

Gestion des déchets solides (GDS) Déchets de BTP

Planning du cours :

Introduction générale

- A. Généralités sur les déchets et leur traitement**
 - I. Approche systémique du déchet
 - II. Classification des déchets et lois en vigueur

- B. Les filières de traitement des déchets**
 - III. Traitements biologiques
 - IV. Traitements thermiques

- C. Les déchets de BTP**
 - I. La problématique
 - II. Les différents déchets
 - III. La gestion

Introduction générale

Le processus d'urbanisation

L'**urbanisation** = transformation des formes de la société → l'augmentation de ceux qui habitent en ville par rapport à l'ensemble de la population.

L'urbanisation présente un caractère exponentiel (nettement avéré depuis les années 1800) qui semble être vécu comme une fatalité par la plupart des gouvernements et aménageurs.

En 1800, à peine 3 % de la population mondiale vivait en ville,

contre 15 % en 1900,

50% en l'an 2000,

et au rythme actuel 65% de la population sera urbaine en 2025, et plus de 80 % dans de nombreux pays.

Problèmes de gouvernance

L'urbanisation apporte à la société un nouveau mode de vie moderne, lui ouvre de nouveaux horizons, lui procure de nouvelles compétences et l'engage dans un processus d'apprentissage. Cependant, une **urbanisation rapide et incontrôlée pose de graves problèmes de gouvernance**

La gouvernance a trait au rôle de l'État dans la société, à la gestion, bonne ou mauvaise, des activités socio-économiques dans les secteurs public, privé et communautaire, ainsi qu'au degré de participation de la société civile à la gestion de la société dans son ensemble. **Pour la Banque mondiale, la gouvernance représente la manière dont le pouvoir s'exerce dans la gestion des ressources économiques et sociales d'un pays en vue de son développement (Banque mondiale, 1992).**

Le problème de la gestion des déchets

L'urbanisation rapide et sauvage des pays d'Afrique a causé la détérioration de l'environnement.

Le taux élevé d'urbanisation dans les pays africains entraîne une accumulation rapide de déchets. Les changements sociaux et économiques qu'ont subi la plupart des pays africains depuis les années 60 ont également entraîné une hausse de la production de déchets par personne.

Ce n'est pas la quantité de déchets qui pose problème, mais plutôt l'incapacité des gouvernements et des sociétés d'élimination des déchets de s'en débarrasser.

A. Généralités sur les déchets et leur traitement

Chapitre I. Approche Systémique des déchets

La nécessaire **maîtrise des impacts environnementaux** est actuellement un objectif capital au niveau de la gestion des activités industrielles. Il en va d'ailleurs de même au niveau des collectivités locales qui ont en charge les conséquences environnementales des multiples activités liées à la vie urbaine.

Cette contrainte résulte pour l'essentiel des **évolutions constatées dans les activités de production et de consommation** :

- forte augmentation quantitative de la production ;
- diversification qualitative avec le développement des matériaux synthétiques et de produits de plus en plus complexes et, de surcroît, à courte durée de vie ;
- prise de conscience, au niveau des populations, des risques écologiques et sanitaires et des impératifs de l'hygiène et de la sécurité.

La maîtrise des impacts environnementaux est encadrée par un important arsenal réglementaire et elle nécessite d'importants moyens techniques ; de ce fait, elle a un poids significatif dans l'économie des activités industrielles.

Ces impacts peuvent être regroupés en trois catégories :

- **l'épuisement progressif des ressources naturelles renouvelables ou non** : combustibles fossiles, métaux, forêt... ;
- **les désordres écologiques** : les milieux physiques (eau, air, sol) et les milieux vivants (animaux, végétaux) sont fortement perturbés, ce qui se traduit par de nombreux effets négatifs qui vont de la perte de la biodiversité au changement climatique, en passant par la déforestation et les différentes formes de la pollution urbaine et agricole ;
- **la dispersion de substances toxiques et/ou écotoxiques** : ces substances sont directement ou indirectement responsables de risques avérés pour la santé des individus.

Naissance du secteur des éco-industries. Les entreprises traditionnelles et les collectivités locales sont de plus en plus nombreuses à se doter de spécialistes à même de définir et de piloter, en interne, la stratégie et les actions à mener en matière de gestion environnementale.

Sous l'angle technologique, les **principaux secteurs concernés par la maîtrise des impacts environnementaux** sont ceux des **économies d'énergie**, de la **dépollution des eaux**, du **traitement des effluents gazeux** et de la **gestion des déchets**.

C'est ce dernier secteur qui nous intéresse.

Tous les travaux scientifiques conduits ces dernières décennies permettent de proposer une approche systémique de l'entité déchet dans sa définition la plus générale. Cette approche doit permettre de mieux s'orienter au moment de choisir entre les multiples stratégies et techniques proposées. Cela est également utile, dans le cadre des réflexions, au niveau de la conception même des produits et des procédés.

1. Le système déchets

La plupart des produits industriels sont issus de processus de plus en plus complexes. À l'origine, **il y a toujours prélèvement de matières premières, d'eau et d'air et, à l'issue de**

chaque étape de la transformation, émission de sous-produits, d'eau et d'air plus ou moins pollués. De plus, chaque étape est consommatrice d'énergie.

Au stade de sa consommation, le produit industriel, surtout lorsqu'il est complexe (cas de l'automobile, par exemple), est à son tour consommateur d'eau, d'air, d'énergie, de pièces de rechange, et tout cela contribue également à différentes formes de l'impact environnemental. Enfin, au stade ultime de son utilisation, le produit devient à son tour un déchet dont il faudra assurer la gestion.

Une vision globale se doit donc d'aborder les problèmes posés à tous les stades de ce que l'on appelle le **cycle de vie** :

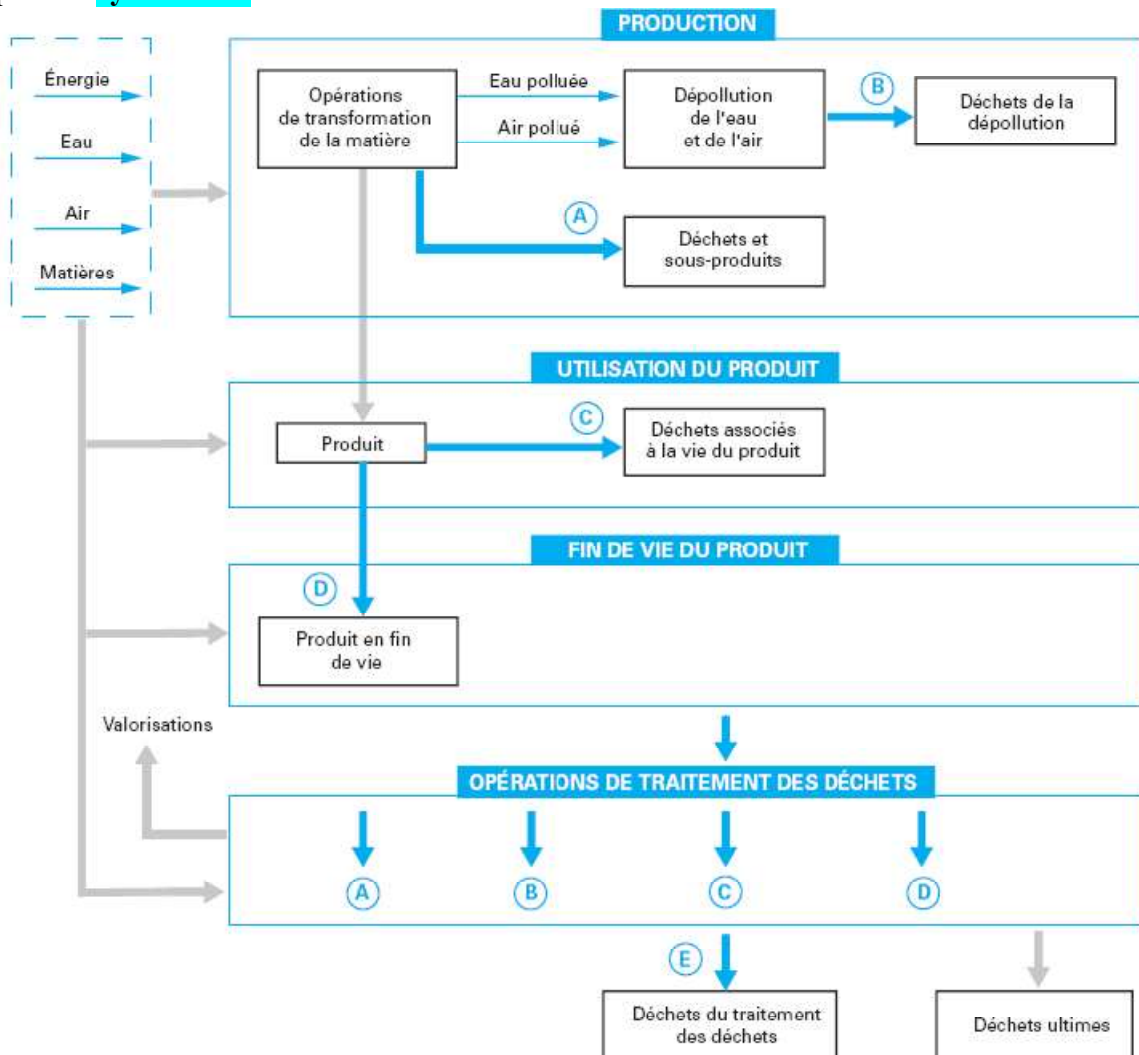


Figure 1 : Processus d'émission des déchets aux différents stades du cycle de vie

Création du produit ---> Utilisation du produit ---> Fin de vie du produit

On observe, sur la figure 1, que les déchets apparaissent à tous les stades du cycle de vie, avec des natures très variées. On peut classer ces déchets en **cinq familles principales** :

- A : déchets et sous-produits de la fabrication ;
- B : déchets de la dépollution de l'eau et de l'air ;
- C : déchets associés à la vie du produit ;
- D : produits en fin de vie ;
- E : déchets du traitement des déchets.

À la fin de ce cycle, une fraction de ces déchets sera valorisée sous des formes diverses et rejoindra les circuits de production, la fraction restante sera soit rejetée dans le milieu naturel lorsqu'il n'y a pas de risques d'impact, soit *confinée* avec le statut de *déchet ultime*.

En résumé, on aboutit ainsi, dans une vision idéale de la production et de la consommation, à un système complexe qui met en jeu des opérations de transformation dépendantes les unes des autres qui pourraient être schématisées par un cylindre à la surface duquel se situeraient les opérations de valorisation et d'élimination. Le cylindre serait alimenté en matières premières et en énergie ainsi qu'en eau et en air (figure 2). L'eau et l'air épurés rejoindraient le milieu naturel, tandis que les déchets ultimes (matières non valorisées) correspondraient à la fraction inutilisable et donc *perdue* qui serait stockée en fin de cycle sous forme de *déchets ultimes*.

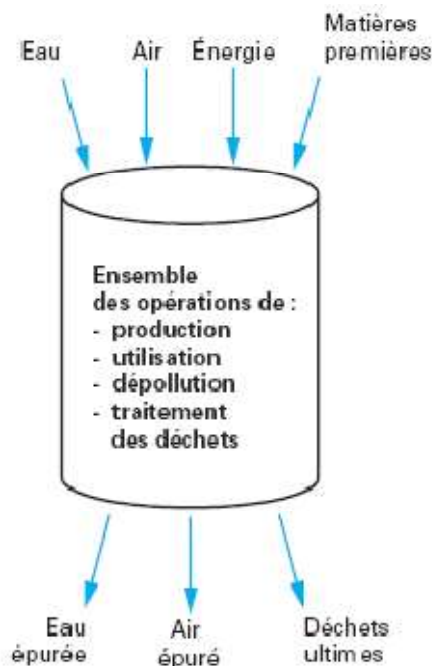


Figure 2 : Le système idéal

La plupart des systèmes industriels évoluent vers ce schéma idéal qui privilégie le choix des matériaux, les économies d'énergie et de matière, développe le recyclage, minimise l'utilisation des substances dangereuses... toute stratégie que l'on retrouve dans ce qu'il est maintenant convenu d'appeler **l'écologie industrielle**.

2. Les stratégies de gestion des déchets

En se plaçant sur un plan prospectif, la réflexion sur la gestion d'un déchet ne doit pas se limiter à la seule recherche d'une solution immédiate au problème posé par son existence. Sa production n'est pas toujours une fatalité et des voies stratégiques sont à explorer qui peuvent conduire à modifier profondément la nature du déchet et les quantités produites pour un procédé donné. Il s'agit là d'une attitude qui peut entraîner des modifications importantes tant au niveau du procédé que du produit. Cela explique que ces évolutions relèvent de la stratégie de l'entreprise au-delà de la seule préoccupation déchet.

✚ Globalement, face à la nécessité de résoudre le problème de la gestion d'un déchet, **les choix stratégiques sont au nombre de cinq** (figure 3).

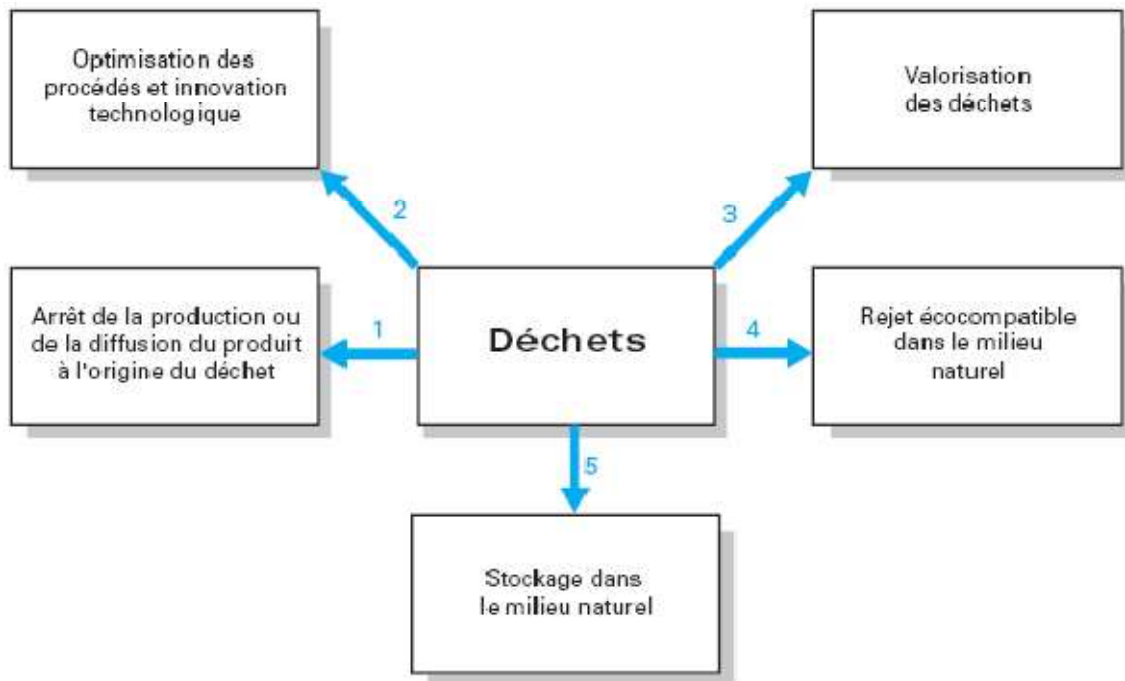


Figure 3 – Stratégies de gestion des déchets

- **Stratégie 1 : arrêt de la production ou de la diffusion du produit à l'origine du déchet**

Le choix de cette stratégie est généralement imposé par les impacts écologiques ou toxiques liés à l'usage de certains produits.

Exemple : interdiction des pyralènes (PCB), des CFC, du DDT et des insecticides organochlorés.

- **Stratégie 2 : optimisation des procédés et innovation technologique**

Cette stratégie est le champ privilégié de ce qu'il est convenu d'appeler les *technologies propres, sobres et économes*. Le recours à l'automatisation et à des techniques de séparation performantes (membranes, résines échangeuses...) permet souvent de substantielles économies de fluides et de matières (**réduction à la source**), tout en évitant la production de déchets dangereux (solvants, complexants...).

Exemple : développement de technologies innovantes dans la chimie de synthèse, l'élaboration des métaux, la fabrication du papier...

- **Stratégie 3 : valorisation des déchets**

En fonction de leur nature chimique, de leurs propriétés mécaniques, physico-chimiques ou thermiques, presque tous les déchets sont potentiellement valorisables. C'est cette stratégie qui se décline à travers toutes les filières de valorisation.

Exemple : développement des filières de valorisation de certains déchets : verre, plastiques, papier, métaux...

- **Stratégie 4 : rejet écopossible dans le milieu naturel**

Il est possible, dans certains cas, de permettre le retour des déchets dans le milieu naturel sans pour autant perturber ce milieu et poser des problèmes de type écologique, écotoxique ou toxique. C'est en général le cas pour les déchets inertes mais aussi pour les sous-produits de la

décomposition thermique de molécules organiques en composés simples comme l'eau et le gaz carbonique.

- **Stratégie 5 : stockage et confinement dans le milieu naturel**

Il s'agit dans ce cas de l'enfouissement des déchets. C'est la traditionnelle *mise en décharge* dans un contexte technique et réglementaire qui doit garantir l'innocuité du système au regard du milieu environnant.

L'expérience montre que, **pour la plupart des déchets, plusieurs stratégies peuvent être a priori utilisées.**

La première, la plus radicale, a été parfois utilisée ces dernières décennies, ce qui a permis de stopper les effets négatifs de quelques substances particulièrement néfastes.

La seconde, la stratégie des technologies propres et des produits propres, constitue une source permanente d'amélioration. On a en effet tendance, actuellement, à associer la recherche d'un *produit propre* à une *technologie propre*.

Les trois dernières stratégies sont, en fait, celles qui relèvent directement de la gestion des déchets, à travers les **deux objectifs principaux de valorisation et d'élimination**.

En fait, la gestion optimale du problème des déchets conduit le plus souvent à **utiliser plusieurs stratégies successivement**.

En conclusion, les deux premières stratégies appartiennent à ce qu'il est convenu d'appeler les **technologies propres, économes et écoproduits**. Elles représentent une voie d'avenir prometteuse en matière de développement durable, notamment par application de principes relatifs au concept d'**écologie industrielle**.

Les trois dernières stratégies (valorisation – rejet écocompatibles – stockage) constituent le secteur proprement dit du traitement des déchets pour un couple procédé-produit donné. Ces stratégies, pour être mises en œuvre, font appel à des dispositifs techniques, appelés **filières**.

3. Filières de traitement des déchets

On peut regrouper l'ensemble des réalisations techniques en matière de traitement des déchets à l'intérieur de 20 filières (tableau 2).

Tableau 2 : Les vingt filières de traitement des déchets

Filière n°	Technologie	Valorisation/élimination
1	Combustion	Valorisation énergétique (figure 4)
2	Élaboration de combustibles dérivés par procédés mécaniques	
3	Élaboration de combustibles dérivés par procédés thermiques	
4	Élaboration de combustibles dérivés par procédés biologiques	
5	Valorisation des matières premières organiques	Valorisation de matières premières
6	Valorisation des matières premières minérales	
7	Valorisation des liants hydrauliques et matériaux de structure	Valorisation de matériaux

8	Valorisation des verres et céramiques	
9	Valorisation des matières plastiques et caoutchoucs	
10	Valorisation des fibres cellulosiques de récupération	
11	Valorisation des autres matériaux	
12	Élaboration d'amendements organiques	Valorisation en agriculture et élevage
13	Élaboration d'amendements minéraux	
14	Alimentation animale	
15	Épuration des effluents liquides et gazeux	Valorisation en techniques de l'environnement
16	Conditionnement des déchets toxiques	
17	Incinération et autres procédés thermiques	Filières d'élimination (figure 5)
18	Traitements biologiques	
19	Traitements physico-chimiques	
20	Mise en décharge	

Toutes les filières identifiées visent les objectifs suivants :

- ✚ valorisation énergétique ;
- ✚ valorisation de matières premières organiques et minérales ;
- ✚ valorisation de matériaux ;
- ✚ valorisation en agriculture et en élevage ;
- ✚ valorisation en techniques de l'environnement ;
- ✚ élimination.

- **Valorisation énergétique**

- Le déchet remplace totalement ou partiellement un combustible classique (bois, charbon, pétrole, gaz) et la chaleur produite est valorisée sous différentes formes (vapeur, eau chaude, électricité...).
- Il est parfois nécessaire, avant combustion, que le déchet soit conditionné. On met alors en œuvre différents procédés mécaniques ou thermiques : tri, broyage, séchage...
- Des procédés thermiques peuvent servir à produire un combustible dérivé à partir du déchet. Ainsi la pyrolyse, la thermolyse, la gazéification permettent de transformer, en atmosphère non ou peu oxydante, les molécules hydrocarbonées des déchets en combustibles liquides, gazeux ou solides en jouant sur différents paramètres (pression, température...).
- Lorsque les déchets hydrocarbonés sont biodégradables, on peut mettre en œuvre des fermentations méthaniques ou alcooliques qui conduisent à la production de biogaz ou d'alcool utilisés ensuite comme combustibles gazeux ou liquides homogènes.

- **Valorisation des matières premières organiques et des matières premières minérales**

Une fraction notable des déchets est constituée de matières premières organiques naturelles ou de synthèse ou de matières premières minérales métalliques ou non métalliques. La mise en œuvre de procédés de séparation physiques, mécaniques ou de traitements thermiques, biologiques ou chimiques permet la récupération de ces matières premières : sucres, protéines, solvants, huiles, métaux ferreux et non ferreux, terres rares, sels, acides, bases...

- **Valorisation de matériaux (liants hydrauliques et matériaux de structure, verres et céramiques, fibres cellulosiques de récupération (papiers-cartons), autres matériaux)**

Les matériaux sont pris ici au sens de produits de composition complexe définis principalement par leur usage. Certaines catégories de déchets, à fort tonnage, sont des matériaux (verre, plastique, papiers) ou des substances susceptibles d'entrer dans la composition de matériaux utilisés en travaux publics et dans le bâtiment. C'est le cas par exemple des laitiers de hauts-fourneaux, des mâchefers d'incinération, des ordures ménagères, des pneumatiques...

- **Valorisation en agriculture et élevage (élaboration d'amendements organiques, d'amendements minéraux et alimentation animale)**

Le secteur agricole a de tout temps utilisé des déchets, en particulier ceux de sa propre activité. Des filières plus larges se sont développées avec le compostage de la fraction organique des ordures ménagères, l'épandage des boues de stations d'épuration ou bien encore l'alimentation animale (déchets alimentaires, farines...). Certains déchets (sable, chaux, scories potassiques) sont utilisés également comme amendements minéraux ou pour améliorer les propriétés des sols de culture.

- **Valorisation en techniques de l'environnement (épuration des effluents liquides et gazeux, conditionnement des déchets toxiques par d'autres déchets)**

Le développement des technologies de dépollution a conduit à rechercher, parmi les déchets et sous-produits, des composés aptes à remplir des fonctions épuratoires ou *inertantes* (par enrobage). C'est ainsi que les effluents liquides peuvent être traités par des flocculants « ex-déchets » comme le sulfate ferreux et que les effluents gazeux peuvent être désodorisés par passage à travers des boues de station d'épuration préalablement conditionnées. Enfin, signalons que différents déchets comme le verre, les matières plastiques, ou des déchets à propriété de liant hydraulique, peuvent être utilisés dans les procédés de stabilisation de vitrification d'autres déchets toxiques.

- **Elimination (procédés thermiques, traitements biologiques, physico-chimiques, mise en décharge)**

Il ne s'agit pas, en réalité, d'éliminer les déchets mais plutôt de mettre en œuvre des techniques visant à atténuer le caractère toxique de certains déchets, à les dégrader thermiquement ou biologiquement et, enfin, à les stocker, après un éventuel traitement de stabilisation-solidification, dans des centres d'enfouissement qui doivent répondre à des conditions strictes en matière de gestion et de protection de l'environnement.

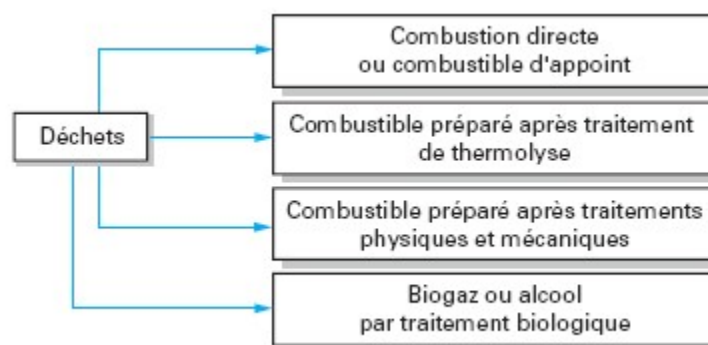


Figure 4 : Différentes techniques de valorisation énergétique

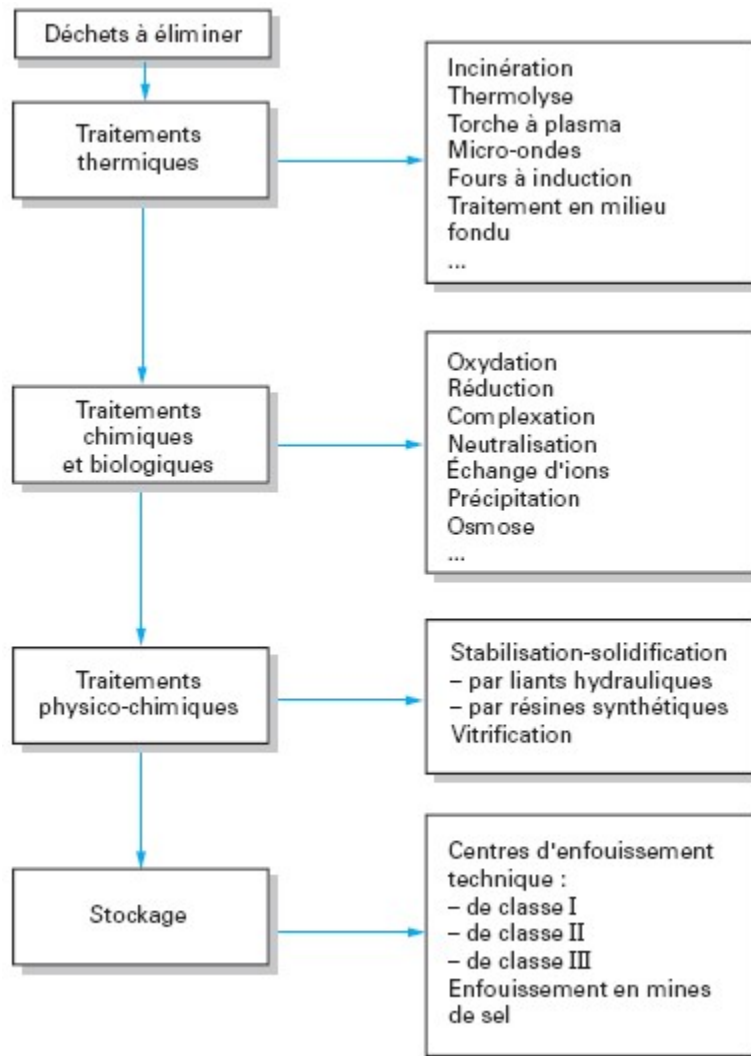


Figure 5 : Différents traitements possibles pour éliminer les déchets

Le tableau des filières proposé ici doit surtout être perçu comme un outil d'analyse des possibilités existantes en matière de choix d'une (ou de plusieurs) filières pour un déchet donné. Le choix définitif est tributaire d'autres considérations telles que :

- la connaissance analytique du déchet ;
- l'analyse spatio-temporelle du gisement ;
- le marché des technologies disponibles ;
- l'analyse environnementale des filières envisagées ;
- une analyse technico-économique des filières ;
- des contraintes imposées par les réglementations et les politiques.

Exemple : cas des pneumatiques

Si l'on met en regard de chaque filière du tableau les différentes propriétés de ce déchet, on constate que les **filières théoriquement possibles** sont :

- filière 1 : la combustion en unités spéciales ou en cimenterie ;
- filière 2 : l'élaboration de combustibles dérivés par des procédés mécaniques ;
- filière 3 : l'élaboration de combustibles dérivés par pyrolyse ou gazéification ;
- filière 5 : la récupération de matières premières organiques par décomposition thermique ou chimique ;

- filière 6 : la récupération des métaux de la carcasse du pneu ;
- filière 7 : l'utilisation des pneus comme agent de structure dans certains ouvrages de génie civil ;
- filière 9 : la valorisation du caoutchouc (poudrette) ;
- filière 11 : les multiples usages des pneus en substitution à divers matériaux (jeux, pare-chocs, chaussures...) ;
- filière 17 : la destruction thermique sans valorisation ;
- filière 20 : la mise en décharge ;

... sans oublier, bien-sûr, le rechapage... qui redonne une seconde vie au pneumatique.

À l'examen, toutes ces filières ont, peu ou pas, été mises en œuvre. Aucune ne semble actuellement émerger significativement. Peut-être d'ailleurs que ce sont les contraintes économiques qui pèsent sur le développement de ces filières ou bien alors qu'il est difficile d'en choisir une, ce qui n'est pas le cas pour le papier-carton, le fer, le verre... pour lesquels le choix est très limité.

4. Dimensions non technologiques des déchets

Il est maintenant admis que la gestion des déchets ne peut se limiter à la seule dimension technologique. D'autres considérations prennent une importance croissante et méritent une place à part entière dans l'analyse du système déchet.

- **Dimension législative et réglementaire**

Le cadre législatif et réglementaire est maintenant dense et contraignant, qu'il s'agisse de la nomenclature même des déchets, de la transparence exigée quant aux quantités générées et au devenir des déchets, ou bien encore des conditions de leur négoce et de leur transport. Le cadre européen, voire international, est maintenant courant.

- **Dimension économique**

Les niveaux de coût exigés par un traitement conforme des déchets donnent à leur gestion une importance nouvelle, tandis que l'accroissement de la valorisation induit des normes de qualité de plus en plus sévères, proches voire même supérieures dans certains cas à celles en vigueur pour les produits vierges.

- **Dimension écologique et sanitaire**

Il est indéniable que, pour des raisons qui tiennent autant à la réalité des faits qu'à une vision spécifique de ce problème par les populations, les déchets sont souvent associés à la détérioration de notre environnement et à de multiples risques pour la santé humaine.

De ce fait, le développement de produits et de procédés nouveaux se doit d'intégrer, le plus en amont possible, des solutions favorables au niveau des déchets potentiels, tant en ce qui concerne leur quantité et leur nature que leur devenir prévisible.

5. Conclusion

En résumé, nous avons tenté de structurer l'approche du problème déchets en développant toutes les logiques qui peuvent exister entre un gisement très hétérogène et des filières de traitement en nombre significatif.

Cette approche systématique doit aider à aborder des développements très spécialisés sur telle ou telle filière tout en se situant dans le cas plus général du système déchet. Les aspects

techniques ont été ceux le plus développés ici, mais il est évident que, dans le cas des déchets, plus peut-être que dans tout autre domaine, les dimensions économiques, réglementaires, juridiques, sociales, sanitaires et psychologiques sont d'une grande importance et qu'il faudra leur réserver toute la place nécessaire.

Chapitre II : Classification des déchets et lois en vigueur

La production des déchets par les ménages « déchets ménagers » avoisine les 8 millions de tonnes/an (environ 0.75 kg/habitant).

La production des déchets de chantiers (bâtiment) au Maroc avoisine les 10 millions de tonnes/an

L'industrie marocaine produit environ 975 000 tonnes par an de déchets industriels dont 120 000 tonnes/an sont des déchets dangereux.

Tous ces déchets sont éliminés dans des décharges sauvages ou encore dans des points noirs et dans les cours d'eau sans aucun traitement ni contrôle. Cette situation engendre de graves conséquences aussi bien pour la santé publique et l'environnement que pour l'avenir des activités socio-économiques dans notre pays.

Depuis l'année 2006, le Maroc dispose d'une loi complète sur la gestion des déchets « Loi n° 28-00 relative à la gestion des déchets et à leur élimination » (voir Dahir n° 1-06-153 du 30 chaoual 1427 (22 novembre 2006) , BO n° 5480 du 7 décembre 2006)

La loi marocaine n° 28-00 relative à la gestion des déchets et à leur élimination comporte dans son premier chapitre « objectifs et définitions », article 3, une définition de déchets et des différentes catégories de déchet :

Extrait de loi marocaine n° 28-00 relative à la gestion des déchets et à leur élimination

Article 3 : Au sens de la présente loi, on entend par :

1. **Déchets**: tous résidus résultant d'un processus d'extraction, exploitation, transformation, production, consommation, utilisation, contrôle ou filtration, et d'une manière générale, tout objet et matière abandonnés ou que le détenteur doit éliminer pour ne pas porter atteinte à la santé, à la salubrité publique et à l'environnement ;
2. **Déchets ménagers** : tout déchet issu des activités des ménages ;
3. **Déchets assimilés aux déchets ménagers** : tout déchet provenant des activités économiques, commerciales ou artisanales et qui par leur nature, leur composition et leurs caractéristiques, sont similaires aux déchets ménagers ;
4. **Déchets industriels** : tout déchet résultant d'une activité industrielle, agroindustrielle, artisanale ou d'une activité similaire
5. **Déchets médicaux et pharmaceutiques** : tout déchet issu des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif, palliatif ou curatif dans les domaines de la médecine humaine ou vétérinaire et tous les déchets résultant des activités des hôpitaux publics, des cliniques, des établissements de la recherche scientifique, des laboratoires d'analyses opérant dans ces domaines et de tous établissements similaires ;
6. **Déchets dangereux** : toutes formes de déchets qui, par leur nature dangereuse, toxique, réactive, explosive, inflammable, biologique ou bactérienne, constituent un danger pour l'équilibre écologique tel que fixé par les normes internationales dans ce domaine ou contenu dans des annexes complémentaires ;
7. **Déchets inertes** : tout déchet qui ne produit pas de réaction physique ou chimique tels les déchets provenant de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation et qui ne sont pas constitués ou contaminés par des substances dangereuses ou par d'autres éléments générateurs de nuisances ;
8. **Déchets agricoles** : tout déchet organique généré directement par des activités agricoles ou par des activités d'élevage ou de jardinage ;
9. **Déchets ultimes** : tout résidu résultant de déchets traités ou ceux qui ne sont pas traités selon les conditions techniques et économiques actuelles ;
10. **Déchets biodégradables** : tout déchet pouvant subir une décomposition biologique naturelle, anaérobie ou aérobie, comme les déchets alimentaires, les déchets de jardins, de papiers et de cartons ainsi que les cadavres d'animaux ;

Le texte complet de la loi 28-00 est annexé sous forme d'un fichier pdf.

B. Les filières de traitement des déchets

Chapitre III. Traitements biologiques

Le principe général des traitements biologiques est d'exploiter certaines activités microbiennes en les stimulant de manière contrôlée afin soit de **réduire les nuisances** potentielles des déchets (odeurs, risques sanitaires, caractère polluant au sens large du terme), soit de les **valoriser sous forme énergétique ou sous forme matière**.

De ce fait, les procédés biologiques sont en pratique généralement utilisés pour le **traitement de déchets essentiellement organiques présentant un caractère biodégradable**, à savoir notamment les déchets associés à l'exploitation ou à la consommation de la biomasse (sous-produits d'élevage, de cultures, d'industries agroalimentaires ; fraction organique des ordures ménagères).

Les deux principaux traitements biologiques sont : le traitement aérobie (compostage) et le traitement anaérobie (méthanisation et fermentation alcoolique). Le **compostage (traitement aérobie)** est un traitement relativement rapide visant à une stabilisation du déchet et à sa valorisation matière, alors que le **traitement anaérobie (méthanisation ou fermentation alcoolique)**, souvent plus longs, permettent une valorisation énergétique.

Les procédés de traitement biologique des déchets organiques sont des techniques robustes bien éprouvées en pratique dans leurs domaines d'application privilégiés. Ils n'exigent pas de technologies sophistiquées et sont donc relativement peu onéreux à mettre en œuvre. Cependant, un certain savoir-faire est nécessaire pour une mise en œuvre efficace et pérenne, notamment concernant la bonne adéquation entre les matériels techniques utilisés, les conditions opératoires, le ou les déchets traités, le contexte socio-économique et technique, et les objectifs fixés au traitement.

1. Principaux déchets concernés

Le recours à des micro-organismes pour traiter un matériau quelconque implique que ce matériau soit transformable par les micro-organismes considérés, c'est-à-dire que la matière qu'il contient puisse être utilisée par les micro-organismes pour leur permettre de vivre à ses dépens. On parle généralement de **biodégradabilité** pour qualifier cette caractéristique.

Déchets Biodégradables :

Ce sont des **déchets essentiellement organiques** (teneur en carbone de l'ordre de 40 à 50 % de la masse sèche) **d'origine végétale ou animale**. Les déchets d'origine animale sont, en général, plus riches en azote (quelques pour-cent de la masse sèche) que ceux d'origine végétale (généralement moins de 1 % de la masse sèche), et souvent plus humides (souvent plus de 70 % de la masse fraîche).

1.1 Déchets agricoles et agroalimentaires

Ils sont générés au niveau soit de la **production agricole (élevages et cultures)**, soit du stockage, du conditionnement et de la transformation des produits agricoles (**industries agroalimentaires**). Pour les déchets agricoles, on retrouve essentiellement les **déjections animales**, les **déchets de culture** qui sont l'ensemble des parties végétales qui ne constituent pas la production végétale.

Pour les **déchets des industries agroalimentaires** on retrouve notamment **les abattoirs et les industries laitières et fromagères** pour les déchets d'origine animale, et les industries

vitivinicoles, les conserveries, les brasseries et l'industrie sucrière pour les déchets d'origine végétale.

1.2 Déchets municipaux

Les déchets municipaux regroupent les **ordures ménagères OM**, les déchets encombrants des ménages, les déchets des artisans, commerçants et de certaines entreprises, et les déchets des communes qui englobent les déchets des espaces verts, des marchés, etc. Parmi ces déchets, certains sont issus de la biomasse et sont ainsi susceptibles d'être traités par voie biologique. Il s'agit notamment de la fraction organique (hors plastiques) des OM (déchets de cuisine dits « déchets putrescibles », mais aussi papiers/cartons, soit environ **60 % de la masse des OM**) et de certains déchets des espaces verts et des marchés.

1.3 Boues de station d'épuration des eaux usées

Les stations d'épuration assurent le traitement des eaux usées municipales et produisent des boues obtenues par décantation soit des eaux usées avant épuration (boues primaires), soit des eaux traitées (boues secondaires). Les boues peuvent être traitées par voie biologique, seules (digestion anaérobie) ou en mélange avec d'autres sous-produits tels que des copeaux de bois (permettant une meilleure aération pour le compostage). La valorisation des boues (brutes ou après traitement biologique) **par épandage sur les sols** est une technique déjà utilisée, mais qui soulève un certain nombre de questionnements relatifs au devenir des micropolluants (notamment les métaux) qui leur sont associés. Cette pratique est **réglementée par la norme NF 44-041 qui fixe des concentrations limites en certains métaux lourds à la fois dans la boue devant être épandue et dans le sol recevant l'épandage.**

2. Compostage

2.1 Objectifs et principe

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.**

La mise en œuvre du compostage comporte généralement deux étapes biologiques (figure 1), auxquelles s'ajoutent des prétraitements et post traitements éventuellement nécessaires broyages, mélange avec d'autres produits, tris, etc.

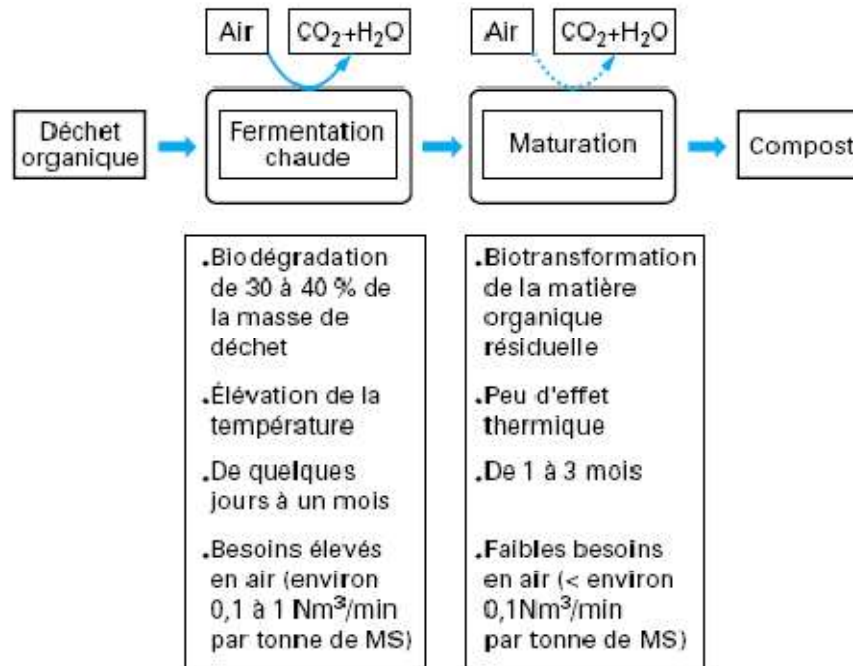


Figure 1 – Étapes biologiques du compostage, pouvant être précédées et suivies de traitements mécaniques et/ou physico-chimiques divers

La **première étape** biologique, dite de fermentation chaude, répond aux deux premiers objectifs de **stabilisation du déchet et de réduction de sa masse**. Au cours de cette étape, la matière organique la plus facilement biodégradable du déchet est oxydée par des micro-organismes aérobies qui consomment de l'oxygène et libèrent de la chaleur. On assiste donc, si le déchet est suffisamment biodégradable et aéré, et que les pertes thermiques sont réduites à **une élévation de la température qui peut atteindre 80 °C**. Pour de nombreux déchets de biomasse, on enregistre une **dégradation d'environ 30 à 40 % de la masse qui s'accompagne d'une réduction d'environ 50 % du volume**. La durée de cette première étape varie de quelques jours à quelques semaines en fonction de la nature du déchet, des conditions opératoires (aération, etc.) et de contraintes diverses (dimensionnement de l'installation, objectifs fixés...).

À l'issue de cette étape, le déchet est beaucoup moins bioévolutif qu'avant traitement puisque sa fraction la plus biodégradable a été éliminée, et, en outre, les cellules indésirables (micro-organismes pathogènes, graines végétales) ont pu être détruites par effet thermique si la température dépasse 60 °C pendant au moins 5 à 24 heures. **On obtient donc un déchet relativement stabilisé pouvant être stocké ou valorisé dans des conditions plus acceptables que le déchet de départ**. Cependant, si l'objectif de production d'un amendement organique (compost) est poursuivi, il est nécessaire de modifier les caractéristiques de la matière organique résiduelle pour lui conférer des propriétés proches de celles de l'humus. C'est l'objectif de la **seconde étape** du traitement (figure 1). Celle-ci ne s'accompagne que d'une faible dégradation de matière et, de ce fait, les besoins en oxygène sont faibles (moins de 0,1 m³ d'air par minute et par tonne de matière sèche) et l'échauffement limité. La température en cours de maturation est donc de l'ordre de 20 à 30 °C.

2.2 Aspects microbiologiques

Contrairement au cas de la digestion anaérobie, la connaissance des aspects microbiologiques ou biochimiques du traitement ne sont pas indispensables à une bonne maîtrise du

compostage. La plupart des micro-organismes impliqués sont en effet robustes et ne s'organisent pas en une chaîne trophique relativement fragile comme c'est le cas en anaérobiose.

2.3 Paramètres importants et mise en œuvre du compostage

Les paramètres du compostage sont ceux pouvant influencer l'activité microbienne. On peut distinguer deux catégories de paramètres, à savoir les paramètres de conduite du procédé et les paramètres caractéristiques du déchet. Les **paramètres de conduite du procédé** sont ceux qui, pour un cas de figure donné (un déchet donné dans une configuration donnée traité dans une installation donnée), permettent de contrôler ou de suivre l'avancement du processus. Il s'agit essentiellement de **l'aération**, de **la température** et de la **teneur en eau**. Ces trois paramètres sont interdépendants, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de contrôler l'un d'entre eux sans affecter plus ou moins significativement au moins l'un des deux autres paramètres.

Les **paramètres caractéristiques du déchet** à traiter ne peuvent, en revanche, pas être modifiés en cours de traitement et ne permettent donc pas de piloter le procédé. Il s'agit notamment de la **biodégradabilité** et de la **granulométrie du déchet**, de son **pH** et de son **rapport C/N/P** (ratios des masses de carbone, azote et phosphore dans le déchet).

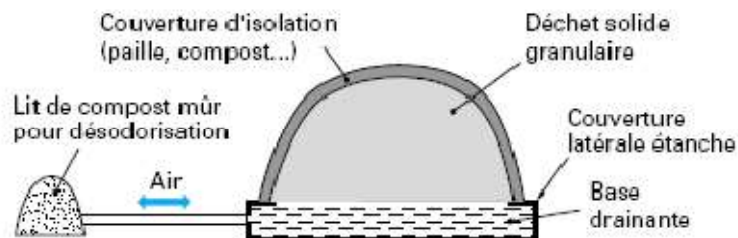


Figure 2 : Représentation schématique d'un dispositif de compostage en tas

Typiquement, les **tas** ont une hauteur de 2 à 3 m sur un diamètre à la base de 3 à 5 m. Les **andains** sont des tas dont la longueur peut atteindre une centaine de mètres.



2.4 Lombricompostage

Le lombricompostage est une variante reposant sur l'utilisation de vers de terre (lombrics) pour consommer et dégrader la matière organique du déchet. Il peut s'utiliser :

— soit en une étape unique de traitement ;

— soit après une étape de fermentation chaude en substitution de l'étape classique de maturation.

La première approche concerne essentiellement le domaine agricole car elle nécessite des surfaces relativement importantes (de l'ordre de $2,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$ de déchet). La deuxième approche évite le problème de l'échauffement car le lombricompostage s'effectue après que la fraction la plus biodégradable du déchet ait été éliminée par une étape classique de fermentation chaude. Elle permet donc de travailler dans des systèmes plus compacts (rapport surface/volume faible).

2.5 Caractéristiques et utilisations du compost

Le compost obtenu à l'issue de la chaîne globale de traitement est un produit susceptible d'être utilisé comme amendement organique des sols. Cependant, sa composition et ses caractéristiques dépendent à la fois de la nature du ou des déchets traités ainsi que des conditions opératoires du procédé de traitement.



Quelle que soit sa qualité agronomique, le compost n'a cependant qu'une faible valeur marchande. **Le prix à la tonne de déchet traité est compris entre 50 et 80 euros.** En outre, il ne joue pas suffisamment le rôle d'engrais et l'apport de nutriments minéraux complémentaires reste nécessaire pour des cultures intensives.

Enfin, la présence possible de micropolluants associés au compost représente probablement le risque le plus important lié à son utilisation sur des terres agricoles. C'est notamment le cas des métaux lourds, qui présentent une forte affinité pour la matière organique. La norme NF U 44-041 relative à l'épandage des boues de station d'épuration des eaux usées fixe des limites de concentrations en divers métaux qui, par extension peuvent être utilisées pour l'utilisation de divers composts sur des sols agricoles. Les métaux concernés sont Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn et la somme Cr + Cu + Ni + Zn. Des teneurs limites sont fixées dans les boues épandues et dans le sol recevant l'épandage qui doit avoir un pH supérieur à 6 pour que l'épandage soit autorisé.

3. Méthanisation

3.1 Objectifs et principe

La méthanisation est un processus de digestion anaérobie poursuivant en général un double objectif de valorisation énergétique par récupération de méthane (CH_4) et de stabilisation des déchets organiques. La filière globale de traitement comporte souvent au moins deux étapes comme l'illustre la figure 5.

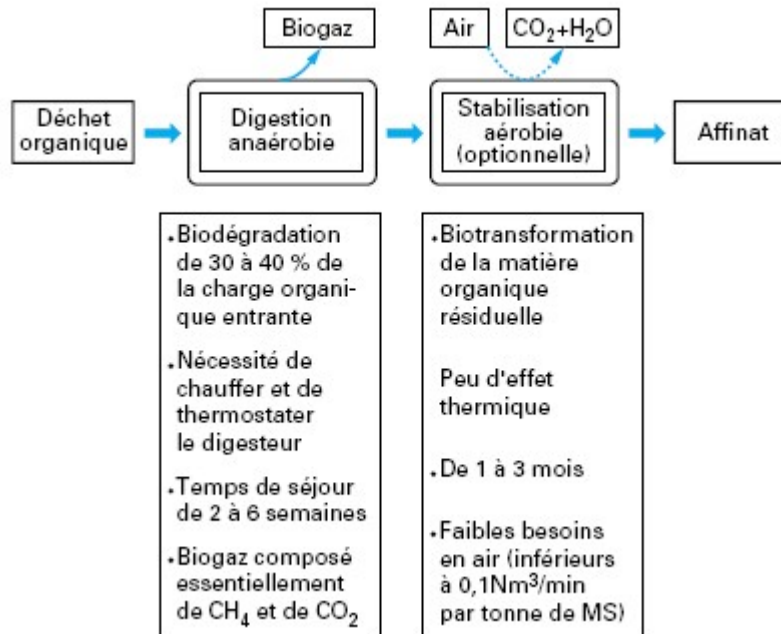


Figure 5 – Étapes biologiques de la filière de méthanisation de déchets organiques, pouvant être précédées et suivies de traitements mécaniques et/ou physico-chimiques divers

La première étape constitue la digestion méthanique proprement dite et se déroule en anaérobiose, c'est-à-dire en l'absence totale d'oxygène. Elle consiste en la biodégradation d'une fraction de la matière organique du déchet conduisant à la libération d'un biogaz formé des métabolites gazeux de biodégradation. Le biogaz contient de 50 à 70 % de méthane environ. La durée globale de la digestion méthanique est généralement de l'ordre de deux à six semaines en fonction de la nature du déchet, des conditions opératoires (température notamment) et des objectifs visés (taux de biodégradation et productivité volumique de méthane recherchés). Le temps de séjour sera réduit pour favoriser une forte production de biogaz par unité de temps et de volume de digesteur, et augmenté si l'objectif recherché est plutôt d'accroître le taux de biodégradation.

À l'issue de l'étape de traitement anaérobie, on obtient le digestat qui est constitué par le déchet initial débarrassé de sa fraction organique la plus biodégradable (si la durée de cette étape a été suffisante).

Le digestat peut être stocké ou utilisé tel quel, mais il doit en général subir un certain nombre de post-traitements dans une seconde étape pour être rendu stockable ou valorisable parmi lesquels une stabilisation aérobie est envisageable pour obtenir à la fin un matériau similaire au compost, généralement appelé affinat (figure 5).

3.2 Aspects biochimiques et microbiologiques

Contrairement au processus de compostage, la connaissance des aspects biochimiques et microbiologiques est fondamentale pour une bonne maîtrise de la digestion méthanique. La biodégradation anaérobie de la matière organique est en effet un processus séquentiel comportant quatre étapes biochimiques réalisées par trois groupes bactériens fonctionnant en symbiose comme l'illustre la figure 6. Ces trois groupes bactériens ont des exigences nutritives et des caractéristiques physiologiques très distinctes.

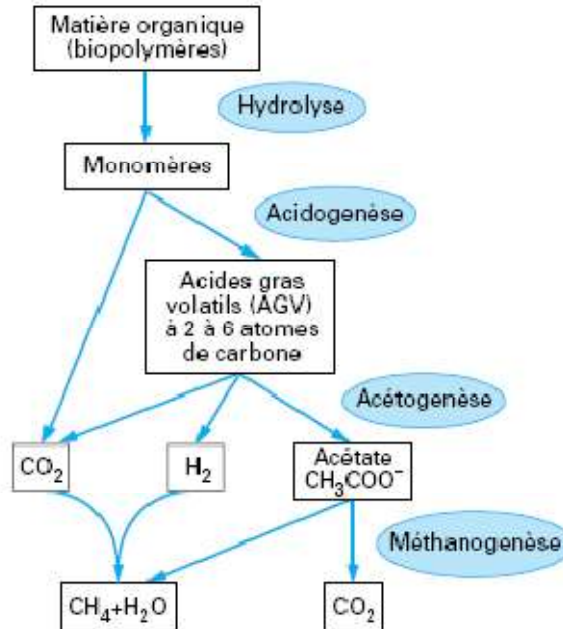


Figure 6 – Représentation simplifiée des étapes de biodégradation anaérobie de la matière organique des déchets de biomasse.

3.3 Paramètres importants

3.3.1 Température

La digestion anaérobie de la matière organique ne produisant pas significativement de chaleur, il est nécessaire de chauffer les digesteurs pour maintenir une température compatible avec une bonne activité microbienne. Ce chauffage est assuré généralement en consommant une partie du méthane produit.

3.3.2 pH

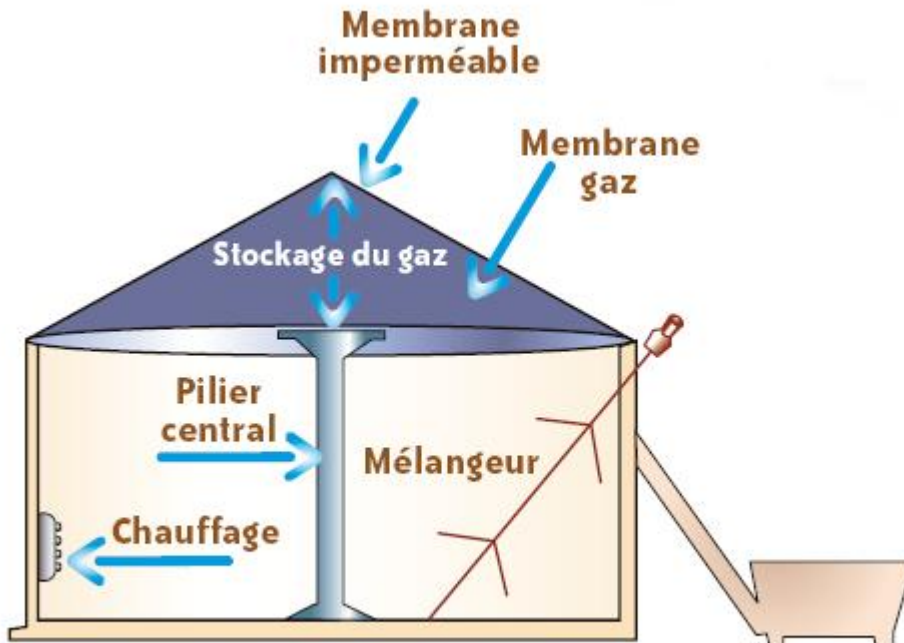
La zone optimale de pH pour la méthanisation est située aux alentours de la neutralité. Les bactéries méthanogènes sont fortement inhibées en dessous de 6. Pour éviter l'inhibition acide des bactéries acétogènes et méthanogènes, on préfère en général travailler, en routine, à des pH compris entre 7,5 et 8,0 pour se garantir une plage de sécurité permettant d'intervenir pour corriger le pH si une baisse régulière est constatée. Le pH est donc le principal paramètre de contrôle du processus de méthanisation.

3.3.3 Charge organique entrante

Si le déchet est bien biodégradable, il faut éviter les surcharges brutales (augmentation de plus de 20 % en moins d'une journée) qui risquent de déséquilibrer le processus et d'acidifier le milieu par suite d'une trop rapide production d'AGV

3.4 Procédés pour déchets solides ou boueux

Les technologies utilisées se doivent avant tout d'être robustes, ce qui généralement conduit à éviter toute sophistication superflue. Les digesteurs sont généralement constitués d'une cuve cylindrique, isolée thermiquement et souvent enterrée. La cuve est totalement étanche à l'air. Une sortie au sommet de la cuve permet de collecter le biogaz produit vers un gazomètre souple. La cuve est remplie par le déchet à traiter, en laissant un ciel gazeux de volume le plus faible possible (souvent de l'ordre du dixième du volume total du digesteur).



3.5 Caractérisation et utilisation des produits

3.5.1 Biogaz

La composition du biogaz formé dépend de la nature du déchet et des conditions opératoires. Les constituants principaux sont le méthane et le dioxyde de carbone. D'autres constituants peuvent être rencontrés comme l'indique le tableau 1. L' H_2S provient de la réduction du soufre ou des sulfates éventuellement présents dans le déchet. Ce gaz peut poser des problèmes liés notamment à son odeur caractéristique à laquelle le nez humain est très sensible, à son caractère neurotoxique et à ses propriétés corrosives vis-à-vis de nombreux métaux (il peut facilement être oxydé en acide sulfurique).

D'autres constituants gazeux (N_2 , H_2 , CO) peuvent être détectés sous forme de traces dans le biogaz, notamment lors de la méthanisation des ordures ménagères.

Tableau 1 – Fourchettes de concentrations des principaux constituants du biogaz formé par digestion méthanique de déchets de biomasse

Constituant	Teneur (en % volume/volume du gaz sec)
CH_4	50 à 70
CO_2	25 à 30
H_2S	0,5 à 5
N_2	0,5 à 3

H ₂	0,1 à 1
CO	< 0,1

Le biogaz peut connaître, a priori, toutes les formes de valorisation énergétique d'un combustible gazeux, à savoir combustion en chaudière pour production de chaleur (pour chauffage, eau chaude sanitaire, réseau de vapeur), combustion en groupe électrogène pour transformation en énergie électrique et combustion en moteur à explosion pour transformation en énergie mécanique (motopompes, véhicules automobiles).

3.5.2 Digestat

Le digestat est par définition la matière résiduelle obtenue après digestion anaérobie du déchet. Le déchet conservant l'intégralité de ses éléments nutritifs principaux (N, P, K) au cours de la digestion (il perd essentiellement C, H et O sous forme du mélange CH₄ + CO₂), le digestat est un produit potentiellement valorisable comme amendement organique des sols, après mélange éventuel avec des engrais minéraux.

La matière organique du digestat ne possède pas de bonnes propriétés agronomiques, car il ne s'agit pas d'une matière humifiée, et un certain nombre de risques sanitaires peuvent exister (présence potentielle de germes pathogènes), car l'effet thermique d'hygiénisation du compostage n'a pas lieu en anaérobiose. Il est donc généralement nécessaire de procéder à des post-traitements du digestat pour envisager son stockage ou sa valorisation dans de bonnes conditions comme l'ajout d'un traitement aérobie de maturation du digestat pour le transformer en affinat (riche en humus).

Les remarques faites au paragraphe 2.5 sur la présence possible d'éléments indésirables et/ou de micro-polluants dans le compost sont également valables pour le digestat ou l'affinat. La même réglementation est applicable pour la valorisation agricole de ces produits (normes NF U 44-051 et NF U 44-041 en France).

4. Fermentation alcoolique

Si le compostage et la méthanisation sont les traitements biologiques les plus utilisés pour les déchets de biomasse, d'autres traitements biologiques sont envisageables, ou peuvent s'appliquer à d'autres types de déchets comme c'est le cas de la fermentation alcoolique.

Il s'agit de la conversion biologique anaérobie des sucres réalisée essentiellement par des levures. Le type de fermentation le plus largement utilisé est la fermentation éthanolique dans laquelle le produit final est l'éthanol C₂H₅OH. Ce processus est largement utilisé dans l'industrie agroalimentaire des boissons fermentées (vins, bières, etc.), mais d'autres utilisations industrielles de l'éthanol sont possibles, notamment comme carburant ou produit de base pour l'industrie chimique.

Exemple : le programme Proalcool au Brésil a démontré la faisabilité de cette démarche à partir de la canne à sucre utilisée comme substrat de départ, l'éthanol produit étant commercialisé comme carburant automobile.

5. Avantages et inconvénients généraux

Lorsque les traitements biologiques sont applicables, leur avantage principal par rapport aux techniques concurrentes de traitement physico-chimiques (stabilisation, etc.) ou thermiques (incinération, etc.) est généralement lié à un coût moindre, soit au niveau de l'investissement ou du fonctionnement, soit au niveau du post-traitement des « déchets de seconde génération », c'est-à-dire des sous-produits générés par le procédé de traitement lui-même. En effet, les

traitements biologiques mettent souvent en œuvre des technologies relativement peu sophistiquées et peu énergivores, utilisent relativement peu de réactifs et génèrent ainsi relativement peu de sous-produits. D'autre part, les traitements biologiques bénéficient souvent d'une image relativement positive auprès du public.

Cependant, un certain nombre **d'inconvénients** majeurs limitent leur utilisation. Notamment, **la durée des traitements biologiques est généralement plus longue que celle des traitements thermiques ou physico-chimiques concurrents.** Par ailleurs, les activités microbiennes sont sensibles aux conditions de milieu et peuvent être perturbées voire inhibées par la présence (chronique ou accidentelle) dans le déchet de composés particulièrement toxiques pour les micro-organismes utilisés. Enfin, l'accessibilité des polluants aux micro-organismes est une limite cinétique parfois importante, dont l'effet sur la durée du traitement peut être difficilement prévisible, rendant ainsi difficile l'engagement d'un opérateur sur une garantie de résultat en une durée de traitement donnée, qui est pourtant souvent exigée par le client.

Chapitre IV Traitements thermiques : incinération des déchets solides

1. Traitements thermiques

Une alternative à la mise en décharge pour les ordures ménagères résiduelles

Les traitements thermiques sont des traitements par l'action de la chaleur. Ils réduisent, dans des conditions contrôlées, le potentiel polluant, la quantité ou le volume des déchets. Les trois principaux procédés sont l'incinération, la gazéification et la thermolyse (pyrolyse).

1.1 La thermolyse

La thermolyse ou pyrolyse est un traitement thermique sans apport d'air ou avec apport d'air limité (teneurs en $O_2 < 1\%$).

Le processus de pyrolyse se limite à la destruction thermochimique du déchet, sans dégagement de chaleur susceptible d'entretenir la réaction. Il est donc nécessaire de fournir de l'énergie au système, soit par un apport externe, en chauffage indirect, soit par combustion partielle ménagée d'une partie de la charge.

1.2 La gazéification

Lorsque l'on chauffe un déchet dans une atmosphère en défaut d'air mais enrichie en vapeur d'eau et/ou dioxyde de carbone (agents réactionnels), les matières volatiles émises ne subiront pas de processus de combustion et le carbone fixe se mettra à réagir avec la vapeur d'eau et CO_2 à des températures de $850-900^\circ C$, dans des réactions endo/exothermiques de transformation thermochimiques, dites de gazéification.

Les réactions de gazéification sont globalement endothermiques, et l'apport d'énergie calorifique nécessaire est en général réalisé en brûlant une faible partie de la charge.

Bien que les techniques de gazéification soient développées pour le charbon, elles ne sont pas encore appliquées (du moins à l'échelle industrielle) aux déchets.

1.3 L'incinération

L'incinération est un traitement basé sur la combustion avec excès d'air.

Avantages :

- traitement adapté à toutes sortes de déchets contrairement aux autres modes de valorisation (tri, compostage ...). Cependant, il devrait aujourd'hui être réservé aux fractions résiduelles des collectes séparatives, et aux refus de tri ou de compostage.
- diminue fortement le volume des déchets.
- génère de l'énergie dont la valorisation doit être optimisée. Le contenu énergétique des ordures ménagères est environ 2300 kWh/tonne.

Une réduction de 70 % environ de la masse des déchets et de 90 % du volume.

Contrainte :

- Traitement indispensable des gaz pour limiter les risques de pollution de l'air. Mais les techniques de dépollution sont sophistiquées ; la modernisation du parc des installations est en cours afin de respecter les exigences de la réglementation.

Les déchets concernés :

- Les ordures ménagères. Toutefois dans les nouvelles installations ne sont incinérés que les déchets résiduels des autres traitements (tri, compostage),

- Les déchets industriels banals,
- Les boues de station d'épuration,
- Les déchets d'activités de soins à risques infectieux.

Sous-produits générés :

- Les mâchefers récupérés en sortie de fours,
- Les résidus d'épuration des fumées (REFIOM),
- Les fumées épurées.

Coût de l'incinération

Le coût de l'incinération est d'environ 80 euros par tonne incinérée.

2. Principes généraux de l'incinération

Au niveau d'une usine de traitement des déchets ménagers par incinération deux difficultés sont à considérer :

- Les problèmes mécaniques liés à la manutention et ses conséquences (usure, coincement, etc.) ;
- Les problèmes liés à la combustion

Les solutions sont fonction de la composition des déchets qu'il est possible de ramener à trois constituants essentiels :

- Les matières combustibles ;
- Les inertes ;
- L'eau.

A ces trois constituants correspondent les trois phases successives de la combustion :

- Le séchage ;
- La combustion proprement dite ;
- La fin de combustion et le refroidissement des mâchefers

2.1 La combustion

Déchet = matières combustibles + Inertes + Eau

La fraction combustible est composée grossièrement de carbone et d'hydrogène. La teneur des déchets en ces deux éléments leur confère leurs caractéristiques thermiques : débit d'air nécessaire à la combustion, débit des fumées, pouvoir calorifique.

Caractéristiques de l'air (comburant)

Composition volumique : $Air(sec) = 20.8\%O_2 + 79.2\%N_2$ (avec des traces de gaz neutres)

Combustion du carbone

✓ Réaction complète : $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 94.05 \text{ Kcal / mole}$

Combustion de l'hydrogène

La réaction est la suivante : $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O(vap) + 57.8 \text{ Kcal / mole}$

Quantité d'air nécessaire (air théorique)

Les principaux éléments intervenant dans les réactions de combustion sont le carbone et l'hydrogène. Cependant pour des calculs plus précis il faut tenir compte aussi de la teneur en oxygène et en soufre.

La formule suivante permet la détermination du volume d'air nécessaire à la combustion d'un kilogramme d'un combustible quelconque (déchet) :

$$Va = 0.095xC + 0.2685xH + 0.0335xS - 0.0335xO$$

Où Va est le volume d'air nécessaire en Nm^3 par kg de combustible. C, H, S et O sont les teneurs en carbone, hydrogène, soufre et oxygène exprimées en % de la masse de combustible.

Va est aussi appelé *air théorique* ou *pouvoir comburivore* du combustible.

Conditions et nécessité d'emploi d'excès d'air

L'excès d'air jusqu'à un certain point améliore l'efficacité de la combustion et permet de tendre vers une combustion complète qui permet d'obtenir le maximum de dégagement thermique et permettra l'obtention d'une température de combustion maximale. Au-delà de cet optimum tout excès d'air sert plus à une dilution des fumées et un abaissement de la température à l'intérieur du four. C'est un moyen de régulation important. Cette régulation doit tenir compte des exigences suivantes :

- La température des gaz dans la chambre de combustion doit être inférieure à $1000^\circ C$ pour éviter la fusion et le ramollissement des cendres et mâchefers (problèmes d'entretien).
- Il doit assurer une combustion complète (amélioration du rendement dans le cas de la récupération de la chaleur) et maintenir la température à un niveau supérieur à $850^\circ C$ pour minimiser la formation de certains produits toxiques (notamment les dioxines).

Les difficultés de régulation proviennent entre autres de l'hétérogénéité des déchets. *Dans un four qui fonctionne dans des conditions bien régulées la température varie dans la gamme $850^\circ C - 1000^\circ C$.*

Les valeurs typiques de l'excès d'air s'échelonnent entre 80% et 150%.

2.2 Refroidissement des gaz de combustion

La température des gaz à la sortie de la chambre de combustion est comprise entre 850°C et 1000°C. Lorsqu'il n'y a pas de récupération, cette température doit être ensuite abaissée jusqu'à 300°C avant l'introduction au dépoussiéreur. En cas de récupération, à la sortie de la chaudière, la température peut varier entre 150°C et 300°C suivant l'importance de la récupération.

Nécessité du refroidissement

Ce sont les éléments de l'installation situés à l'aval du four: gaines, dépoussiéreurs, ventilateurs et cheminée qui imposent une limitation de la température des fumées pour des raisons de dimensionnement et de bonne tenue des matériaux. La valeur limite se situe aux environs de 300 °C.

2.3 Récupération de la chaleur dans les gaz de combustion

L'incinération des déchets génère de l'énergie. Le contenu énergétique des ordures ménagères est de l'ordre de 2300 kWh par tonne (8280 kJ/kg).

Considérant le fait que cette énergie après combustion est libérée sous forme de gaz chauds à haute température (850°C à 950°), que de toutes les façons il faut refroidir jusqu'à 300°C au minimum, la récupération de l'énergie s'impose.

La récupération de la chaleur contenue dans les gaz de combustion s'opère essentiellement à l'aide de chaudières (boilers) qui stockent l'énergie thermique récupérée sous forme de vapeur d'eau. Cette vapeur peut être valorisée selon trois voies :

- Production de chaleur uniquement comme alimentation d'un réseau de chauffage urbain ou privé.
- Production d'électricité uniquement par le biais d'une turbine à condensation.
- Production combinée d'électricité (par une turbine à contre pression) et de chaleur.

2.4 Traitement des fumées

Malgré ses aspects positifs, l'incinération des déchets présente des limites : elle génère des émissions polluantes. On estime généralement qu'une tonne d'ordures ménagères génère 5200 m³ de fumées qui contiennent des polluants qu'il faut capter, tels les poussières, métaux lourds, les dioxines ou les oxydes d'azote et de soufre. L'équipement pour le traitement des fumées peut comporter plusieurs modules :

- le dépoussiérage;
- la neutralisation des gaz acides;
- le traitement des dioxines et furanes;
- le traitement des oxydes d'azote.

L'épuration des fumées génère des résidus appelés **REFIOM** (Résidus d'Épuration des Fumées des Incinérateurs des Ordures Ménagères). Une tonne d'ordures ménagères incinérée génère 25 à 40kg de REFIOM.

2.5 Mâchefers – Cendres volantes

Les produits solides de la combustion sont composés des inertes non volatiles présents dans les déchets ménagers (métaux, verres, cendres des produits combustibles...). Les inertes qui représentent 15 à 40 % du poids des déchets se retrouvent sous forme de mâchefers (90%) et cendres volantes (10 %).

2.5.1 Mâchefers

Les mâchefers ont l'aspect d'une « grave » grisâtre dont la granulométrie varie entre 0 et 30 mm et qui contient de nombreux éléments métalliques et des fragments de verre.

La température de fusion des mâchefers est comprise entre 1000 et 1100°C.

Il est donc impératif, pour éviter le colmatage des grilles et des fumisteries et éviter l'augmentation des imbrûlés (efficacité de la combustion) de maintenir un excès d'air suffisant pour limiter la température des gaz en cours de combustion autour de 900 à 1000°C.

A titre indicatif, le tableau ci après donne une analyse type de scories (composante principale des mâchefers) :

Carbonates	1.85%
Chlorures	0.01%
Sulfates	0.83%
Anhydride phosphorique	0.75%
Chaux	11.23%
Magnésie	1.97%
Oxyde de potassium	0.91%
Oxyde de sodium	7.88%
Silice	53.61%
Alumine	6.14%
Oxyde ferrique	9.76%
Plomb	0.17%
Zinc	0.21%
Chrome	0.02%
Cuivre	0.20%
Manganèse	0.17%
Nickel	0.02%
Etain	0.06%
Titane	0.12%

Les teneurs importantes en Al_2O_3 (alumine), SiO_2 (Silice) et CaO (Chaux) confèrent aux mâchefers des propriétés proches de celles des ciments.

La valorisation des Mâchefers de l'Incinération des Ordures Ménagères (MIOM) apparaît comme un enjeu important pour les industriels du BTP.

Pour être conformes à la réglementation, les MIOM transitent par une Installation de Maturation et d'Elaboration (IME). Après ce passage à l'IME, le matériau traité est mûré et calibré.

En France, les MIOM sont principalement utilisés dans les terrassements, remblais et couches de forme, ainsi que dans les structures de chaussées et de parkings.

2.5.2 Cendres volantes

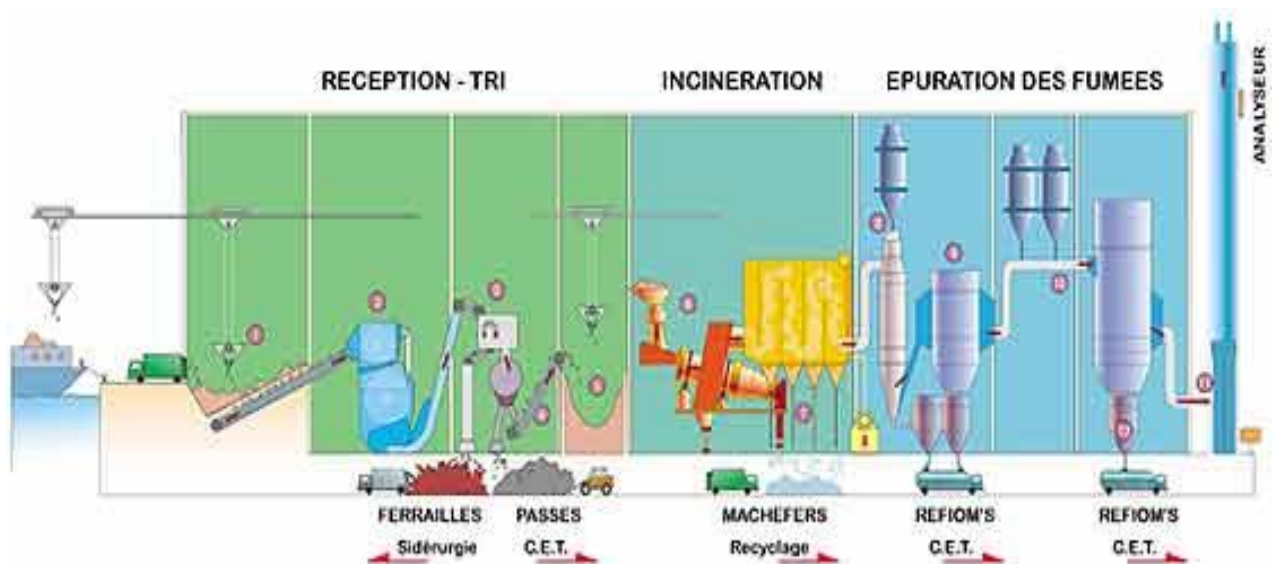
Les cendres sont les particules entraînées par les gaz de combustion. Leur proportion augmente avec la vitesse des gaz sortant de la couche des ordures en combustion. Elles sont recueillies dans les trémies sous chaudière et dans le système de dépoussiérage. Elles forment une poudre grisâtre dont la granulométrie varie de quelques μm à quelques centaines de μm .

La valorisation des cendres récupérées (REFIOM) est difficile. Elles contiennent souvent des éléments très toxiques issues de traitement de fumées (dioxine). Elles sont souvent mises en décharge (centre de stockage des déchets de classe 1 en France).

3. Les installations

3.1 Description générale

La figure ci-dessous représente un schéma typique des équipements qui interviennent dans une installation d'incinération qui peuvent être séparés grossièrement en trois blocs :



- Réception et tri : regroupe le quai de déchargement, la fosse, et les différents équipements optionnels de traitement avant enfournement.
- Incinération : Ce bloc comporte le four, le circuit d'alimentation en air et le dispositif de refroidissement des gaz et de récupération des mâchefers. C'est dans ce bloc que sera incorporée la chaudière dans le cas d'une installation avec option de récupération d'énergie.
- Traitement des fumées : Dans ce bloc se retrouvent tous les dispositifs de traitement des fumées discutés ci avant à savoir : dépoussiérage, neutralisation des gaz, élimination des dioxines et furanes et traitement des NOx.

L'installation, en plus des équipements ci-dessus, comporte des circuits auxiliaires (pompage et circuits d'eau, circuits d'air comprimés, circuits électriques, de contrôle et de commande) et les bâtiments principaux et annexes.

3.2 Les fours

Les fours utilisés pour l'incinération sont très diversifiés et connaissent un développement continu. La plupart utilisent, au moins pour une partie de leur fonctionnement, le principe de four à grille décrit ci-dessous. .

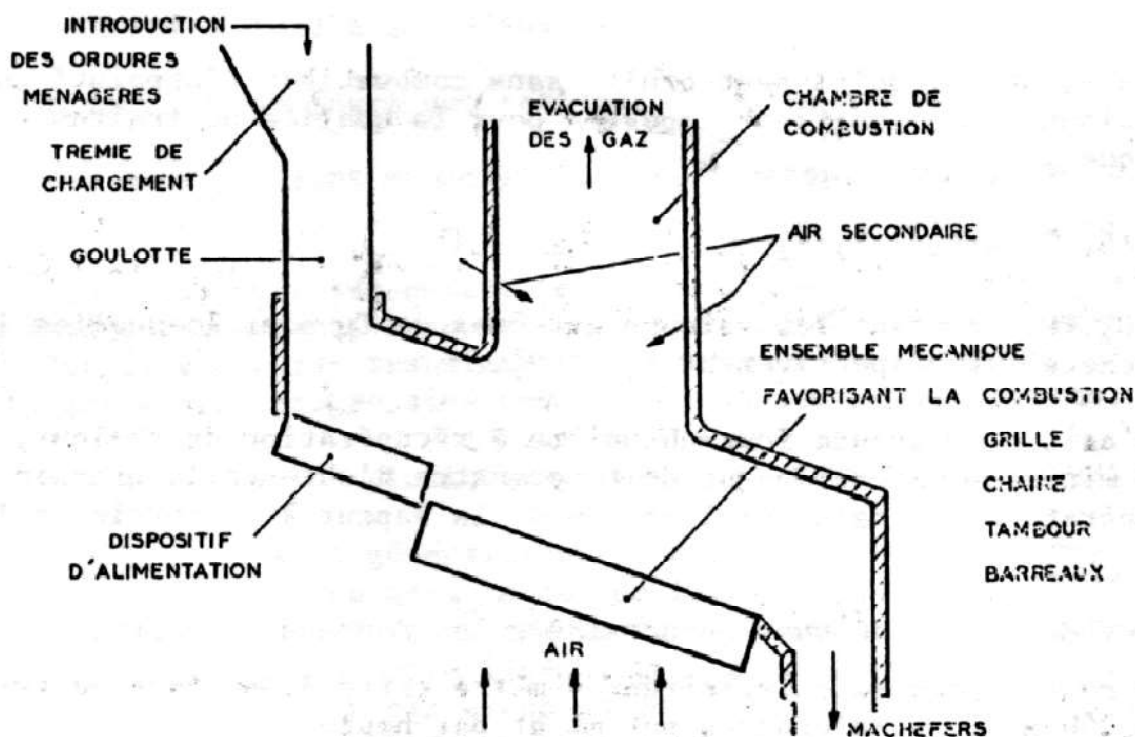


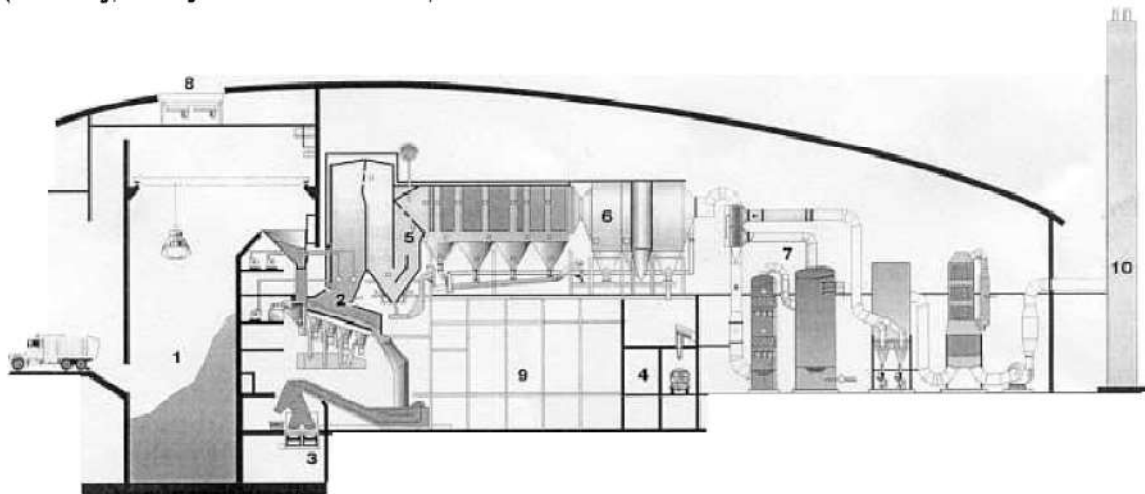
Schéma de description d'un four à grille

Bien que, au coeur d'une installation d'incinération, le four et ses auxiliaires ne sont qu'un élément de la chaîne d'incinération et ne représentent du point de vue coût que 25 à 50% du coût de l'ensemble.

Dans le design de certaines installations avec récupération, la partie supérieure de la chambre de combustion est tapissée de tubes écrans d'eau.

Pour illustration, on présente ci-dessous le schéma d'une installation avec four à grille de la société VonROLL Inova mise en fonctionnement en Allemagne (2001). Avec le schéma du four à grille et la photo des grilles à l'intérieur du four.

Coupe d'une installation de traitement thermique par four à grille
(Nuremberg, Allemagne. Mise en service: 2001).



- 1 Fosse
- 2 Grille d'incinération (refroidie à l'eau)
- 3 Extracteur de mâchefers
- 4 Chargement des cendres
- 5 Générateur de vapeur
- 6 Electrofiltre
- 7 Traitement des fumées
- 8 Unité de refroidissement
- 9 Bâtiments électriques
- 10 Cheminée

photos : details et grandeur des grilles du four

