Mâchefers (MIOM)

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

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

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

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

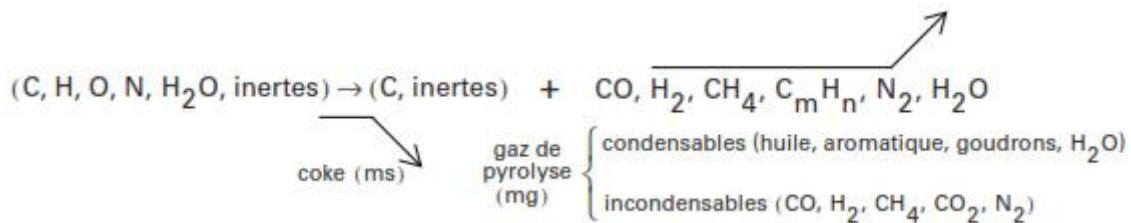
Les REFIOM sont constitués de 90% en moyenne de composés minéraux sans danger (silice et calcaire), le reste de métaux lourds, de dioxines et furanes. Les cendres volantes renferment 100 fois plus de dioxines que l'air rejeté à la sortie de la chambre de combustion.

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

5.2. PYROLYSE

5.2.1. Principe de la pyrolyse

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



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

- de poussières composées principalement de noir de carbone ;
- d'un gaz combustible ($CO, H_2, CH_4, H_2O...$) ;

- d'un résidu huileux composé principalement de produits organiques partiellement oxydés (esters, acides, alcools,...) ;
- d'un résidu carboné solide (coke de pyrolyse).

Le schéma général de mise en œuvre d'un processus de pyrolyse de déchets est illustré en figure 51.

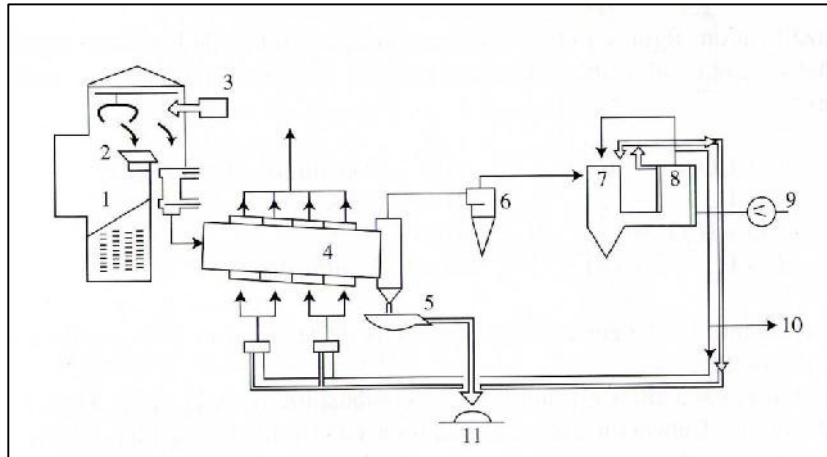


Figure 51 : Schéma de principe d'un four de pyrolyse.

- (1) déchet ; (2) crible ; (3) calcaire ; (4) pyrolyseur ; (5) extraction de coke ; (6) cylindre ; (7) crackage ; (8) échangeur de chaleur ; (9) air ; (10) production gaz ; (11) coke.

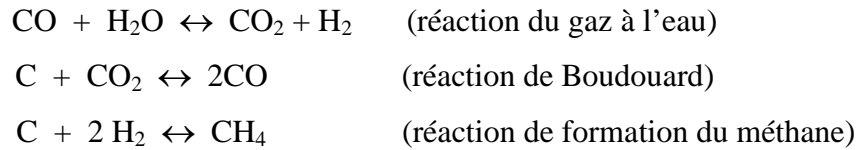
La pyrolyse s'effectue selon trois phases : un séchage pour l'élimination de l'eau, suivi d'une distillation des matières volatiles et enfin une transformation en carbone fixe. Elle engendre moins de gaz que l'incinération, les dioxines et furanes sont totalement éliminés et le chlore est neutralisé.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

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

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

5.2.2.1. En atmosphère neutre dépourvue d'oxygène

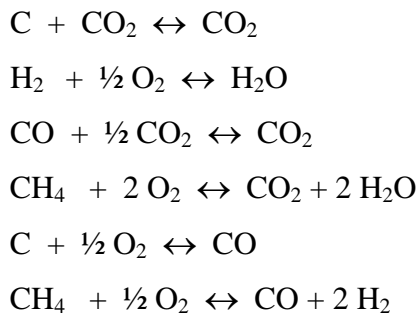
L'élévation progressive de la température des déchets conduit à leur décomposition et libération de composés sous forme de gaz (eau, COV) et rupture des macromolécules pour fournir des molécules plus courtes à l'état de gaz, de liquides ou de solides. L'oxygène présent est issu des molécules organiques,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



Il se forme ainsi progressivement une atmosphère réductrice.

5.2.2.2. En présence d'oxygène

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



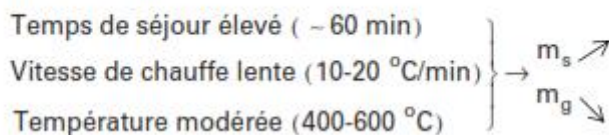
5.2.3. Types de pyrolyse

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

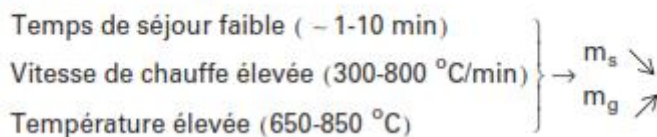
- la *pyrolyse lente*, à température modérée ;
- la *pyrolyse rapide*, ou carbonisation à haute température.

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

– en pyrolyse lente :



– en pyrolyse rapide :



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

- un gaz combustible, typiquement 380-400 kg par tonne de déchets bruts, composé d'un mélange complexe de gaz incondensables (hydrogène, monoxyde de carbone, méthane...) ainsi que d'hydrocarbures et/ou goudrons condensables ;

- un résidu solide carboné appelé coke, semi-coke ou charbon ($\approx 420-400$ kg par tonne de déchets bruts), contenant de l'ordre de 40% de matériaux inertes.

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

5.2.4. Valorisation des produits de pyrolyse

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

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

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

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

5.2.5. Types de fours utilisés en pyrolyse

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

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

5.2.6. Principales différences entre incinération et pyrolyse

5.2.6.1. Incinération

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

5.2.6.2. Pyrolyse

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

Références bibliographiques

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dotreppe-Grisard N., Déchets solides industriels et urbains : Traitement, Destruction et Valorisation. Ed. Cebedoc, Liège, Belgique et Ed. Tec & Doc, Lavoisier, Paris, France, 1986.

- Emilian K., Traitement des pollutions industrielles. Ed. Dunod, Paris, France, 2004.
- Galvez-Cloutier R., Gestion intégrée de déchets solides municipaux. Département de Génie Civil et Génie des Eaux, Faculté de Sciences et Génie, Université Laval, Québec, Canada, 2012.
- Gillet R., Traité de gestion des déchets solides : Programme minimum de gestion des ordures ménagères et des déchets assimilés (1^{er} Volume). OMS, PNUD, Copenhague, Allemagne, 1985.
- Gillet R., Traité de gestion des déchets solides : Les traitements industriels des ordures ménagères et des déchets assimilés-Organisation et gestion d'un service (2^{ème} Volume). OMS, PNUD, Copenhague, Allemagne, 1986.
- Gourdon R., Traitement biologique des déchets. Coll. Techniques de l'ingénieur, G2 060, traité Environnement, Paris, France, 2000.
- Lambert S. *et al.*, Manuel environnement à l'usage des industriels. Ed. AFNOR, Paris, 1994.
- Le Groux J.-Y., Le Douce C., L'incinération des déchets ménagers. Ed. Economica, Paris, 1995.
- Leroy J.B., Les déchets et leur traitement. Collection que sais-je?, Paris, France, 1981.
- Loudjani F., Guide des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimilés. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE) en collaboration avec le Programme des Nations Unis pour le Développement (PNUD), Alger, Algérie, 2009.
- Maës M., Déchets industriels : mode d'emploi. Ed. Tec & Doc, Lavoisier, Paris, France, 1986.
- Maës M., La maîtrise des déchets industriels. Ed. Pierre Johanet S.A., Paris, France, 1992.
- Maës M., Les résidus industriels (Tome 1) : Traitement, Valorisation, Législation. Ed. Tec & Doc, Lavoisier, Paris, France, 1975.
- Maës M., Les résidus industriels (Tome 2) : Technologie propre, Traitement, Valorisation, Législation. Ed. Tec & Doc, Lavoisier, Paris, France, 1977.
- Maës M., Options déchets. Ed. Pierre Johanet S.A., Paris, France, 1992.
- MATE, Guide de gestion intégrée des déchets ménagers et assimilés. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement en collaboration avec la société Allemande GTZ, Alger, Algérie, 2012.
- Mezouari Sandjakdine F., Conception et exploitation des centres de stockage des déchets en Algérie et limitation des impacts environnementaux. Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme, Université de Limoges, France, 2011.

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

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

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

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

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

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

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

Weiner R.E., Matthews R.A., Environmental engineering, Fourth Edition. Butterworth-Heinemann, Elsevier, Burlington, USA, 2003.

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

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