

Approche systémique des déchets

par **Alain NAVARRO**

Professeur émérite à l'Institut national des sciences appliquées de Lyon

1. Le système déchets	G 2 000 – 2
2. Les stratégies de gestion des déchets	— 4
2.1 Connaissance analytique des déchets.....	— 4
2.2 Stratégies de gestion des déchets	— 5
3. Filières de traitement des déchets	— 6
4. Filières dédiées et centres collectifs	— 8
5. Dimensions non technologiques des déchets	— 8
6. Conclusion	— 8

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.

Avant d'aborder les aspects techniques de la maîtrise des impacts, il est utile de rappeler que 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.

C'est dans ce cadre que la recherche de solutions a mobilisé, ces dernières décennies, une forte activité scientifique et technique, qui a donné naissance au **secteur des éco-industries**. Ce secteur occupe désormais une place très significative dans le paysage industriel. Cela va des bureaux d'études aux multinationales en passant par un fort contingent de PME, couvrant un large spectre de

spécialités. Enfin, 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 préoccupe ici.**

Avant de l'aborder de la façon la plus exhaustive possible dans cette rubrique et sur le CD-Rom Déchets industriels, nous en ferons une présentation, dans une approche systémique, qui doit donner de la cohérence à un problème, souvent présenté comme foisonnant et démuné de toute logique.

En effet, alors que les économies d'énergie, les traitements de l'eau et de l'air, ont rapidement été rangés par les spécialistes dans des cadres méthodologiques structurés, force est de constater que la gestion des déchets est souvent abordée un peu « en aveugle », par tâtonnement. Cela tient probablement à plusieurs raisons : le mot même de déchet induit des **connotations négatives** qui n'incitent peut-être pas à une approche raisonnée comme c'est le cas pour l'eau ou l'air, éléments vitaux par excellence. En outre, contrairement à l'eau ou à l'air, **les déchets ne correspondent pas à une typologie unique**. La pollution de l'eau et de l'air résulte, pour l'essentiel, de l'apport de substances étrangères à un milieu bien identifié et, par conséquent, la dépollution consiste à extraire ces substances indésirables. C'est parfois très difficile à faire mais l'enjeu est clair.

À l'inverse, les déchets regroupent toute la variété des espèces chimiques minérales ou organiques, naturelles ou synthétiques, seules ou en mélange. On peut considérer que **chaque famille, parfois chaque déchet au sein de la famille, constitue une entité spécifique**. C'est probablement cette particularité qui complique une approche systémique des déchets. La tâche est encore accrue par le fait que les déchets relèvent pour l'essentiel du domaine des **solides particulièrement propices à l'hétérogénéité**. De surcroît, on est souvent dans « l'inutile, l'indésirable, la non-valeur ».

Tous les travaux scientifiques conduits ces dernières décennies permettent pourtant de proposer une approche systémique de l'entité déchet dans sa définition la plus générale. Cette présentation doit permettre au lecteur de mieux s'orienter au moment de choisir entre les multiples stratégies et techniques qui lui sont 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** :

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**.

■ Déchets et sous-produits (A)

On trouve, dans cette catégorie, tous les déchets qui ont participé à l'élaboration des produits mais qui ne se retrouvent pas dans le produit final. Il s'agit des sous-produits de réaction chimique, des résidus de certains traitements (peinture, traitements de surface...), des emballages plus ou moins souillés, des matières enlevées à l'issue d'opérations mécaniques (usinage, moulage, polissage...) et des loupés de fabrication. On classe généralement ces déchets en trois catégories : les déchets industriels spéciaux (DIS) ou dangereux, les déchets industriels banals (DIB) et les déchets inertes.

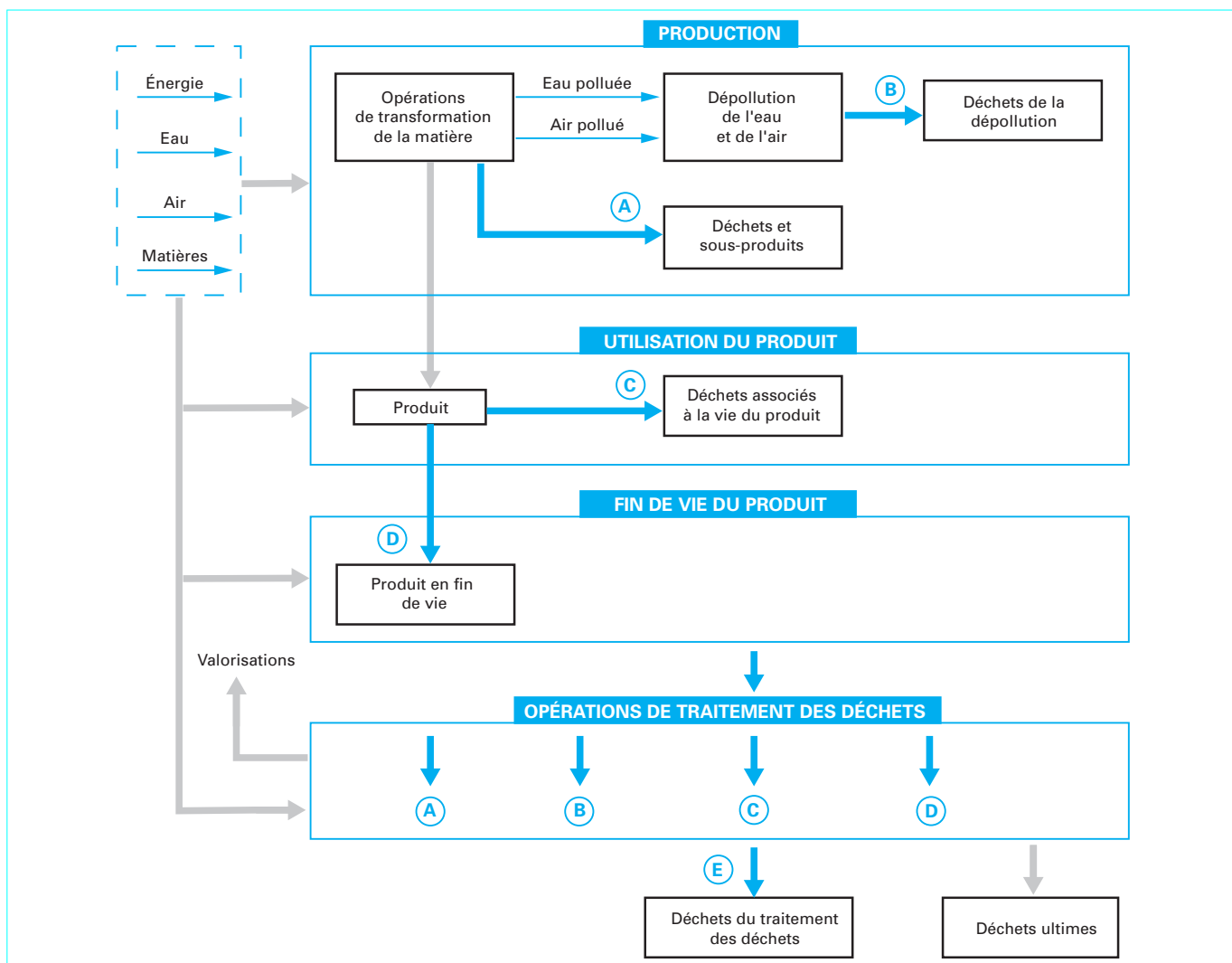


Figure 1 – Processus d'émission des déchets aux différents stades

■ **Déchets de la dépollution de l'eau et de l'air (B)**

L'eau et l'air, abondamment utilisés dans les fabrications industrielles, sont le plus souvent pollués par différents réactifs, ce qui rend inacceptable leur rejet, en l'état, dans le milieu naturel. Ces effluents font donc l'objet, avant rejet, de traitements de dépollution qui génèrent à leur tour de nouvelles catégories de déchets : poussières collectées par les filtres, boues de traitements chimiques, physico-chimiques ou biologiques, cendres et mâchefers résultant du traitement thermique de certains effluents et sous-produits. On parle couramment, à ce sujet, de **déchets de la dépollution**. Ces déchets sont actuellement parmi les plus préoccupants.

■ **Déchets associés à la vie du produit (C)**

L'accroissement qualitatif et quantitatif de la consommation conduit à cette importante famille de déchets. L'automobile en est un exemple significatif : pneumatiques, batteries usagées, filtres à huile et à air, déchets de la réparation automobile, huiles de vidange... C'est aussi le cas des déchets liés à la consommation alimentaire [emballages (verre, plastique, carton, métal)], des journaux et périodiques, des médicaments, des produits de nettoyage et de bricolage... Au sein de ces déchets, une catégorie retient de plus en plus l'attention : il s'agit

des déchets toxiques en quantité dispersée (DTQD) issus des particuliers, des artisans et autres activités : imprimeries, garagistes, teinturiers, photographes..., des laboratoires médicaux et des établissements d'enseignement et de recherche. On peut également ranger, dans cette catégorie, les déchets produits par les hôpitaux, les cliniques, les dispensaires, les cliniques vétérinaires...

■ **Produits en fin de vie (D)**

En fin de vie, par usure, accident ou obsolescence, certains produits deviennent des déchets. C'est le cas, par exemple, des véhicules hors d'usage (VHU), des produits de démolition (déconstruction), des bâtiments d'habitation et des sites industriels ou bien encore des produits électroménagers (réfrigérateurs, micro-ondes, téléviseurs...) et informatiques (ordinateurs).

■ **Déchets du traitement des déchets (E)**

Tous les déchets que nous venons d'énumérer font l'objet d'opérations de traitement, qu'il s'agisse d'en assurer la **valorisation** sous différentes formes ou bien encore de procéder à leur **élimination**. L'ensemble de ces opérations constitue les **filères de traitement des déchets**.

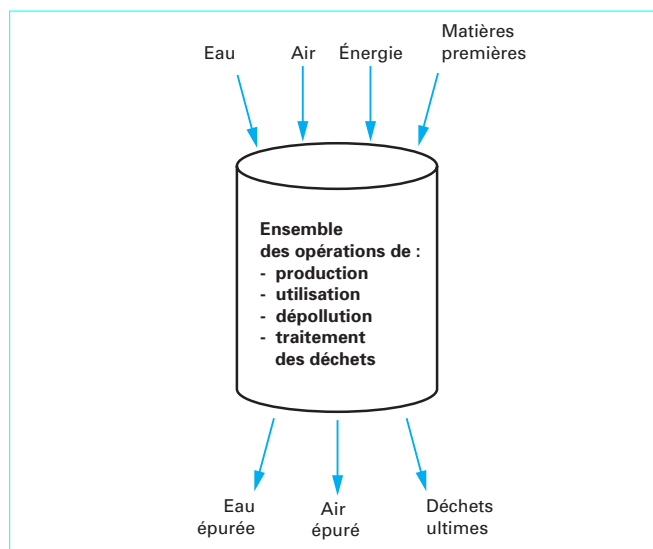


Figure 2 – Le système idéal

Ces filières deviennent de plus en plus complexes et la plupart des installations qui leur sont dédiées présentent toutes les caractéristiques de véritables unités industrielles en tout point semblables aux unités classiques de production. De ce fait, ces installations émettent à leur tour des effluents qu'il faut dépolluer et des « déchets de déchets », à leur tour objets de traitement ou de valorisation jusqu'à ce que, arrivés au stade de déchets ultimes, ils soient définitivement stockés dans des centres d'enfouissement technique (CET).

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*.

La plupart des systèmes industriels évolue 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'éco-logie industrielle**.

2. Les stratégies de gestion des déchets

Avant toute réflexion sur le choix d'une filière de traitement pour un déchet donné, il y a lieu d'aborder deux étapes préliminaires :

- la première concerne tous les **travaux d'analyse** et les **tests de comportement** qui doivent permettre de bien **connaître le déchet au plan qualitatif mais aussi au plan quantitatif et spatio-temporel** ;
- la seconde, plus difficile, consiste à **choisir**, parmi toutes les possibilités, la **stratégie de gestion la mieux adaptée**.

2.1 Connaissance analytique des déchets

■ Au regard des **réglementations en vigueur**, un déchet est **légalement défini à partir de la connaissance de sa composition**, ce qui donne toute son importance à la caractérisation en laboratoire. Nous n'aborderons pas ici ce point en détail. Ce sera le rôle d'exposés spécifiques dans cette rubrique et dans ce CD-Rom Déchets. Il est également nécessaire de disposer d'une caractérisation très rigoureuse pour effectuer le choix d'une technique de traitement : incinération, valorisation matière, mise en décharge...

■ Les **opérations d'échantillonnage** sont très délicates et de nombreuses techniques analytiques classiques sont sollicitées. Il faut aussi réaliser des tests de comportement dont certains font l'objet de normes. En fait, envisager une filière de gestion conduit à respecter un cahier des charges analytique spécifiques à chaque filière. Le tableau 1 fournit, à titre d'illustration, les éléments les plus usuels de cette caractérisation analytique.

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

L'examen des résultats obtenus au cours de la caractérisation d'un déchet fait apparaître une liste de **paramètres favorables** à la mise en œuvre de la filière envisagée et une liste qui regroupe les **paramètres défavorables**. Ce sont là les **éléments déterminants dans le choix d'une filière de traitement**. Ce travail délicat et complexe, compliqué le plus souvent par les problèmes d'échantillonnage inhérents aux déchets, est de première importance. Il joue un rôle majeur dans des domaines comme la valorisation des métaux, des matières plastiques, du papier, des fertilisants, des matières organiques... Cela explique, en partie, le fait que des déchets collectés en vue d'une valorisation ne peuvent toutefois être recyclés à cause de leur non-conformité à un cahier des charges analytique.

■ Cette connaissance analytique du déchet n'est toutefois pas suffisante ; elle doit s'accompagner d'une **analyse quantitative** : *quel est le tonnage concerné ? et surtout spatio-temporelle : comment se situe le gisement au plan géographique ? quel est le flux d'émissions du déchet ?*

● Importance quantitative du gisement

La viabilité d'une unité de traitement est directement liée à la taille du gisement à traiter. En milieu industriel, de nombreux déchets toxiques générés au sein d'une même entité ne peuvent valablement être traités sur place à cause de leur trop faible tonnage.

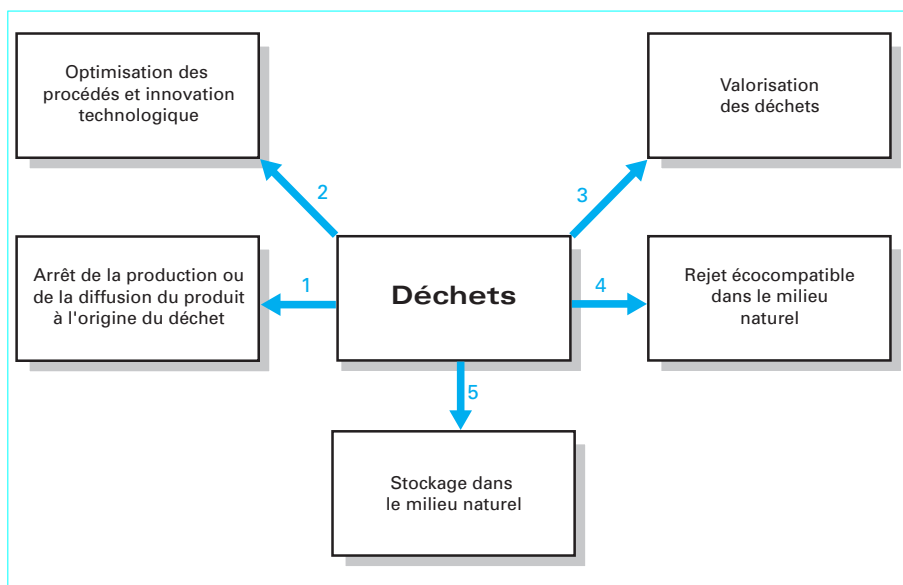


Figure 3 – Stratégies de gestion des déchets

● Caractéristiques spatio-temporelles

• Analyse des flux

Les déchets peuvent être générés régulièrement, à flux quasi constant, tout au long de l'année (cas des ordures ménagères, par exemple) ou bien de façon aléatoire (déchets de la démolition, retraits saisonniers de fruits, loupes de fabrication...).

• Répartition géographique des sources d'émission

Les déchets industriels sont en général produits dans des zones bien délimitées du territoire et leur mobilité est souvent restreinte pour des raisons de coût de transport, d'une part, et de dangerosité de ce transport, d'autre part. Leur regroupement en un point unique de traitement (solution optimale) peut ainsi s'avérer très délicat à mettre en œuvre.

• Variabilité de la composition au cours du temps

Tout changement au niveau d'une technologie de production peut entraîner une modification profonde de la nature et de la quantité des déchets produits. À titre anecdotique, l'or présent en quantité significative dans les ordinateurs de la première génération n'est plus qu'un souvenir aujourd'hui, ce qui a rendu obsolètes les unités de récupération de cet or. Cette variabilité explique, en grande partie, le caractère éphémère de certaines filières de valorisation.

2.2 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).

● 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.

La décision, qui dépasse le plus souvent le cadre national, conduit, d'une part, au développement d'une activité de récupération et d'élimination du produit incriminé et, d'autre part, à la recherche d'un produit de substitution.

Exemple : interdiction des pyralènes, 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, complexesants...). Le développement des biotechnologies et des nanotechnologies s'inscrit dans cette évolution des outils de production, moins générateurs de déchets dangereux.

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 écoresponsable 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.

Exemple : banalisation de déchets minéraux après stabilisation-solidification.

● **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.

■ **Exemple** : maîtrise accrue de l'enfouissement des déchets ultimes.

■ 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. On ne peut toutefois y recourir systématiquement car ce sont en fait plusieurs centaines de milliers de molécules différentes que nous devons gérer et que nous jugeons souvent indispensables.

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. Nous les développerons dans les vingt filières de traitement (§ 3).

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

Exemple : on s'interdira l'utilisation de certains réactifs, au sein d'un système de production minimisé au niveau des rejets et de la production de déchets. Une fraction des déchets sera valorisée sous forme de matières premières ou d'énergie, alors qu'une autre fraction sera rejetée dans l'environnement sous une forme écoprometteuse. Une fraction finale sera enfin stockée en centre d'enfouissement technique, comme déchet ultime.

■ En conclusion, les deux premières stratégies appartiennent à ce qu'il est convenu d'appeler les **technologies propres et 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 écoprometteuse – 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**.

Comme nous pourrions le constater par la suite, il est souvent nécessaire d'associer plusieurs filières pour assurer la gestion complète d'un déchet. De la même façon, un déchet donné peut être valablement traité par différentes filières et se pose alors le problème du choix de l'une d'entre elles. Il est important de constater que ces filières sont bien identifiées et en nombre limité. Tous les progrès enregistrés depuis des décennies en matière de traitement des déchets n'ont pas porté sur l'émergence de filières réellement nouvelles dans leur objectif ou leur principe mais ont, par contre, permis le développement de certaines d'entre elles grâce à des progrès technologiques très significatifs.

3. Filières de traitement des déchets

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.

On observe que les technologies mises en œuvre pour atteindre ces objectifs mobilisent toutes les sciences de l'ingénieur en les adaptant à la spécificité du matériau déchet. Ce sont ces transferts de technologie qui font toute la particularité des filières de traitement.

Par souci de simplification, nous pouvons regrouper l'ensemble des réalisations techniques en matière de traitement des déchets à l'intérieur de 20 filières (tableau 2).

■ **Filière 1 : valorisation énergétique (combustion)**

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...).

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	Valorisation en agriculture et élevage
12	Élaboration d'amendements organiques	
13	Élaboration d'amendements minéraux	
14	Alimentation animale	Valorisation en techniques de l'environnement
15	Épuration des effluents liquides et gazeux	
16	Conditionnement des déchets toxiques	Filières d'élimination (figure 5)
17	Incinération et autres procédés thermiques	
18	Traitements biologiques	
19	Traitements physico-chimiques	
20	Mise en décharge	

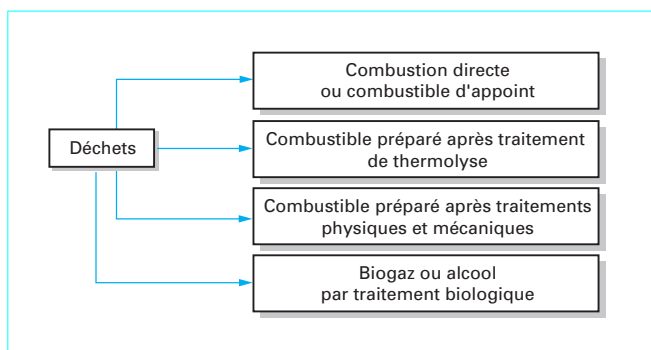


Figure 4 - Différentes techniques de valorisation énergétique

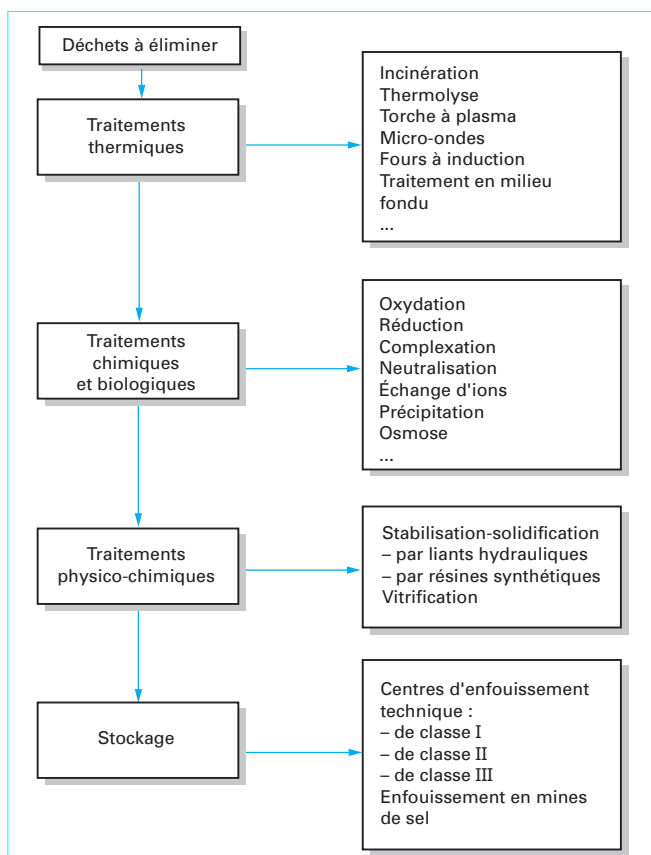


Figure 5 - Différents traitements possibles pour éliminer les déchets

■ **Filière 2 : valorisation énergétique (élaboration de combustibles dérivés par des procédés mécaniques)**

Il est parfois nécessaire, avant combustion, que le déchet soit conditionné. On met alors en œuvre différents procédés mécaniques ou thermiques : tri, broyage, séchage...

■ **Filière 3 : valorisation énergétique (élaboration de combustibles dérivés par des procédés thermiques)**

Des procédés comme 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...).

■ **Filière 4 : valorisation énergétique (élaboration de combustibles dérivés par des procédés biologiques)**

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.

■ **Filières 5 et 6 : 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...

■ **Filières 7-8-9-10 et 11 : valorisation de matériaux (liants hydrauliques et matériaux de structure, verres et céramiques, fibres celluliques 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 mâche-fers d'incinération, des ordures ménagères, des pneumatiques...

■ **Filières 12-13 et 14 : 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.

■ **Filières 15 et 16 : 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 conditionnés. 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.

■ **Filières 17-18-19 et 20 dites d'élimination (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.

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 qui sont largement abordées dans le CD-Rom « *Déchets industriels. Gérer, traiter, valoriser* ». Il s'agit pour l'essentiel de :

- 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 nationales.

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 prou, 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. Filières dédiées et centres collectifs

Nous avons jusqu'ici raisonné, dans le cadre de cette approche systémique, sur le cas de chaque déchet pris isolément. Cela appelle deux remarques.

■ Depuis quelques décennies se sont développées des **structures collectives** qui assurent le traitement de déchets d'origine et de matière très différentes. C'est le cas :

- des centres d'enfouissement technique et de leurs équipements annexes de stabilisation-solidification ;
- des stockages profonds en mine de sel ;
- des plates-formes d'incinération et de traitement physico-chimique. Ces centres, qui traitent d'importants tonnages, assurent pour l'essentiel la détoxification et le stockage des déchets ;
- des cimenteries ; de par leur spécificité technique, ces installations, très énergétiques, valorisent une part significative de certains déchets combustibles, en mélange.

■ On assiste depuis quelques années au développement de **filières dédiées** qui ambitionnent le traitement global de certains déchets pour lesquels il y a obligation d'assurer un recyclage adapté : c'est le cas, par exemple, des véhicules hors d'usage (VHU), des appareils électriques et électroniques, des batteries, des piles...

Tous ces aspects font l'objet de développements dans le cadre du CD-Rom « *Déchets industriels. Gérer, traiter, valoriser* » et de la rubrique « *Déchets* » du traité Environnement des Techniques de l'Ingénieur.

5. 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. Nous nous contenterons ici de les évoquer.

■ 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. À cela s'ajoute la concurrence sévère au plan international sur le marché des produits recyclés : papiers, métaux, plastiques, etc. Réelle pour le secteur industriel de la production, cette contrainte économique le devient tout autant pour les collectivités locales gestionnaires, en particulier de tous les déchets de la consommation urbaine et de la salubrité publique. Taxes et impôts constituent un élément significatif de cette problématique. La mise en place de plans départementaux en est l'illustration la plus récente.

■ 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. Cette situation a au moins deux conséquences. En premier lieu, elle accroît sensiblement la difficulté à installer des unités de traitement et participe donc à l'accroissement des coûts. En second lieu, elle incite les responsables publics à user de plus en plus du principe de précaution et à mettre en place des contraintes normatives et réglementaires très sévères. 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.

6. 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. Nous avons volontairement plus développé les aspects techniques, 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.