Licence Professionnelles ALIPACK

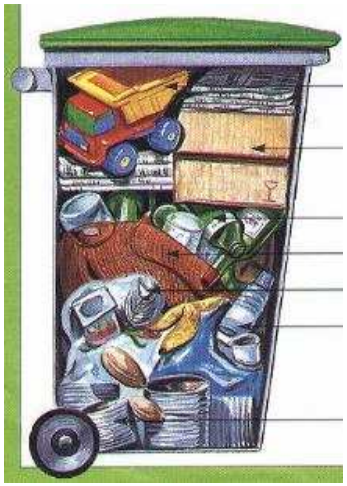
# Le traitement des déchets

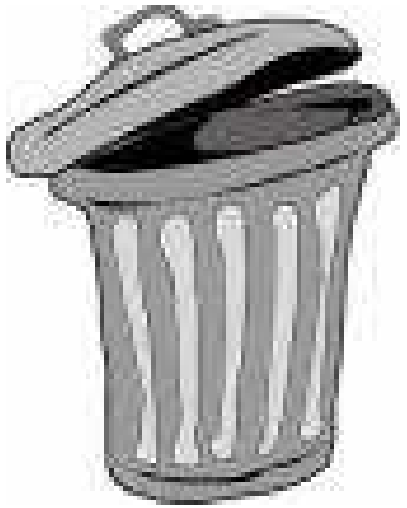
Denis Bouyer

Laboratoire de Génie des Procédés d'élaboration des Bioproduits - UMR CIRAD 016
Bâtiment 15, Rez de Chaussée
Université Montpellier 2

# Le traitement des déchets

1. Quels déchets, quelles stratégies de traitement ?
2. La problématique des déchets ménagers
3. Valorisation & recyclage
4. Les centres d'enfouissement technique (CET)
5. Traitements thermiques
6. Traitements biologiques
7. Stabilisation des déchets





Denis Bouyer

Laboratoire de Génie des Procédés d'élaboration des Bioproduits - UMR CIRAD 016
Bâtiment 15, Rez de Chaussée
Université Montpellier 2

# 1. Quels déchets, quelles stratégies de traitement ?

photo : J Léone, Grand Lyon

Le centre d'enfouissement technique
de Rillieux-la-Pape

?

?

?

?

# a) Sémantique

## ❑ Le dictionnaire

Mot apparu vers 1200… et vient du verbe « déchoir » (diminution de la valeur d'un objet)

**Déchet**

- Discrédit « *le déchet où étaient tombées ses appas* » La Fontaine
- Ce qui est perdu (Larousse, 1924)
- Partie inutilisable d'une matière; morceau qu'on rejette ou qui s'en détache (Larousse de la Langue Française, 1992)

## ❑ Ce que dit la loi

**1975** : « *Tout résidu de production de transformation et d'utilisation, toute substance, tout matériau ou produit que le propriétaire a abandonné ou destiné à l'abandon* »

**1992** *:* Définition complétée par la notion de déchets ultimes
*« Les déchets résultants ou non du traitement d'un déchet qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant et dangereux »*

# b) Historique

## ❑ Quand et comment les déchets deviennent-ils un problème ?

Dans l'ancien temps, l'homme produisait de déchets biodégradables ou inertes (rien de synthétique)

↻ Dégradation naturelle plus ou moins lente par voie biologique (rapide) ou physico-chimique (lent)

| | |
|---|---|
| Problème de l'activité humaine | • Création de substances inconnues<br>• Concentration plus rapide que la capacité à les assimiler |

Un exemple : l'élevage

• Extensif : aucun problème d'élimination des boues dans les prairies (engrais naturel)
• Intensif : concentration de lisiers en lieu et temps, épandage, pollution.

➡ **Evacuer, disperser, transformer**

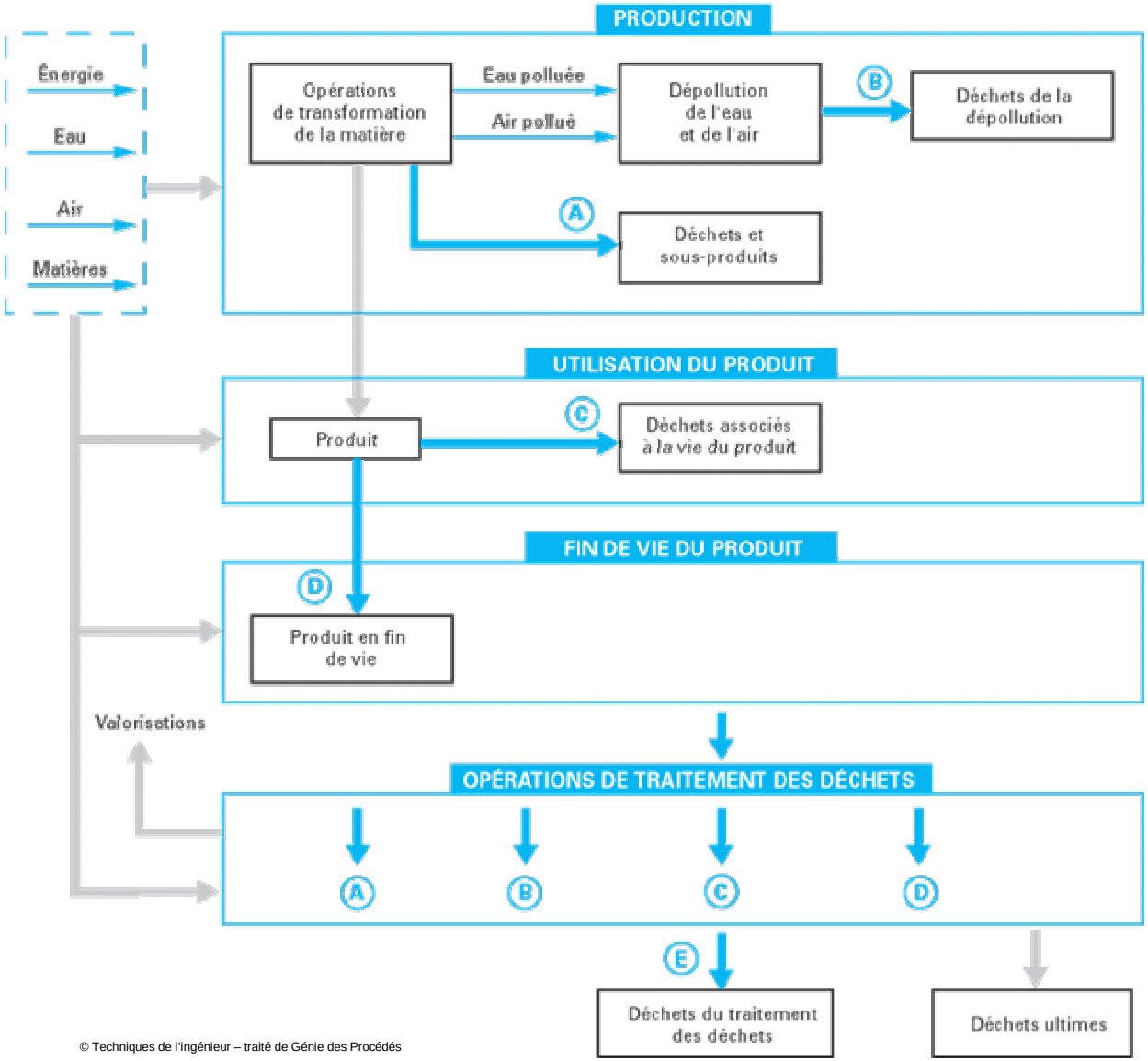
## 1. Quels déchets, quelles stratégies de traitement ?

### ❑ Quelques dates

Lutèce qui vient du latin « *lutum* »: boue...

1131 : Louis VI (dit le gros) interdit la divagation des porcs à Paris.
1348 : Règlement du Prêvot sur l'enlèvement de boues. Sans effet.
1506 : Louis XII crée un Service de Ramassage des Boues et une taxe (« dite des boues et des lanternes ») ➲ hostilité générale de la population
1600 : Sully décrète la privatisation du Service. Sans effet... sauf une émeute.
1666 : Edit de Louis XIV réglant les horaires de dépôts et d'enlèvement sur la voie publique.
1798 : 1ière Loi définissant l'organisation du nettoyage en France.
1810 : Décret impérial sur les installations industrielles et commerciales insalubres.
1876 : 1ier incinérateur en Angleterre.
1883 : Arrêté du Préfet Poubelle et création d'un impôt municipal pour les contraintes de balayage et d'enlèvement des déchets.
1893 : 1ier incinérateur en France.
1935 : Benne à ordure mécanique.
1950 : Poubelles plastiques.
1975 : Directive Européenne sur les déchets ;
Loi du 15/07 sur la responsabilité des communes.
1992 : Loi du 13/07 sur la fermeture des décharges.
1998 : Circulaire Voynet sur les Plans Départementaux.

# c) Le système déchet




**A :** déchets et sous-produits de la fabrication

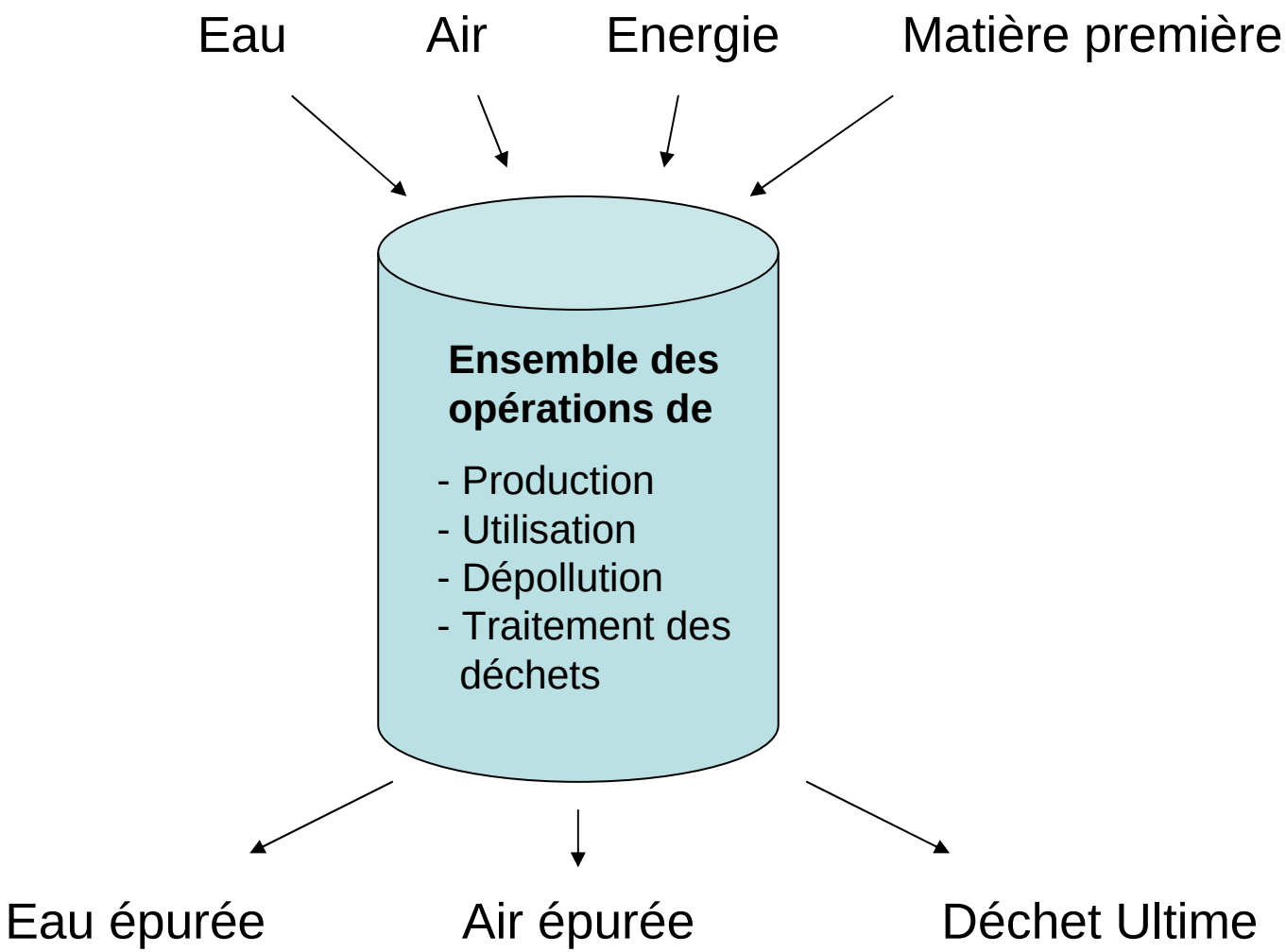
**B :** déchets de la dépollution de l'eau et de l'air

**C :** déchets associés à la vie du produit

**D :** produits en fin de vie

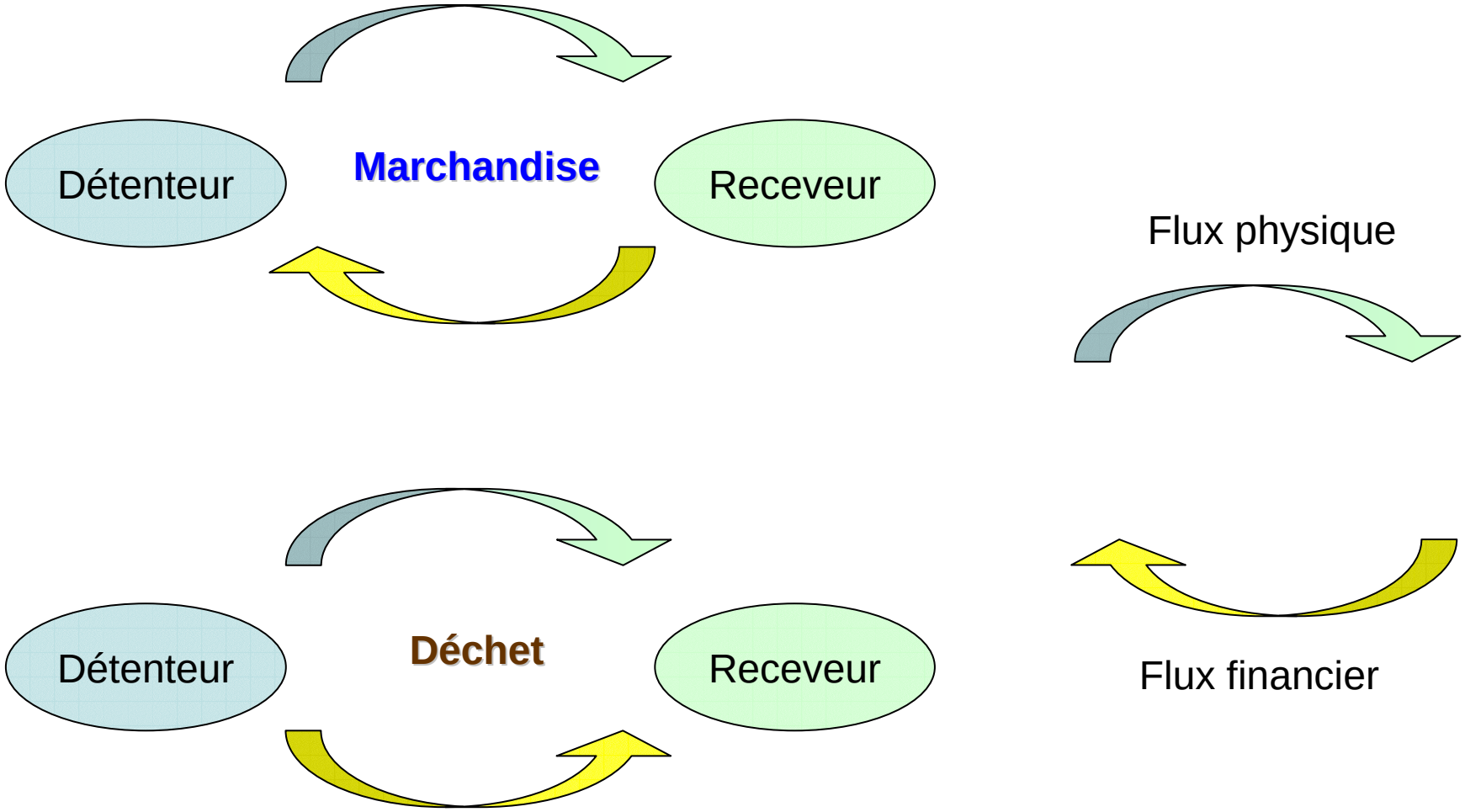
**E :** déchets du traitement des déchets

# Le système idéal




© Techniques de l'ingénieur – traité de Génie des Procédés

# Aspect socio-économique



# d) Les stratégies de gestion des déchets

***Deux étapes préliminaires*** :

Travaux d'analyse et tests de comportement Choix de la stratégie de gestion la mieux adaptée

➲ *permettre une bonne connaissance du déchet au plan qualitatif, quantitatif et spatio-temporel*

## ❑ Connaissance analytique des déchets

Un déchet est défini par sa composition, qui conditionne ensuite en partie le choix de la filière de traitement ⇨ nécessité d'une analyse détaillée

| *Caractérisation analytique des déchets* | |
|---|---|
| **Caractéristiques principales** | **Exemples** |
| Composition chimique élémentaire | Métaux, C, H, N, P, S, Cl… |
| Composition chimique moléculaire | Benzène, phénols, protéines, sucres…<br>Sels minéraux, oxydes, polymères… |
| Propriétés thermodynamiques et chimiques | Pouvoir calorifique, 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, d'écotoxicité… |
| Comportement spécifique | Tests de lixiviation, pouvoir fertilisant… |

# 1. Quels déchets, quelles stratégies de traitement ?

**⚠ Connaissance analytique du déchet non suffisante !! ⚠**

➲ analyse quantitative (*tonnage concerné ?)*

➲ analyse spatio-temporelle (*situation géographique ? flux d'émissions ?)*

## ❶ Importance quantitative du gisement :

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

## ❷ Caractéristiques spatio-temporelles :

• *Analyse des flux*

Les déchets peuvent être générés régulièrement, à flux quasi constant, tout au long de l'année (OM) ou bien de façon aléatoire (déchets de la démolition, retraits saisonniers de fruits, loupés de fabrication...)

• *Répartition géographique des sources d'émission*

Déchets industriels en général produits dans des zones bien délimitées

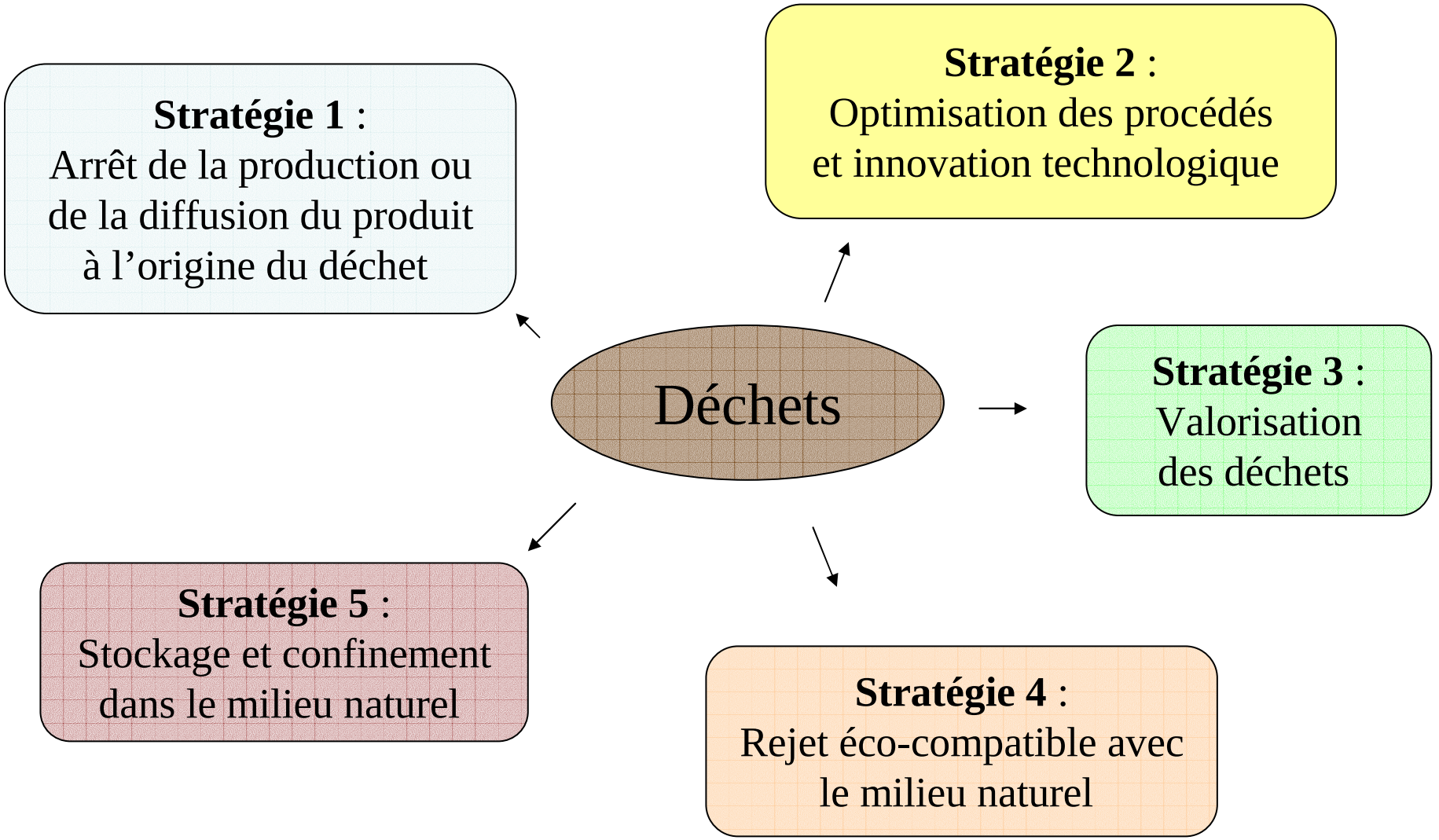
Mobilité souvent restreinte (coût de transport & dangerosité du transport)

• *Variabilité de la composition au cours du temps*

Changement au niveau d'une technologie de production ⇨ modification profonde de la nature et de la quantité des déchets produits.

# 1. Quels déchets, quelles stratégies de traitement ?

## ❑ Stratégie de gestion des déchets



# e) Les filières de traitement des déchets

| *Les vingt filières de traitement des déchets* | | |
|---|---|---|
| **Filière** | **Technologie** | **Valorisation/élimination** |
| 1 | Combustion | Valorisation énergétique |
| 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 |
| 18 | Traitements biologiques | |
| 19 | Traitements physico-chimiques | |
| 20 | Mise en décharge | |

Valorisation énergétique →
- Combustion directe ou combustible d'appoint
- Combustion préparé après traitement de thermolyse
- Combustion préparé après traitement physique et mécanique
- Biogaz ou alcool par traitement biologique

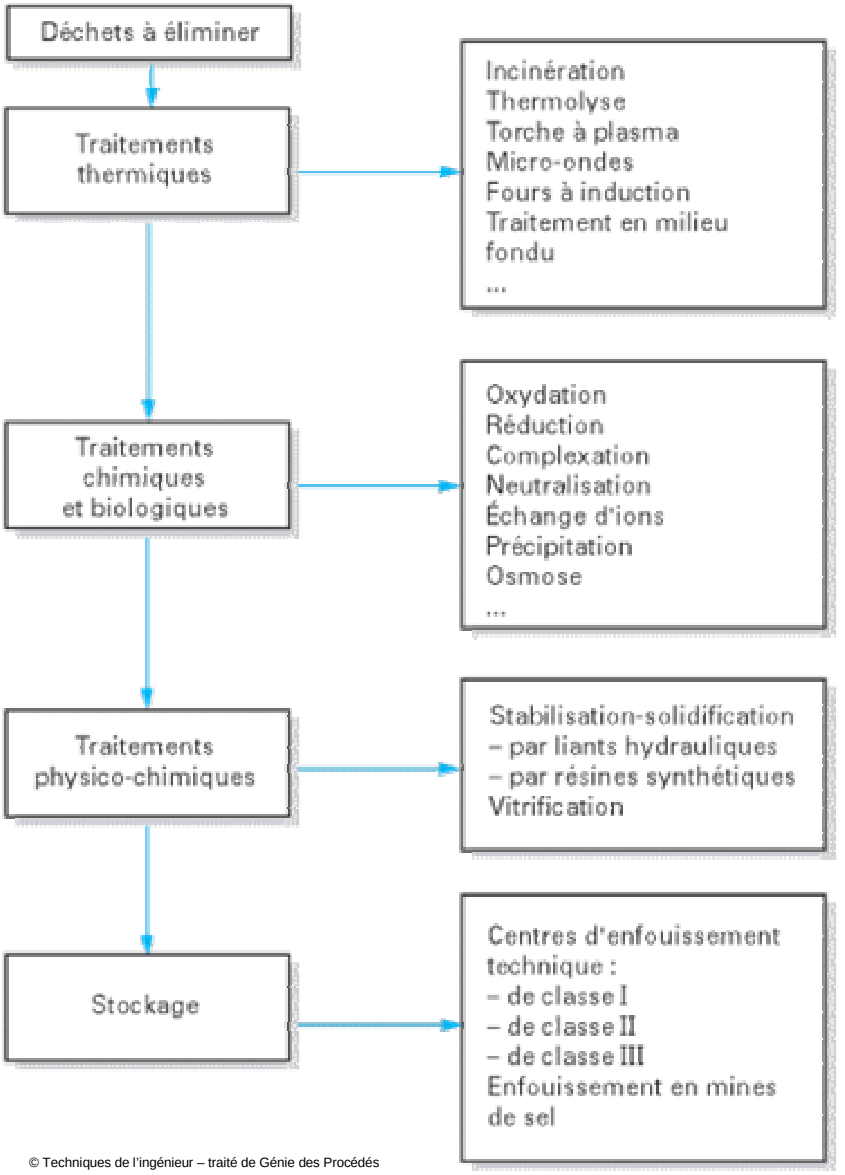
## ❑ Filières élimination (17, 18, 19, 20)

### Objectifs

✓ Atténuer le caractère toxique de certains déchets

✓ Dégrader thermiquement ou biologiquement les déchets

✓ Stocker les déchets (CET), après un éventuel traitement de stabilisation-solidification (non viable à long terme si les déchets sont organiques)




© Techniques de l'ingénieur – traité de Génie des Procédés

## ❑ Exemple : les secondes vies possibles du pneu…

- filière 1 : combustion directe en unités spéciales ou en cimenterie
- filière 2 : élaboration de combustibles dérivés par des procédés mécaniques (broyage)
- filière 3 : élaboration de combustibles dérivés par pyrolyse ou gazéification
- filière 5 : la récupération de matières premières organiques par décomposition thermique ou chimique
- filière 6 : récupération des métaux de la carcasse du pneu
- filière 7 : utilisation des pneus comme agent de structure dans certains ouvrages de génie civil
- filière 9 : valorisation du caoutchouc (poudrette) et rechapage
- filière 11 : multiples usages des pneus en substitution à divers matériaux (jeux, pare-chocs, chaussures…)
- filière 17 : incinération sans récupération d'énergie
- filière 20 : mise en décharge

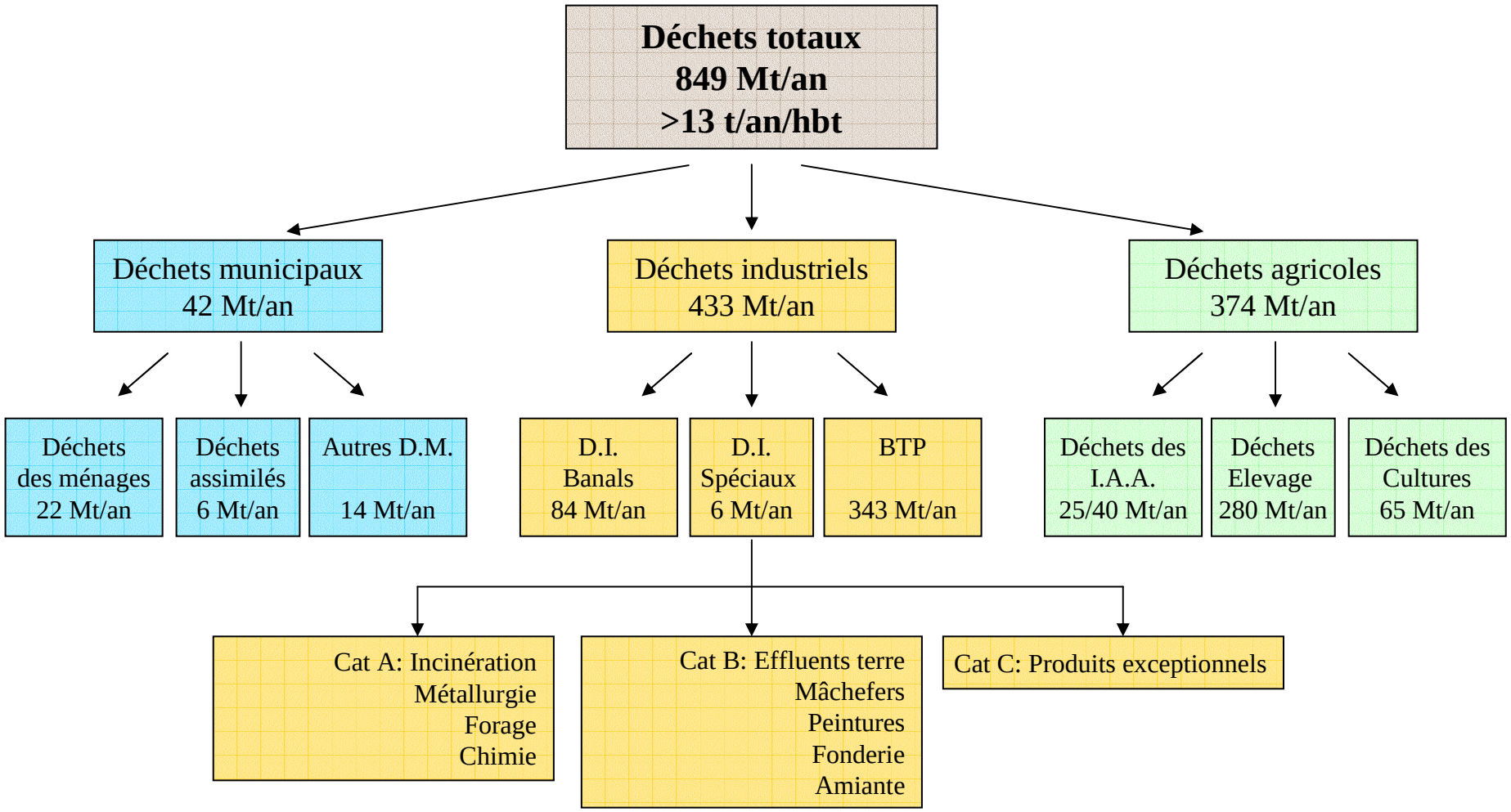
Dernier recours…

Le traitement des déchets industriels

# 2. Problématique des déchets ménagers

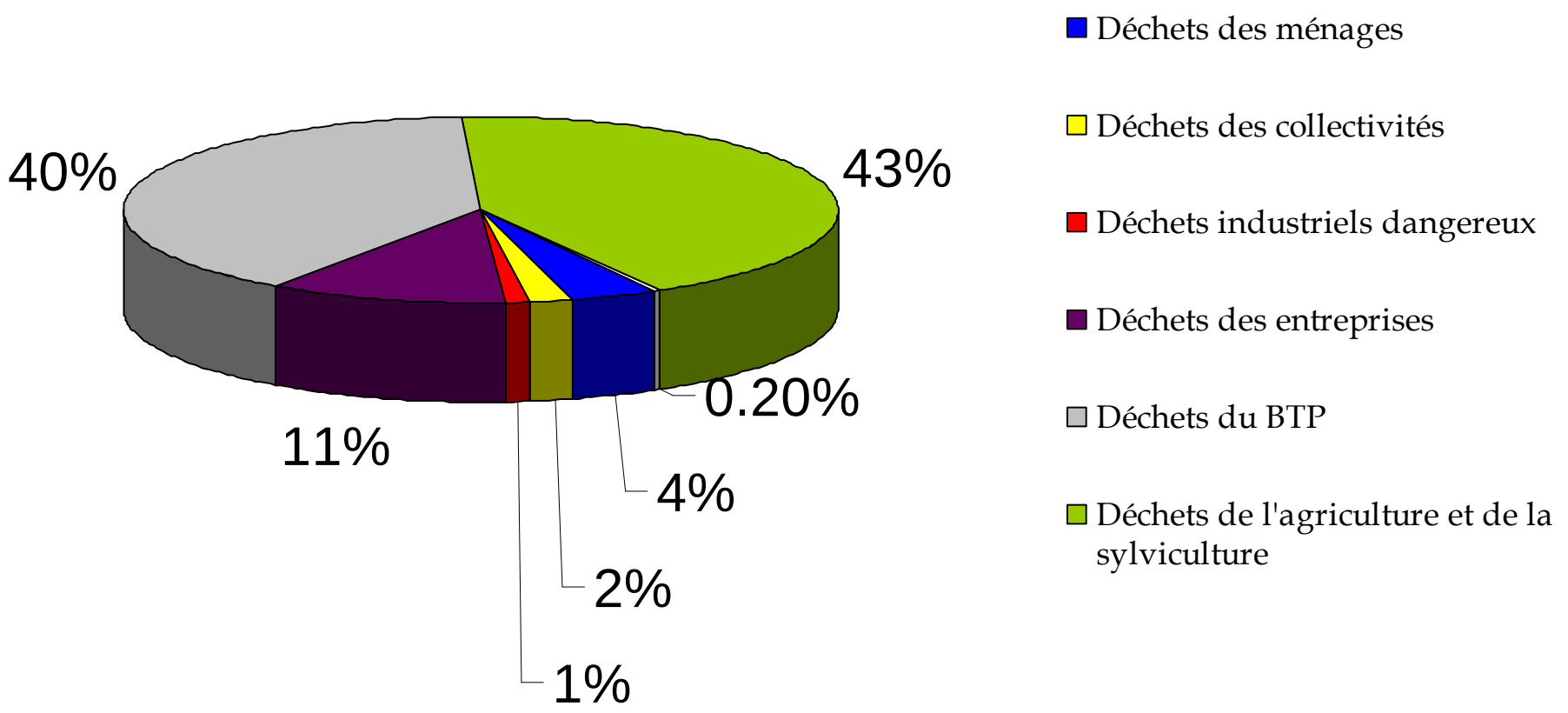
# a) Que sont nos déchets ménagers ?

**Quoi ?** **Combien ?** **Où?** **Par qui?**




Chiffres ADEME 2006

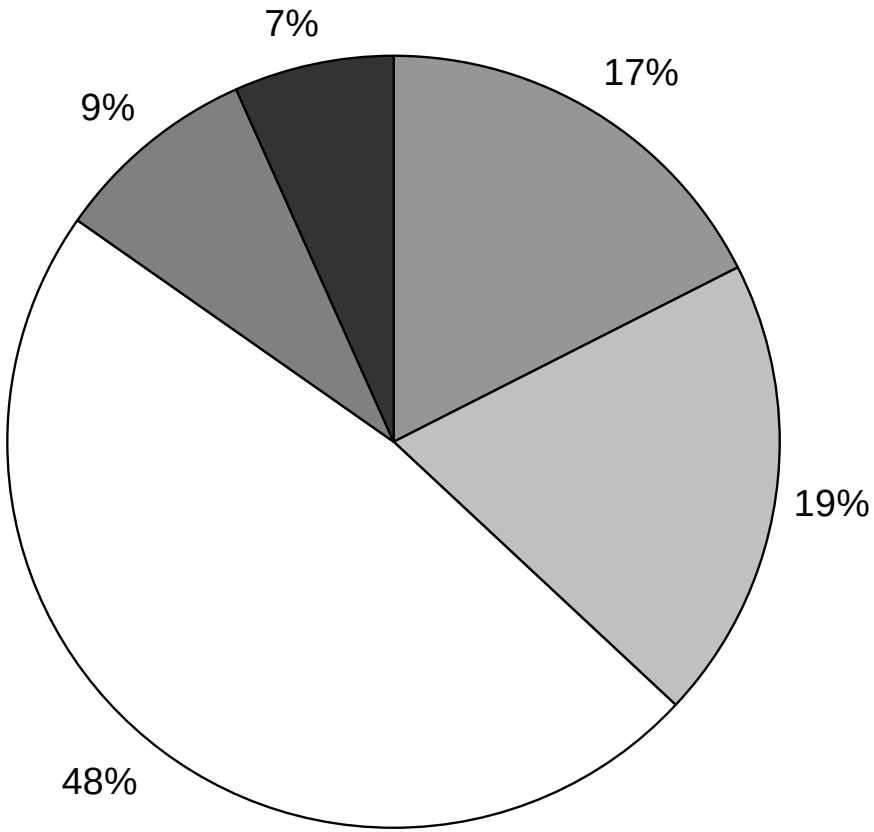
# 2. Problématique des déchets ménagers




Chiffres ADEME 20006

## 2. Problématique des déchets ménagers

# Répartition du gisement des déchets municipaux




- Déchets ménagers (24,7 Mt)
- Boues de stations d'épuration (9 Mt)
- Matières de vidanges domestiques (10 Mt)
- Encombrants & déchets inertes (4,5 Mt)
- Déchets d'espaces verts (3,4 Mt)

Production de déchets ménagers : de 200 à 500 kg/hab.an (dépend du type de commune)
Emballages ➲ 38 % en poids du total & 50 % en volume du total

## 2. Problématique des déchets ménagers

# ❑ Composition des déchets ménagers

| Catégorie de déchets | Sec | Humide |
|---|---|---|
| Déchets putrescibles | 15.8 | 28.8 |
| Papiers | 17.5 | 16.0 |
| Cartons | 9.2 | 9.3 |
| Complexes | 1.6 | 1.4 |
| Textiles | 3.0 | 2.6 |
| Textiles sanitaires | 1.9 | 3.1 |
| Plastiques | 12.6 | 11.1 |
| Combustibles divers | 3.9 | 3.2 |
| Verres | 19.3 | 13.1 |
| Métaux | 5.6 | 4.1 |
| Incombustibles divers | 8.9 | 6.8 |
| Déchets spéciaux | 0.7 | 0.5 |
| TOTAL | 100 | 100 |

*Composition des ordures ménagères*

| Déchets d'emballage | % (pds) des ordures ménagères | % (pds) des emballages |
|---|---|---|
| Papiers | 1 | 3 |
| Cartons | 9 | 23 |
| Complexes | 1 | 3 |
| Plastiques | 10 | 25 |
| Verres | 13 | 33 |
| Métaux | 4 | 10 |
| | 1 | 3 |
| TOTAL | 39 | 100 |

*Déchets d'emballages présents dans le gisement global des ordures ménagères (source ADEME)*

*Autres caractéristiques des ordures ménagères (ADEME)*

- Pouvoir Calorifique (PCI) : ~ 7820 kJ/kg. 1 tonne d'ordure ➤ 150 litres de fuel
- Densité : 0,15 à 0,2 tonne/$m^3$ en sac poubelle, 0,4 à 0,6 tonne/$m^3$ en benne avec tassement
- Taux d'humidité moyen : 35 %

## 2. Problématique des déchets ménagers

### ❑ Combien, où & par qui ?

Comment mesurer les déchets ➲ **Masse** ou **Volume** ? – **Teneur en eau** ?

1 benne : 20 $m^3$

Transport = pollution…

**Combien ?**

- 20 tonnes d'inertes
- 6 tonnes de papier
- 600 kg bouteille plastiques (non pressées)
- 200 kg Polystyrène expansé

Traitement ➲

- Incinération : le « client » paie à la tonne
- Enfouissement : le client paie au $m^3$

**Où ?** Plus de déchets en ville qu'à la campagne (nature différente)

**par qui ?** Un américain produit 2 fois plus de déchets qu'un européen et 10 fois plus qu'un africain

# b) Que prévoit la loi ?

## Loi du 15 Juillet 1975 (elle suit une directive européenne)

- ✓ Définit la notion de déchet
- ✓ Etablit le principe **pollueur-payeur**
- ✓ Donne la responsabilité de l'élimination des OM aux **communes**
- ✓ Incitation à limiter le volume & incite à la valorisation…

## Loi du 13 Juillet 1992 (elle suit une directive européenne)

- ✓ **Prévention** ou réduction de la production des déchets ou de leur nocivité
- ✓ Valorisation des déchets par ré-emploi, recyclage, ou énergie
- ✓ Principe de **proximité**
- ✓ Mise aux normes des UIOM avant le 01/01/96 ➲ récupération d'énergie & traitement des fumées
- ✓ Suppression des décharges **brutes** au 01/07/02 (!!) ➲ CSDU (notion de DU)
- ✓ **Responsabilité** des exploitants vis-à-vis de leur site
- ✓ **Transparence** (!...)
- ✓ **Taxe** à l'ADEME en fonction de la quantité de déchets (OM & DIS)
- ✓ **Plans départementaux** d'élimination des déchets ménagers (coordination, modernisation…)

## 2. Problématique des déchets ménagers

Face au retard constaté dans l'élaboration et l'adoption des plans & à un constat mettant en évidence la place (encore) trop importante de l'incinération et du stockage

### Circulaire ministérielle du 28 Avril 1998 (dite circulaire Voynet)

- ✓ Collecter 50% des déchets dont l'élimination est de la responsabilité des collectivités locales en vue de leur recyclage, de leur compostage ou épandage
- ✓ Nouvelle définition du déchet ultime:

« le déchet ultime pouvant être mis en décharge au-delà de juillet 2002 se définit comme la fraction non récupérable des déchets et non comme le seul résidu de l'incinération »

### Directive du 26 Avril 1999

- ✓ 2017 ➲ -35% (/1995) sur les déchets biodégradables en décharge

### Circulaire du 27 Juin 2002

- ✓ Faire le point sur l'application de la loi de 1992…
- ✓ Volonté de fermer les 9000 décharges brutes…

# c) Organismes gouvernementaux

## ADEME

**A**gence **D**e l'**E**nvironnement et de la **M**aîtrise de l'**E**nergie

***Statut :*** Etablissement public à caractère industriel et commercial, placé sous la tutelle conjointe des ministères en charge de l'Ecologie et du Développement durable, de l'Industrie et de la Recherche.

***Missions :*** susciter, animer, coordonner, faciliter ou réaliser des opérations ayant pour objet la protection de l'environnement et la maîtrise de l'énergie.

***Domaines d'intervention :*** énergie, air, bruit, transports, déchets, sites et sols pollués, management environnemental.

***Effectif :*** 850 salariés (dont 359 ingénieurs)

***Organisation :*** 3 sites pour les services centraux à Angers (49), Paris (75) et Valbonne (06), 26 délégations régionales, 3 représentations dans les territoires d'outre-mer et 1 bureau de représentation à Bruxelles.

## DRIRE

**D**irection **R**égionale de l'**I**ndustrie de la **R**echerche et de l'**E**nvironnement

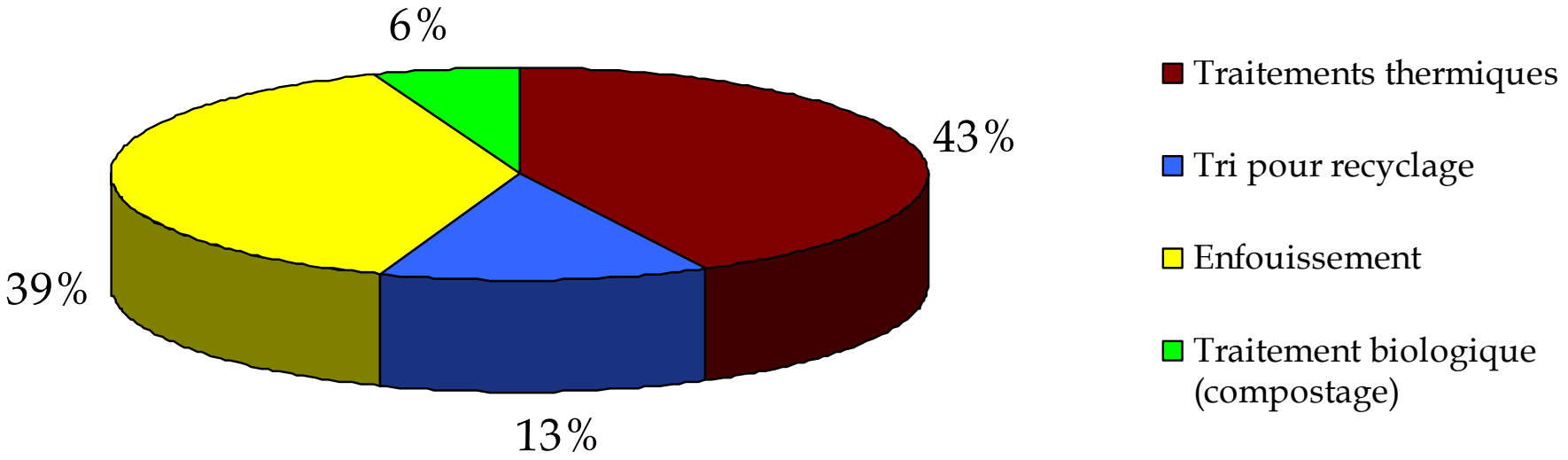
*Plusieurs prérogatives (dév. durable, aide aux entreprises, sûreté nucléaire… & environnement)*

- contrôle des activités industrielles susceptibles d'avoir un impact sur l'environnement (cadre ICPE)
- inspection des installations classées : mission de police environnementale auprès des établissements industriels

<u>Rôle d'animation des acteurs de l'environnement :</u>

- associations de surveillance de la qualité de l'air (39 réseaux)
- secrétariats permanents pour la prévention des pollutions industrielles (12 SPPPI),
- commissions locales d'information et de surveillance (près de 600).

# d) Quels traitements pour les déchets ménagers ?




+ 0,1 % Fabrication de combustible
0,2 % Méthanisation

Le traitement des déchets

# 3. Valorisation et recyclage

## 3. Valorisation & recyclage

Une idée reçue… fausse ➲ ~~emballage recyclable~~

Une idée reçue… fausse ➲ ~~Tout est recyclable !~~

- ✓ Techniquement presque vrai
- ✓ Économiquement faux
- ✓ Écologiquement parfois non viable

Trois idées fortes

➲ Le tri coûte très cher

➲ Les flux sont encore (trop) faibles

➲ L'inertie est grande (notion de civisme)

A ne pas négliger

➲ La valorisation énergétique

# Le cas des déchets d'emballage

Plutôt mauvaise presse… (¼ des personnes interrogées pensent que les déchets d'emballage sont néfaste pour l'environnement) pour deux raisons majeures:

➲ Produit à partir de ressources terrestres le + souvent non renouvelables, alors que la demande explose (nouveaux marchés)

➲ Les déchets encombrent la nature et doivent être traitées. Leur biodégradabilité pose problème

**Production en hausse!**

Déchets ménagers ➔ + 63% en 30 ans (220 à 360 kg/hab.an)

Part des emballages ➔ de 16,5 à 33,5% durant la même période

**Traitement à améliorer!**

37,5% des déchets d'emballages sont traités avec une valorisation

61% partent en décharge directement (déchet ultime dans chaque cas??)

# 2. Problématique des déchets ménagers

***Au niveau légal…***

Loi française (15/07/75) et décret appliqué au 01/01/93

- Responsabilité de reprise
- Agrément
- Contrat
- Cahier des charges
- Organisme ou entreprise titulaire
- Elimination individuelle
- Valorisation

***Conséquences du décret:***

***3 possibilités***

- Consigne
- Elimination individuelle
- Contribution collective
  - Tri
  - Reprise
  - Communication
  - Recherche

Directive Européenne (20/12/94)

*Recyclage plutôt que val. énerg.*

- Echéance de 5 ans : entre 50 et 65%w des déchets d'emballage valorisés
- Entre 25 et 45%w des matériaux d'emballage recyclés et 15%w minimum pour chaque matériau
- Marquage (nature de l'emballage)
- Concentration en métaux lourds

# 2. Problématique des déchets ménagers

## *Quelles solutions industrielles*

### - Diminution en poids des emballages

| Emballage | matériau | Poids (g) 70-80 | Poids (g) 90-97 | Réduction (%) |
|---|---|---|---|---|
| Bouteille vin | verre | 450 | 285 | -37 |
| Bouteille bière | verre | 210 | 130 | -38 |
| Bouteille lait | verre | 340 | 245 | -28 |
| Boite boisson | acier | 91 | 22 | -76 |
| Sac | acier | 247 | 215 | -13 |
| Sac sortie de caisse | PE | 23 | 6.5 | -70 |
| pot yahourt | PS | 6.5 | 3.5 | -45 |
| Film pour palette | PE | 1400 | 350 | -75 |
| Boutielle boisson | PET | 66 | 42 | -36 |

### - Réduction de la consommation d'énergie

- 1kg Pain ➲ 1,7 MJ pour l'emballage, 14,1 MJ pour production et distribution
- 1kg sucre ➲ 0,9 MJ pour l'emballage, 19,1 MJ pour production (16MJ rendu)

Réduction progressive: 7,66 GJ pour 1t de verre en 1960 et 6GJ aujourd'hui
30 GJ pour 1t d'acier en 1960 et 25GJ aujourd'hui

Sur l'électricité, réduction de 40 à 70% en 15 ans

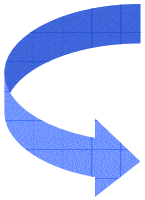
**- Recherche de nouveaux produits** (ex. CFC)

**- Conception différente** (composites, différentes formes)…

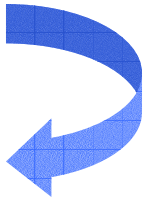
## 2. Problématique des déchets ménagers

*Deux idées (fausses) et des réponses nuancées*

| Consigne obligatoire = meilleure solution (/écologie) | PVC = mauvais matériau d'emballage |
|---|---|
| - Transport ?<br>- Consommation de produits de nettoyage ?<br>- Consommation d'énergie ?<br>- Traitement des eaux usées ? | - PVC = pétrole + Nacl (1 pour 1)<br>- Cohérence de la chaîne de production (chlore + soude)<br>- Autres matériaux plus « chers » à transformer |



**BILAN ECOLOGIQUE GLOBAL**



# Valorisation ou recyclage matière ?

Le type de valorisation, donc de recyclage, dépend de la nature du déchet

Il existe 3 grandes familles de matériaux dont les propriétés de base orientent vers des voies de valorisation prioritaires.

## Déchets organiques

*Déchets putrescibles, déchets verts…*

Décomposition possible par micro-organismes

**Compostage**

**Méthanisation**

## Déchets minéraux

*Verre, métaux*

Inertes

**Valorisation matière**

## Macromolécules organiques

*Résistance limitée à la chaleur, à l'oxydation, au vieillissement. Perte de leurs propriétés par des ruptures de chaîne pour les plastiques*

*macromolécules naturelles*

**Compostage**
**Méthanisation**
**Incinération (val. energ.)**
**Val. matière**

*macromolécules de synthèse*

**Val. Matière**
**Incinération (val. energ.)**
**Val. chimique**

# La valorisation matière

Activité vielle comme le monde… mais remise sur le devant de la scène depuis 10 ans.
Composante incontournable de l'économie des matières premières

Ex: Acier, verre et cartons sont produits à plus de 50% à partir de matériaux recyclés
Certaines installations en consomment plus de 75%

## ❑ Un secteur de petites entreprises en cours de mutation

~ 3700 d'entreprises de la récupération en 2000. Chiffre stable depuis 1993.

Mais, ↗ des entreprises de la récupération des matériaux non ferreux
↘ des entreprises de la récupération des matériaux ferreux

Entreprises de petite taille (85% ont mois de 10 salariés)

## ❑ Activité dominée par les marchés mondiaux de matières premières

CA annuel du secteur ~ 4.5 Milliards d'Euros pour 25.5 Millions de tonnes de matières destinées au recyclage en 2000.

50% du CA réalisé par les métaux

L'activité dépend fortement des marchés mondiaux et des cours des matières premières.

# Vers la responsabilité du « metteur » sur le marché..

Double évolution dans les années 90:

- ✓ le « pollueur-payeur » passe du détenteur du déchet (produit en fin de vie), au « metteur » sur le marché du produit neuf (du producteur du déchet au producteur du produit)
- ✓ le contribuable laisse la place au consommateur pour financer la gestion des produits en fin de vie

Concept de responsabilité partagée

- **Le détenteur** ➲ trier et remettre ses déchets à un dispositif adapté
- **Le distributeur** ➲ être un acteur de la collecte des produits en fin de vie
- **Les collectivités locales** ➲ participer à la collecte des produits en fin de vie des ménages
- **Le « metteur » sur le marché** ➲ coordonner le dispositif et assurer sa gestion financière
- **Le traiteur** ➲ traiter dans le respect de l'environnement
- **Les pouvoirs publics** ➲ assurer le cadre réglementaire

# 3. Valorisation & recyclage

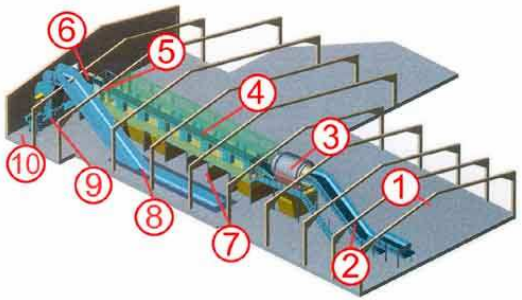
Créent en 1992 (avec les pouvoirs publics) & paient la taxe

**Industriels**

Vend les balles

Garantie de reprise

Produit




*Le centre de tri*
*(vie sa vie d'entreprise en faisant payer pour le traitement)*

Paie ce traitement

*La commune*

Condition

Subventionne

Contrat (optionnel)

ECO-EMBALLAGES

ADELPHE

REVIPAC GARANTIE DE RECYCLAGE

Valorplast

*Deux filiales*

# 3. Valorisation & recyclage

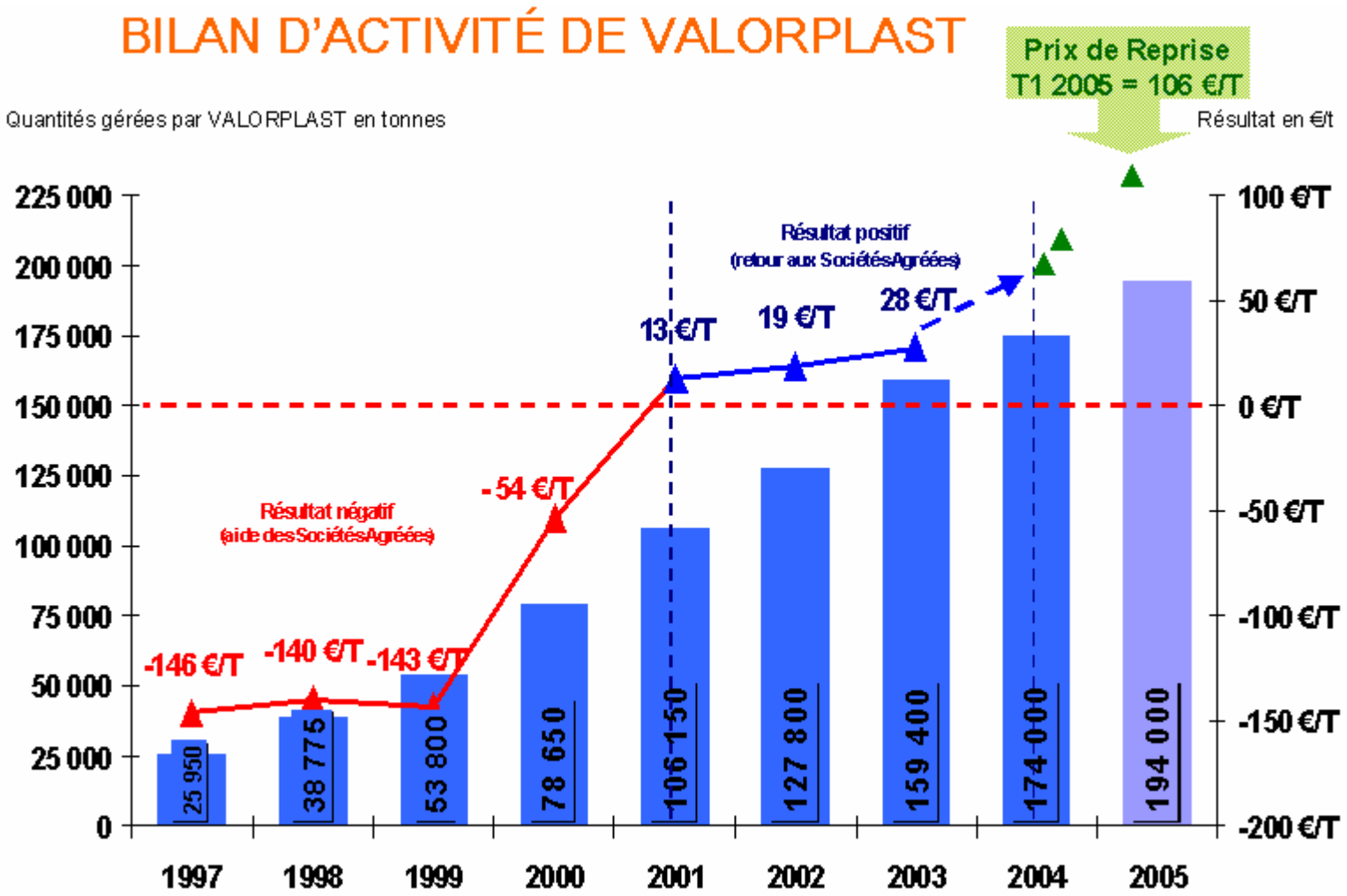
## DÉFINITION DU PRIX DE REPRISE

Valorplast

| | | T1 2005<br>1er trimestre 2005 | 2006 | 4ième trimestre 2007 |
|---|---|---|---|---|
| Prix de vente des balles | ➢ Prix de vente définis dans les contrats avec les recycleurs et indexés sur les cours des matières vierges<br>➢ Prix variant selon le type de flux trié<br>Ex.: prix Contrats France en janvier 2005<br>PEhd : 110 €/t PET incolore 249 €/t PET foncé 100 €/t | +148 €/T | + 223€/t | + 245€/t |
| Coûts de transport | ➢ Influencés par le poids des chargements et les distances parcourues | - 38 €/T | -35 €/t | -35 €/t |
| | ➢ Incitation financière à l'optimisation des transports<br>➢ Aide AZE des Sociétés Agréées (Eco-Emballages / Adelphe) | + 7 €/T | +7 €/t | +7 €/t |
| Frais de Fonctionnement | ➢ Dépenses liées au fonctionnement de la Garantie de Reprise | - 11 €/T | -13 €/t | -17 €/t |
| | | | | +4 €/t |
| Prix de Reprise | ➢ Fixé pour le 1er trimestre 2005 à | **= 106 €/T** | = 182 €/t | = 204 €/t |
| | ➢ Prévision 2ème trimestre 2005 : stabilité | | | |

*Source: http://www.valorplast.com/*

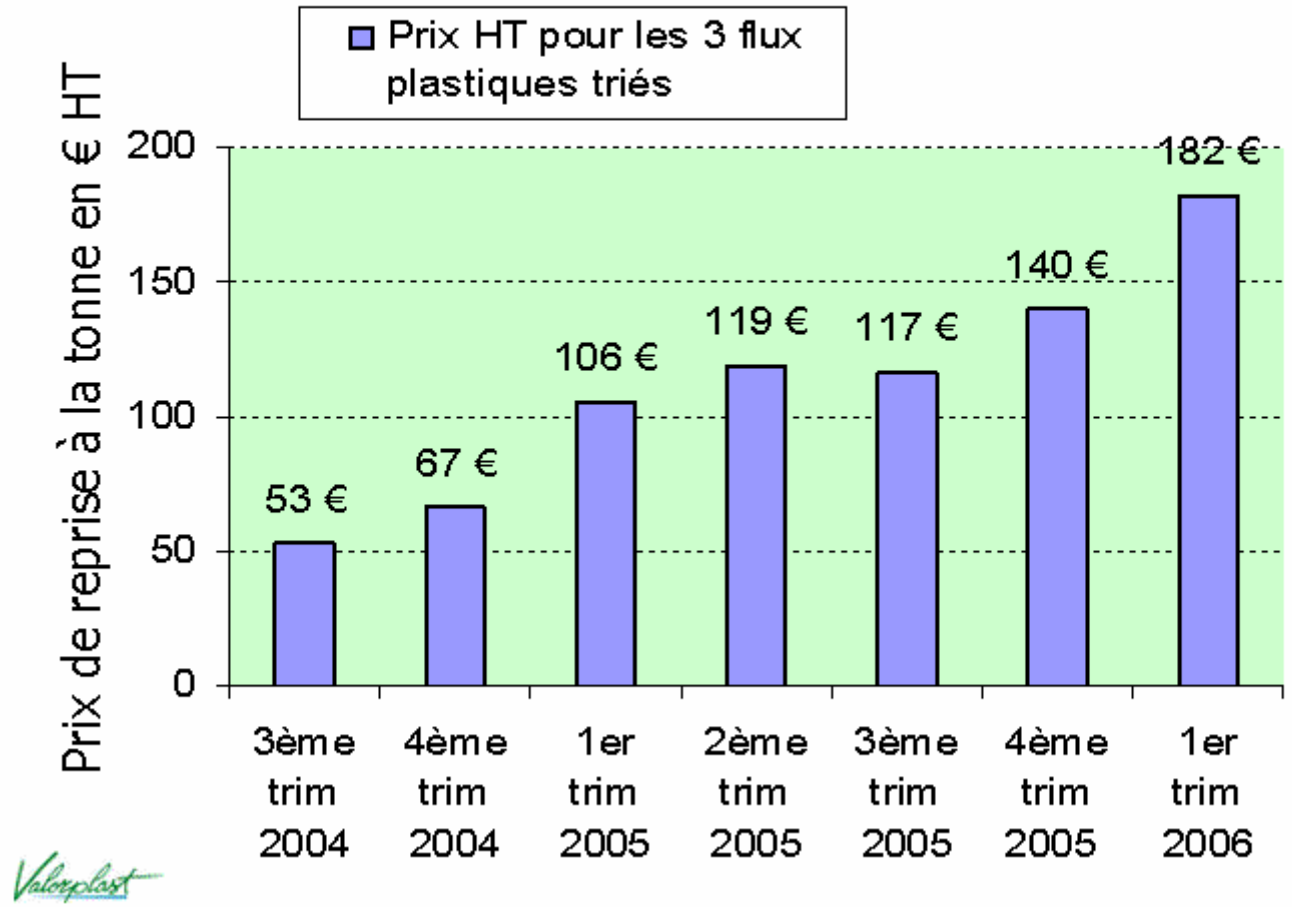
# 3. Valorisation & recyclage




*Source: http://www.valorplast.com/*

# 3. Valorisation & recyclage

## EVOLUTION DU PRIX DE REPRISE




Valorplast

1

*Source: http://www.valorplast.com/*

# Octobre 2005 – convention particulière plastiques ACCREDITATION DES CLIENTS VALORPLAST

Tous les industriels clients de Valorplast sont accrédités. L'accréditation se fait après évaluation des capacités de chaque industriel, sur le plan financier, économique, technique et environnemental, selon la liste des critères établie ci-dessous. Les industriels assurent ainsi à Valorplast :

- la garantie d'achats et de paiements réguliers,
- la traçabilité jusqu'au produit final,
- la transparence de la mise en oeuvre des tonnages traités,
- le respect de l'environnement,
- la promotion du recyclage.

## ***Liste des critères :***

### Capacité technique

Fiabilité du (ou des) procédés de régénération et de recyclage
Conformité aux réglementations (autorisation, exploitation, assurances…)
Niveau de certification (ISO 9000, 14000, 18000…)
Expérience de la régénération et du recyclage : historique / compétences du groupe ou d'autres usines
Niveau d'information sur le procédé

### Capacité de l'installation

Taille de l'installation
Part de la collecte française dans l'approvisionnement / évolution dans le temps (passé / futur)
Capacité de stockage et de transformation pour absorber les variations saisonnières des collectes,

### Capacité économique

Intégration des débouchés : ensemble de la production / consommation partielle
Connaissances du marché aval : compétences commerciales
Niveau d'information sur les débouchés des produits et des sous-produits
Qualité et fiabilité des débouchés. Intégration Régénération-Recyclage.
Confiance dans l'encadrement et le management de l'entreprise

### Capacité financière

Solidité financière de la société
Confiance dans les actionnaires
Qualité du montage juridique
Bilan et compte de résultats des années précédentes

### Capacité environnementale

Impact sur l'environnement du procédé
Taux de valorisation
Gestion des déchets et des eaux usées

### Continuité dans la bonne prestation du service

Continuité / régularité dans les achats
Ponctualité dans les paiements
Retour d'informations sur le poids et la qualité des livraisons
Respect des procédures pour les prises de rendez-vous, réceptions
Qualité de l'accueil lors des Journées Portes Ouvertes

### Historique

Expérience des échanges commerciaux avec Valorplast
Fiabilité du courant d'achats avec Valorplast
Expérience des échanges commerciaux avec des organismes similaires

### Situation géographique

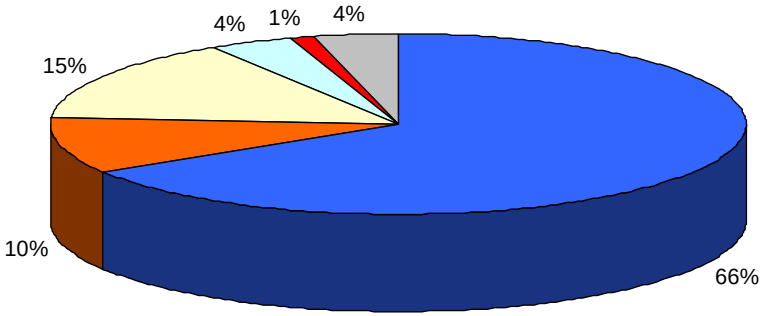
Impact sur coût de transport
Impact environnemental du transport
Contribution à l'emploi local
Contribution au développement des capacités de recyclage en France / en Europe.

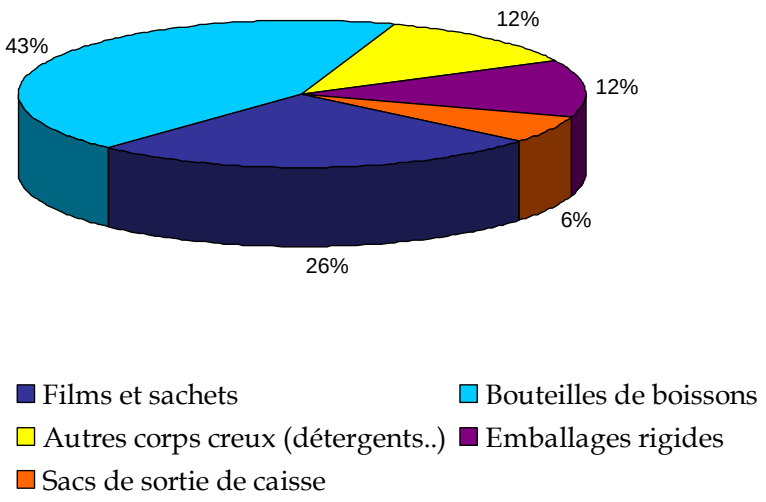
# Exemple de valorisation matière et énergétique : les matières plastiques

Les matières plastiques proviennent de différentes sources :

- déchets industriels
- déchets de distribution
- déchets agriculture
- déchets travaux publics
- **les ordures ménagères**

10 % des ordures ménagères sont des matières plastiques



# 3. Valorisation & recyclage

## ❑ La collecte et le tri

Collecte globale : nos poubelles communes
Collecte sélective : tri sélectif (bon vouloir des consommateurs)
Collecte spécifique des bouteilles en plastique transparent : bennes dédiées

➲ Différents niveaux de sélectivité : - collecte multi-matériaux
- collecte mixte verre-plastique
- collecte spécifique bouteilles

## ❑ Recyclage matière des plastiques

**Thermoplastiques homogènes**

*Déchets, objets usagés, chutes de fabrication*

triage, broyage, lavage, séchage
fonte dans une extrudeuse

**granulés**

**Produit régénéré**

**Thermorigides**

*Déchets infusibles (Polyuréthane, Polyester)*

Broyage

**Broyats (réincorporés à 30%)**

**Produit réincorporé**

**Plastiques mélangés**

*Emballages thermoplastiques (PET, PVC etc…)*

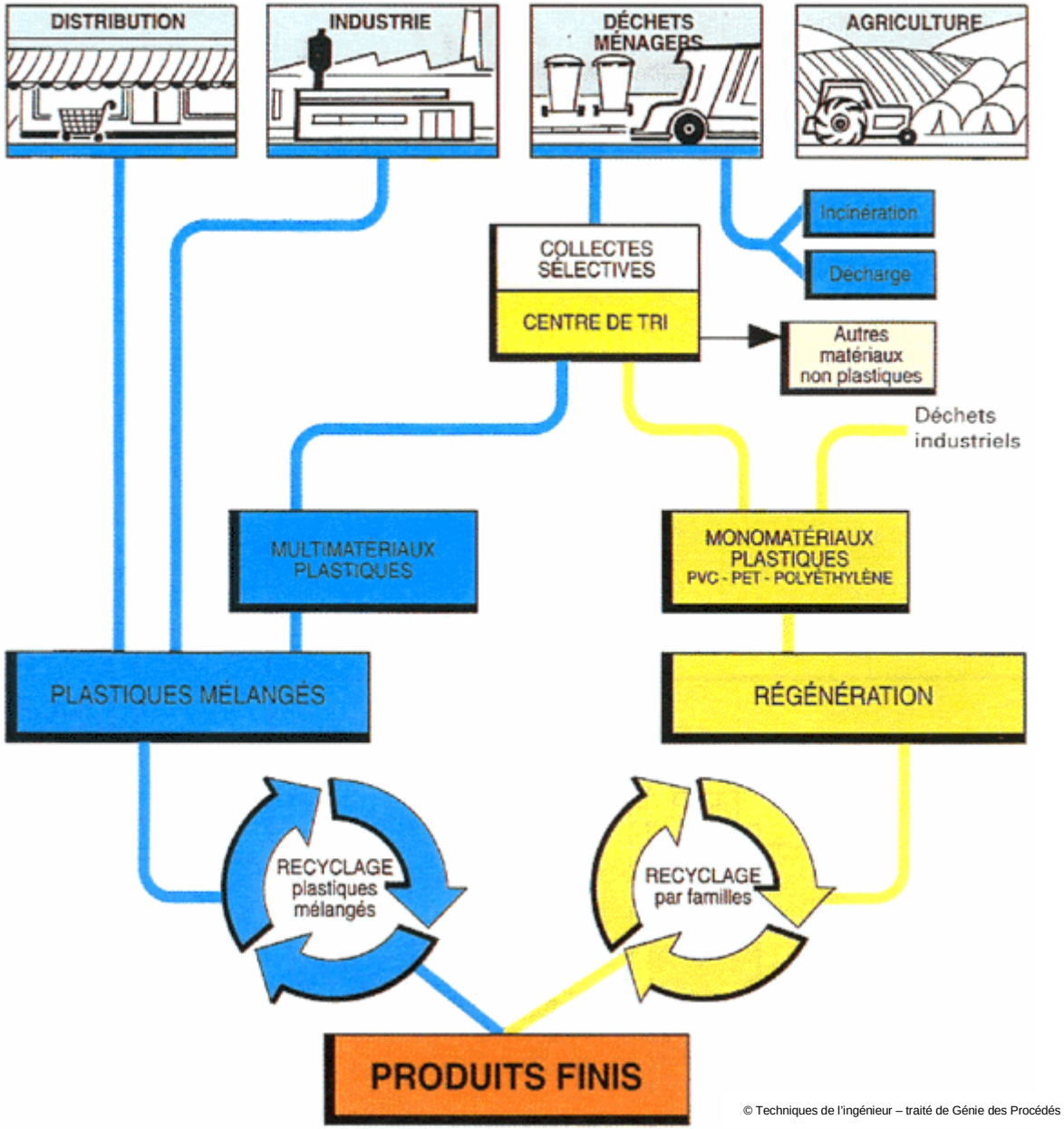
triage, broyage, lavage, séchage
fonte dans une extrudeuse
mélange avec d'autre plastiques

**granulés**

**Produit recyclé**

## Circuit des déchets plastiques

Certains transformateurs utilisent ces technologies avec les seuls déchets plastiques contenus dans les ordures ménagères. D'autres, pour améliorer la qualité des produits finis, incorporent des déchets plastiques moins souillés, comme ceux provenant de l'industrie




© Techniques de l'ingénieur – traité de Génie des Procédés

## *Limites du recyclage physico-mécanique*

**Limite économique** : Prix des matières vierges trop bas

**Limite technique** : Variabilité de la qualité; Propriétés mécaniques des produits finaux obtenus inférieures à celles des mêmes produits à base de plastique vierge

**Limite écologique** : le bilan écologique global peut s'avérer négatif par rapport à une incinération avec récupération énergétique selon les normes européennes.

## ❑ Valorisation pour la chimie

*Pyrolyse* : décomposition des molécules par chauffage sous vide ; hydrocarbures liquides ou gazeux utilisables ultérieurement dans les raffineries.

*Hydrogénation* : traitement par l'hydrogène et la chaleur des macromolécules qui sont craquées en huiles hydrocarbonées utilisables dans les raffineries et les usines de produits chimiques.

*Gazéification* : Plastiques chauffés en présence d'air ou d'oxygène ; le gaz de synthèse résultant est constitué de monoxyde de carbone et d'hydrogène qui peut être utilisé dans la production de méthanol ou d'ammoniac ou encore comme agent réducteur dans la production d'acier.

*Décomposition chimique proprement dite* : Décomposition chimique des produits peuvent être décomposés pour obtenir les monomères ou les produits de base correspondants, réutilisables pour une nouvelle polymérisation.

## ❑ Valorisation énergétique des matières plastiques

**Propriété des matières plastiques ➔ Capables de restituer la plus grande part de l'énergie nécessaire à leur fabrication.**

*Définition du pouvoir calorifique* :
Quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de masse (combustibles solides ou liquides), exprimée en J/kg de combustible

| | |
|---|---|
| PCI des matières plastiques (dans les OM) | ~ 36,5 GJ/t |
| PCI des OM dans leur ensemble | ~ 8,5 GJ/t |

10 % de matières plastiques apportent 48,6 % de l'énergie récupérable

**Rendement énergétique** $= \dfrac{\textbf{PCI}}{\textbf{Coûts énergétiques}}$

*somme totale des énergies nécessaires pour l'obtention d'un objet fini*

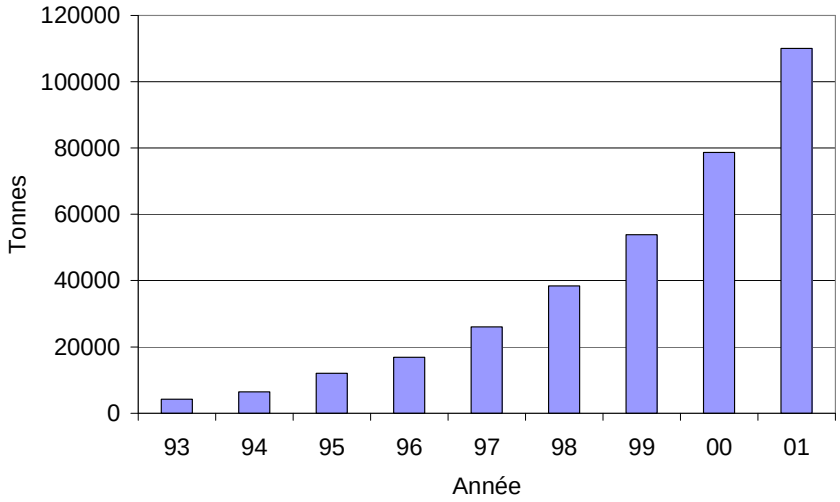
| Plastique utilisé | PCI | Coût énergétique CE | Rendement RE (1) |
|---|---|---|---|
| | (GJ · t$^{-1}$) | (GJ · t$^{-1}$) | |
| PVC rigide | 18,4 | 67,2 | 0,27 |
| Polyéthylène | 46 | 88,2 | 0,52 |
| Polypropylène | 46 | 88,2 | 0,52 |
| Polyester | 21 à 33 | 67,2 | 0,31 à 0,49 |
| Polyuréthanne | 25 | 126 | 0,20 |
| PMMA | 25 | 126 | 0,20 |
| Polystyrène | 41 | 92,4 | 0,44 |

## 3. Valorisation & recyclage

### ❑ Quelques chiffres...

**141 000 tonnes/an** ➔ Quantité produite de déchets plastiques en Languedoc-Roussillon

80 % de thermoplastiques recyclables (PE, PET, PP, PVC…)
20 % de thermodurcissables non recyclables (polyuréthane, polyesters insaturés…)




*Quantité d'emballages plastiques ménagers recyclés*

| Année | 1990 | 1995 | 1997 |
|---|---|---|---|
| Déchets plastiques récupérés par la filière « valorisation matière » | >100 000 | 310 000 | 350 000 |

*Quantité de matières plastiques recyclées*

# 3. Valorisation & recyclage

## ❑ Quelques chiffres...

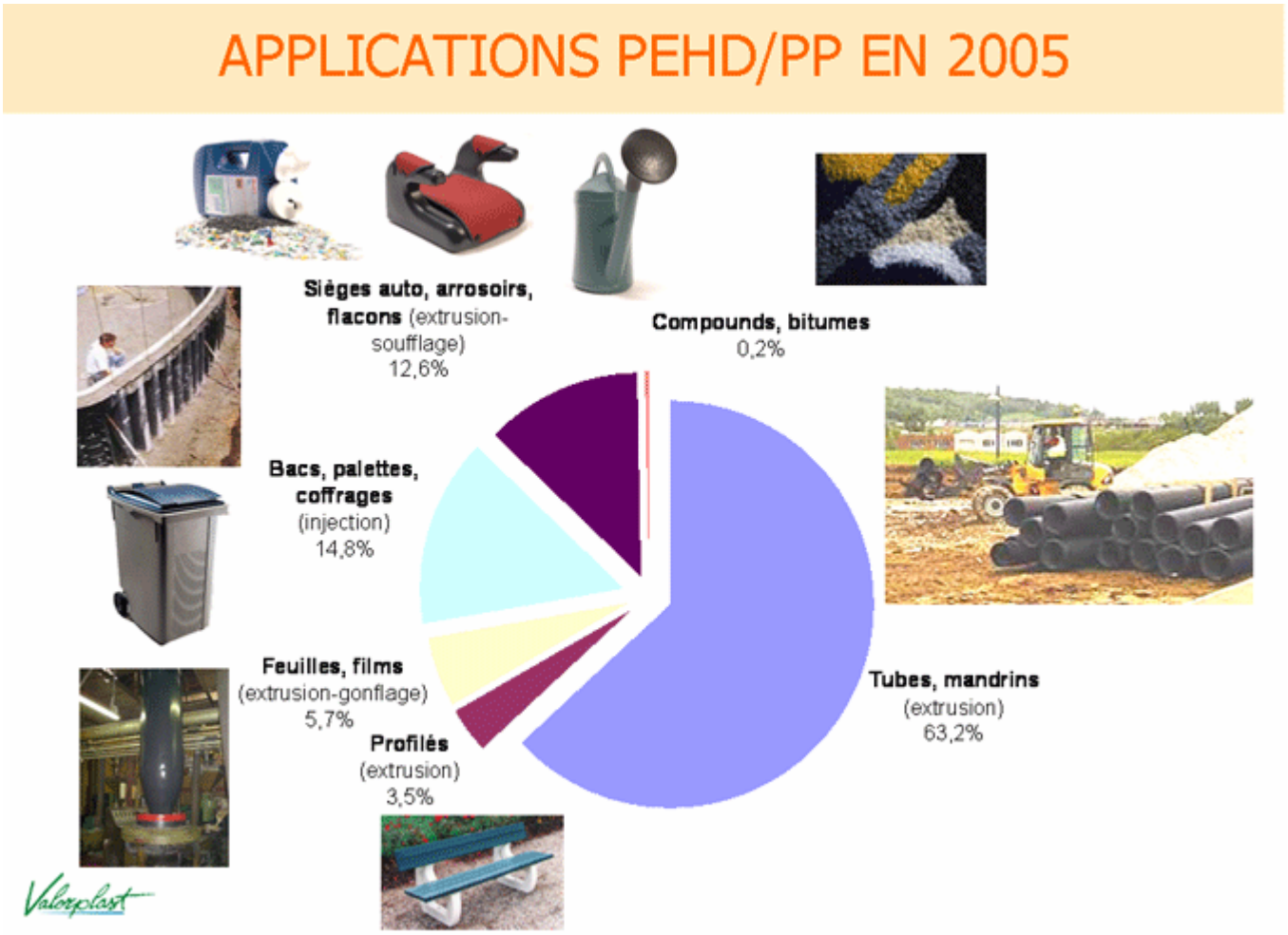
### Évolution des résultats des collectes sélectives d'ordures ménagères en France (d'après *Recyclage Magazine* )

| | 1992 | 1996 | 1999 |
|---|---|---|---|
| Verre d'emballage ($10^3$ t) | 940 | 1 210 | 1 550 |
| Papiers, cartons d'emballage ($10^3$ t) | 5 | 42 | 185 |
| Journaux, magazines ($10^3$ t) | 145 | 195 | 400 |
| Métaux (1) ($10^3$ t) | 170 | 225 | 275 |
| Plastiques (2) ($10^3$ t) | 7 | 19 | 55 |
| Déchets organiques ($10^3$ t) | | 29 | 80 |
| Population desservie par des collectes multimatériaux (millions d'habitants) | 0,5 | 9 | 27 |

Autres collectes sélectives :
•vêtements usagés (en 2000, collecte de 1 kg/habitant) ;
•déchets toxiques des ménages : certaines collectes sélectives n'ont pas pour objectif principal une valorisation, mais une « détoxication » des flux.
(1) Y compris déferraillage des mâchefers d'incinération.
(2) Bouteilles et flacons essentiellement.

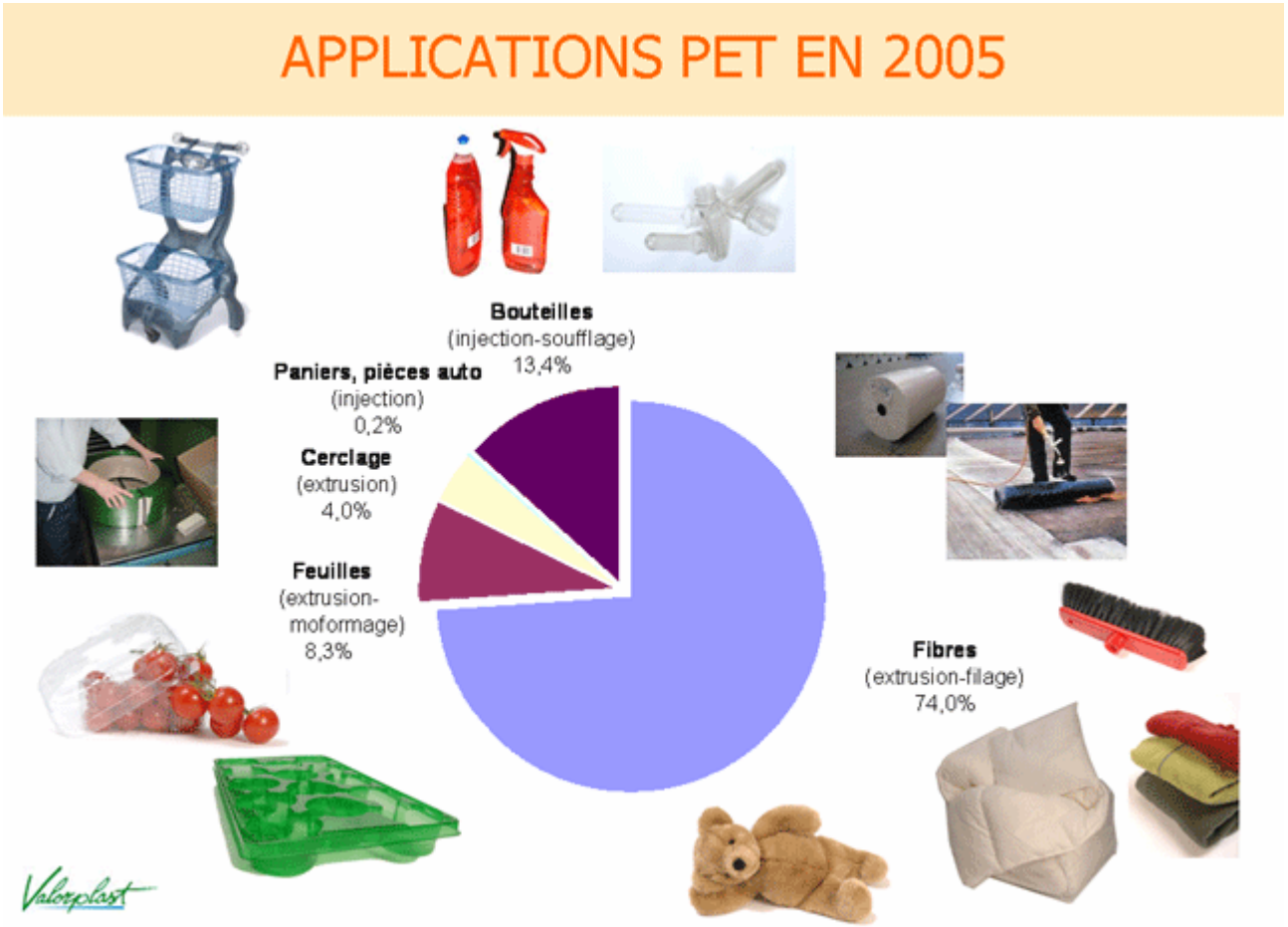
# 3. Valorisation & recyclage

## Utilisation des paillettes et granulés de PEHD en 2005



# 3. Valorisation & recyclage

## Utilisation des paillettes de PET en 2005



Le traitement des déchets

# 4. Les centres d’enfouissement technique (CET)

photo : J.Léone, Grand Lyon

Le centre d'enfouissement technique
de Rillieux-la-Pape

*Une vue aérienne du Centre Enfouissement Technique de Paihoro à Taravao, avec la presqu'île en arrière plan*

# a) Principes généraux et aspects théoriques

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

Alain Damien « Guide du traitement des déchets »

Stabilisation des déchets : 30 à 100 → souci d'éviter les pollutions dans le milieu environnant (conception adaptée, contrôle en exploitation et en post-exploitation)

***Conception*** : connaissance géologique du site ; maîtrise du niveau de perméabilité de la membrane (naturelle ou artificielle) ⇨ contrôle des infiltrations souterraines

***Exploitation*** : gestion des effluents liquides et gazeux si nécessaire (CET classe 2)

***Post-exploitation*** : fermeture (couverture) et maintenance continue pour récupérer les effluents liquides et gazeux

# b) Aspects historiques

Référence la plus ancienne : ville de Cnossos (empire minoen)

1348 : Philippe VI de Valois impose l'évacuation des déchets hors de la ville

1404 : Création de la décharge (Charles VI)

1925 : Décharges soumises à une autorisation préfectorale

1978 : Décharges brutes d'ordures ménagères prohibées

1980 : Déchets Industriels Banals (DIB) avec les ordures ménagères OM

1980 : Distinction des classes 1, 2 et 3

1987 : CET pour déchets urbains (implantation, gestion des lixiviats et du biogaz)

1992 : Loi sur la fermeture des décharge

2002 : Seul doit (devrait) rester le CSDU… pour les déchets ménagers

# c) Description et usages des installations

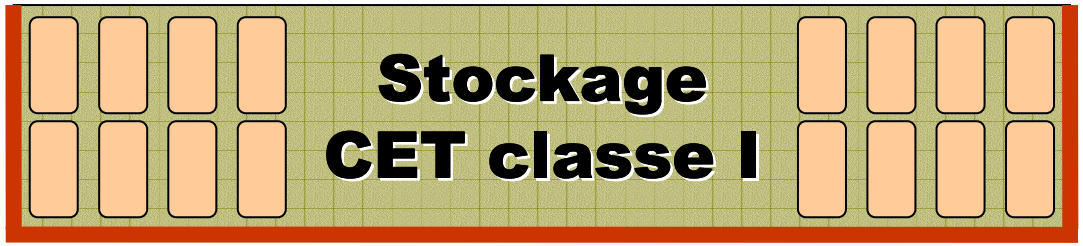
## ❑ CET de classe 1

**Déchets admissibles**
*(DIS: Déchets fortement toxiques, REFIOM, Métaux lourds)*

↓

Pré-traitement (conditionnement)
*(enrobage dans un liant hydraulique, organique ou minéral)*

↓




*Membrane imperméable*

Pas de rejet ↓

**Milieu récepteur**

## 4. Le centre d'enfouissement technique

### ❑ CET de classe 2

**Déchets admissibles**
*(Déchets Ultimes: OM et DIB non valorisables)*
**Déchets interdits**
(DIS, DAS, radioactifs, déchets inflammables ou explosifs, …)

Pas de pré-traitement

**Stockage & Transformation**
**CET classe II**

**Biogaz**
**($CH_4$ & $CO_2$)**

*Membrane semi-perméable*

**Lixiviats**

*Traitement si nécessaire*

EDF ← Électricité ← Brûleurs

Consom. propre

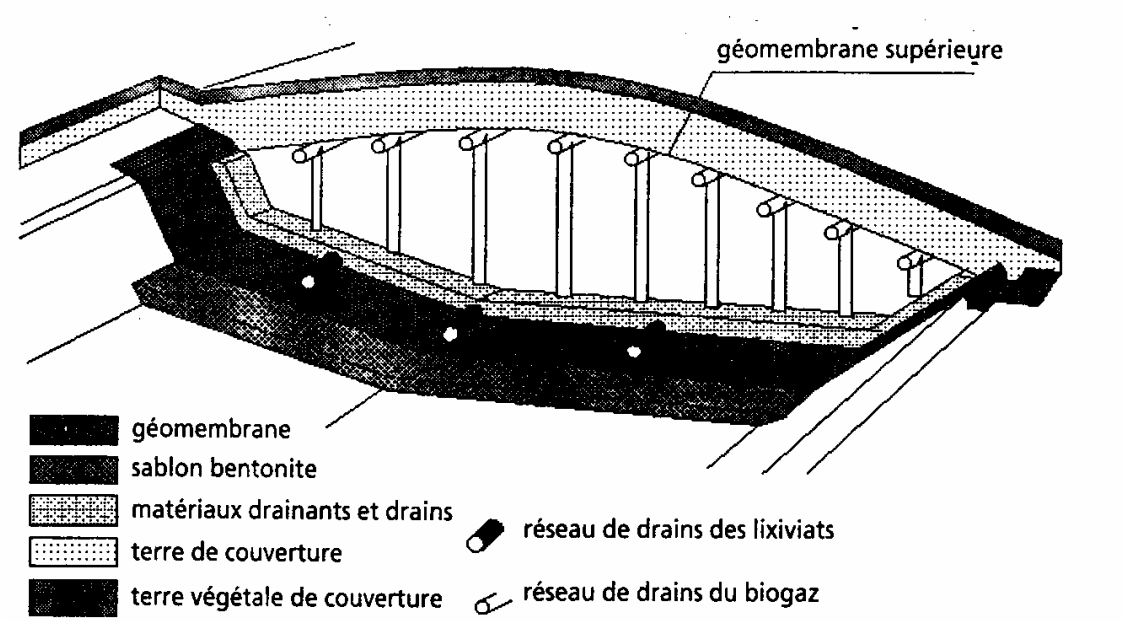
$CO_2$

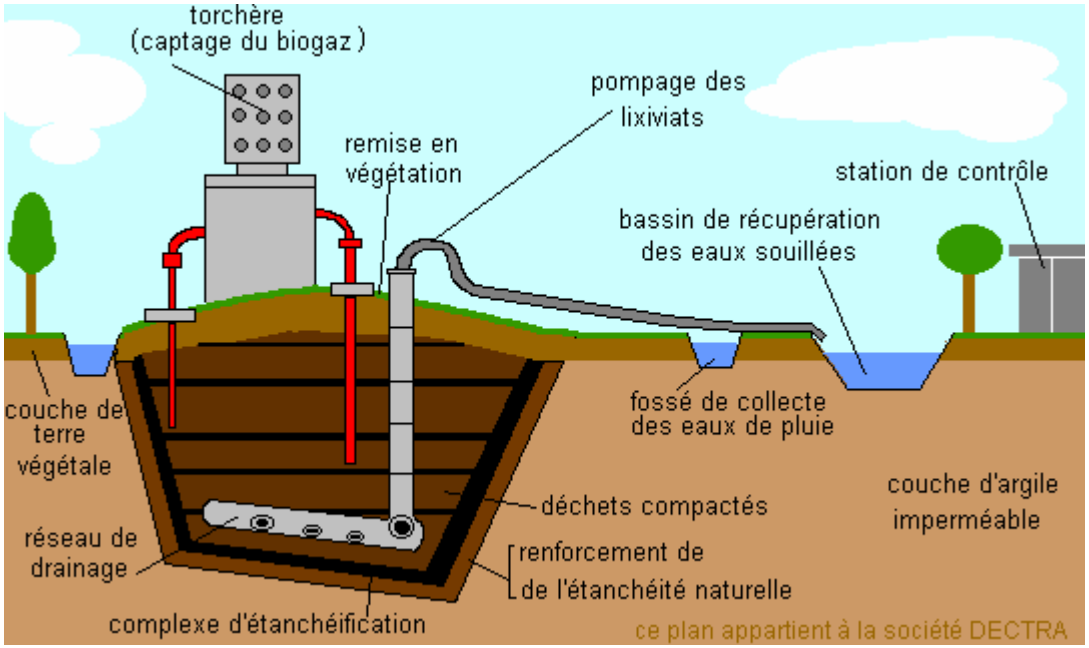
**Milieu récepteur**

# 4. Le centre d'enfouissement technique

## ❑ CET de classe 2

Empilement de plusieurs couche pour:
- assurer l'étanchéité
- drainer
- soutenir la structure



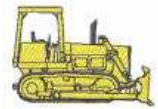
Sous-sol

Argile = imperméabilité assurée

## 4. Le centre d'enfouissement technique

### ❑ CET de classe 3

**Déchets admissibles**
*(Déchets Inertes: démolition, gravas…)*
**Déchets interdits**
(Déchets non stablesOM, DIS, DAS, radioactifs, déchets inflammables ou explosifs, …)



Pas de pré-traitement

**Stockage**
**CET classe III**

*Membrane perméable*

**Lixiviats**

*Pas de traitement*

**Milieu récepteur**

## 4. Le centre d'enfouissement technique

### ❑ L'exploitation des décharges

***Réception des déchets***

Principe d'adéquation déchets reçus/déchets autorisés (formulaires standardisés)

***Exploitation du dispositif***

Réduire au maximum les nuisances de cette activité

- ✓ exploitation sur un nombre limité d'alvéoles
- ✓ couverture journalière définitive
- ✓ gestion correcte des lixiviats et du biogaz
- ✓ surveillance et contrôle du site

***Post-exploitation***

Pose de la couverture finale pour éviter les envols et les infiltrations d'eau
Couverture perméable (déchets peu évolutifs), semi-perméable (déchets organiques)

Site revégétalisé, traitement du biogaz et des lixiviats contrôlé

- de la fin d'exploitation à 5 ans : contrôle mensuel (biogaz et lixiviats)
- de 6 ans à 30 ans : procédures allégées de contrôle

# d) Traitement des lixiviats

## ❑ Rappels

*CET classe I :* Faible production de lixiviats (stabilisation préalable)

*CET classe II :* Traitement obligatoire des lixiviats (déchets organiques)

*CET classe III :* Pas de traitement (déchets inertes)

## ❑ Caractérisation

Lixiviats : percolation de l'eau des déchets à travers le massif de déchets & eau de pluie

Mécanismes de formation de nature physico-chimiques et biologiques variés et complexes

Mécanismes biologiques ⟷ Mécanismes interdépendants ⟷ Mécanismes physico-chimiques

déchets = substrat pour les micro-organismes

Dissolutions
Précipitations

# 4. Le centre d'enfouissement technique

## ❑ Mécanismes biologiques de dégradation des déchets

*Phase aérobie* : Production d'eau et de chaleur - température ~ 60°c

*Phase anaérobie (sous la surface)*

### I) Hydrolyse

Potentiel oxydo-reduction ↘, DCO ↗, des nutriments sont crées

### II) Acidogenèse

Formation des AGV, pH ↘, consommation de N et P → biomasse, $CO_2$, $H_2$

### III) Acétogenèse

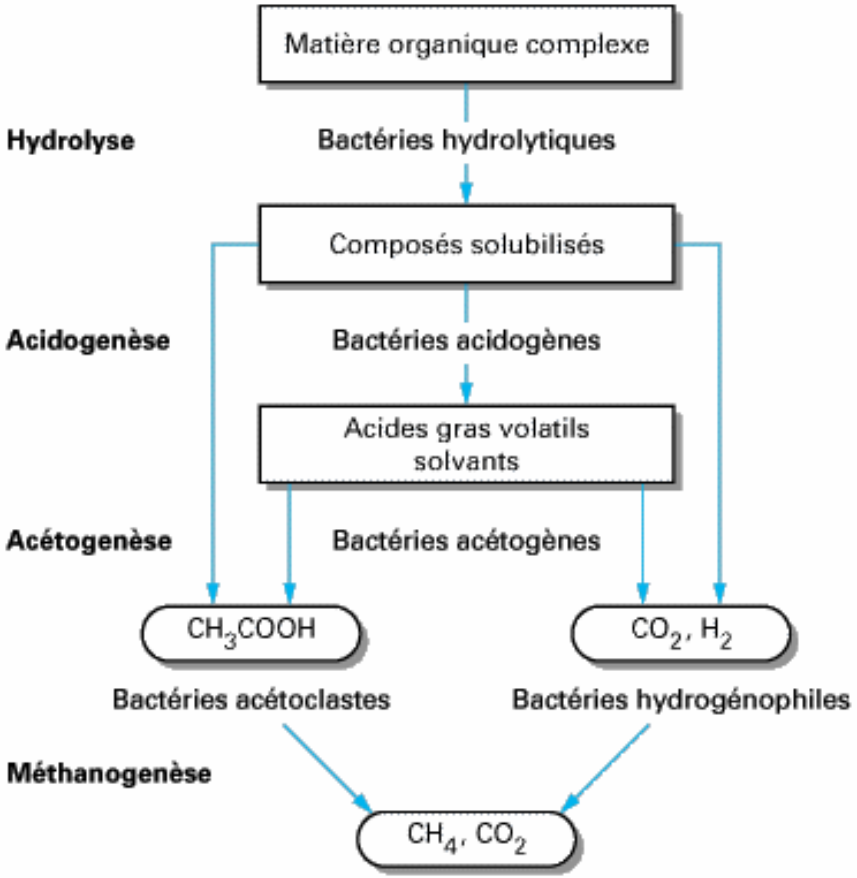
Transformation des AGV en acides acétiques, $CO_2$ et $H_2$

### IV) Méthanogenèse

Production de $CH_4$ et $CO_2$

### V) Maturation

Stabilisation de la matière organique




© Techniques de l'ingénieur – traité de Génie des Procédés

# 4. Le centre d'enfouissement technique

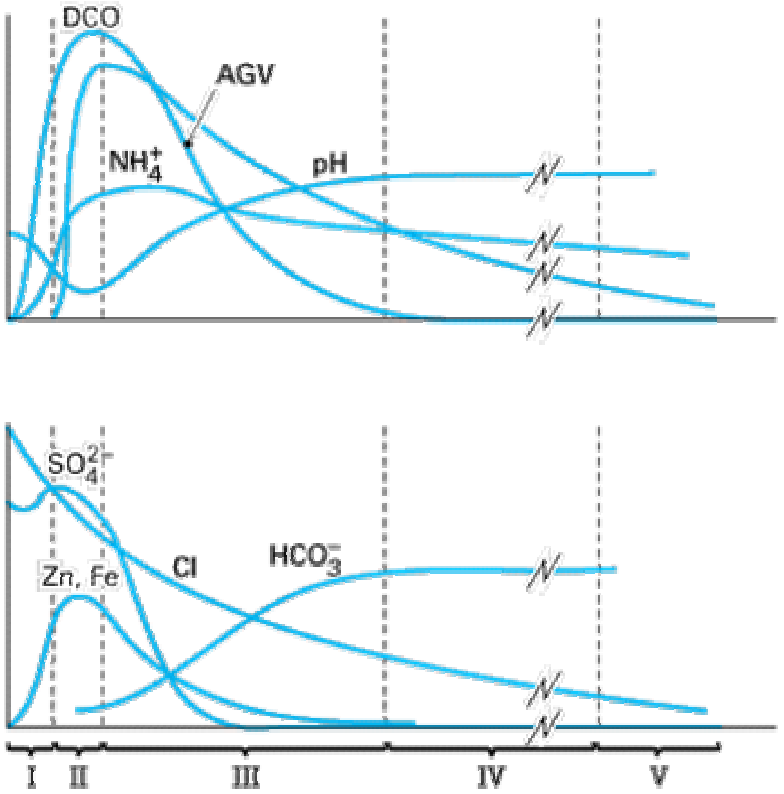
## ❑ Composition et quantification des lixiviats

*Composition* : forte variabilité (temps & espace)

| | |
|---|---|
| $DBO_5$ | 1 000-30 000 |
| DCO | 1 000-50 000 |
| $DBO_5$/DCO | 0,6-0,8 |
| N Kjeldahl | 10-500 |
| Nitrates | 0,1-10 |
| Phosphates | 0,5-50 |
| Cu | 0,02-1 |
| Pb | 0,1-1 |
| Ni | 0,1-1 |
| Fe | 10-1 000 |
| Zn | 0,5-30 |

Composition des lixiviats (mg/l)

© Techniques de l'ingénieur – traité de Génie des Procédés




Evolution de la composition des lixiviats au cours du temps (modèle)

*Quantification* :

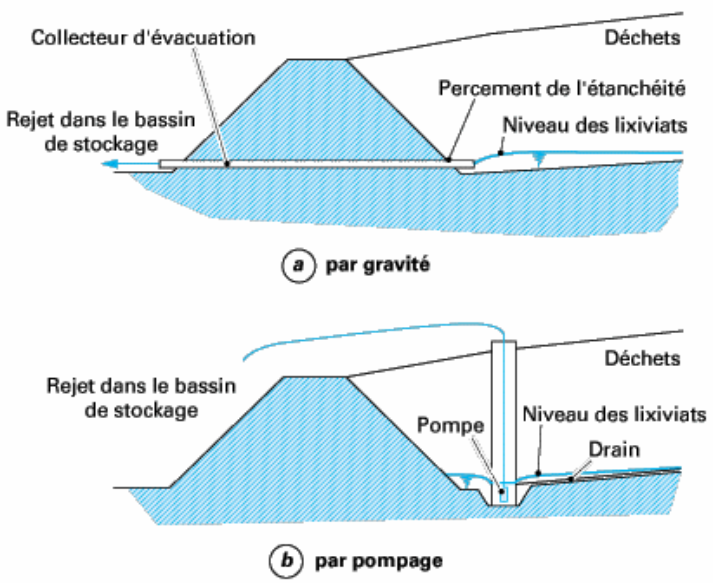
bilan hydrique ➲ « balance comptable » des entrées et sorties d'eau sur le site, pendant une durée déterminée

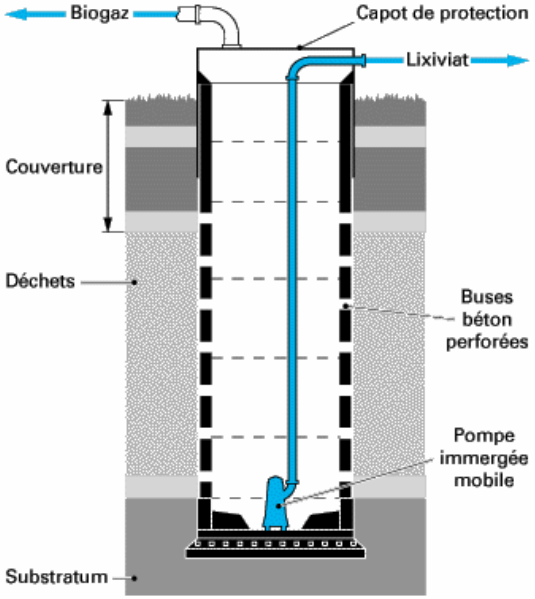
$$E = P + ED - I - ETR + R_{ext} - R_{int} + (-\Delta ED)$$

Modèles à ce jour encore insuffisants pour permettre une approche prédictive

# 4. Le centre d'enfouissement technique

## ❑ Evacuation des lixiviats




© Techniques de l'ingénieur – traité de Génie des Procédés

## ❑ Traitement des lixiviats

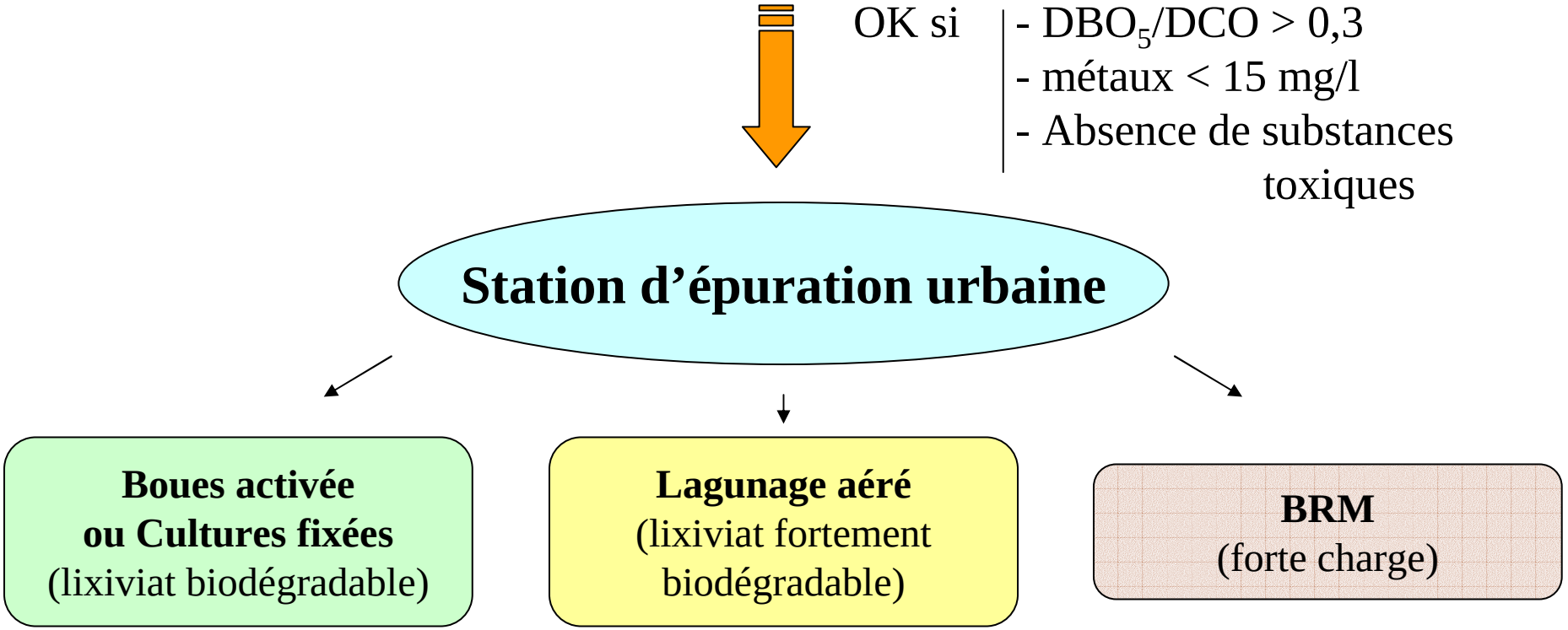
Si les lixiviats respectent des valeurs réglementaires → rejet en milieu naturel
Sinon → traitement obligatoire

*Valeurs réglementaires* :

- MEST < 100 mg/l si flux journalier max < 15 kg/j, sinon < 35 mg/l
- DCO < 300 mg/l si flux journalier max < 100 kg/j, sinon < 125 mg/l
- $DBO_5$ < 100 mg/l si flux journalier max < 30 kg/j, sinon < 30 mg/l
- N global < 30 mg/l si flux journalier max > 50 kg/j
- P total < 10 mg/l si flux journalier max > 15 kg/j
- Phénols < 0,1 mg/l
- Métaux totaux < 15 mg/l
- Hydrocarbures totaux < 10 mg/l si flux journalier max > 100 g/j

## 4. Le centre d'enfouissement technique

Traitement des lixiviats en dehors du site : incinération (!!), concentration par évaporation, ou traitement biologiques en station (50% selon l'ADEME, 97).




Autres traitements :

Physico-chimiques → Ozone, Ultra-violets, peroxyde d'hydrogène, charbon actif
Membranaires → OI, Nanofiltration

# e) Traitement du biogaz

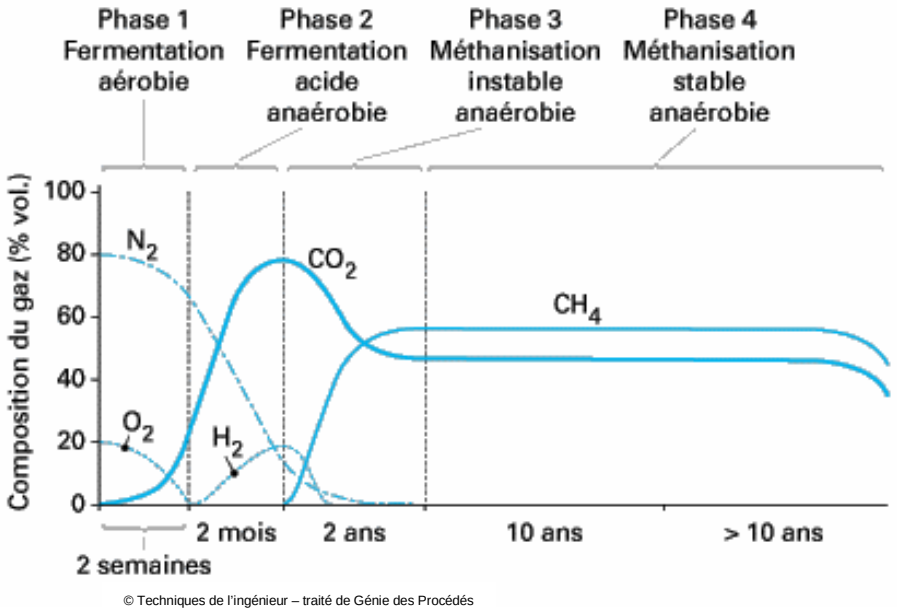
## ❑ Formation du biogaz

Biogaz produit par digestion anaérobie des déchets organique → en CET 2

Délai de latence entre l'ouverture du site et la production de biogaz mais la production continue bien après la fermeture

Production = f (nature & composition, compactage, % humidité, couverture..)

Production varie au cours de la décomposition (4 phases)




© Techniques de l'ingénieur – traité de Génie des Procédés

*Composition finale :*

- $CH_4$ : entre 30 et 55 %
- $CO_2$ : entre 22 et 50 %
- $N_2$ : entre 3 et 26 %
- $H_2S$ : entre 4 et 20 mg/m$^3$
- CO : entre 0 et 3 %
- $H_2$ : entre 0 et 3 %
- $O_2$ : entre 1 et 8 %

\+

*Traces (qqes mg/m$^3$)*
alcools
organosoufrés
organohalogénés
hydrocarbures
esters & éthers

PCI (biogaz) ~ 5 kWh/Nm$^3$ soir 2/3 du gaz naturel

## 4. Le centre d'enfouissement technique

### ❑ Elimination du biogaz

✓ ***Pourquoi ?*** ⇨ Nombreux dommages

- à la végétation : défoliation
- effet de serre : production de $CH_4$ et $CO_2$
- aux riverains : odeurs

✓ ***Elimination du biogaz par combustion***

Combustion par torchère qui doit répondre à trois niveaux de performances :

**3 T**

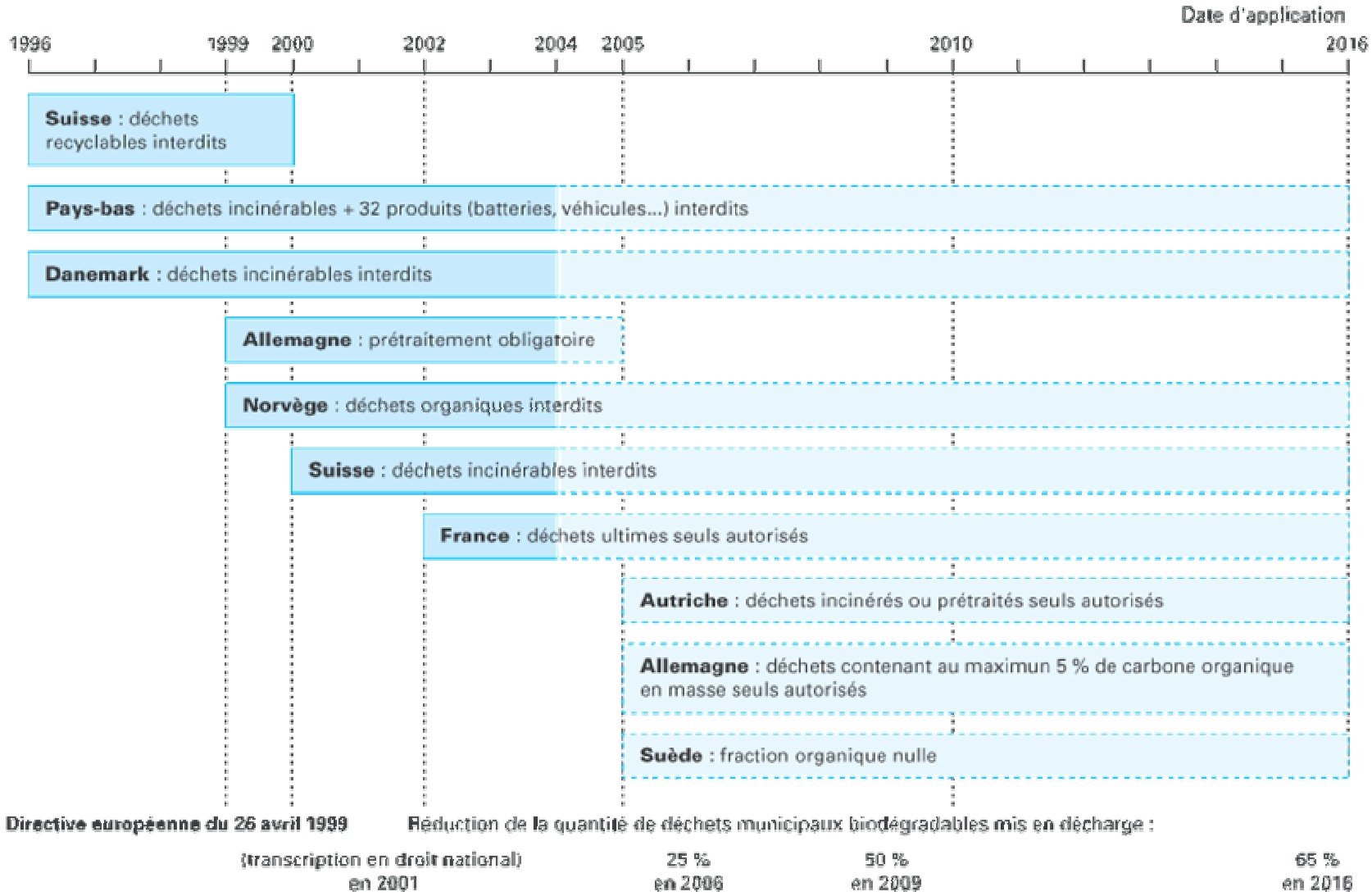
- une bonne **turbulence** ➲ Mélange
- une **température** de combustion suffisamment élevée ➲ brûlage complet des hydrocarbures halogénés (~ 900 °C)
- un **temps** de brûlage suffisamment long ➲ conversion totale

✓ ***Valorisation possible du biogaz***

- la production d'électricité autonome
- la revente d'électricité à EDF
- la purification du gaz en vue de l'utilisation comme carburant
- la purification du gaz en vue d'alimenter le réseau GDF (problème : présence de soufre)
- la cogénération (production de chaleur et d'électricité)
- la vente du gaz (en vue d'une de ces utilisations)

# 4. Le centre d'enfouissement technique

## Situation mondiale




*Critère d'acceptation des déchets en décharge en Europe*

© Techniques de l'ingénieur – traité de Génie des Procédés

Le traitement des déchets industriels

# 5. Traitements thermiques

# a) Caractérisation de l'incinération

**Déchets admissibles**

*Tout ! (ou presque) – OM, DIB, DASRI, refus de tri*

**Déchets interdits**

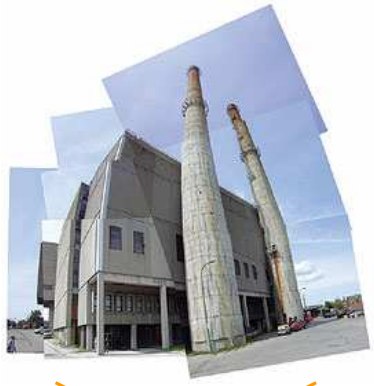
(boues de station ayant une trop grande siccité, déchets inflammables, radioactifs…)

pré-traitement réduit

Volume ↘ 90%

Masse ↘ 70%

**Flux élevés**



Energie électrique

Vapeur

CET I ← REFIOM

Valorisable (remblais)

Sinon ➔ CET II

**Mâchefers**

**Fumées** → **Traitement**

**Fumées épurées**

**Milieu récepteur**

# 5. Traitements thermiques

1 tonne d'OM

**Métaux non ferreux**

**(1 kg)**

**Métaux ferreux**

**(20 kg)**

**Energie**

**(2300 kWh)**

**Mâchefers**

**(250 kg)**

**Fumées**

**(6000 Nm$^3$)**

**REFIOM**

**(25-40 kg)**

# Chiffres ADEME, année 2002

- ✓ $11.10^6$ $t_{déchets}$/an dont $9,6.10^6$ $t_{OM}$/an – 87% d'OM
- ✓ 135 usines d'incinération de déchets ménagers
- ✓ 88% du tonnage (50% des usines) avec valorisation énerg.
- ✓ 64 incinérateurs avec tonnage > 48000 t/an (grosses usines)
- ✓ 121 installations ont fermé entre 99 et 2002 !! (loi 96)
- ✓ 2002 ➲ 20 installations ne sont pas (encore) aux normes
- ✓ 82% de l'énergie est vendue (18 % auto-consommation)
- ✓ 85% de traitement des gaz acides
- ✓au 31/12/2002 ➲ 24 incinérateurs déclarent être équipées d'un dispositif de traitement pour les dioxines

# 5. Traitements thermiques

## Pourcentages massiques approximatifs d'incinération des ordures ménagères

| **Europe** | |
|---|---|
| Suisse (hors UE), Luxembourg | 80 % |
| Danemark | 65 % |
| Suède, Belgique | 60 % |
| France, Pays-Bas | 40 % |
| Allemagne, Norvège (hors UE) | 25 % |
| Italie | 17 % |
| Royaume-Uni, Espagne | 6 % |
| Portugal, Irlande | 0 % |

| | |
|---|---|
| **Japon** | 75 % |
| **Amérique du nord** | |
| États-Unis | 15 % |
| Canada | 6 % |
| **Autres pays** | 0 % à moins de 5 % |
| **Moyenne mondiale** | moins de 5 % |

Source: «Approche socio-économique des déchets », *Techniques de l'Ingénieur*

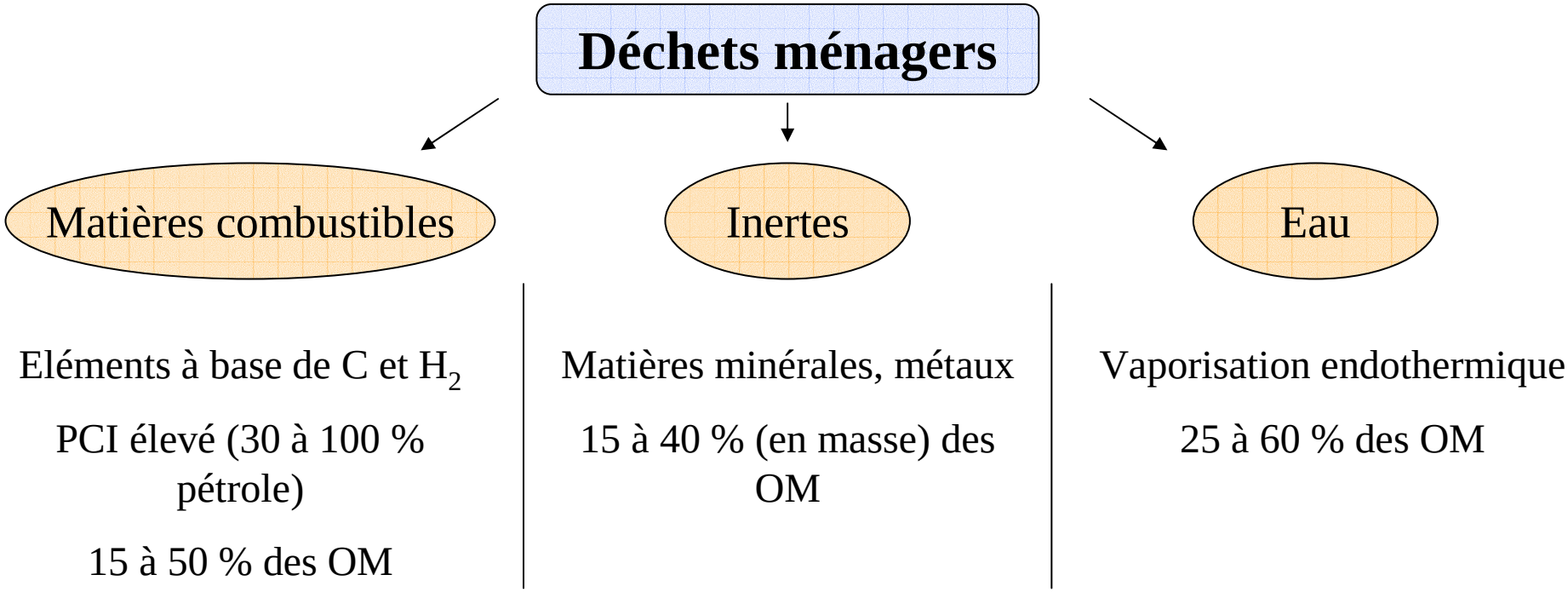
## L'incinération est-elle le fait des pays riches ?

| **Taux d'incinération (% masse)** | **PNB par habitant en 2001 ($ US)** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **> 30 000** | **20 000 à 30 000** | **10 000 à 20 000** | **< 10 000** |
| **Plus de 50 %** | Suisse, Danemark, Japon, Luxembourg | Suède, Belgique, Monaco | | |
| **20 à 50 %** | Norvège | Pays-Bas, Autriche, Allemagne, France | | |
| **10 à 20 %** | | États-Unis, Italie | | |
| **Moins de 10 %** | | Finlande, Irlande, Royaume-Uni, Canada | Australie, Espagne, Taïwan, Nouvelle-Zélande, Grèce, Portugal, Corée du Sud | Arabie Saoudite, République tchèque, Hongrie, Pologne, Slovaquie, Brésil, Turquie, Russie, Roumanie, Chine, etc. |

# b) Principes généraux et aspects théoriques

## ❑ Caractérisation physico-chimiques des déchets ménagers

Forte hétérogénéité dans la composition des matériaux (papier, verre, déchets alimentaires) et dans l'état physique (dimension, tassement..)




PCI moyen d'une OM : ~ 8000 kJ/kg
(Cellulose : 17000 kJ/kg, plastiques : entre 25000 et 38000 kJ/kg)

## ❑ La combustion

Réaction d'oxydation complète des déchets avec l'air préchauffé (les molécules organiques représentent la principale part combustible)

Combustion étagée au fur et à mesure de l'échauffement de la matière

1. Evaporation de l'humidité des déchets
2. Macromolécules → Petites molécules (inertes, ou gaz)
3. CO, $H_2$, $CH_4$, $SO_2$ s'oxydent immédiatement → Flammes
4. Les flammes poursuivent l'échauffement → molécules + courtes formées
5. Libération chlore (PVC et autres) → Acide chlorhydrique gazeux
   Libération Fluore → Acide fluorhydrique gazeux
6. Les métaux lourds sont oxydés. Une partie est entraînée à l'état gazeux ou dans les poussières (cendres volantes) ; une autre partie → mâchefers
7. A la fin, le carbone (résidu des matières organiques) s'oxyde
8. Résidu final : mâchefer (25 % de la masse entrante) + imbrûlés (< 5 %)

Réactions de combustion multiples & variées → Prise en compte des principales dont l'aspect exothermique est prépondérant dans la formation et l'entretien de la flamme

# 5. Traitements thermiques

- ***Combustion du carbone***

Réaction complète : $C + O_2 \rightarrow CO_2$ [393 kJ/mol]
Réaction incomplète : $C + ½\ O_2 \rightarrow CO$ [110 kJ/mol]
(carence d'$O_2$) $CO + ½\ O_2 \rightarrow CO_2$ [283 kJ/mol]

⇨ Excès d'air
Four à grille : 60 à 150 %
Four à lit fluidisé : 40 à 60 %

- ***Combustion de l'hydrogène***

$H_2 + ½\ O_2 \rightarrow H_2O$ [242 kJ/mol] si l'eau retourne à l'état liquide
[286 kJ/mol] si l'eau retourne à l'état vapeur (le + svt)

- ***Combustion du souffre*** Combustion plus ou moins complète selon la température du four

A 250 °C : $S + O_2 \rightarrow SO_2$ [297 kJ/mol]
Entre 300 et 500 °C : $S + 3/2\ O_2 \rightarrow SO_3$ [11.3 kJ/mol]
> 950 °C : La réaction s'inverse et $SO_3$ devient négligeable

- ***Combustion de l'azote*** Combustion à haute température

Jusqu'à 950 °C : $N_2 + O_2 \rightarrow N_2$ (pas de réaction)
> 950 °C : $N_2 + O_2 \rightarrow 2\ NO$

La production de NO ↗ avec la température

| Température (°C) | 1500 | 1875 | 2200 | 2500 |
|---|---|---|---|---|
| % NO | 0,18 | 0,79 | 1,85 | 3,14 |

## 5. Traitements thermiques

- ***Transformation des éléments chlore et azote***

Production très problématique des **$NO_x$ !** (toxiques donc à éliminer avant rejet)
➥ Production liée à la température du four mais surtout à la présence initiale d'azote dans les déchets (ex: déchets verts ➤ tonte de gazon riche en azote)

Combinaisons intermoléculaires : production d'acide chlorhydrique gazeux (polluant majeur, objet d'une neutralisation ultérieure)

Formation de composés plus complexes, en traces infimes (quelques dizaines de millionièmes de milligrammes) résultant de la combinaison d'hydrogène, de chlore et de l'oxygène ➤ Organochlorés **(dioxines et furanes)**

### ❑ Volume et masse d'air utilisés

Combustion toujours réalisée en **excès d'air**

- abaissement de la température de la flamme
- atmosphère oxydante (réactions complètes & minimum d'imbrûlés)

Excès d'air jusqu'à 150 % pour les installations sans récupération de chaleur, 80 à 100 % si récupération (fours à grille) et seulement 40 à 60 % en lit fluidisé

## ❑ Refroidissement des fumées

• ***Dilution avec l'air (si pas de récupération d'énergie)***

L'excès d'air limite la température à 900 – 1000 °C
Diminution supplémentaire avant les procédés de traitement des fumées (entrée dans le filtre à 200 – 300 °C) → Injection d'air tertiaire entre le four et le filtre

Inconvénient : surdimensionnement de tous les matériels

• ***Mélange et évaporation d'eau (si pas de récupération d'énergie)***

Chaleur latente de l'eau très élevée (beaucoup + que la chaleur sensible)

➥ Accroissement très réduit du débit volumique

Inconvénient : - fumées humides → colmatage des filtres & corrosion
- grande consommation en eau

• ***Récupération de chaleur***

Valorisation thermique imposée par la réglementation

Rendements jusqu'à 70 – 75 % mais encrassement très important des tubes

# c) Aspects historiques

1865 : Premier four d'incinération (rocher de Gibraltar)

XIX$^{ième}$ siècle : généralisation des installations en Angleterre (Paddington vers 1870, Nottingham en 1874, Manchester en 1876). Grilles plates et convection naturelle ; Température inférieure à 500 °C → combustion incomplète et présence de nombreux imbrûlés

1890 : Tirage forcé → forte réduction des imbrûlés

A la même époque, production de vapeur et d'électricité en Angleterre et aux Etats-Unis → investissements élevés mais recettes complémentaires

Puis Suède, Russie (St Pétersbourg), Allemagne (Hambourg, 1895), Pays-bas (La Haye, 1920)

1905 : Incinérateurs de St Ouen, Issy-les-Moulineaux et Romainville (France)

## ❑ Evolution des installations

Nombreux défauts sur les premières installations:

- Chargement des déchets directement sur le feu (poussières)
- Exposition du personnel aux rayonnement du foyer
- Pas de zone de post-combustion (émanation de CO)

Evolution technologique dictée par une meilleure prise de conscience des dangers d'une incinération défectueuse (imbrûlés, combustion incomplète..)

**Premiers fours** ⇨ **Fours à grille** ⇨ **Fours à lit fluidisé**

- Fours à cellule
- Four à haut fourneau
- Débuts → 1919

- Grille Martin
- Ecoulement progressif des déchets sur la grille
- 1925 → aujourd'hui

- 3 types de lits fluidisés
- Bonne homogénéisation de la température
- 1920 → aujourd'hui

## ❑ Evolution de la réglementation

Dès les premiers textes réglementaires : incinération = établissement dangereux

Dès 1932 : loi visant à supprimer les nuisances créées par les fumées industrielles
Textes spécifiques : 1,5 g/m$^3$ de poussières à Paris..

1972 : Seuils de concentrations en fonction de la taille des installations

| | |
|---|---|
| 1 g poussières/Nm$^3$ | ← Capacité < 1 t/h |
| 0,6 g poussières/Nm$^3$ | ← 1 < Capacité < 4 t/h |
| 0,25 g poussières/Nm$^3$ | ← 4 < Capacité < 7 t/h |
| 0,15 g poussières/Nm$^3$ | ← Capacité > 7 t/h |

1978 : obligation de traiter les déchets des hôpitaux par incinération
1983 : Conditions opératoires de l'incinération des déchets industriels

➥ 150 mg poussières/Nm$^3$ & contrôle des émissions de métaux et chlore

1989 : réglementation concernant les dioxines et les furanes…
1996 : Mise en conformité des installations (récupération d'ERJ & traitement des fumées)
Échéance du 28/12/2005 : ensemble du parc soumis aux mêmes valeurs limites de rejets (dont dioxines ➲ 0,1 ng/Nm$^3$)

# d) Circuit d'une OM dans une usine d'incinération

Plusieurs unités :

- Fosse de stockage des déchets
- Four (pourvu ou non d'une chambre de postcombustion)
- Chaudière génératrice de vapeur
- Dispositif de traitement des fumées
- Evacuation des fumées
- Production d'électricité

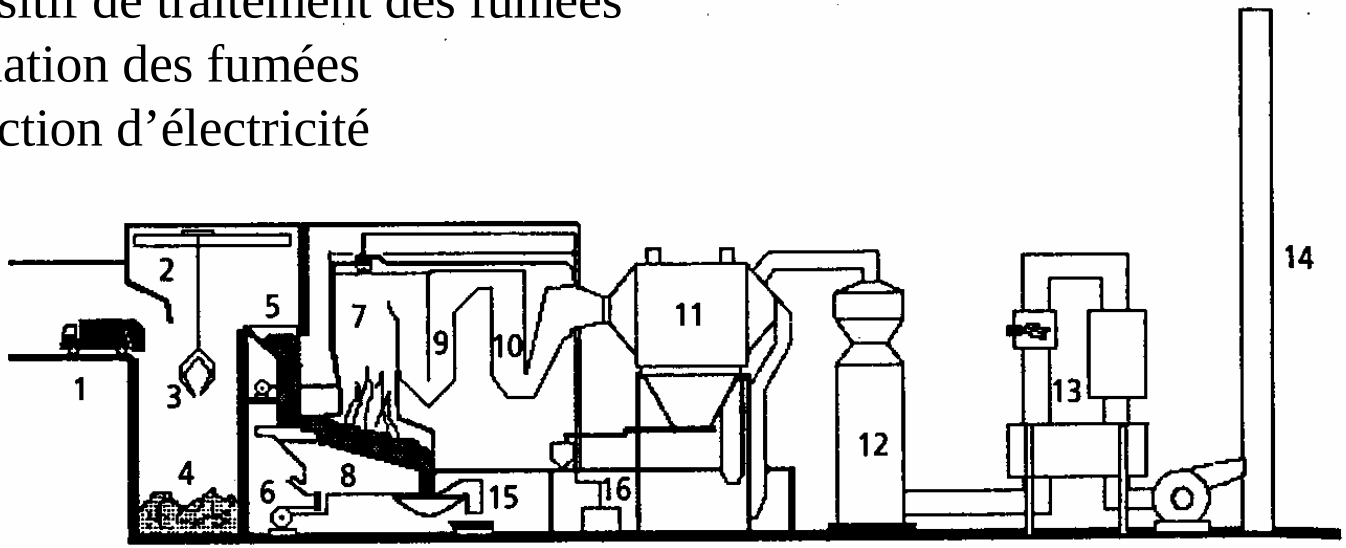



**Figure 3.1** — Schéma de principe d'une usine d'incinération.

1. Quai de déchargement. 2. Pont roulant. 3. Grappin. 4. Fosse d'ordures ménagères. 5. Trémie de chargement. 6. Ventilateur de soufflage. 7. Four d'incinération. 8. Grille. 9. Chaudière (évaporation, surchauffeur). 10. Chaudière (économiseur, réchauffeur d'air). 11. Dépoussiéreur. 12. Tour de lavage. 13. DéNOx. 14. Cheminée. 15. Extracteur à mâchefers. 16. Groupe turboalternateur.

## ❑ La fosse de stockage

Volume de la fosse déterminé en fonction de plusieurs paramètres :

- Capacité journalière maximale d'incinération
- Jours de collecte les plus chargés
- Masse volumique des ordures en fosse

Fosse placée en dépression
Brumisateur (captation des poussières)
Reprise des ordures : pont roulant
Pompe de relevage (lixiviats)
Lits fluidisés ➤ broyeurs et cisailles

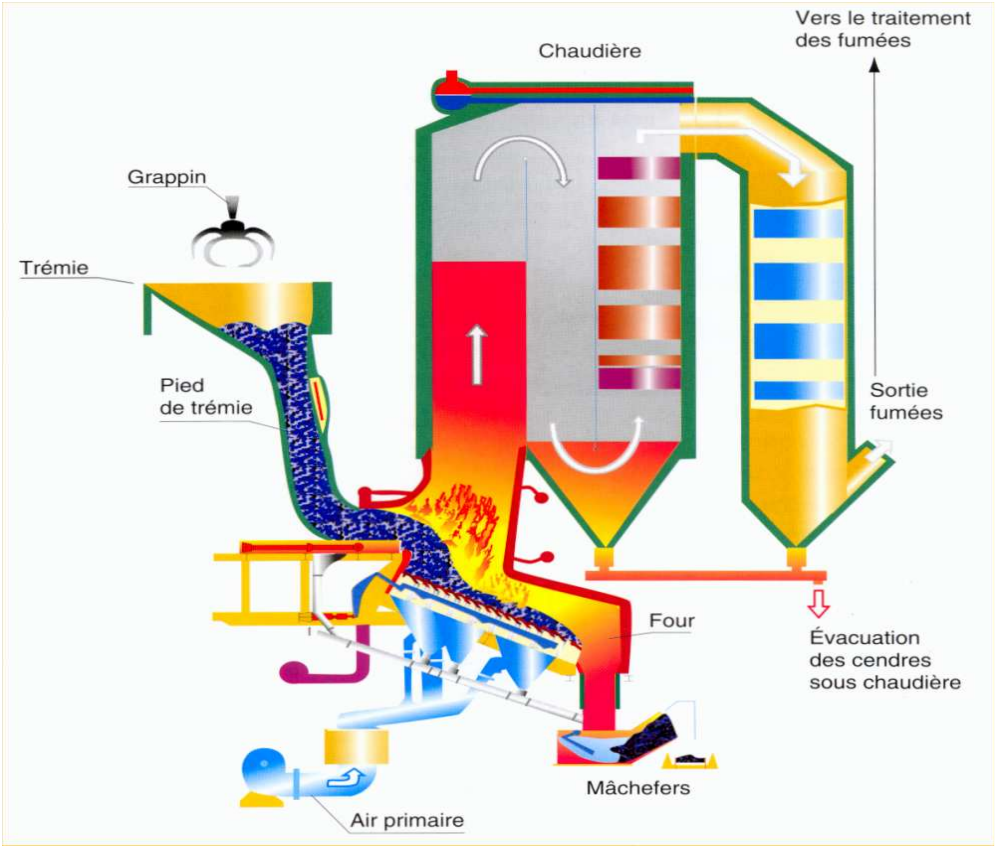
## ❑ Le four ⟹

Chargement par l'ensemble trémie-goulotte (alimentation régulière)

Acheminement des déchets par gravité

Alimentation vers la grille par des poussoirs

Goulotte équipée d'une opercule de fermeture (éviter la remontée de flammes)



## 5. Traitements thermiques

• ***La chambre de combustion***

Chambre exposée à de très hautes températures (900 – 1000 °C)

↪ Matériaux réfractaires très résistants (point de fusion minimal : 1700°C), souvent à haute teneur en alumine (35 à 55 %).

Sur une certaine hauteur, emploi de briques ou ciments réfractaires à haute teneur en carbure de silicium, 70 à 90 % (résister à l'abrasion des déchets et des mâchefers et éviter le collage des cendres fondues)

Incinération en 3 phases

- **Séchage** et **décomposition** des déchets en MV
- **Combustion**
- **Refroidissement** du mâchefer

Bonne combustion : 3 paramètres fondamentaux ➲ **REGLE DES 3 T**

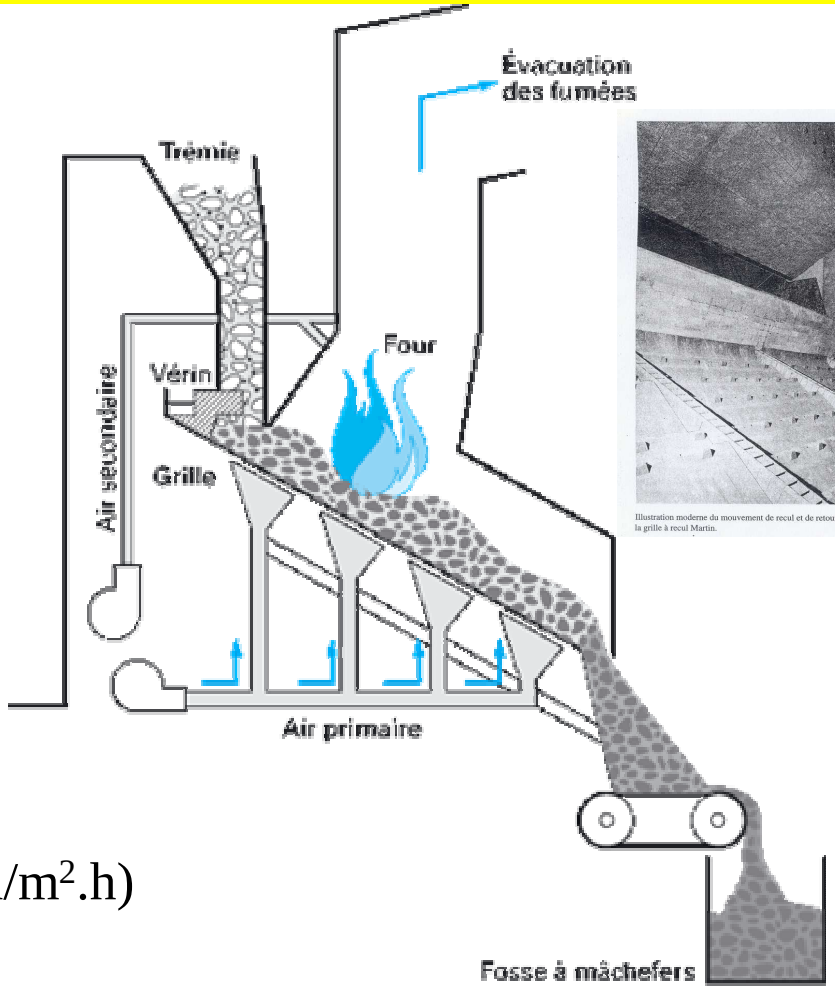
- **Temps de séjour** (1 h sur la grille, 3 s dans la chambre de post-combustion)
- **Température** (750 < T < 900 °C)
- **Turbulence**

# 5. Traitements thermiques

- ***Technologie des fours***

## 1. Fours traditionnels à grille

- Premier brevet déposé par Martin en 1925 (grille inclinée à recul)
- Mouvement alternatif des rangées de tuiles (brassage efficace)
- Injection d'air primaire dans des buses
- Caissons de récupération des cendres et de raccordement de l'air primaire



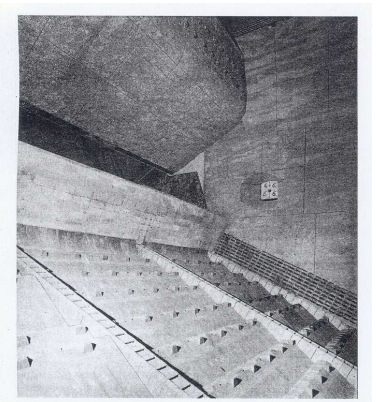



Illustration moderne du mouvement de recul et de retournement de la couche de combustible de la grille à recul Martin.

© Techniques de l'ingénieur – traité de Génie des Procédés

Charge pondérale admissible :

↳ 350 kg OM/m$^2$ (500 à 900 th/m$^2$.h)

## 2. Fours à rouleaux

- Technologie très similaire au niveau de la combustion
- L'air de combustion passe entre les rouleaux pour alimenter la base du foyer tout en les refroidissant

## 3. Fours oscillants ou rotatifs

- Fours de section circulaire pour des capacités de traitement réduites
- Capacité de traitement entre 2 et 10 t OM/h
- Production de dioxines réduite
- Air comburant préchauffé (circulation autour de la partie foyer)

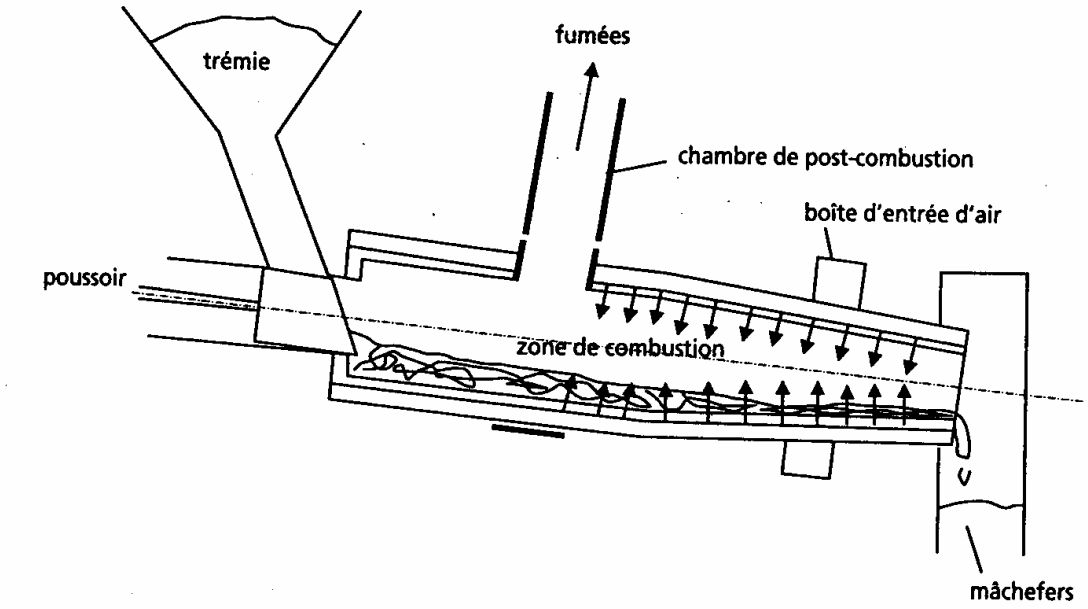



*Schéma d'un four rotatif*

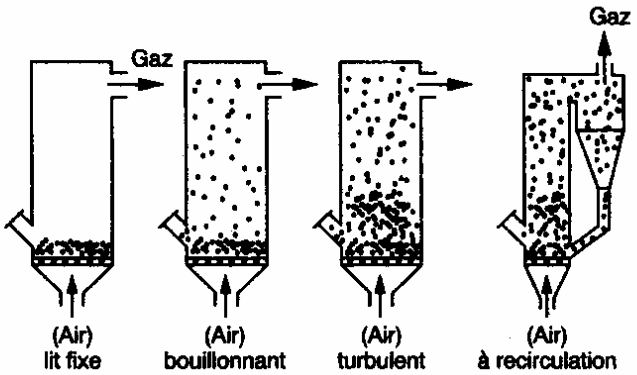
*Technologie Cyclergie*

## 4. Fours à lit fluidisé

- Technologie dont la conception date de 1920 : gazéification du charbon (société BASF en Allemagne), cracking catalytique et séchage de produits alimentaires
- Années 50 : utilisés comme systèmes de combustion (boues urbaines, charbon)
- Années 80 : incinération des déchets (majorité des fours construits au Japon)

***Principe*** : Déchets maintenus en **suspension** dans un bain de sable agité par l'air (air primaire avec ou non recirculation d'une partie des fumées)

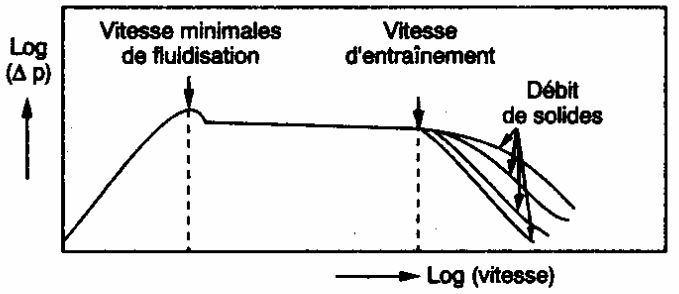
99 % de sable, 1% de déchets (en masse)




***Intérêt*** : **Homogénéisation** de la température

➥ $T_{fonctionnement} < T_{fours\ à\ grille}$ (~ 750 °C)

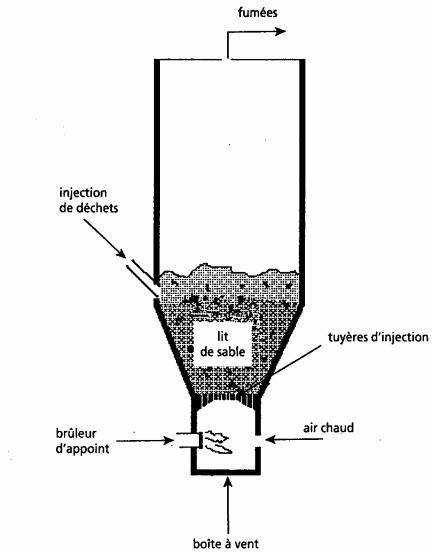
➥ Formation limitée des oxydes d'azote ($NO_x$)




Perte de charge en fonction de la vitesse de gaz

# 5. Traitements thermiques

## *Le lit fluidisé dense*




Vitesse de l'air (~ 1 m/s)
➥ sustentation du lit
➥ ~~entraînement~~ des particules

Déchets 20 – 30 cm au max

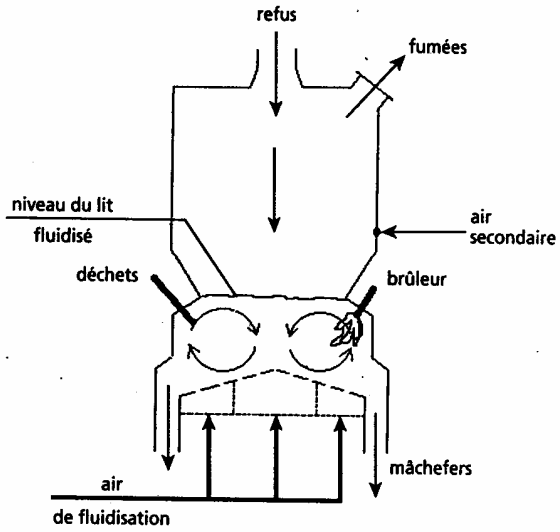
Débits < 10 t/h & PCI < 3000 th/t

Dimension réduite

Chaudière intégrée dans le four

Problèmes liés à la non homogénéité de la température

## *Le lit fluidisé rotatif*




Répartition inhomogène des vitesses d'injection d'air
➥ re-circulation permanente

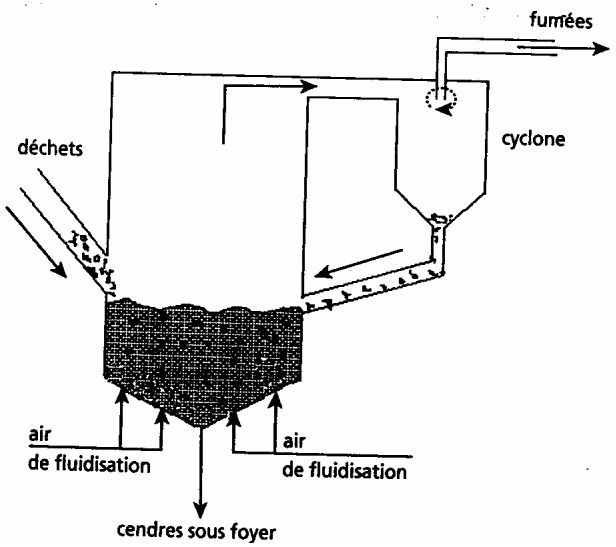
Débit ~ 15 t/h & PCI < 3500 th/t

Société japonaise Ebara

Homogénéité de la température
➥ Meilleure efficacité que le lit dense

**Le ⊕ utilisé pour les OM**

## *Le lit fluidisé circulant*




Vitesse de l'air (4,5 ⇨ 9 m/s)
➥ entraînement des particules

Le cyclone recycle les imbrûlés

Débits ~ 22 t/h & PCI ~ 3900 th/t

Faible granulométrie (0-80 mm)
➥ prétraitement des déchets

# 5. Traitements thermiques

## *Dimensionnement* :

Dimensionnement fonction des caractéristiques propres aux déchets | PCI
Dimensions

Problèmes : non homogénéité des OM → bilan thermique du four sur quelques heures de fonctionnement → Détermination d'une valeur moyenne

Si le four n'est pas construit : 1500 th/t pour les zones rurales, 2150 th/t pour Paris

| Type de déchets | PCI (kJ/kg) | Humidité (%) |
|---|---|---|
| Emballages cartons | 17100 | 23 |
| Emballages papiers | 18000 | 8 |
| Fleurs et plantes | 19200 | 5 |
| Bois | 19600 | 2 |
| Déchets de repas | 28450 | 2 |
| Textiles | 17350 | 7 |
| Matières plastiques | 18000 | 1 |
| Déchets usine | 16300 | |
| Déchets hospitaliers et de laboratoire | 10000 | |
| Déchets de restaurant | 15000 | |

| Type de déchets | PCI (MJ/kg) |
|---|---|
| Gaz naturel | 46 |
| Fuel oil | 42 |
| Charbon bitumineux | 33 |
| Bois | 19 |
| Tourbe | 9 |
| Huile usagée | 38 |
| Solvant résiduaires | 27 |
| Résidus broyage automobile (RBA) | 15 |
| OM | 10 |

## 5. Traitements thermiques

• ***La chaudière***

Sortie du four : fumées entre 800 °C (lits fluidisés) et 950 °C (fours classiques)
Entrée dans le dispositif de traitement des gaz : 180-260 °C
➥ Récupération de chaleur conséquente (chaudière)

2 techniques : circuits de refroidissement à eau surchauffée (fours de faibles capacité) ou à vapeur (plus forte capacité & production d'électricité)

Quelques chiffres…
- Rendement moyen ~ 80 %
- Production d'environ 2 t de vapeur (15 bars, 220 °C) / t OM consommée
- Production d'environ 80 à 170 kWh (cogénération) et 500 à 580 kWh (pas de vapeur) pour 1 t d'OM consommée

• ***Les résidus solides de l'incinération***

2 types de résidus solides : MIOM ou MIDI & les REFIOM ou REFIDI

MI : Mâchefer d'Incinération
REFI : Résidus d'Epuration des Fumées d'Incinération
OM : Ordures Ménagères

OCREAL

# OCREAL S.A

novergie
Vos déchets sont source d'énergie

## Unité de Valorisation Energétique de Déchets

SITA

AFAQ ISO 9001 VERSION 2000 ISO 14001

**[ LES ÉQUIPEMENTS DE COLLECTE ET DE TRAITEMENT DES DÉCHETS MÉNAGERS ET ASSIMILÉS EXISTANTS OU PRÉVUS SUR LE TERRITOIRE DU SYNDICAT ]**

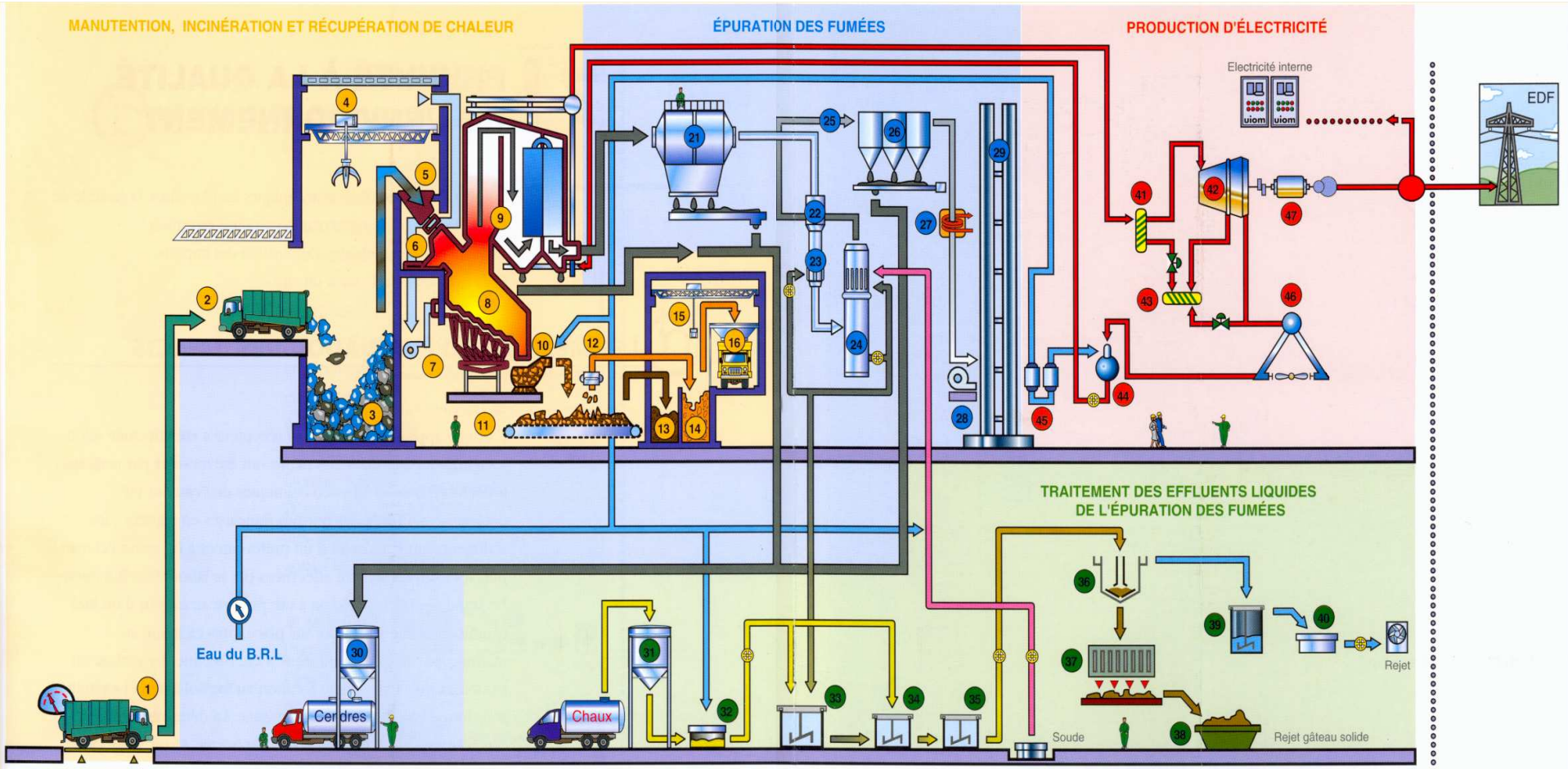
*Centre de tri*

*Mini déchetteries (5)*

*Déchetteries principales (22)*

*Stations de compostage (7)*

*Unité d'incinération et de valorisation énergétique (Lunel-Viel)*




## MANUTENTION, INCINÉRATION ET RÉCUPÉRATION DE CHALEUR

1. PONT BASCULE
2. HALL DE DÉCHARGEMENT
3. FOSSE A DÉCHETS
4. PONT ROULANT ET GRAPPIN
5. TRÉMIE DE CHARGEMENT
6. POUSSOIRS ALIMENTATEURS
7. VENTILATEUR AIR PRIMAIRE
8. GRILLE D'INCINÉRATION
9. CHAUDIÉRE DE RÉCUPÉRATION
10. EXTRACTEUR DES MACHEFERS
11. BANDES TRANSPORTEUSES
12. DÉFERRAILLAGE
13. FOSSE À MÂCHEFERS
14. FOSSE À FERRAILLES
15. PONT ROULANT À MÂCHEFERS ET FERRAILLES
16. TRÉMIE DE CHARGEMENT DES MÂCHEFERS

## ÉPURATION DES FUMÉES

21. ÉLECTROFILTRE DÉPOUSSIÉREUR
22. ÉCHANGEUR
23. QUENCH - LAVEUR ACIDE
24. LAVEUR BASIQUE
25. INJECTION DE CHARBON ACTIF
26. FILTRE À MANCHES
27. RÉCHAUFFAGE FINAL
28. VENTILATEUR DE TIRAGE
29. CHEMINÉES
30. SILO À CENDRES

## TRAITEMENT DES EFFLUENTS LIQUIDES

31. SILO À CHAUX
32. PRÉPARATION LAIT DE CHAUX
33. NEUTRALISATION ET PRÉCIPITATION
34. COAGULATION ET INSOLUBILISATION
35. FLOCULATION
36. DÉCANTEUR - ÉPAISSISSEUR
37. FILTRE PRESSE
38. BENNE STOCKAGE GATEAUX
39. REMISE À pH
40. CONTRÔLE FINAL ET REJET

## PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

41. BARILLET VAPEUR 45 BARS À 350° C
42. TURBINE À CONDENSATION ET SOUTIRAGE
43. BARILLET VAPEUR 8 BARS
44. BÂCHE ALIMENTAIRE DÉGAZANTE
45. TRAITEMENT D'EAU CHAUDIÈRES
46. AÉROCONDENSEUR
47. ALTERNATEUR 9,8 MW

# e) La coïncinération

***Principe*** : brûler simultanément des déchets (organique, hydrocarbure, solvants, huiles…) avec un combustible (fuel, charbon, gaz naturel)

***Origine*** : crise pétrolière des années 70 (⇨ économie d'énergie)

***Aujourd'hui*** : réglementation plus stricte concernant les fumées & obligation de valorisation (matière ou énergie)

## ❑ Les cimenteries et les fours à chaux

***Intérêt*** : économiser du combustible & stabiliser les déchets au niveau du clinker (résidu d'incinération, mélangé au gypse et à d'autres additifs pour l'obtention du ciment souhaité)

***Limitations*** : respecter la qualité du ciment ou la blancheur de la chaux

# 5. Traitements thermiques

***Procédé*** :

✓ broyage d'un mélange primaire (cru) : calcaire, marne, agents de correction (silice, argile, boues d'hydroxyde d'aluminium…)

✓ incinération à haute température (~ 1500 °C pendant 20 min) ➤ réactions chimiques ➤ formation de silicates de calcium et d'aluminium (clinker)

Flamme ~ 2000 °C ➤
**destruction** des dioxines **mais** formation excessive des NO*x*

➔ Seuils plus élevés que pour les usines d'incinération

Chlore fixé par le clinker
➔ Mauvaise qualité ➤ moins de 1 % de chlorure de vinyle admis

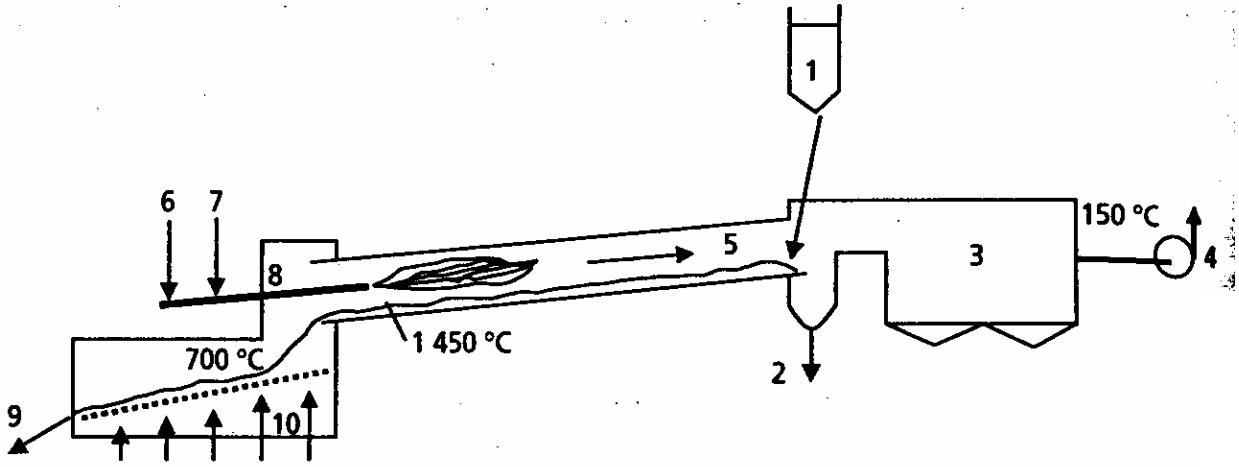



**Figure 4.3 — Fours à ciment, voie humide.**
1. Pâte à 28 % d'eau. 2. Poussières. 3. Dépoussiéreur électrostatique. 4. Ventilateur d'extraction des fumées. 5. Four rotatif. 6. Charbon. 7. Déchets. 8. Brûleur. 9. Clinker. 10. Refroidisseur.

Oxydes de souffre ($SO_x$) fixés par le clinker basique

Métaux lourds (à l'exception du mercure) fixés (adsorption) sur le clinker (à 99 %)

## 5. Traitements thermiques

***Utilisation des déchets :***

- ✓ Combustible dans le brûleur principal ($1800 < T_{flamme} < 2000$ °C)
- ✓ Matière première du cru : terres polluées, cendres de charbon, sable de fonderie
  - ➥ Respecter les concentrations en composants principaux :
    $SiO_2$ 22%, $Al_2O_3$ 5 %, $Fe_2O_3$ 3%, CaO 65%
- ✓ Ajout au ciment : cendres, boues de plâtre séchées
- ✓ Agent auxiliaire de dénitrification des fumées

***Exemples de réalisation :***

Cimenterie de Calcia de Bussac-Forêt (17) ⇨ 60 000 t de combustible pour produire 650 000 t/an de ciment. Utilisation de 5 % de farines animales et 15 % de déchets divers dans le futur.

Ciments d'Obourg (Belgique) ⇨ 2 fours en voie humide (3000 et 3200 t/jour)
Combustibles complémentaires : solvants (27 000 t), boues sulfuriques (15 000 t)

**En règle générale, les DIS sont les principaux déchets incinérés en cimenteries et en fours à chaux (400 000 t/an)**

## ❑ Les centrales thermique

***Intérêt*** : valorisation thermique des déchets, économie de combustibles

***Limitations*** : flamme altérée ⇨ baisse de la puissance nominale de la chaudière
Elimination des sous-produits (cendres)

***Mise en œuvre***

1. Foyers à grille pour les combustibles solides (uniquement incinération de déchets)
2. Brûleurs à charbon pulvérisé ou brûleurs à injection simultanée de fuel/gaz naturel et d'air
3. Lits fluidisés pour les combustibles solides (pré-traitement nécessaire)

Ajouts des déchets sous forme gazeuse, liquide ou solide (broyage fin nécessaire car le temps de passage en flamme est très bref : < 1 s)

***Conclusion*** : coïncinération = technique thermique de dégradation des déchets par oxydation totale incluant une valorisation matière ou énergie ⇨ en accord avec une politique de développement durable. **Non encore rentables économiquement**

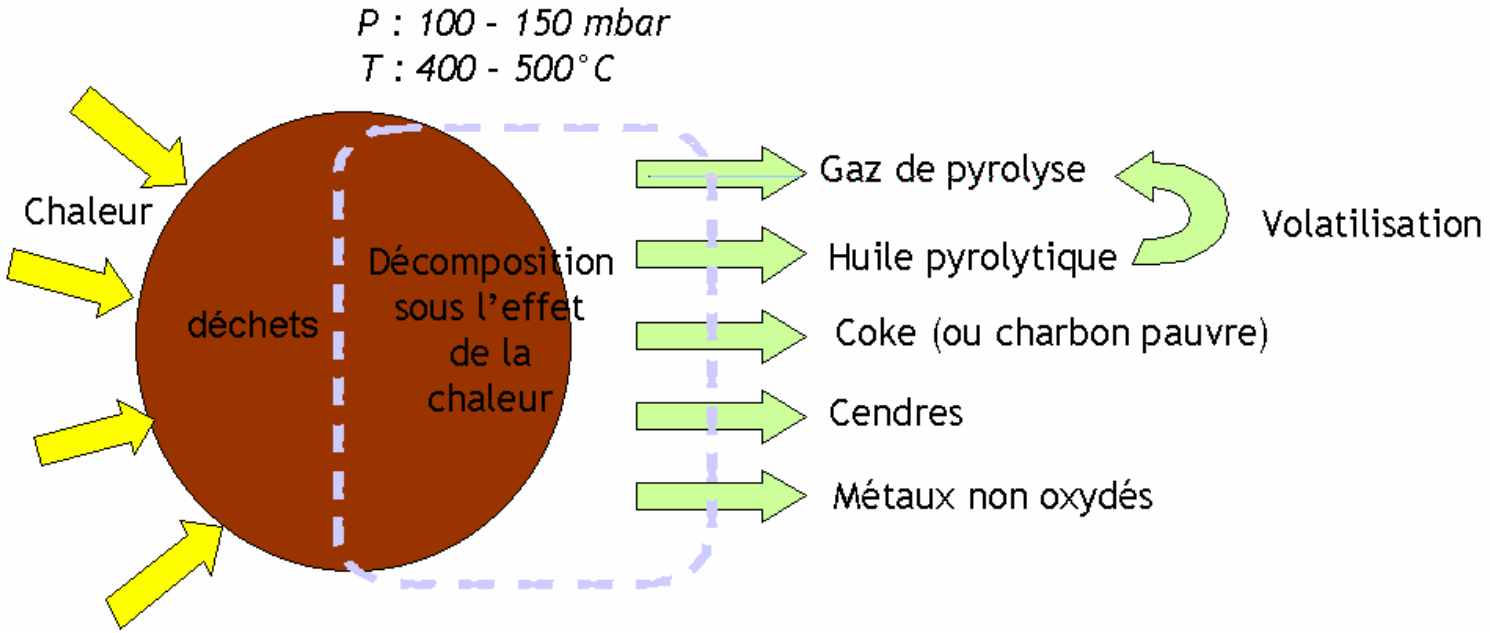
# f) La pyrolyse

***Principe*** : oxydation partielle en présence d'$O_2$ ⇨ oxydation ménagée
oxydation en l'absence d'$O_2$ ⇨ Thermolyse - Pyrolyse

***Produits obtenus*** : gaz pauvre, coke et jus pyroligneux

***3 niveaux de température*** : 400-600 °C ⇨ pyrolyse basse
600-1200 °C ⇨ pyrolyse moyenne
1200-2000 °C ⇨ pyrolyse haute

***Situation*** : technique très peu répandu à l'heure actuelle pour le traitement des déchets ⇨ autorisations aux cas par cas et absence de réglementation globale



# 5. Traitements thermiques

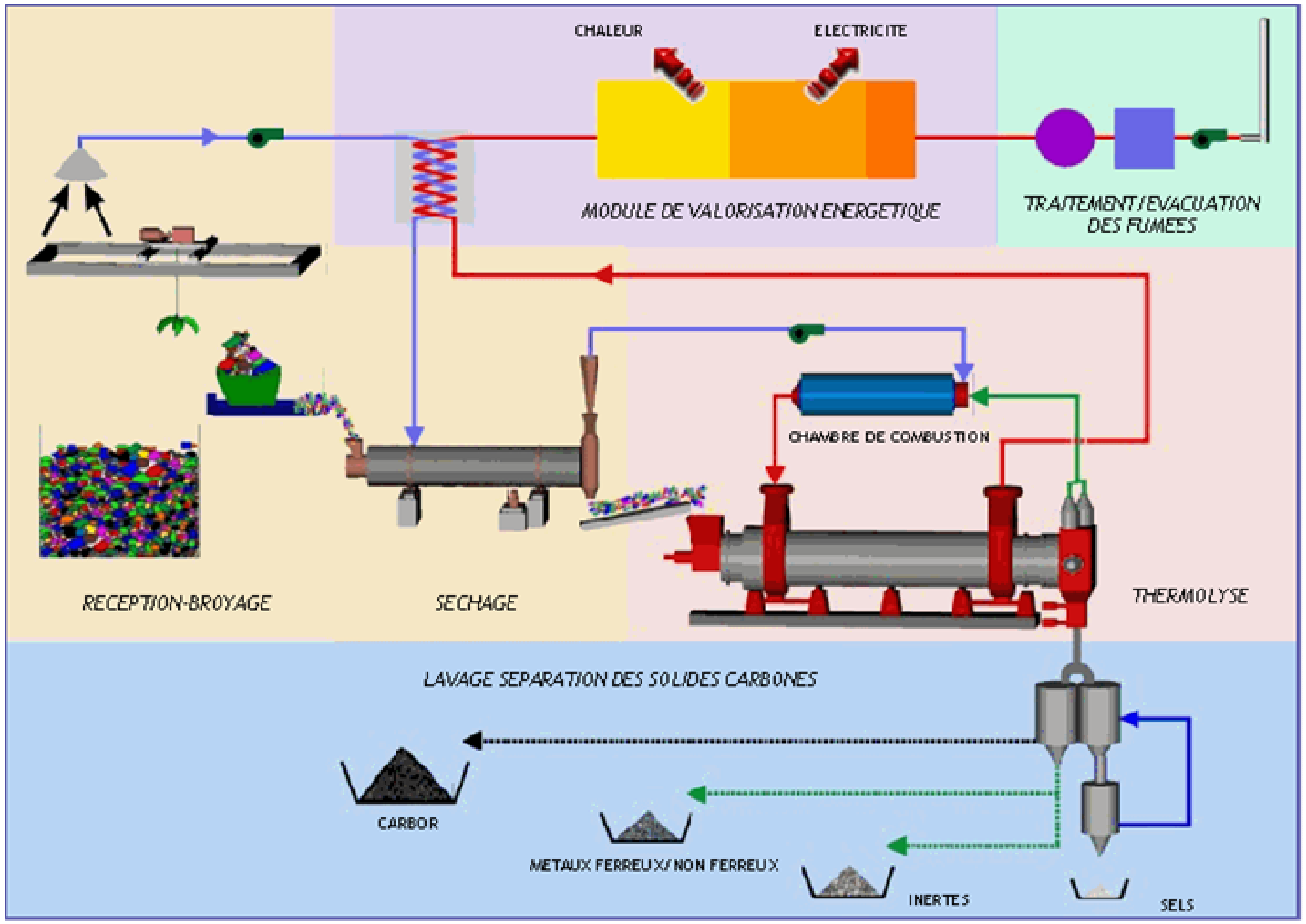



*Schéma de principe d'une installation de thermolyse, Thide®*

## ❑ Principe de la décomposition thermique sous atmosphère de gaz ou sous vide

***En atmosphère neutre dépourvue d'oxygène*** :

Absence d'$O_2$ ⇨ décomposition des déchets et libération de composés sous forme de gaz (eau, COV), rupture des macromolécules

| | |
|---|---|
| $CO + H_2O \Leftrightarrow CO_2 + H_2$ | réaction du gaz à l'eau |
| $C + CO_2 \Leftrightarrow 2\ CO$ | réaction de Boudouard |
| $C + 2\ H_2 \Leftrightarrow CH_4$ | réaction de formation du méthane |

➥ Formation progressive d'une atmosphère réductrice

***En présence d'oxygène*** ($O_2$ généré par décomposition du déchet) :

$C + O_2 \Leftrightarrow CO_2$
$H_2 + ½\ O_2 \Leftrightarrow H_2O$
$CO + ½\ O_2 \Leftrightarrow CO_2$
$CH_4 + 2\ O_2 \Leftrightarrow CO_2 + 2\ H_2O$
$C + ½\ O_2 \Leftrightarrow CO$
$CH_4 + ½\ O_2 \Leftrightarrow CO + 2\ H_2$

## 5. Traitements thermiques

***Les gaz produits*** :

Mélange complexe de gaz car les déchets libèrent de nombreuses molécules organiques. Gaz principaux ➤ $CO_2$, CO, $H_2$, $CH_4$, HCl, $H_2S$

Les gaz sont produits en faible quantité (<6000 $Nm^3$/t de déchets)

***La température*** :

✓ Température minimale de décomposition thermique : 300-500 °C
✓ Température atteinte à la surface des déchets puis diffusion thermique à l'intérieur des déchets ⇨ cinétiques plus lente qu'en incinération
✓ Accroissement de la température ⇨ formation de gaz au détriment du résidu solide et liquide (dégagement de métaux volatils)
✓ Réactions de thermolyse autothermes une fois initiées par apport ext. de chaleur

***Les différents fours utilisés*** :

| | |
|---|---|
| ✓ Fours verticaux à lit tombant | ➤ haut fourneaux |
| ✓ Fours tournants (rotatifs) | ➤ idem incinération ou cimenteries |
| ✓ Fours à lit fluidisé | ➤ sable mis en mouvement par les gaz |
| ✓ Fours à traitement par lots | ➤ déchets disposés en vrac dans des wagons |

# 5. Traitements thermiques

Déchets admissibles
*(OM – Pneus usagers – Refus de tri – Plastiques, Boues, Déchets dangereux)*

## Pyrolyse - Thermolyse

### Résidus solides

**Parties organiques ➲ Noir de carbone**

**Fractions minérales et métalliques non affectées**

Séparation ➔ valorisation

### Résidus liquides

**Mélanges eau-huile à caractère visqueux (S, Cl..)**

Valorisation possibles en raffineries (dilution avec du pétrole brut)
Valorisation énergétique (PCI ~ 40 MJ/kg)

### Résidus gazeux

**Composition très variable**
$H_2$ : 10 à 55 %
CO : 1 à 20 %
$CO_2$ : 5 à 25 %
$CH_4$ : 6 à 15 %

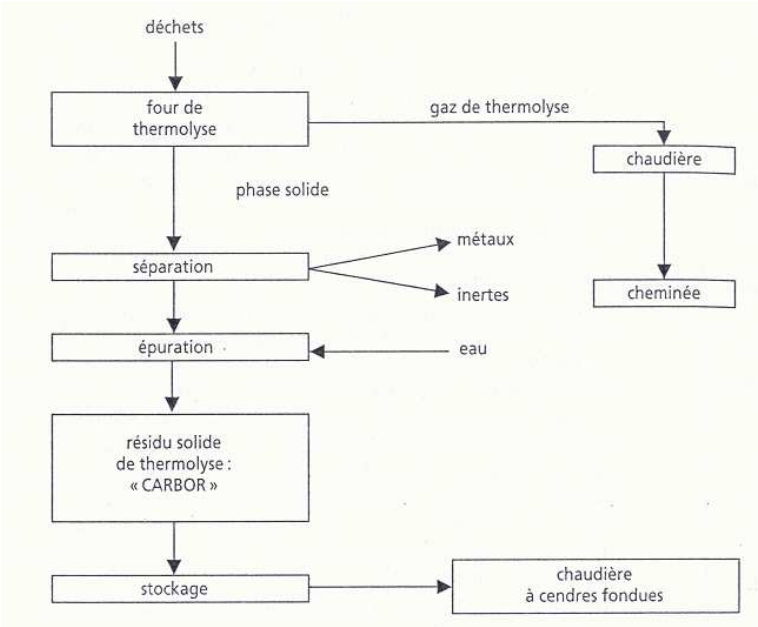
Gaz brûlés sur place pour assurer les besoins énergétiques

## ❑ Les procédés en exploitation

### *Le procédé Eddith* :

Développé par Thide environnement et l'IFP pour traiter des déchets (OM, pneus, DIB organiques, boues urbaines, plastiques) réduits (taille max : 15-20 cm), déferraillés et séchés (siccité > 90 %) dans un four chauffé à 450-550 °C sous atmosphère d'azote. Temps de séjour = 1 heure. Gaz brûlés à 1100 °C. Valorisation du coke débarrassé du chlore

➥ $3500 < PCI_{Carbor} < 4500$ kcal/kg



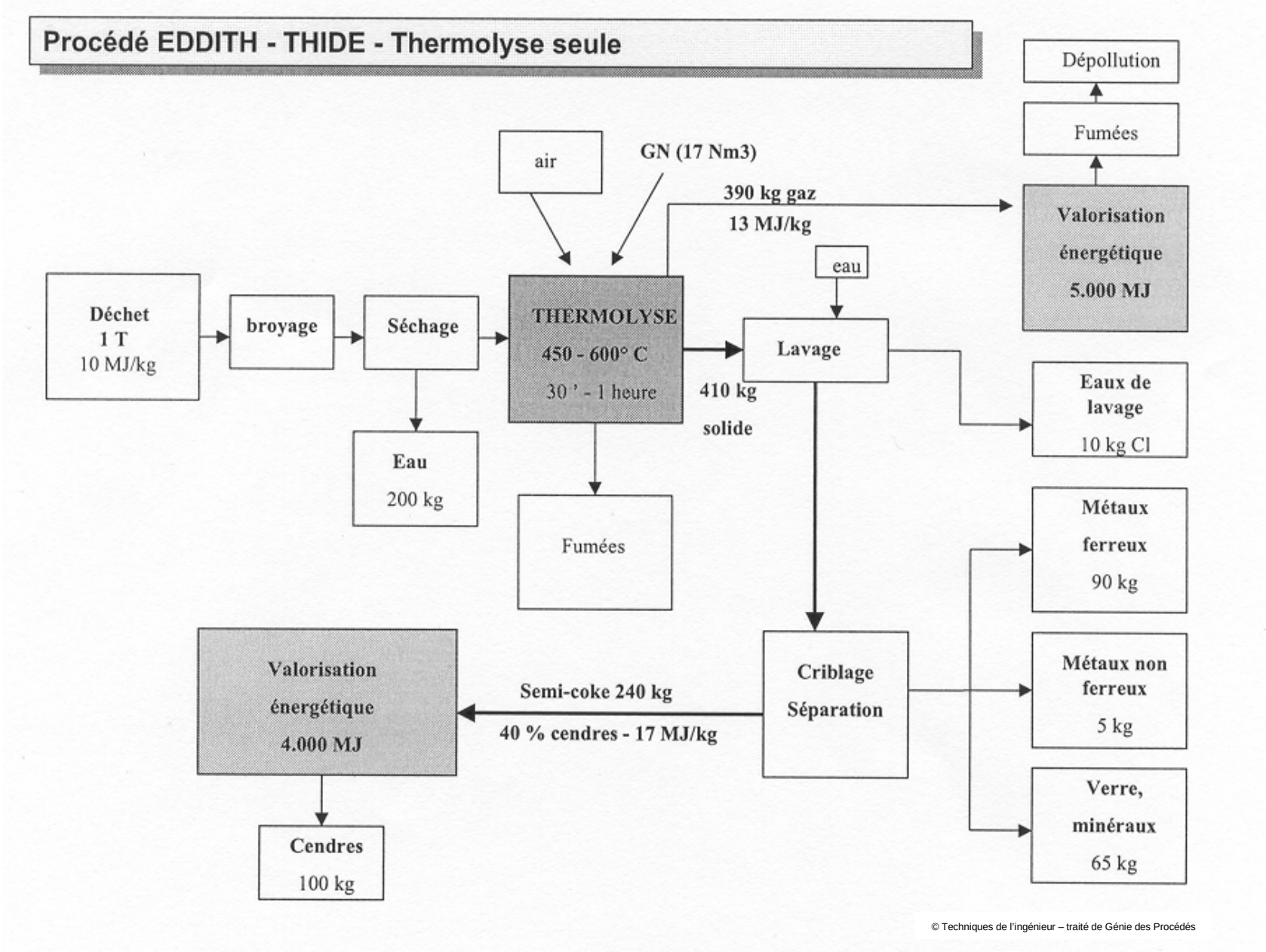
**Usine d'Arras *ARTHELYSE®***

Capacité annuelle de traitement de 50.000 tonnes

Deux lignes de fours

Démarrage industriel en 2004

# 5. Traitements thermiques



Le traitement des déchets industriels

# 5. Traitements biologiques

# 6. Traitements biologiques

Déchets admissibles
*(FFOM, déchets verts, boues station*, déchets industriels (IAA))*
**Déchets interdits (ou non souhaités)**
(Déchets minéraux, Métaux lourds, toxiques…)

Pré-traitement (optionnel)
*(mélange des boues avec copeaux de bois, réduction taille déchets)*

**Compostage**

**Odeurs**

Traitement

Compost

Amendement organique

**Milieu récepteur**

# a) Compostage

## ❑ Objectifs et principe

- 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

***Principe général*** : 5 étapes dont deux étapes de dégradation biologique

- Broyage (si nécessaire, ex :branches)
- Mélange de déchets organiques avec des coproduits éventuels (rapport C/N ~ 30, humidité entre 30 et 35 %)
- **Fermentation active (ou chaude) sous aération forcée**
- Affinage par criblage (tamis vibrants ou à disques)
- **Maturation du produit (valorisation en compost)**

Une variante : le lombricompostage

## ❑ Caractérisation des déchets compostables

- ***Les déchets verts***

  Estimés à 3,4 Mt/an, ce sont des sous-produits des cultures, des déchets d'élevage (litières) et déchets forestiers.
  Caractéristiques (rapport C/N, structure, humidité) parfaitement adaptées

- ***Les OM***

  Bonne fraction fermentescible
  Fraction non fermentescible inerte ou toxique à l'égard des µorganismes
  ➥ Tri obligatoire en amont du traitement

- ***Boues de stations d'épuration***

  Faible part de la production de compost (2 % des boues produites)
  Compostables en présence d'un support (copeaux, paille, écorce)

- ***Déchets industriels***

  Gisement potentiel important (industrie agroalimentaire et papetière)

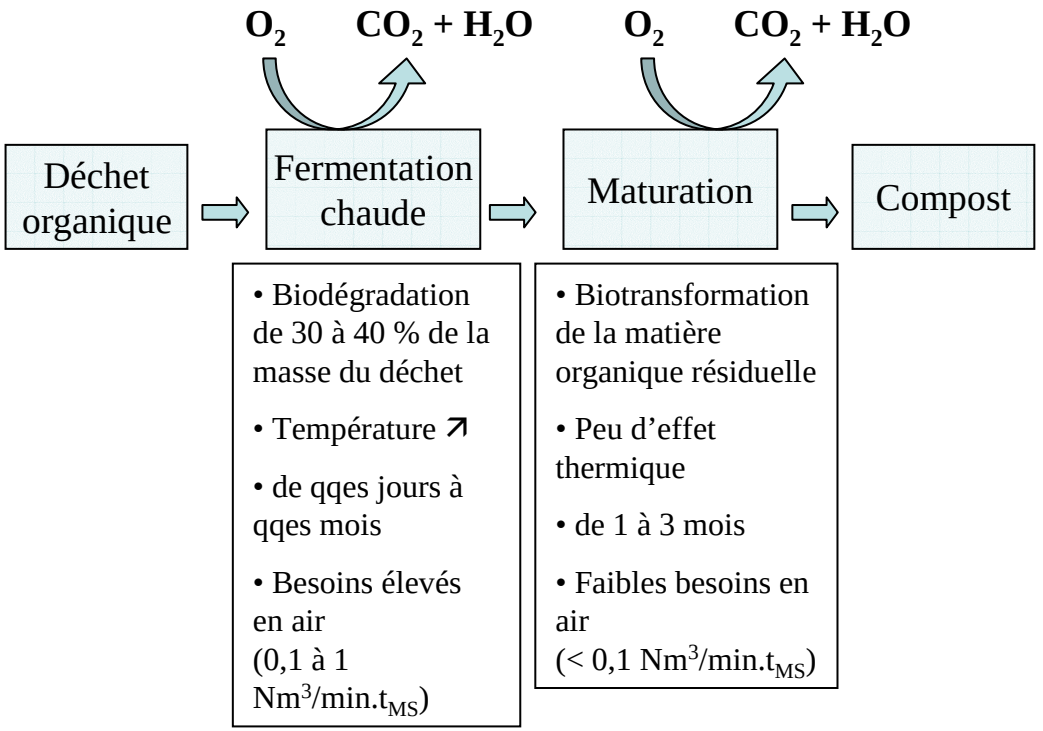
## ❑ Aspects biologiques et microbiologiques

Fermentation chaude

Dégradation de la MO la + facilement biodégradable

Consommation d'$O_2$ & Production de chaleur

Température ~ 70 °C
➥ élimination des microorganismes pathogènes




Maturation

Faible dégradation de la matière

Echauffement limité
➥ température ~ 25 °C

### *Aspects microbiologiques*

Grande variété des microorganismes impliqués (bactéries, algues, protozoaires, champignons et actinomycètes). Souvent directement présents au sein des déchets.
➥ Souvent : absence d'inoculation

Modification microbienne constante tout au long du processus de dégradation (évolution de la matière organique au compost final)

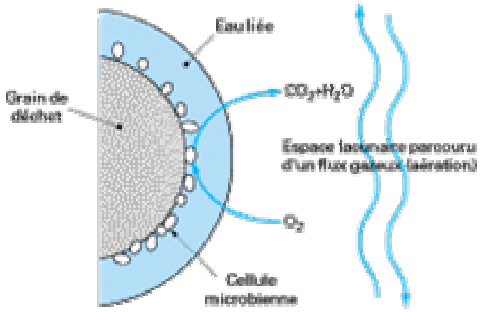
## ❑ Paramètres du compostage

Deux catégories de paramètres (paramètres de conduite et paramètres du déchet)

### Paramètres de conduite

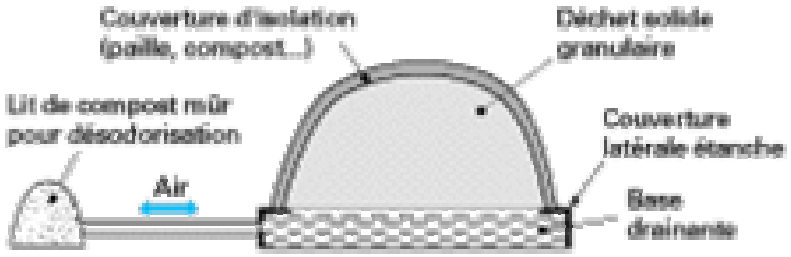
- ***Teneur en $O_2$***

Déchets organiques solides ➤ matériaux granulaires poreux
Réactions de biodégradation à la surface des grains
Teneur minimale en $O_2$ : 5 % volume/volume
Consommation max : 25 $m^3/t_{compost}$.jour




Techniques d'aération

3 techniques : aération naturelle, retournements mécaniques et aération forcée




*aération forcée*

Aspiration forcée recommandée en début de compostage (nuisances olfactives) mais risque de compactage des déchets ➤ inversions périodiques

Débit d'aération  fonction de la temp.
➥ en phase thermophile $D_{air}$~ 1 $m^3/min.t_{MS}$

Si T ↘, $D_{air}$ ↘

## 6. Traitements biologiques

- ***Température***

- Equilibre thermique production de chaleur (dégradation biologique) & pertes

- Augmentation souhaitée de la température souhaitée pour deux raisons :

  ✓ ↗ vitesse de biodégradation (+ 10°C ⇨ doublement de la vitesse)

  ✓ Objectif « d'hygiénisation » du déchet : destruction des germes pathogènes ou des graines végétales

  ➥ T > 60 °C au moins quelques heures, mais sans dépasser 80 °C (réaction chimiques non souhaitées), puis température ↘ à 50-55 °C

- Favoriser une bonne température → réduction pertes thermiques par conduction (optimisation du rapport surface/volume)

➥ **tas** : hauteur de 2 à 3 m sur un diamètre à la base de 3 à 5 m.
➥ **andains** : tas dont la longueur peut atteindre une centaine de mètres.

Température & aération sont étroitement liées (le suivi de température est un indicateur permettant le contrôle du débit d'air à injecter)
➥ Savoir-faire des sociétés spécialisées dans le compostage

- ***Teneur en eau***

Teneur en eau minimale de 50 % (en masse) pour une bonne activité microbienne

Plus généralement ⇨ 60 à 80 %

Si le matériau est trop humide : problèmes de porosité à l'eau → défaut d'$O_2$ → conditions anaérobies locales
➥ prétraitement à l'aide d'agents structurants (copeaux, sciure de bois…) mélangés aux déchets en amont du compostage
➥ post-traitement pour les éliminer avant la maturation (criblage)

Contrôle régulier de la teneur en eau pour un bon fonctionnement
➥ ~ 1 $m^3$ d'eau consommé/tonne de déchets (humidité = 60 %)

## Paramètres des déchets

*4 paramètres essentiels* :

- Biodégradabilité
- Granulométrie
- pH
- Rapport massique C/N/P

## ❑ Le lombricompostage

Utilisation de vers de terre pour consommer et dégrader la MO du déchet

**Deux approches**

***Etape unique de traitement***

Réservé au domaine agricole car il requiert des surfaces importantes
➤ 2,5 $m^2/m^3$ déchet

Rapport surface/volume élevé
➥ température plus faible que pour le compostage classique (garder les petites bêtes en vie)
➥ Hauteur des tas et andains : 35 cm

Plusieurs semaines à plusieurs mois

***Substitution de l'étape de maturation***

Pas de problème d'échauffement (fraction la plus biodégradable déjà dégradée lors de la fermentation chaude)

Compost obtenu : excrément des vers qui ingèrent et digèrent la MO résiduelle

Produit mieux calibré
➥ facilité du post-traitement

## ❑ Caractéristiques et utilisation du compost

***Nature du compost*** *:*

Compost : produit de composition variable pouvant être utilisé comme amendement organiques des sols. Teneur organique optimale d'un sol ~ 3 % (en France ~ 1 %)
Le compost permet donc de réduire l'érosion et l'appauvrissement des sols et d'améliorer leur qualité de support de croissance des végétaux. Mais le compost possède une faible valeur marchande et ne peut pas joue le rôle d'engrais.-

***Utilisation du compost*** *:*

Le compost fait l'objet d'une réglementation précise (Norme U 44-051 définit les teneur en MO et en éléments fertilisants) ; composés toxiques soumis à des seuils de composition
Cas des STEP : homologation du compost de boue chaque fois un cas d'espèce

***Destination du compost*** *:*

94 % du compost est valorisé ! Mais le tri-compostage des OM grises valorise seulement 50 % du compost
Sinon : stockage, incinération

***Prix du compost*** *:*

Compost négocié entre 7,50 et 75 € suivant sa qualité

## ❑ Etat de développement actuel (chiffres ADEME 2000)

### Trois modes de compostage

- Plates-formes dédiées au compostage des déchets verts uniquement
- Plates-formes recevant les biodéchets des ménages
- Plates-formes de tri-compostage de OM brutes

| Plates-formes | Nb unités | Quantités en entrée (kt) | Compost (kt) | Refus (kt) | % refus |
|---|---|---|---|---|---|
| **Déchets verts** | 207 | 1804 | 776 | 40 | 4,9 |
| **Biodéchets des ménages** | 23 | 127 | 41 | 14 | 25,5 |
| **OM** | 75 | 1653 | 629 | 788 | 55,6 |
| **Autre** | 9 | 193 | 80 | 80 | 50 |
| **Ensemble** | 313 | 3777 | 1526 | 922 | 37,6 |

Unités de traitement petites : elles représentent 20 % du parc et 8 % des déchets, soit 13 300 tonnes/an (1 seule de méthanisation = 92 000 tonnes/an)

# 6. Traitements biologiques

Déchets admissibles
*(FFOM, déchets verts, Boues station*, déchets industriels (IAA))*
**Déchets interdits (ou non souhaités)**
(Déchets minéraux, Métaux lourds, toxiques…)

Apport d'énergie

**Méthanisation**

Biogaz
($CH_4$ & $CO_2$)

Brûleurs

Épuration

EDF

Digestat

Affinat = Compost

Amendement organique

**Milieu récepteur**

# b) Méthanisation

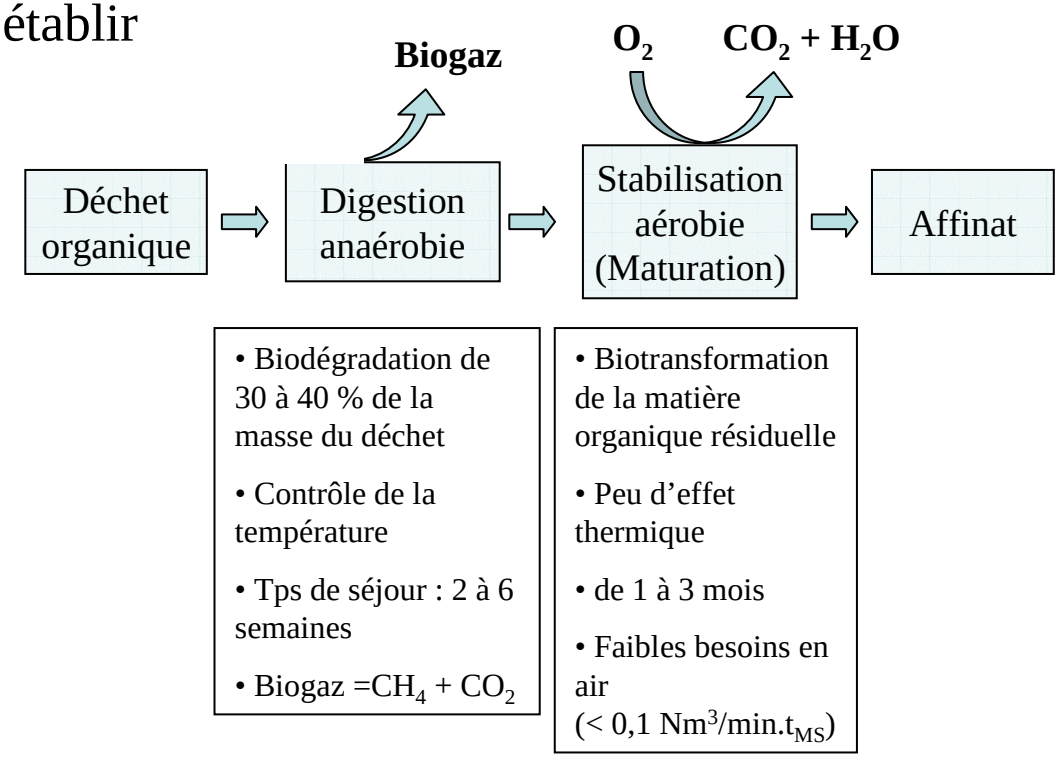
## ❑ Introduction

Mécanisme observé depuis longtemps mais l'exploitation industrielle est récente

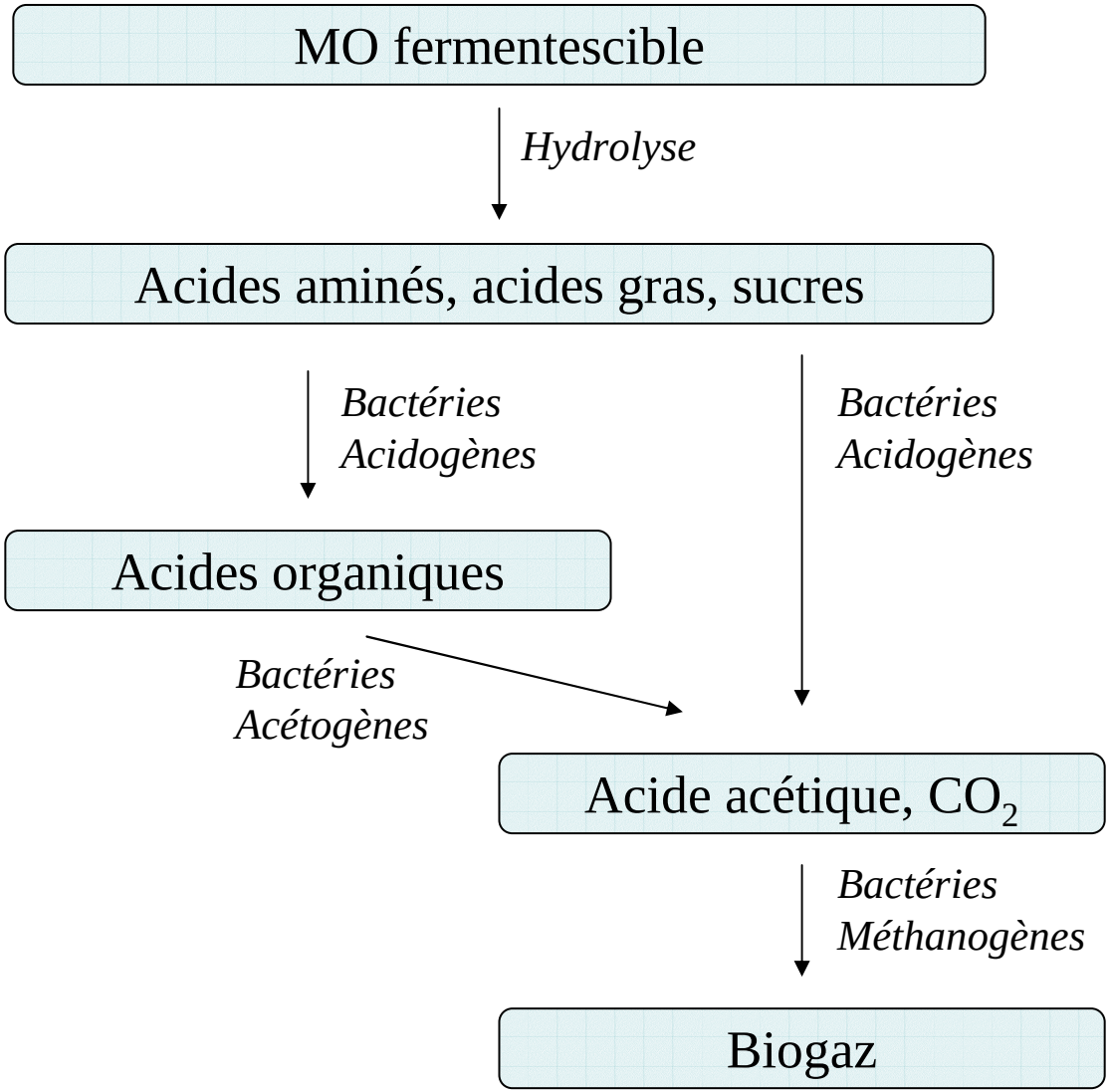
Comparaison incinération / méthanisation à faire sur plusieurs niveaux

➥ Bilan énergétique meilleur pour l'incinération
➥ Bilan écologique plus complexe à établir

Matière première : identique au compostage (matière naturelle végétale ou animale, de synthèse dans certains cas) ;
Matière lignocellulosique mieux dégradée en compostage.
➥ Post-traitement :
Compostage du digestat après méthanisation des déchets



## ❑ Principe de la méthanisation




**Hydrolyse** : dégradation des polymères en monomères

**Acidogenèse** : transformation des monomère en gaz carbonique et acides organiques (apparition d'acétates, d'éthanol, d'ammoniaque, d'hydrogène et acides gras organiques de 2 à 5 atomes de carbone

**Acétogenèse** : Les µorganismes transforment les AGV et alcools en hydrogène, gaz carbonique et acétates

**Méthanogenèse** : intervention des bactéries méthanogènes pour élaborer les méthane à partir de gaz carbonique et des acétates

## ❑ Les paramètres importants

• ***Température***

Chauffage nécessaire pour réaliser la digestion (pour maintenir une bonne activité microbienne)

➥ Consommation d'une partie du méthane produit

➥ Isolation nécessaire de l'installation

Pour ne pas trop consommer ➤ conditions mésophiles (25-40 °C) plutôt que thermophiles. Larges variations de température à éviter (1 °C sur une journée)

• ***pH***

Zone optimale : neutralité
Bactéries méthanogènes fortement inhibées en dessous de pH 6
Chute de pH → mauvais fonctionnement. En pratique ➤ 7,5 < pH < 8

➥ **Paramètre prépondérant du procédé**

• ***Charge organique entrante***

Eviter les surcharges brutales, 20 % en une journée ➤ équilibres microbiologiques très fragiles

# 6. Traitements biologiques

## • *Besoins nutritionnels*

Besoins nutritionnels des microorganismes anaérobies moins importants que ceux des microorganismes aérobies (production de biomasse plus faible)

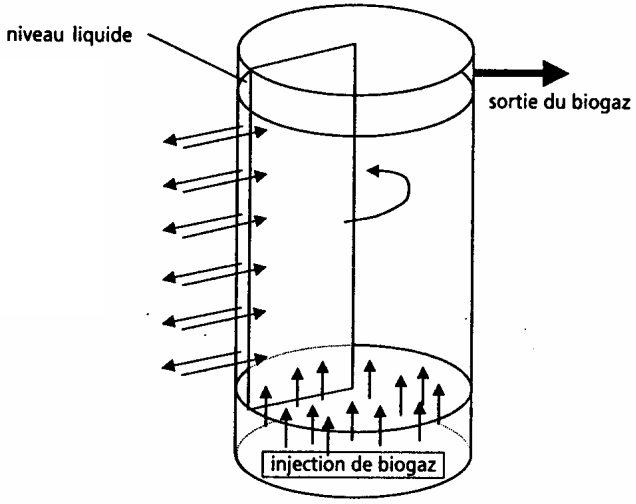
Rapport C/N/P ~ 100/4/1 (identique aérobie)

## • *Oxygène moléculaire et teneur en eau*

$O_2$ très toxique pour les bactéries aérobies (acétogènes et methanogènes)
➥ systèmes noyés bien adaptés aux déchets très humides (> 80 %)

## • *Agitation*

Rôle : éviter la formation de croûtes et la décantation des particules denses
➥ Brassage mécanique (vis tubé ou hélicomélangeur, N = 20 à 50 tr/min)
➥ Brassage hydraulique (pompes, pour déchets boueux)
➥ Brassage par injection de biogaz



## ❑ Caractérisation des produits

### • *Le biogaz*

Principaux constituant : $CH_4$ & $CO_2$
$H_2S$ parfois présent (réduction du souffre ou des sulfates) : problèmes d'odeur, de toxicologie et de corrosion. Oxydation aisée en acide sulfurique.

### • *Le digestat*

Digestat = déchet – C, H & O (le digestat garde les éléments nutritifs principaux)

Valorisation directe rare :
- Temps de séjour trop court pour une bonne épuration (les industriels privilégient la production de méthane) ➤ durée du traitement : 2 à 3 semaines uniquement
- Phase aqueuse libre du digestat importante (re-largage dans le sol ou le sous-sol)
- Mauvaises propriétés agronomiques (présence de germes pathogènes par ex.)

➥ Post-traitements :
- Mécanique (pour les digesteurs boueux, décantation, centrifugation ou filtration)
- Thermiques (opérations de séchage et de granulation)
- Physico-chimiques (coagulation-floculation pour les digestats boueux)
- Biologiques (fermentation chaude: Digestat ⇨ Affinat ~ Compost)

# 6. Traitements biologiques

## ❑ Etat de développement actuel

Filière de traitement largement utilisée en France et dans le monde, principalement pour les déchets boueux (MS < 15 %) car la technique est simple à maîtriser.

➥ Lisiers (de porcs) et autres déjections animales
➥ Boues de stations d'épuration d'eaux urbaines
➥ Certains déchets d'industries agro-alimentaires

Mais aussi les OM ! (procédé Valorga)

Domaine agricole : 474 digesteurs en Europe (1998) produisant 40 $Nm^3$ de $CH_4$

OM : 46 unités industrielles de méthanisation dans le monde (1994)

Ex. Valorga met en œuvre la méthanisation des OM (MS ~ 30 à 35 %) à Amiens (85 000 tonnes/an), de mélanges de déchets verts et de cuisine à Tilburg, Pays-bas (40 000 tonnes/an).
Procédé Dranco (*Dry Anaerobic Composting*) utilisé à Brecht (Belgique) pour traiter un mélange de déchets de fruits et légumes, de résidus de jardinage et de vieux papiers (10 000 tonnes/an).

# Comparatif des coûts des différents traitements

**Collecte unitaire** : 35 à 80 €/t, en fonction de la fréquence de collecte et des configurations locales ; 1 à 2 emplois pour 1 000 t/an.

**Traitements** :

- ***Incinération*** (conforme à la réglementation, y compris dioxines < 0,1 ng/Nm$^3$ ) : **60 (cas de grosses installations) à 120 €/t.** L'investissement (amortissement) représente 40 à 50 % du coût total, les coûts de fonctionnement fixes 20 à 30 %, les frais de personnel 10 % ; 0,3 emploi pour 1 000 t/an.

Les recettes (énergie, le cas échéant mâchefers) peuvent représenter 20 % du coût brut.

À défaut de valorisation, les mâchefers (environ 25 % du tonnage entrant) sont mis en CET2 et les résidus de traitement des fumées (refioms) en CET1.

- ***Stockage*** (CET2 conforme à la réglementation) : **40 à 100 €/t** (notamment suivant la taille), dont investissement (amortissement) : 10 %, fonctionnement fixe : 65 à 75 %, fonctionnement variable : 10 à 15 %, et taxe générale sur les activités polluantes (TGAP) : 10 €/t ; il s'agit de coûts hors garanties financières, mais y compris coûts associés à la phase de postexploitation.
- ***Fractions fermentescibles* (hors coûts de collecte), *compostage* :**
  - déchets verts seuls : **30 à 80 €/t** ;
  - plus largement, fraction fermentescible des ordures ménagères : 40 à 100 €/t, notamment suivant le tonnage annuel, et y compris la recette liée au compost produit (0 à 10 €/t).
- ***Méthanisation* : 50 à 70 €/t.**

**Collectes sélectives de fractions sèches** :

- ***Apports volontaires à des conteneurs* :**
  - verre : 30 à 40 €/t ; part des charges en main-d'œuvre : 25 à 30 % ; 0,2 à 1,7 emploi pour 1 000 t/an + activité en aval des « traiteurs » ;
  - journaux, magazines ou corps plats : 30 à 50 €/t ;
  - bouteilles plastiques (seules) : **coût de collecte (par aspiration notamment) et séparation PET/PVC/PEHD : 220 à 300 €/t ; environ 5 emplois pour 1 000 t/an.**

*Nota* **:** PET : polyéthylène téréphtalate ; PVC : polychlorure de vinyle ; PEHD : polyéthylène haute densité

- ***Multimatériaux en porte-à-porte* :**

Vis-à-vis des collectes sélectives par apports en conteneurs, les coûts à la tonne sont plus élevés, mais généralement, le « taux de captage » est aussi plus élevé.

Les coûts (et les emplois associés) sont variables, notamment suivant que la collecte sélective est réalisée en substitution (qui nécessite cependant une fréquence de base du service de collecte relativement élevée, à savoir au moins 3 jours par semaine), en simultané ou en addition.

L'accroissement de l'emploi de collecte est d'environ 10 % dans le cadre de collectes par substitution, 20 % en simultané, 25 à 30 % en addition. Ces chiffres s'entendent hors emplois relatifs à la communication (ambassadeurs du tri, etc.).

Au-delà, le produit de la collecte sélective est acheminé vers un centre de tri.

Le coût de tri est de 110 à 250 €/t entrante ; la part du personnel dans les charges d'exploitation est de 50 à 60 % (le tri reste largement manuel) ; il y a 3,2 emplois en moyenne (1,2 à 12 suivant les flux sélectionnés) pour 1 000 t entrantes.

Source: «Approche socio-économique des déchets », *Techniques de l'Ingénieur*

Le traitement des déchets industriels

# 6. Stabilisation des déchets

# a) Objectifs des procédés

## ❑ Définitions : *Arrêté du 18 décembre 1992*

« Un déchet est considéré comme stabilisé quand sa perméabilité à l'eau et sa fraction lixiviable ont été réduites et quand sa tenue mécanique a été améliorée de telle manière que ses caractéristiques satisfassent aux critères d'admissibilité des déchets stabilisés dans les centres de stockage, suivant la réglementation en vigueur »

Le déchet stabilisé doit être « inerte », c'est-à-dire dans un état de stabilité physico-chimique tel qu'il ne puisse pas subir de transformations susceptibles de générer des nuisances environnementales

## ❑ Gisement des déchets concernés

- **Résidus d'incinération** : REFIOM & REFIDI, résidus des eaux de lavage des gaz, mâchefers

- **Résidus de la métallurgie** : poussières, boues d'usinage contenant moins de 5 % d'hydrocarbures, sables de fonderie n'ayant pas subi la coulée

# 7. Stabilisation des déchets

- **Déchets minéraux** de traitement chimique : oxydes métalliques résiduaires solides hors alcalins, sels métalliques résiduaires solides hors alcalins, sels minéraux résiduaires solides non cyanurés, catalyseurs usés

- **Résidus de traitement d'effluents ou de déchets ou de terres contaminées** : boues et résidus de STEP, résines échangeuses d'ions saturées

- **Résidus de peinture** : déchets de peinture polymérisés ou solides, de résine etc…

- **Résidus d'amiante**

- **Réfractaires** et autres matériaux minéraux usés

Production de l'ensemble de ces déchets industriels : 7 Mt/an

➥ (½ traités sur site, ½ traités en centres spécialisés)

Procédés de solidification : faible proportion des déchets (~ 600 000 t/an dans 13 centres collectifs)

Gisement principal : REFIOM (23 $Mt_{OM}$/an) → 400 000 t/an sont traités par les procédés de stabilisation solidification

# b) Stabilisation à base de liant hydraulique

## ❑ Principes de la solidification :

Ciment (+ chaux + additifs) = matériaux finement broyés qui se lient au contact de l'eau pour former une matière solide poreuse ⇨ prise hydraulique due aux réactions d'hydratation
Ajout des déchets d'autant plus facile qu'ils contiennent de la chaux, de la silice et de l'alumine (cas des REFIOM)

Ciment Portland Artificiel (CPA) = clinker (80% calcaire, 20% argile) + gypse (5%)

## ❑ Mécanismes de stabilisation par liants hydrauliques :

***Réactions d'hydratation*** :

Le mécanisme d'hydratation peut être fortement perturbé par les déchets
➥ Empoisonnement possible (zinc ou chrome) ⇨ prise hydraulique impossible

Problèmes des sels sur les propriétés mécaniques
Chlorures & sulfates ➤ gonflement du ciment générateur de fissuration

# 7. Stabilisation des déchets

***Solidifias obtenus*** (3 caractéristique principales) :

- Caractère massif : garantir une surface d'exposition minimale par rapport aux contacts avec l'eau
- Résistance mécanique : empêcher les phénomènes de fissuration et d'émiettement
- Porosité : très variable (dépend en particulier du rapport eau/ciment). Cette caractéristique conditionne la pénétration de l'eau dans la matrice solide poreuse

***Polluants amenés par le déchet*** :

Transformations chimiques possibles ou interactions avec les phases solides du ciment qui conduisent à limiter leur solubilité et leur mobilité :
- précipitation d'hydroxydes ou de sels de calcium dans un milieu très basique
- phénomènes d'adsorption à la surface des hydrates
- intégration dans les hydrates très peu solubles (phénomènes de substitution)

| Atouts | Limites |
|---|---|
| • Mise en oeuvre aisée<br>• Coût acceptable (fonction de la nature du liant)<br>➥ 120 €/t<br>• Bon retour d'expérience<br>• Bien adapté pour les déchets comportant une forte concentration en métaux lourds | • Augmentation conséquente du volume et du poids de base (30 à 40 %)<br>• Peu efficace sur certains polluants (granulométrie fine, chlorure...)<br>• Liant spécifique à chaque type de déchet |

# 7. Stabilisation des déchets

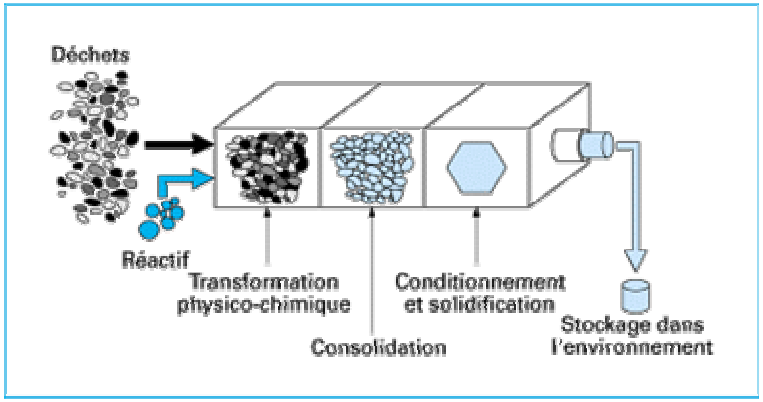
## ❑ Mise en oeuvre :

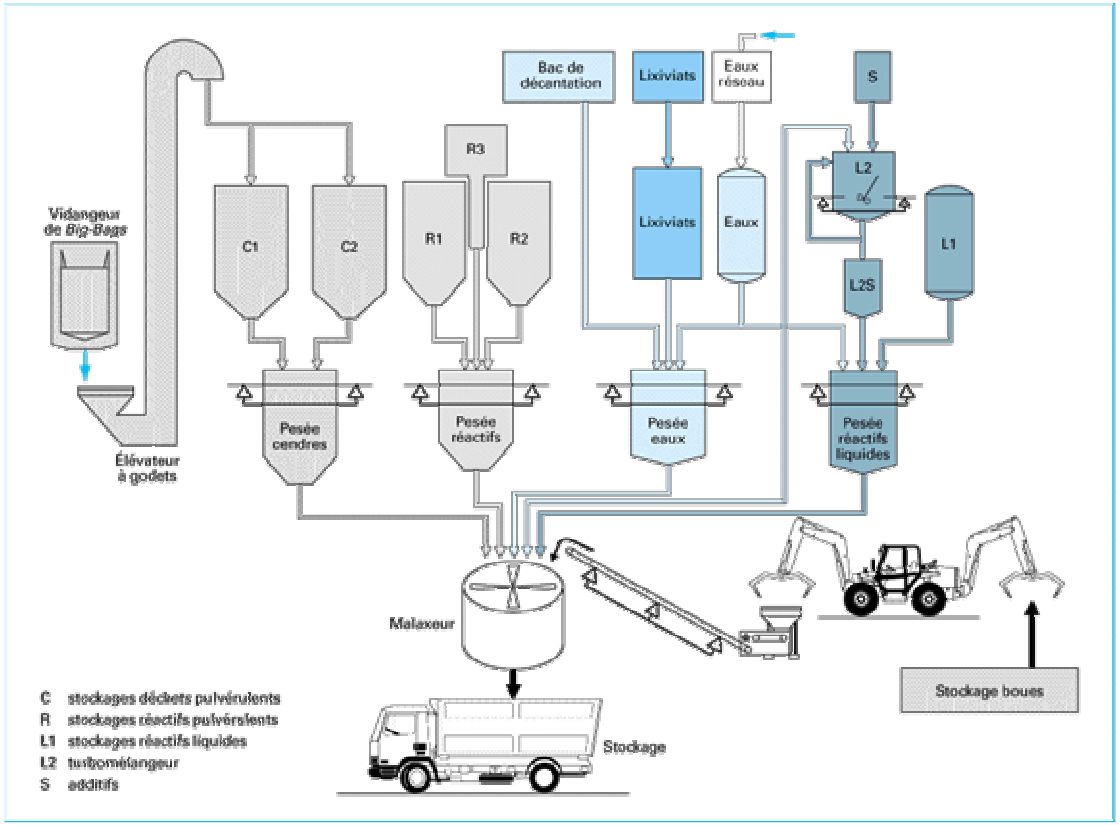
Procédé **Inertec** (Villeparisis, 100 000 t/an).

➥ applicable à d'autres déchets que les REFIOM (résidus de la métallurgie, boues de stations d'épuration, boues d'hydroxydes métalliques, terres polluées)

Les mélanges de liants hydrauliques et d'adjuvants sont déterminées au cas par cas.

Procédé **Ecofix®**



# b) Vitrification

## ❑ Principe :

Sous haute température (T > 1200 °C), les déchets sont fondus et présentent au refroidissement une structure vitreuse homogène

Initialement, le traitement était réservé aux déchets de l'industrie nucléaire
➥ Confinement des déchets radioactifs dans une matrice non poreuse et résistance à des hautes températures et à la radioactivité ➤ Ajout de silice et de borate aux calcinats des solutions de fission (⇨ verres silicoborates)

## ❑ Procédés de vitrification des déchets :

***Fours à arc électrique*** :

Application d'un arc électrique entre deux électrodes
Ex. pilote EDF du site des Renardières
- Consom. électrique < 1 kWh/$kg_{REFIOM}$
- Réduction du volume : facteur 6
- 70 % vitrifiat, 29 % gaz, 1 % cendre
- Densité du vitrifiat : 3

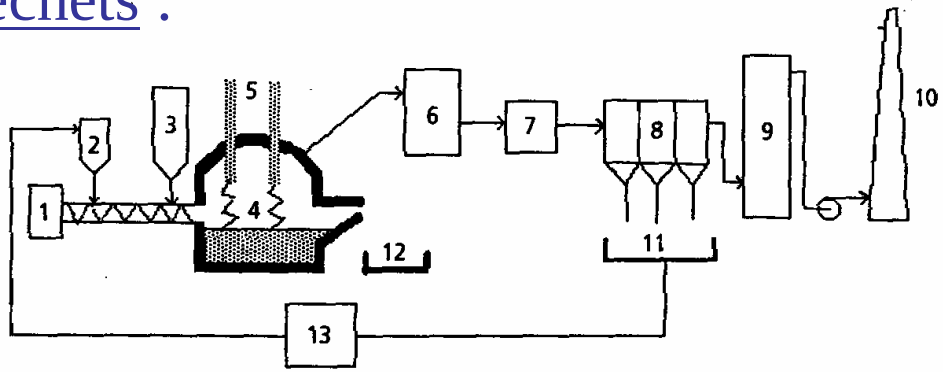
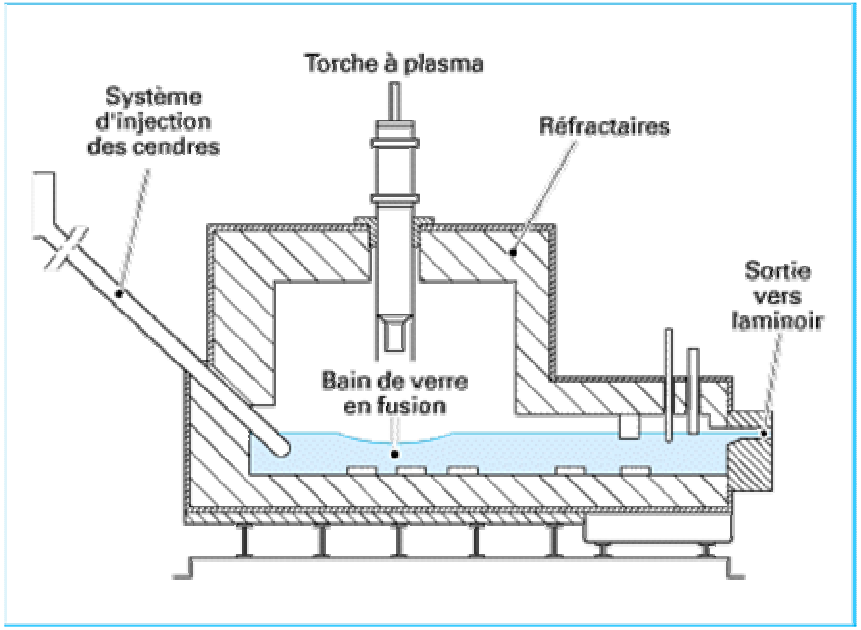



**Figure 8.1** — Schéma de principe du pilote de vitrification par arc (d'après document EDF). 1. Vis d'alimentation. 2. Trémie des cendres secondaires. 3. Trémie de REFIOM. 4. Arc électrique. 5. Électrodes. 6. Chambre de postcombustion. 7. Refroissement par air. 8. Filtres à manches. 9. Tour de lavage (soude). 10. Cheminée. 11. Récupération des cendres secondaires. 12. Ligotière de coulée. 13. Traitement des cendres.

# 7. Stabilisation des déchets

***Fours à plasma*** :

➥ Ionisation des molécules d'un gaz (chauffage par un arc électrique entretenu entre deux électrodes). Le plasma d'arc se distingue par des densités énergétiques et des capacités de chauffage à hautes températures très supérieures à celles des moyens conventionnels




© Techniques de l'ingénieur – traité de Génie des Procédés

Ex. Vitrification de l'amiante (unité Inertam de Morcenx)
- Température : 1600 °C
- Puissance : 1700 W
- Dispositif de traitement des fumées
- Fonctionnement discontinu (cycle de traitement d'une heure)
 - 85 % vitrifiat, 14 % gaz, 1 % cendre

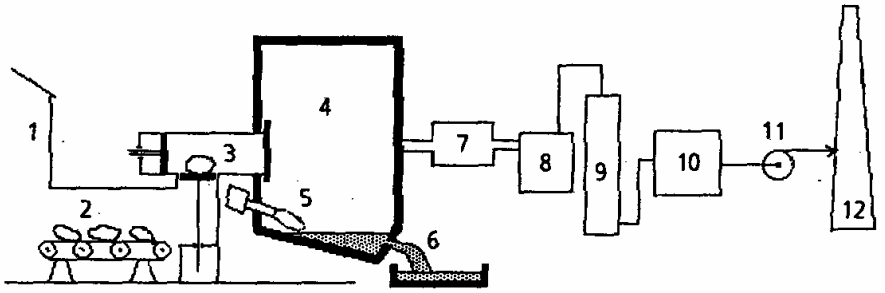



**Figure 8.2** — Schéma de principe du pilote de vitrification par plasma de l'amiante.
1. Hangar de chargement. 2. Dispositif de manutention. 3. Sas. 4. Four de vitrification. 5. Torche à plasma. 6. Coulée du vitrifiat. 7. Four de postcombustion. 8. Réfrigérant. 9. Tour de lavage. 10. Électrofiltre. 11. Ventilateur d'extraction. 12. Cheminée.

| Atouts | Limites |
|---|---|
| • Importantes réductions de volume (environ 50 %)<br>• Produit obtenu très stable | • Coût élevé (gros apport énergétique)<br>➥ ~ 300 €/$t_{\text{cendres volantes d'usine d'incinération}}$<br>• Difficultés techniques pour obtenir un vitrifiat de bonne qualité |

## c) Procédés d'enrobage par liant organique

### ❑ Les bitumes :

Utilisé depuis + de 20 ans pour enrober les déchets nucléaires

*Bitume* : mélange complexe d'hydrocarbures aliphatiques, naphténiques et aromatiques à masses molaires élevées, obtenu pendant la distillation des pétroles bruts ➤ matériau hydrophobe qui s'oppose à la pénétration de l'eau en son sein.

- Bon pouvoir agglomérant car il adhère à la majorité des matériaux
- Viscosité du bitume très élevée à la température ambiante ⇨ matériau solide et imperméable où les polluants contenus dans les déchets sont confinés
- Bonne résistance mécanique à l'écrasement et à la fissuration, bonne inertie chimique ⇨ convient pour tous les déchets

## *Mise en oeuvre* :

Principe : dispersion homogène d'un déchet granulaire dans la matrice de bitume

Bitume préchauffé à 190 °C. Brassage des déchets finement divisés avec du bitume dans un pétrin chauffé à 230 °C (quelques heures). ⅓ bitume + ⅔ déchet
➥ déchets coulés sous forme de lingots

Etat du développement : technologie développée par Shell Bitumes à l'état de démonstration. Aucune réalisation industrielle à ce jour.

## ❑ Encapsulation par les matières plastiques :

Matériaux thermoplastiques : composés macromoléculaires ayant la propriété de devenir pâteux et relativement fluides lorsque l'on élève la température. Comme pour les bitumes, ils retrouvent un état solide si la température s'abaisse.

➥ Enrobage possible et confinement de déchets granulaires

Matériaux utilisables : polyéthylène, polypropylène & polychlorure de vinyle

# 7. Stabilisation des déchets

| Atouts | Limites |
|---|---|
| • Coût acceptable (100-180 €/t)<br>• Installation technique peu encombrante<br>• Bonne étanchéité du produit obtenu | • Incompatible avec les déchets aqueux<br>• Pas de retour d´expérience sur la tenue du produit à long terme. Quelles stabilité à long terme ?<br>• Temps de refroidissement du déchet stabilisé assez long<br>• Mal adapté pour stabiliser des polluants chimiques (acide, déchets chlorés...)<br>• Produit dangereux (risque d'incendies en stockage)<br>• Traitement des gaz et des fumées nécessaire<br>• Matière organique ⇨ non stockable à terme |

# Bibliographie


Alain NAVARRO, « Approche systémique des déchets », *Techniques de l'Ingénieur*

Gérard BERTOLINI, «Approche socio-économique des déchets », *Techniques de l'Ingénieur*

Jean-Claude BOEGLIN, « Pollution industrielle de l'eau - Caractérisation, classification, mesure », *Techniques de l'Ingénieur*

MEINCK (F.), STOOF (J.), KOHLSCHUETTER (H.), « Les eaux usées industrielles », *Masson éd., Paris (1977)*

Mémento technique de l'eau. *Sté Degrémont. Ed. Technique et Documentation,* Paris (1989)

Jacques BOURGOIS, Bruno DEBRAY, Valérie LAFOREST, « Traitements chimiques et physico-chimiques des déchets », *Techniques de l'Ingénieur*

Rémy GOURDON, « Traitement biologique des déchets », *Techniques de l'Ingénieur*

Pierre MOSZKOWICZ, Radu BARNA, « Stabilisation-solidification des déchets », *Techniques de l'Ingénieur*

Alain DAMIEN, « Guide du traitement des déchets », *Dunod, Paris, 2002*

Jean-Paul Pothet, « Emballage et environnement », *Techniques de l'Ingénieur*

Incinération des déchets ménagers en France – situation en 2000, Rapport ADEME

Les déchets en chiffres - Document ADEME 2006