

## 5.3 Aluminium

### 5.3.1 Situation actuelle du recyclage

Le recyclage de l'aluminium est déjà relativement bien développé malgré la présence de divers problèmes.

#### (1) Offre en aluminium sur le marché tunisien

La Tunisie, n'ayant ni de ressource en aluminium ni d'équipement de raffinage, importe la totalité de lingots, de produits finis et de produits semi-finis d'aluminium. Le tableau 5.3-1 montre l'évolution des échanges de ces 6 dernières années. En 1997, environ 2.300 tonnes de lingots et 8.700 tonnes de produits finis et produits semi-finis ont été importées, soit environ 11.000 tonnes d'aluminium au total. D'autre part, environ 1.500 tonnes de lingots probablement régénérés et 1.500 tonnes de produits finis et produits semi-finis ainsi que 900 tonnes de déchets d'aluminium ont été exportés, soit environ 3.900 tonnes au total. Autrement dit, la quantité d'aluminium accumulé dans le pays en 1997 a été d'environ 7.000 tonnes, sous forme de produits finis pour la plupart.

A part cet approvisionnement par l'importation, les déchets d'aluminium sont réutilisés pour la fabrication des produits, soit tels quels soit régénérés en lingots.

Comme le montre le tableau 5.3-1, l'accumulation d'aluminium de ces 6 dernières années atteint presque 44.000 tonnes, et c'est aussi la quantité potentielle de déchets d'aluminium qui seront générés dans un proche avenir.

Pour évaluer plus précisément, il faut ajouter la quantité d'aluminium utilisé en tant que composants des automobiles ou des électroménagers importés.

Tableau 5.3-1 Importation et exportation d'aluminium (1977)

		(Chiffres arrondis) Unité: tonnes					
		1992	1993	1994	1995	1996	1997
Importation	Lingots	1.700	3.900	1.800	4.400	4.200	2.300
	Déchets	100	0	0	16	0	0
	Produits	7.500	7.700	8.600	10.100	7.700	8.700
	total	9.300	11.600	10.400	14.500	12.000	11.000
Exportation	Lingots	100	800	1.300	700	800	1.500
	Déchets	1.200	900	1.700	0	400	900
	Produits	1.700	2.500	2.600	2.700	2.200	1.500
	Total	3.000	4.200	5.600	4.700	3.500	3.900
Accumulation annuelle		6.300	7.400	4.800	9.800	8.500	7.000
Accumulation totale			13.700	18.500	28.300	36.800	43.800

Note : La quantité des produits est le total des produits finis et des produits semi-finis.

## (2) Production de produits et consommation d'aluminium

La consommation d'aluminium dans le pays peut être estimée sur la base des quantités d'aluminium importé et exporté par article de 1997 (Tableau 5.3-2).

Les statistiques sur la production de chaque produit n'existant pas, l'équipe d'étude a essayé d'obtenir des données pour comprendre le flux quantitatif d'aluminium en faisant des enquêtes de la production et de la consommation des matières premières auprès de quelques fabricants représentatifs de principaux produits. Les informations sur la situation actuelle ainsi obtenues sont présentées ci-dessous.

### a) Produits extrudés

Comme fabricants de produits extrudés en aluminium, il existe une seule entreprise qui produit 2.000 à 2.500 tonnes/an. Pour la production interne de billettes de 800 tonnes environ, elle consomme environ 200 tonnes de lingots neufs et plus de 800 tonnes de déchets (des déchets générés à l'usine et des déchets achetés des autres usines de transformation dans le pays). À part les billettes produites à l'usine, elle consomme également 1.700 ~ 2.300 tonnes de billettes importées.

La moitié de ses produits est destinée à l'exportation. En ce qui concerne la part des produits commercialisés sur le marché local, 90 % sont des matériaux de construction tels que les châssis de fenêtre.

Un des fabricants de matériaux de construction utilise 200 tonnes de produits extrudés importés de l'Algérie, et 100 tonnes de produits tunisiens pour fabriquer 250 à 300 tonnes/an de matériaux de construction dont la totalité est commercialisée sur le marché local. Il existe 4 autres sociétés du même secteur et de taille similaire.

La production totale de matériaux de construction dans le pays est estimée, bien qu'imprécise, entre 1.000 et 1.400 tonnes.

### b) Produits coulés sous pression

Il existe 2 principales entreprises. L'une produit 250 tonnes de radiateurs à eau chaude et de chauffages électriques par an, en consommant 270 tonnes/an de lingots régénérés et 20 tonnes/an de lingots neufs. Seulement 30 tonnes sont destinées au marché local, et tout le reste de 220 tonnes à l'exportation.

Par ailleurs, elle produit 200 tonnes de pièces coulées par gravité (pièces de machine, etc.) à partir de 180 tonnes de lingots régénérés, 25 tonnes de déchets d'aluminium et 5 tonnes de lingots neufs.

La production totale du pays des produits coulés sous pression peut être évaluée entre 400 et 500 tonnes par an, bien que la confirmation n'ait pas été possible.

### c) Câbles électriques

Il y a deux entreprises qui produisent des câbles électriques en aluminium de divers types, à partir des fils bruts importés. L'une de ces entreprises produit, à partir de 1.200 tonnes/an de fils d'aluminium de 9,5 mm de diamètre importé sous forme de bobine, divers types de câbles de diamètre variant de 1,7 à 9,2 mm sous gaine plastique, qui sont fournies à la STEG. Les câbles d'aluminium à noyau en acier pour haute tension, n'étant pas fabriqués en Tunisie, sont entièrement importés.

La production de l'autre entreprise n'est pas connue, mais étant donné que la consommation annuelle des câbles électriques en aluminium de la STEG s'élève à

3.000 tonnes, et que celle des câbles d'aluminium à noyau en acier à 300 tonnes, la production de câbles d'aluminium du pays est estimée à environ 2.700 tonnes/an au total. D'après la STEG, la quantité de déchets de câbles d'aluminium générés reste encore inférieure à 100 tonnes/an.

Tableau 5.3-2 Importation et Exportation de produits en aluminium (1997)

(par article) (chiffres arrondis) (unité : tonne)

Articles		Importation	Exportation
Lingots	Lingots	2.288,6	1.536,1
Déchets	Déchets d'aluminium	-	891,2
Produits finis et produits semi-finis	Poudres et paillettes	40,2	-
	Barres et profilés	241,7	863,9
	Fils d'aluminium	1.493,9	6,2
	Plaques et bandes (0,2 mm d'épaisseur ou plus)	1.463,8	3,5
	Feuillards (0,2 mm d'épaisseur ou moins)	1.851,0	42,9
	Tubes et tuyaux	53,0	2,0
	Accessoires de tuyauterie (brides, joints, etc.)	7,4	1,0
	Matériaux de construction (pont, tours, portes, châssis, barres et tuyauteries de bâtiments, etc.)	217,4	58,0
	Récipients et cuves (sauf bouteilles à gaz comprimés/liquéfié) (contenance 30 l ou moins)	2,0	-
	Réservoirs, fûts, tambours, boîtes d'une contenance de 300 litres ou moins	181,3	63,4
	Bouteilles à gaz comprimé ou liquéfié	11,5	-
	Câbles électriques, tresses, torons	636,6	21,6
	Ustensiles de cuisine et articles sanitaires	307,9	186,0
	Autres articles	2.152,5	229,2
	<b>Total de produits finis et produits semi-finis</b>	<b>8.658,6</b>	<b>1.475,0</b>
<b>Total général</b>		<b>10.947,2</b>	<b>3.902,3</b>

#### d) Ustensiles

Il y a 7 principales entreprises qui produisent au total environ 2.000 tonnes/an d'ustensiles de cuisine tels que les casseroles et les récipients. L'une d'entre eux importe environ 300 ~ 350 tonnes/an de disques d'aluminium à emboutir, pour fabriquer 300 ~ 350 tonnes de produits, dont 150 ~ 200 tonnes sont destinées à la vente sur le marché local et 150 ~ 200 tonnes à l'exportation. Cette entreprise fabrique des manches des casseroles et des récipients en coulée. Elle produit 40 tonnes de coulée, à partir de 30 ~ 35 tonnes de déchets de production internes en y ajoutant 10 tonnes de déchets achetée. Parmi ces 40 tonnes, 25 tonnes sont utilisées par cette usine et 15 tonnes sont vendues à l'extérieur.

Par ailleurs, il existe environ 5 fabricants d'ustensiles de petite taille qui produisent 300 ~ 500 tonnes/an au total.

e) Produits coulés par gravité

Il existe plusieurs fonderies qui fabriquent diverses pièces de machines et des produits coulés, en utilisant un four à creuset de petite taille. L'équipe d'étude en a visité quelques unes et essayé d'enquêter par téléphone sur la production et la consommation des matières premières, mais il n'a pas été possible d'obtenir des données précises.

f) Canettes de boisson

Il y a une brasserie qui dispose d'une ligne de fabrication de canettes en aluminium. Elle produit 25 millions d'unités de canettes par an (24 g/canette) à partir d'environ 600 tonnes de pastilles d'aluminium importées.

g) Plaques d'impression

D'après une enquête téléphonique auprès de quelques agences de presse, il s'est avéré qu'en Tunisie, des plaques en aluminium sont utilisées à l'offset. On peut supposer, bien que la quantité ne soit pas précisée, qu'environ 50 tonnes de plaques en aluminium sont utilisées chaque année. Il paraît que ces plaques sont importées sous forme de produits finis.

(3) Génération et récupération de déchets d'aluminium

Pour estimer la quantité de déchets générés, il faut obtenir les données sur les catégories et les quantités de produits en aluminium distribués sur le marché local de cette décennie ou des dernières décennies. La génération de déchets peut être évaluée approximativement en tenant compte également de la durée de vie de chaque produit. Cependant, en Tunisie, une telle évaluation est actuellement impossible en raison du manque de données. Même au Japon, cette enquête vient d'être effectuée tout récemment dans le secteur concerné.

L'estimation de la génération et la récupération de déchets d'aluminium au Japon en 1995 étaient estimées respectivement à environ 1.600.000 tonnes et 1.230.000 tonnes. La quantité de déchets récupérés représente 31 % de l'offre en lingots dont le volume est d'environ 4 millions de tonnes (dont 1.560.000 tonnes sont des lingots régénérés).

En Tunisie, il existe 3 entreprises notables de régénération de lingots. D'après une enquête effectuée auprès des deux d'entre eux, la quantité de déchets d'aluminium récupérés s'élève à 1.500 tonnes/an. L'évaluation de la quantité actuelle de déchets récupérée sera mentionnée ci-dessous.

(4) Situation actuelle du recyclage de l'aluminium

a) Déchets des ouvrages usagés

Il y a trois entreprises qui produisent des lingots régénérés à partir de 1.500 tonnes/an de déchets provenant des ouvrages usagés.

① Récupération de déchets d'aluminium

En raison de sa valeur supérieure à celle des déchets ferreux, les déchets d'aluminium semble être suffisamment récupérés.

## ② Récupérateurs (grossistes) de déchets d'aluminium

D'après l'étude effectuée par le Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire (Etude sur la gestion des déchets encombrant en Tunisie, avril 1996), il existe 42 principaux récupérateurs de déchets, dont 3 seulement traitent les métaux non ferreux y compris l'aluminium. La plupart d'entre eux sont des récupérateurs de déchets ferreux, mais ils traitent parfois, en faible quantité, des métaux non ferreux aussi.

Les quantités annuelles des métaux traités par l'un de ces récupérateurs est comme suit :

Aluminium	200 à 250	tonnes
Cuivre	300 à 400	tonnes
Plomb	1.000	tonnes
Fer	1.000	tonnes
Laiton (alliage de zinc et de cuivre)	50	tonnes
Bronze (alliage d'étain et de cuivre)	80	tonnes

L'estimation du volume total de déchets récupérés annuellement sera mentionnée plus tard.

## ③ Fabricants des lingots régénérés

Ces entreprises utilisent, comme matières brutes, des déchets tels que les pièces d'automobiles (piston, bloc-moteur, etc.), les ustensiles ménagers, les canettes de boisson, les câbles, et les déchets de transformation (plaque, profilé).

(Exemple de la Société A)

Consommation de déchets en tant que matières brutes	: 600 tonnes/an
Production de lingots régénérés	: 500 tonnes/an
Part de l'exportation des produits	: 87 %

La plus grande partie des déchets sont fournis par le grossiste mentionné ci-dessus (ce grossiste est le père du patron de la Société A). Elle n'achète pas de récupérateurs individuels qui apportent en petits lots de 1 à 2 tonnes.

Exemple de la Société B

Consommation de déchets en tant que matières brutes	: 600 tonnes/an
Production de lingots régénérés	: 420 tonnes/an
Part de l'exportation des produits	: 50 %

Cette société est un récupérateur-grossiste de divers métaux (aluminium, plomb, zinc, etc.) qui produit elle-même des lingots régénérés. Ses activités sont détaillées dans le tableau ci-dessous.

Déchets	Rendement	Production
Pièces d'automobile	65 %	15 tonnes de lingots régénérés à partir de 23 tonnes de déchets
Déchets de transformation	90 %	5 tonnes de lingots régénérés à partir de 5,5 tonnes de déchets
Canettes, ustensiles, etc.	65 %	15 tonnes de lingots régénérés à partir de 23 tonnes de déchets

A part ces 2 sociétés, il existe des fonderies de petite taille et des récupérateurs qui fondent les déchets en petit four à creuset pour les réutiliser comme matières brutes, mais ces lingots ne subissent aucun réglage de composante. Ce sont des lingots appelés métaux de base au Japon, qui sont normalement utilisés comme matière brute par les fabricants de lingots régénérés. Cependant, il est quasiment impossible de connaître la quantité totale.

#### b) Déchets de production et de transformation

Suivant une enquête auprès de quelques fabricants de pièces coulées sous pression, de produits extrudés et d'ustensiles ménagers, la récupération et la réutilisation de déchets générés dans l'usine sont très bien effectuées. La plupart des fabricants réutilisent ces déchets tels quels en tant que matières premières dans leur usine.

Exemple d'un fabricant de produits extrudés

A. Lors de la production des billettes :

300 kg de déchets sont générés pour la production d'une tonne de billettes.

B. Lors de l'extrusion :

200 kg de déchets sont générés pour l'extrusion d'une tonne de produits.

Ces déchets sont remis au four de fusion en tant que matière première des billettes. Les fabricants de pièces coulées sous pression réutilisent également les crasses et les bavures en tant que matière première.

#### (5) Schéma macroscopique du flux d'aluminium

La figure 5.3-1 schématise le flux quantitatif d'aluminium estimé à partir de la valeur moyenne des statistiques sur les échanges d'aluminium de ces 5 dernières années (Tableau 5.3-1), des données détaillées sur les échanges en 1997 (Tableau 5.3-2), ainsi que des enquêtes auprès des fabricants susmentionnés.

Le volume total d'aluminium fourni aux entreprises de transformation secondaires s'élève à environ 10.750 tonnes, qui consistent en 3.300 tonnes de lingots importés, en 5.100 tonnes de produits semi-finis importés, en 1.300 tonnes de lingots régénérés, et en 1.100 tonnes de déchets récupérés. En déduisant 600 tonnes de déchets qui y sont générés et recyclés et 1.100 tonnes de lingots destinés à l'exportation, la quantité d'aluminium fourni aux fabricants des produits finis est estimée à 9.050 tonnes. En ce qui concerne les 1.100 tonnes de lingots destinés à l'exportation, la plus grande partie doit être des lingots régénérés, mais la quantité est cependant trop importante. Donc, il semble qu'une partie de lingots neufs importés soit exportée directement à un pays tiers.

Parmi les 9.050 tonnes d'aluminium fourni aux fabricants des produits finis, environ 450 tonnes sont récupérées comme déchets, et 2.300 tonnes sont exportées sous forme de produits finis ou de produits semi-finis. Il reste 6.300 tonnes de produits en aluminium dans le pays, et il y a également 3.500 tonnes de produits en aluminium importés. La quantité d'aluminium distribué finalement sur le marché local est donc estimée à 9.800 tonnes au total.

Par ailleurs, parmi les 2.500 tonnes de déchets récupérés dans le pays, 900 tonnes sont exportées et 1.600 tonnes sont fournies aux fabricants de lingots régénérés. L'équipe d'étude a supposé que les déchets exportés de 900 tonnes soient des déchets des ouvrages usagés, mais il est possible qu'une partie soit des déchets de

transformation récupérés des usines. De toute façon, étant donné que l'accumulation des produits en aluminium n'est pas encore importante dans le pays, le taux de récupération de déchets se situe actuellement à un niveau satisfaisant.

### 5.3.2 Orientation de la promotion du recyclage

Comme il a été susmentionné, le recyclage de l'aluminium est actuellement à un niveau satisfaisant, malgré quelques problèmes qui sont les suivants :

- (1) Impossibilité de recyclage des feuillards d'aluminium et des copeaux d'usinage en lingots régénérés

Il est techniquement impossible de recycler les feuillards d'aluminium et les copeaux d'usinage avec les équipements existants, d'où la nécessité de changer le type du four. Mais comme ceci est une question de la taille d'activité, il faudra encore un certain temps pour résoudre ce problème. Actuellement, les déchets d'aluminium en forme de feuillards et de copeaux sont exportés tel quels.

- (2) Traitement de déchets des matériaux composites (canettes peintes, etc.)

Il s'agit notamment de produits en aluminium qui ont fait l'objet d'un traitement de surface comme une peinture. Le cas de canettes de boissons est typique. Actuellement, la société A limite l'utilisation de ce type de déchets à moins de 6 %, alors que la société B utilise tous les déchets composites ou non. Les déchets peints doivent être démunis de couche peinte avant d'être fondus, d'où la nécessité d'un investissement en biens d'équipement.

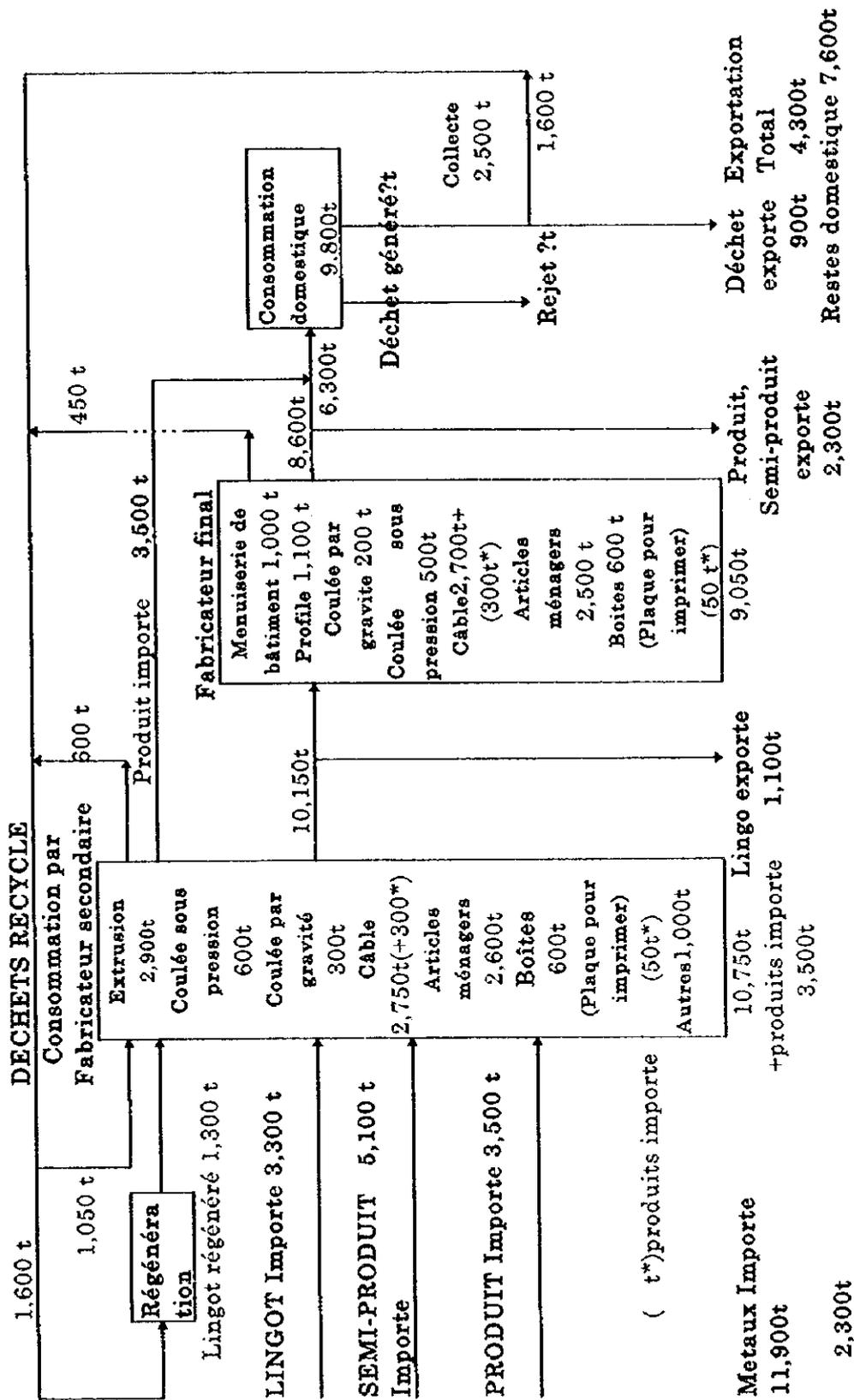
- (3) Traitement de crasses

Lorsque les déchets d'aluminium sont fondus pour la régénération en lingots, environ 20% des déchets introduits au four ressortent sous forme de crasses contenant 60 à 70 % d'aluminium. Au Japon, l'aluminium est récupérable à partir des crasses à un taux d'environ 40% du volume de crasses. En Tunisie, les crasses sont actuellement abandonnées sans abri dans le site d'usine. Mais à cause de la petite taille des entreprises, il n'est pas rentable d'en récupérer les métaux en faisant un investissement en équipement. Cependant, il est fort possible de récupérer une partie importante de teneur en aluminium même manuellement.

- (4) Protection de l'environnement

Etant donné que les crasses qui contiennent de l'azote dégagent du gaz ammoniac nocif à l'environnement quand elles sont mouillées, un traitement convenable est nécessaire.

Fig.5.3.1 SCHEMA MACROSCOPIQUE D'ECOULEMENT DE L'ALUMINIUM EN TUNISIE



#### (5) Exportation des lingots régénérés et des déchets d'aluminium

En 1997, environ 1.500 tonnes de lingots et 900 tonnes de déchets, soit 2.400 tonnes d'aluminium au total ont été exportées. Ce volume dépasse quelque peu celui des lingots importés qui s'élève à 2.300 tonnes. Il faudra examiner s'il vaut mieux les accumuler dans le pays en tant que ressources, ou les exporter en leur ajoutant plus de valeur.

Pour promouvoir désormais le recyclage, il faudra tout d'abord résoudre ces problèmes. Il sera certes difficile d'effectuer des mesures d'amélioration et de promotion qui nécessitent des investissements en biens d'équipement à l'heure actuelle où la taille du marché d'aluminium est encore limitée. Actuellement, des récupérateurs grossistes de petite taille équipés en petits fours à creuset seulement produisent des lingots régénérés, ce qui cause les pertes de métaux et des problèmes au niveau de la qualité des produits. Il serait donc nécessaire, dans le futur, de regrouper les fabricants de lingots régénérés.

Enfin, il reste nécessaire de prévoir et évaluer la quantité de déchets générés pour mieux promouvoir le recyclage. Pour ce faire, il faut obtenir les données sur la production de chaque produit et leur vente sur le marché local, comme il a été dit plus haut. L'établissement rapide d'un système de collecte d'informations est donc nécessaires.

L'équipe propose, pour sa réalisation, d'obliger les entreprises à transmettre au gouvernement les données quantitatives sur la production et la vente ainsi que sur la consommation des matières premières. Il faut aussi que l'Etat encourage la formation et le développement des associations industrielles qui regroupent les entreprises du secteur tel que le façonnage, la récupération, et la fabrication de lingots régénérés en aluminium.

## 5.4 Plomb

En Tunisie, le plomb est extrêmement bien recyclé, malgré des problèmes écologiques au niveau de la récupération et du procédé de recyclage. Presque la totalité du plomb est réutilisée en batteries d'automobiles.

### 5.4.1 Situation actuelle du recyclage

#### (1) Offre en plomb sur le marché tunisien

De même que l'aluminium, le plomb en Tunisie dépend à 100% de l'importation. L'évolution des échanges de lingots, de produits finis et de produits semi-finis en plomb de ces 6 dernières années est indiquée dans le tableau 5.4-1. Les échanges de produits finis et de produits semi-finis sont peu ; en 1997, environ 5.000 tonnes de plomb ont été importées alors que 1.000 tonnes de déchets sont exportées, autrement dit, environ 4.000 tonnes de plomb a été accumulées dans le pays.

Le tableau 5.4-2 montre la décomposition des échanges de produits finis et de produits semi-finis en 1997.

Tableau 5.4-1 Importation et exportation de plomb (1997)

		(Chiffres arrondis) (Unité : tonnes)					
		1992	1993	1994	1995	1996	1997
Importation	Lingots				4.400	5.100	4.800
	Déchets				0	0	0
	Produits				20	21	55
	Total	5.400	2.900	4.200	4.500	5.100	4.800
Exportation	Lingots				45	1	1
	Déchets				1.100	3.000	1.000
	Produits				5	4	21
	Total	47	200	700	1.200	3.000	1.000
Accumulation annuelle		5.400	2.700	3.500	3.300	2.200	3.800
Accumulation totale			8.100	11.600	14.900	17.100	20.900

Tableau 5.4-2 Importation et exportation de produits en plomb par catégorie (1997)  
(unité : tonne)

		Importation	Exportation
Lingots	Lingots de plomb	4.776,9	1,4
Déchets	Déchets de plomb	-	1.022,9
Produit finis et produits semi-finis	Barres, profilés, fils	12,0	-
	Plaques, bandes, feuillards, poudres, paillettes	26,4	-
	Tubes, tuyaux	7,3	-
	Réceptacles/blindage contre la radioactivité	9,2	-
Total de produits finis et produits semi-finis		54,9	20,9
Total général		4.821,8	1.045,2

### (2) Fabrication et consommation de produits en plomb

Au niveau mondial, le plomb est utilisé principalement aux batteries. Au Japon, 70 % de plomb est utilisé pour la fabrication des batteries. La liste ci-après montre les différents usages du plomb.

Batterie	69 %
Réactif inorganique	14 %
Soudure	4 %
Tuyau et plaque	3 %
Gaine de câble électrique	1 %
Autres	9 %

En Tunisie aussi, le plomb est utilisée en grande partie dans les batteries qui sont actuellement fabriquées par 2 entreprises. Toutes les deux entreprises récupèrent les batteries usagées pour les réutiliser comme matière première.

		Société A	Société B
Production	Pour véhicules	190.000 unités/an (100 % pour voitures d'occasion)	400.000 unités/an (8 % pour voitures d'occasion)
	Usage industriel	-	3.000 à 4.000 unités/an
Matière première	Lingots neufs	2.200 tonnes	3.000 tonnes
	Lingots régénérés de batteries usagées	2.000 tonnes	2.000 tonnes
Destination des produits	Marché local	160.000 unités	200.000 unités
	Exportation	30.000 unités	200.000 unités (80 % pour la France)

Presque la totalité des 5.000 tonnes de lingots neufs importés est utilisée par ces 2 sociétés.

### (3) Génération de déchets et leur récupération

D'après la société A, le nombre de batteries usagées générés dans le pays s'élève à 350.000 ~ 400.000 tonnes/an. En supposant qu'une batterie contienne 12 kg de plomb, on peut estimer que 4.200 à 4.800 tonnes de plomb usagé sont générés. Par ailleurs,

d'après la société B, 550.000 batteries/an sont vendues sur le marché local. Compte tenu qu'il faut s'attendre à un nombre équivalent de batteries usagées, le volume de plomb usagé atteindra 5.000 à 6.000 tonnes/an. Le fait que la quantité de plomb récupéré et réutilisé par ces 2 sociétés est d'environ 4.000 tonnes/an au total, montre que la récupération des batteries usagées et le recyclage du plomb sont effectués avec une efficacité excellente (au Japon, les batteries usagées sont presque complètement récupérées).

#### (4) Situation actuelle du recyclage

##### a) Récupérateurs (grossistes) de plomb usagé

Les entreprises de démontage de véhicules usagées et les récupérateurs des déchets de métaux traitent les batteries usagées en même temps que des déchets ferreux ou des déchets métalliques non ferreux. A part les batteries, l'équipe d'étude a remarqué des plaques et des tuyaux en plomb dans les dépôts des récupérateurs.

##### b) Fabricants de batterie recyclée

###### ① Société A

Elle achète, aux entreprises de démontage de batterie usagés, seulement les éléments (batterie démunie du bac et de l'acide sulfurique servant d'électrolyte) régénérables en lingots pour utiliser comme matériau de batteries. Le nombre exact des entreprises de démontage n'est pas disponible, mais cette société en connaît 6. Il existe des entreprises de démontage de petite taille qui agissent illégalement. Par ailleurs, la société A n'achète pas de plomb récupéré et apporté à un petit lot de 1 à 2 tonnes par des récupérateurs individuels.

Les crasses générées dans le procédé de recyclage du plomb sont mises aux décharges, bien qu'elles contiennent 3 à 5 % de plomb.

Les déchets de transformation générés dans le procédé de fabrication des batteries recyclées qui contiennent aussi du plomb sont entièrement réutilisés. La mise en place d'une chaîne de démontage automatique de batteries usagées a été étudiée par la société, mais a été abandonnée à cause de la quantité insuffisante pour être rentable.

###### ② Société B

De même que la société A, elle achète uniquement les éléments pour les mettre au four d'une capacité de 2.000 tonnes/an qui fonctionne 24 heures sur 24 en trois équipes pour récupérer le plomb. Les 1.000 tonnes de crasses générées chaque année sont mises aux décharges publiques. Les poussières générées du four à fondre sont collectées par un dépoussiéreur (filtre à manche) pour les réutiliser en les renvoyant au four. Cette société prévoit la mise en place d'une chaîne de démontage automatique de batteries usagées dans un proche avenir. Etant donné la capacité importante de cette installation qui atteint 5 tonnes/h, elle est en train d'étudier l'importation de batteries usagées.

##### c) Exemple d'un récupérateur (grossiste) qui s'occupe du recyclage de plomb

Lors de la visite d'un fabricant de lingots d'aluminium régénérés qui est en même temps récupérateur (grossiste) des déchets de métaux, l'équipe a appris qu'il faisait également fondre chaque mois 22 tonnes de plaques et tuyaux usagés en plomb dans un

petit four à creuset pour récupérer 20 tonnes de plomb, pour laminier en une bande peu large afin de l'expédier en forme de bobine. Ces bandes sont utilisées dans les hôpitaux comme protection contre l'irradiation.

#### (5) Schéma macroscopique du flux de plomb

La figure 5.4-1 montre le schéma macroscopique du flux de plomb élaboré d'après les chiffres statistiques des échanges de 1997.

### 5.4.2 Orientation pour la promotion du recyclage

Bien que le recyclage soit déjà actuellement à un niveau excellent, il engendre divers problèmes comme ceux mentionnés ci-après. Comme on peut penser que ces problèmes s'aggravent à mesure que l'accumulation nationale du plomb s'accroît et que le marché s'élargit, il s'avère indispensable de trouver la solution à chaque problème tout en l'appliquant afin de faire avancer davantage le recyclage.

#### (1) Démontage de batteries usagées

Actuellement, presque tous les entreprises de démontage de petite taille traitent les batteries sans aucun souci de la pollution de l'environnement par l'acide sulfurique contenu. Il faut que les autorités compétentes intervienne le plus tôt possible pour qu'elles prennent des mesures contre la pollution. Si possible, il est souhaitable de démonter les batteries dans un établissement de démontage automatique équipé des installations écologiques, comme pratiqué dans les pays industrialisés. La figure 5.4-2 montre le procédé ordinaire du démontage de batteries usagées et du recyclage du plomb, incluant des mesures écologiques.

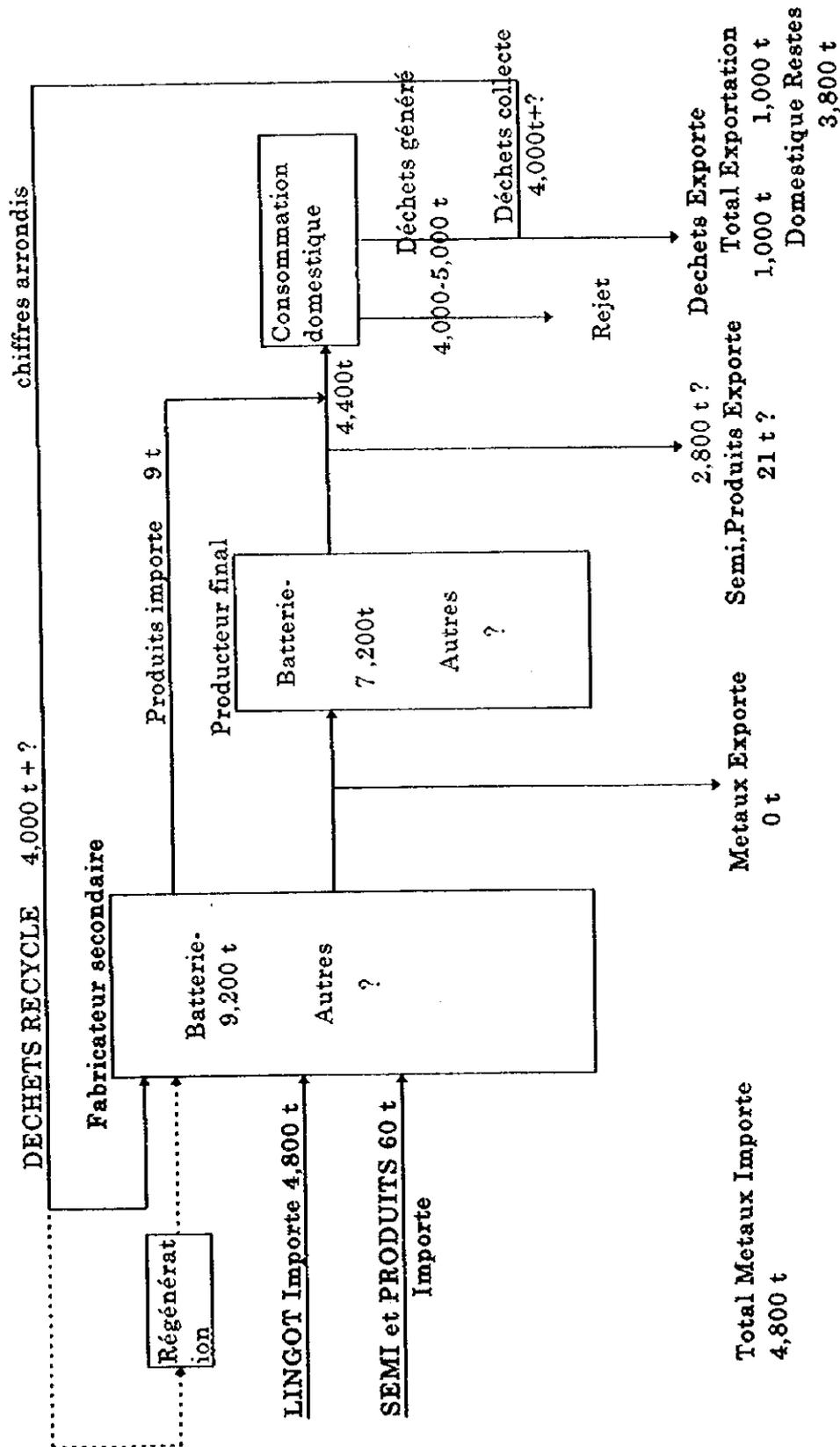
#### (2) Problème environnemental issu de la récupération de plomb à partir des batteries usagées

Le procédé de récupération de plomb à partir des batteries usagées dégage des fumées comprenant du plomb qui est nocives à la santé, ainsi que du gaz anhydride sulfureux et des poussières. Il existe des cas où ces procédés sont effectués avec des mesures insuffisantes au niveau de la protection de l'environnement à l'intérieur et à l'extérieur du site. Dans l'état actuel, des effets sur la santé des travailleurs peuvent se produire.

#### (3) Problème technique de récupération du plomb à partir de batteries usagées

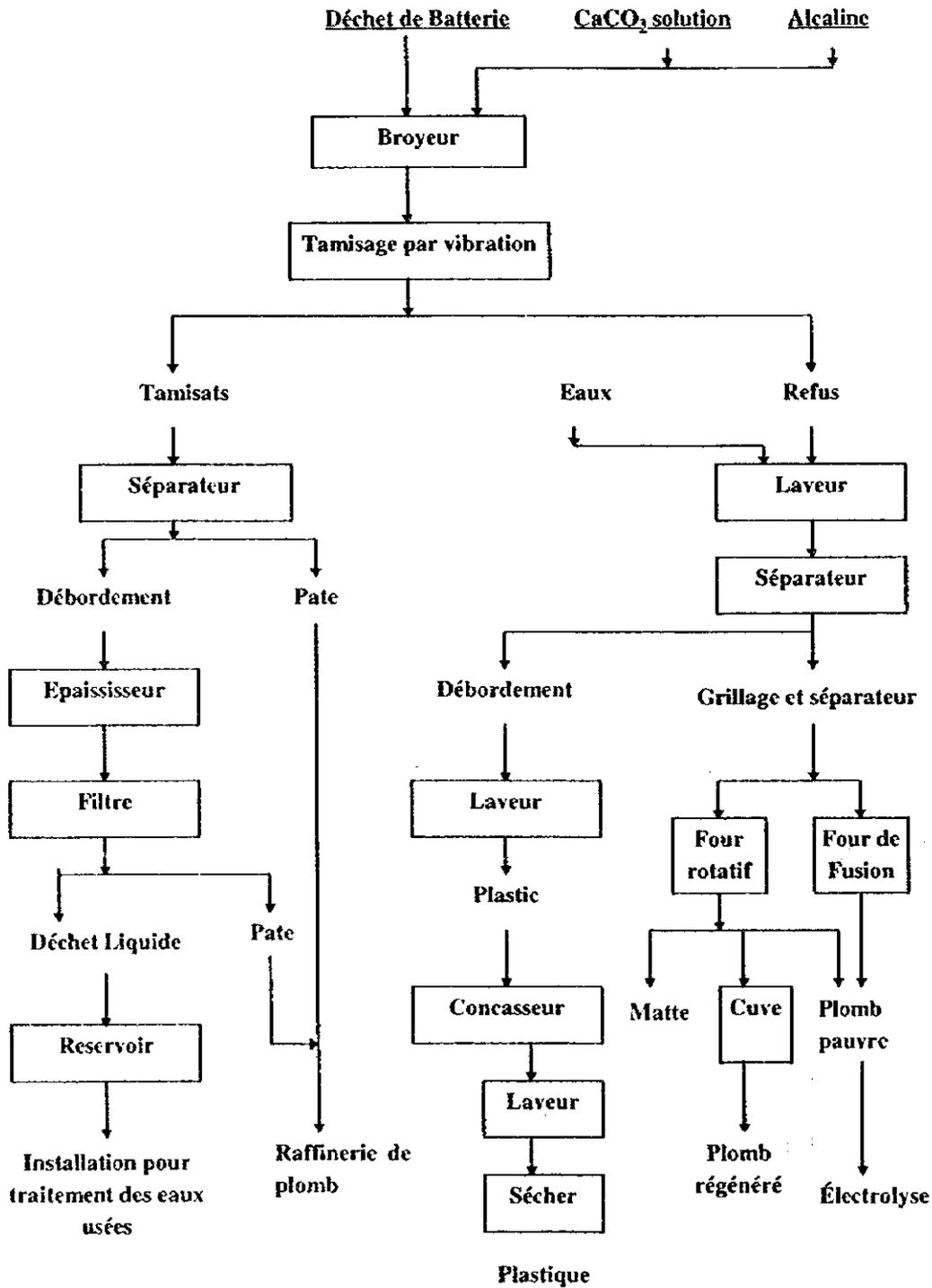
Le nouveau type de batterie qui ne demande pas de maintenance est devenu courant ces dernières années. Ce type de batterie utilise le calcium au lieu de l'antimoine qui est utilisé dans les batteries ordinaires. En Tunisie, comme les batteries contenant du calcium sont encore peu nombreuses, il n'est pas nécessaire de les recycler séparément. Mais dans un futur proche, il faudra envisager la récupération sélective.

Fig. 5.4.1 SCHEMA MACROSCOPIQUE D'ECOULEMENT DU PLOMB EN TUNISIE (1997)



**Fig.5.4.2 Schéma de Démontage de Batteries Usées**

**et régénération de métal**



## 5.5 Zinc

### 5.5.1 Situation actuelle du recyclage

#### (1) Offre en zinc sur le marché tunisien

La Tunisie, bien qu'elle ait des ressources en plomb et en zinc, importe la totalité du zinc sous forme de lingots, de produits finis et de produits semi-finis, en raison de l'absence des installations de raffinage. Les statistiques des échanges commerciaux de ces 6 dernières années figurent dans le tableau 5.5-1. En 1997, 6.500 tonnes de lingots et 400 tonnes de produits finis et produits semi-finis, soit presque 7.000 tonnes de zinc ont été importées au total, tandis que 700 tonnes de déchets et environ 100 tonnes de produits finis et produits semi-finis, soit ensemble 800 tonnes de zinc ont été exportées. L'accumulation annuelle de zinc a été d'environ 6.000 tonnes.

La décomposition de l'importation et de l'exportation de produits finis et produits semi-finis en 1997 est indiquée dans le Tableau 5.5-2.

Tableau 5.5-1 Statistiques de l'importation et l'exportation de zinc

		Unité: tonnes					
		1992	1993	1994	1995	1996	1997
Importation	Lingots				5.000	5.600	6.500
	Déchets				200	0	0
	Produits				400	400	400
	Total	5.400	3.700	5.600	5.500	4.000	6.900
Exportation	Lingots				0	0	0
	Déchets				800	400	700
	Produits				4	60	94
	Total	600	2.200	4.100	800	400	800
Accumulation annuelle		4.800	1.500	1.500	4.700	3.500	6.100
Accumulation totale			6.300	7.800	12.500	16.000	22.100

Tableau 5.5-2 Importation et exportation de produits en zinc (par catégorie)  
(1997) (unité : tonne) (chiffres arrondis)

		Importation	Exportation
Lingots	Lingots de zinc	6.513,6	-
Déchets	Déchets de zinc	-	668,0
Produits finis et produits semi-finis	Poudres, paillettes	21,5	94,0
	Barres, profilés, fils	92,2	-
	Plaques, bandes, feuillards	103,9	-
	Tubes, tuyaux et leurs accessoires	0,7	-
	Gouttières, toiture, fenêtres, autres ouvrages pour bâtiment	166,2	0,5
Total de produits finis et produits semi-finis		384,4	94,5
Total général		6.898,0	762,5

(2) Production et consommation

Au Japon, le zinc est utilisé principalement pour la galvanisation des plaques et des ouvrages d'acier ce qui représente 66 % de la demande totale. La coulée sous pression (12 %) occupe la deuxième place, suivie de la vulcanisation de pneus (11 %). En Europe, il est utilisé également comme matériau de toiture. En Tunisie, de même qu'au Japon, la galvanisation occupe la première place des usagers du zinc, suivie de la coulée sous pression. Par ailleurs, le zinc est utilisé à la production du laiton dans les fonderies de cuivre ou dans les usines de produits métalliques, à un petit lot d'une à deux tonnes.

Les exemples des usines tunisiennes utilisant le zinc sont présentés ci-après.

a) Coulée sous pression, Société A

Production	350 à 400 tonnes/an
Gamme de produits	Poignets de portes, crochets, accessoires de salle de bain, pièces d'automobiles (rétroviseurs, guides d'amortisseur)
Destination	80 % à la vente sur le marché local, 20 % à l'exportation
Matière brute	Zamac (alliage de zinc) 400 à 500 tonnes / an importé de la France, de la Belgique, de l'Allemagne, etc.
Nombre de sociétés	3 sociétés (Société A y comprise)
Consommation	800 à 900 tonnes/an de zamac au total des 3 sociétés
Déchets de zinc	Crasses de zamac générées des fours à fondre (volume équivalent à 8-9 % de celui du zamac utilisé) Déchets provenant des machines à coulée sous pression. Produits défectueux de galvanisation

#### b) Galvanisation, Société B

Production (capacité de galvanisation)	5.000 tonnes / an
Gamme de produits	Production de conduites en acier pour irrigation et leur galvanisation, galvanisation de divers pièces sur commande (poteaux électriques en profilé, etc.)
Consommation de zinc	Galvanisation des conduites : 200 tonnes/an Galvanisation des autres pièces : 300 tonnes
Déchets de zinc	Mattes : 60 tonnes/an (Teneur en zinc : 60 à 70 %) Cendre : 150 tonnes/an (Teneur en zinc : 30 à 35 %)

#### c) Galvanisation, Société C

Production et gamme de produits	Galvanisation de plaques d'acier (600 à 1.500 mm de largeur) : 82.000 à 83.000 tonnes/an (Les plaques sont importées de l'Italie, de l'Espagne, de la Grèce, etc. sous forme de bobine. La totalité des plaques galvanisées à chaud, à une épaisseur de 30 micromètres, est exportée en Italie (à la zone franche)
Consommation de zinc	3.000 tonnes/an environ (importé de l'Italie)

#### (3) Production et récupération de déchets

Le zinc utilisé à la galvanisation apparaît dans les poussières générées par le four électrique où les produits en acier galvanisé qui sont introduits pour la récupération du fer. Le zinc s'évapore par la chaleur du four pour être capté au dépoussiéreur. Dans les pays industrialisés comme le Japon, le zinc est récupéré à partir de ces poussières.

La génération de déchets provenant des produits coulés sous pression reste inconnue car les données sur les genres et les quantités de produits accumulés jusqu'à présent ne sont pas disponibles. La quantité de zinc récupéré n'est pas non plus disponible.

#### (4) Situation actuelle du recyclage

##### a) Récupération de déchets

Les récupérateurs de déchets traitent le zinc à côté d'autres métaux.

##### b) Recyclage en lingots

Le récupérateur grossiste D recycle chaque année 50 tonnes de zinc en lingots qu'il vend à la fonderie de cuivre en tant que matière brute pour la fabrication du laiton. Ce récupérateur exporte chaque année 100 tonnes de matte et cendre de galvanisation, ou bien de crasses générés dans l'usine de coulée sous pression.

Une telle production de lingots régénérés à partir des déchets semble être effectuée en faible dimension par quelques récupérateurs grossistes.

c) Procédé de la coulée sous pression

Concernant la société A susmentionnée, les crasses produites dans la production de pièces coulées sous pression sont toutes exportées après avoir fait récupérer le zinc par une autre société (teneur en zinc d'environ 15 %). Les débris de la machine à coulée sous pression et de produits galvanisés défectueux sont fondus dans le petit four de l'usine pour recycler le zinc sous forme de lingots.

d) Recyclage de déchets produits dans le procédé de galvanisation

Une matte contenant 60 à 70 % de zinc (descendue au fond du bac de galvanisation) et des cendres dont la teneur en zinc est de 30 à 35 % (dispersées autour du bac de galvanisation) sont générées au cours de la galvanisation à chaud. Ces déchets sont exportés pour la récupération du zinc.

(5) Schéma macroscopique du flux de zinc

La figure 5.5-1 montre le schéma macroscopique du flux de zinc. Parmi les 7.000 tonnes de lingots importés, 70 % sont consommées à la galvanisation et le reste serait façonné en produits coulés sous pression. Les produits galvanisés produisent uniquement des ferrailles, et les déchets de zinc proviennent uniquement des produits coulés sous pression.

Le peu de déchets régénérés en lingots est utilisé comme matière brute à la production d'alliage de cuivre (laiton).

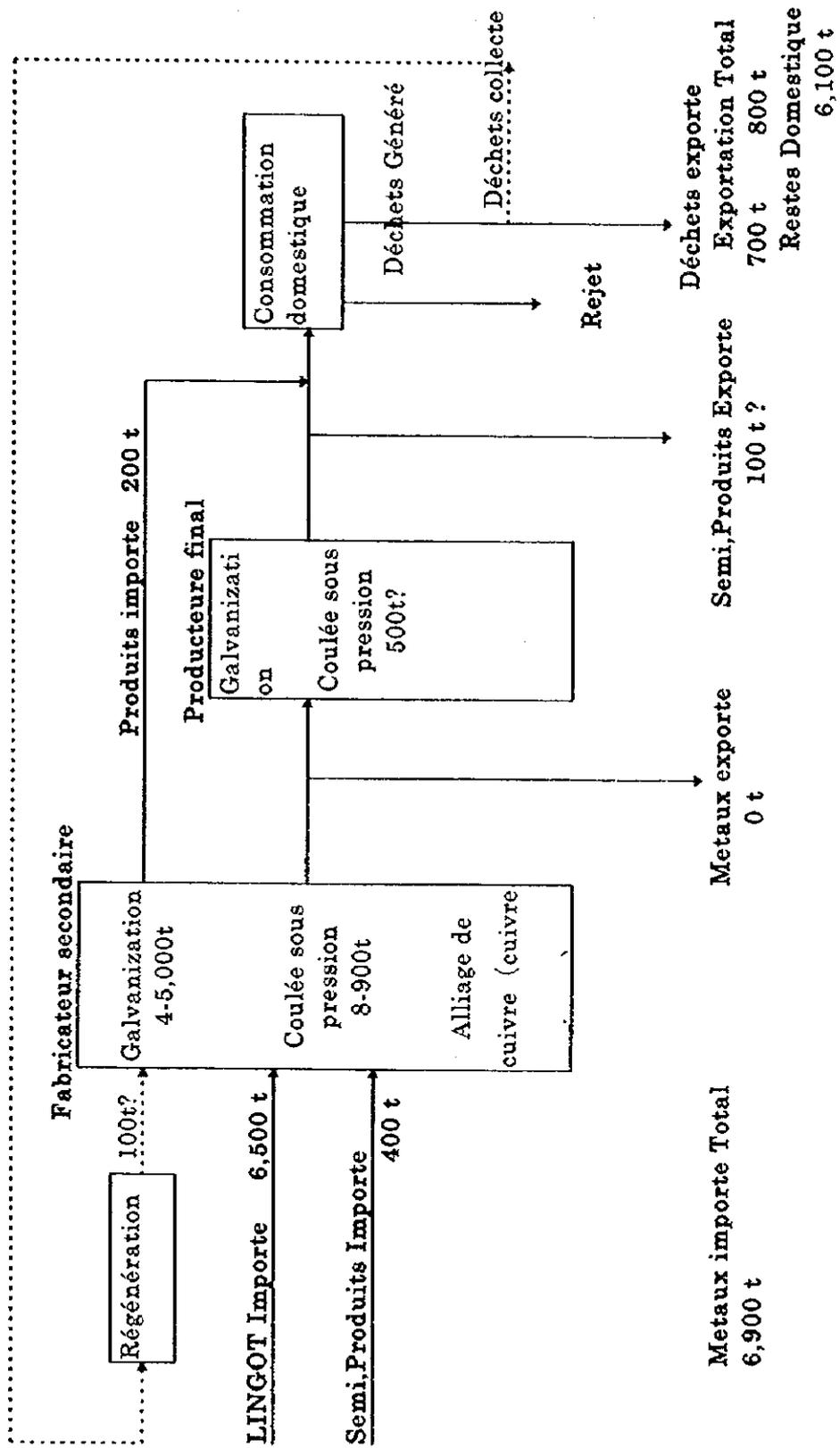
### 5.5.2 Orientation de la promotion de recyclage

Au Japon, le lingots régénérés à partir des pièces coulées sous pression n'est pas recommandé pour la coulée sous pression en raison de ses impuretés (Pb, Cd).

L'idéal du recyclage de zinc est de récupérer le zinc à l'intérieur du pays à partir des mattes et cendres de galvanisation ainsi que des crasses, alors que ces déchets sont actuellement exportés pour la récupération du zinc, mais compte tenu des investissements en biens d'équipement et technologie, et au vu de la faible quantité à traiter, sa réalisation ne sera possible que dans le futur.

Par ailleurs, la récupération du zinc à partir des tôles effectuée dans les pays industrialisés serait difficile à envisager pour la Tunisie où le four électrique des usines ne dispose pas de dépoussiéreur, et où il n'y a pas d'usine métallurgique de zinc.

Fig. 5.5.1 SCHEMA MACROSCOPIQUE D'ECOULEMENT DU ZINC EN TUNISIE(1997)  
(chiffres arrandis)



## 5.6 Plastique

### 5.6.1 Génération et recyclage des déchets par les générateurs

L'industrie pétrochimique n'est pas développée en Tunisie. Cependant, la consommation en plastique étant en hausse ces dernières années, l'industrie transformatrice de plastique connaît un développement rapide. Les entreprises tunisiennes dépendent des produits semi-finis du polyéthylène, du polystyrène, du polypropylène ou du PVC importés sous forme de grains, de pastilles ou de poudre. Le tableau 5.6-1 montre la production locale et la quantité de matières plastiques consommées par l'industrie tunisienne transformatrice ainsi que la consommation de produits en plastique.

Tableau 5.6-1 Importation et consommation de plastique

	(Unité : tonnes / an)		
	1995	1996	1997
Importation de matières plastiques	121.200	134.500	140.900
Production (transformation en produits)	126.000	140.000	145.000
Consommation de produits en plastique	140.000	157.000	170.000

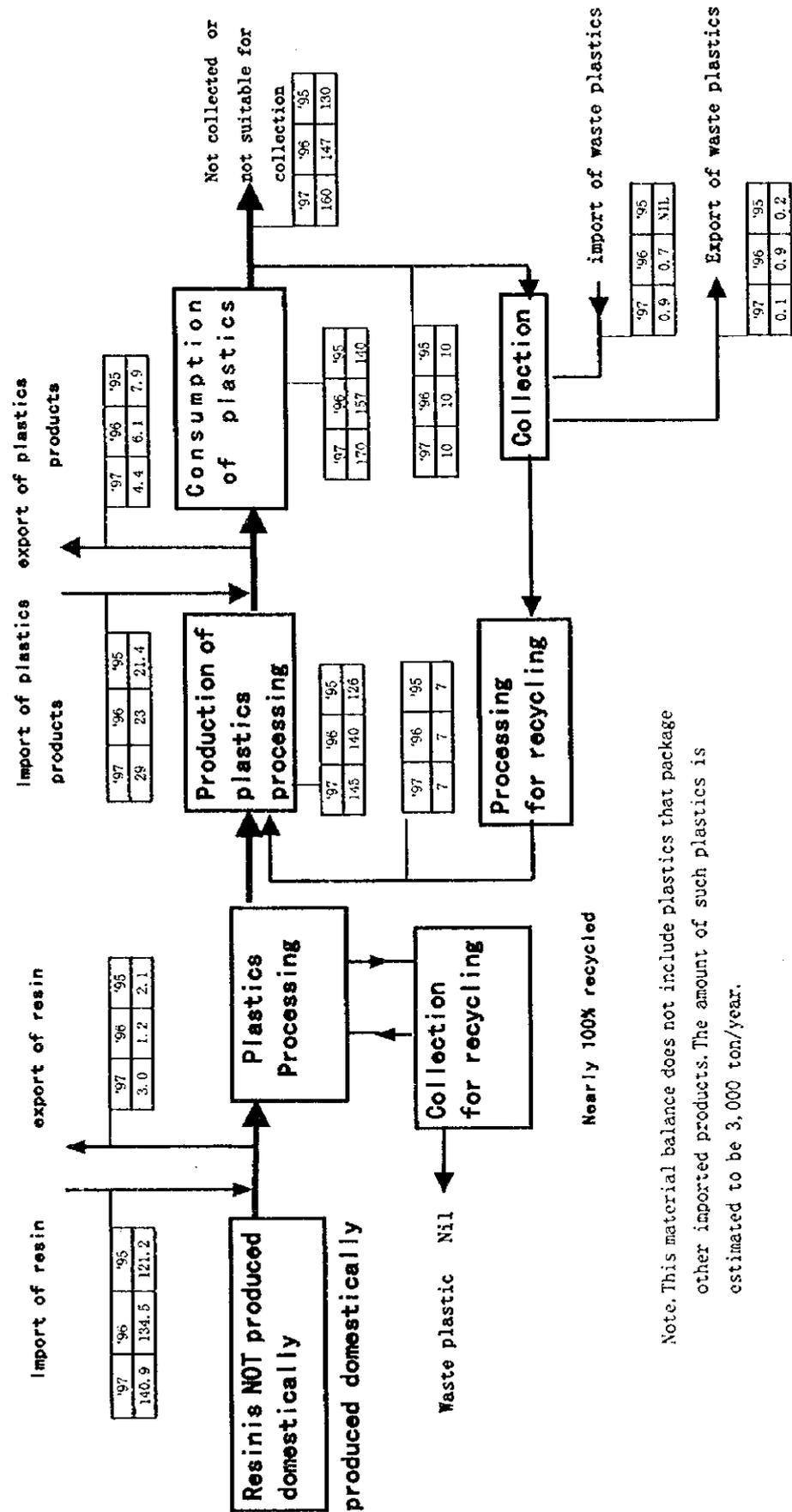
La consommation s'est accrue chaque année en raison de 10 % durant ces trois ans. C'est un taux d'accroissement important. Il y a une petite quantité de déchets de transformation des résines plastiques, mais presque la totalité de ces déchets est recyclée sans rejeter à l'extérieur des usines. A l'étape du recyclage, les thermoplastiques sont recyclés séparément par type de résines plastiques, mais environ 10 % sont les matières non recyclables en raison de son usure et de la présence des impuretés.

### 5.6.2 Situation actuelle des récupérateurs et des recycleurs

Au niveau du recyclage de plastique en Tunisie, les récupérateurs sont en même temps les recycleurs, car les entreprises de recyclage s'occupent de la récupération elles-mêmes. Les déchets de plastique sont récupérés directement des sources de génération telles que les usines d'alimentation, de transformation des résines, de polyéthylène agricole et de shampoing. Le prix du plastique récupéré pour le recyclage s'élève à 400-600 DT/tonne, tandis que celui des matières brutes vierges est de 800 à 1.000 DT/tonne, ce qui rend les activités des entreprises de recyclage extrêmement difficiles. Il y a quelques usines traitant moins de 1.000 tonnes/an dont la plupart procèdent à la régénération simple, et parfois au recyclage des plastiques usagés en produits combinés tels que les caisses pour des bouteilles, les seaux, les tambours, les brosses, etc. mais d'une qualité relativement basse.

Figure 5.6-1 Material Balance of Plastics in Tunisia

Unit: 1,000 ton/year



Note. This material balance does not include plastics that package other imported products. The amount of such plastics is estimated to be 3,000 ton/year.

Tableau 5.6-2 Quantite d'exportation/importation des materiaux plastique

	tonnes/an											
	1995				1996				1997			
	Import	Export	Consom	Import	Export	Consom	Import	Export	Consom	Import	Export	Consom
Poluethylene	46.700	nil	46.700	54.700	100	54.600	58.800	100	58.700	58.800	100	58.700
Polypropylene	14.900	nil	14.900	18.400	200	18.200	17.700	nil	17.700	17.700	nil	17.700
Polystyrene	9.300	nil	9.300	10.400	nil	10.400	8.900	nil	8.900	8.900	nil	8.900
Chlorure de vinyle	26.200	200	26.000	30.800	200	30.600	28.900	nil	28.900	28.900	nil	28.900
Plastique acrylique	2.100	100	2.000	2.300	nil	2.300	2.600	nil	2.600	2.600	nil	2.600
Polysesster etc.	7.000	400	6.600	6.900	200	6.700	10.300	600	9.700	10.300	600	9.700
Polyurethane etc.	8.400	nil	8.400	7.400	nil	7.400	9.400	0	9.400	9.400	0	9.400
Acetate etc.	1.600	200	1.400	1.700	300	1.400	2.000	100	1.900	2.000	100	1.900
Autres	5.000	1.200	3.800	1.900	200	1.700	2.300	2.200	2.200	2.300	2.200	100
Total	121.200	2.100	119.100	134.500	1.200	133.300	140.900	3.000	137.900	140.900	3.000	137.900

Note  
 L'industrie petrochimique de la Tunisie n'etant pas developpee, les materiaux plastiques dependent  
 entirement de l'importation.  
 La case "Production locale" a ete supprimee.  
 Ces Materiaux plastiques proviennent en grande partie des pays de Proche et Moyen Orient.

Tableau 5.6-3 Quantité d'importation / exportation des produits plastiques

tonnes/an

	1995			1996			1997		
	Import	Export	Consom	Import	Export	Consom	Import	Export	Consom
Plastique Tuyaux	1.600	300	1.300	2.300	600	1.700	2.600	700	1.900
Plastique Planche, Feuille, Ruban	9.700	4.100	5.600	9.500	2.000	7.500	11.300	800	10.500
Plastic Boite, Sac, Bouteille	3.600	1.400	2.200	4.000	1.200	2.800	4.900	1.000	3.900
Plastique materiel d'emballage interieur	400	0	400	400	nil	400	700	nil	700
Articles divers menagers, Couvert etc.	300	nil	300	400	nil	400	500	nil	500
Plastic Dechets, Déjection	nil	200	-200	700	900	-200	900	100	800
Autres	5.800	1.900	3.900	5.900	1.400	4.500	8.100	1.800	6.300
Total	21.400	7.900	13.500	23.200	6.100	17.100	29.000	4.400	24.600

Tableau 5.6-4 Prix des matériaux et des produits plastiques d'importation/exportation

\*PÈ F DT/ton

Categorie	Prix d'importation	Tarif douanier (%)	Taux de TVA (%)	Prix d'exportation	Remarques
Polyethylene	990 -1045	20	17	1145	
Polypropylene	877	20	17	-	
Polystyrene	875	20	17	-	
Chlorure de vinyle	806	20	17	-	
Plastique acryle	1369-2838	20	17	-	
Polyester	1172	20	17	-	
Polyurethane	2341	30	17	-	
Tuyaux en Polyethylene	2453	31	17	2210	
Tuyaux en polypropylene	5652	31	17	-	
Dechets Polyethylene	169	20	17	-	
Dechets Polystyrene	-	20	17	368	
Dechets Clorure de vinyle	282	20	17	-	

### **5.6.3 Filière de recyclage, traitement et élimination**

En Tunisie, le recyclage de plastique le plus pratiqué est la régénération simple comme susmentionné. Le circuit de recyclage, de traitement et de rejet est indiqué dans le schéma macroscopique du flux de plastique ci-après. La quantité annuelle de plastique recyclé est de quelques milliers à une dizaine de milliers de tonnes, ce qui ne représente qu'environ 5 % de la consommation. La quantité de plastique recyclé s'accroîtra largement par la promotion de valorisation énergétique.

### **5.6.4 Mesures préconisées au niveau de la génération**

En cas de la régénération simple, il faut éviter les impuretés et le mélange des résines de différents types. Les déchets de plastique d'un seul type de résine sont des matières précieuses comme matériau à recycler. Pour cela, il faut prendre soin de ne pas mélanger des impuretés ou des résines de différents types au niveau de la génération des déchets de plastique. Par ailleurs, les fabricants doivent s'efforcer à améliorer leurs technologies pour donner une meilleure qualité à la résine, en augmentant la résistance au choc par l'ajout des additifs par exemple.

### **5.6.5 Aménagement du système de récupération**

Actuellement, il est difficile de développer les débouchés de produits recyclés de plastique en régénération simple en raison de leur qualité médiocre, ce qui rend la gestion des entreprises de recyclage difficiles. Comme le développement du recyclage de plastique est limité, en régénération simple comme en régénération combiné, la valorisation énergétique sera dans un proche avenir le courant principal même en Tunisie. C'est à ce moment-là qu'il faut établir un véritable système de récupération. Il faudra également aménager des unités pour la réduction du volume de déchets de plastique afin de faciliter leur transport.

### **5.6.6 Techniques et procédés de recyclage**

Il existe plusieurs méthodes pour le recyclage des déchets de plastique ; grosso modo, la régénération et la valorisation énergétique. Il y a deux modalités de régénération, comme pratiquée en Tunisie, la régénération simple et la régénération combiné. La valorisation énergétique est la réutilisation des déchets de plastique sous forme de liquide thermolysé ou de combustible solide, ou bien tels quels pour avoir la chaleur d'incinération. Le recyclage du plastique a soulevé diverses discussions dans le monde entier, mais le coût du recyclage tient toujours la clé de la faisabilité. La majorité des pays s'orientent depuis quelques temps vers la valorisation énergétique en tant que source de chaleur dans les usines sidérurgiques, les cimenteries, ou les centrales électriques.

La consommation de produits en plastique en Tunisie était de 170.000 tonnes/an en 1997, ce qui est 60 fois inférieur à celle du Japon (9.660.000 tonnes/an en 1994). Mais elle tend à s'accroître rapidement à un taux de 10 % par an ces trois ans, d'où l'importance de la promotion de son recyclage. Pour référence dans l'élaboration des mesures à prendre, la situation actuelle du recyclage au Japon est résumée ci-dessous.

(1) Production et usages des principales matières plastiques au Japon

Le tableau 5.6-5 présente les données sur la production et l'usage des principales matières plastiques au Japon par type de résine.

Tableau 5.6-5 Usages et production de principales matières plastiques au Japon

(en 1995) (unité : tonne)

Type de plastique	Usages	Production
Téréphtalate de polyéthylène (PET)	Pellicules, bandes magnétiques (vidéo), Cassettes, Bouteilles en PET	610.000 (4%)
Polyéthylène haute densité	Bidons d'huile, bouteilles, articles ménagers, conteneurs, filets de pêche, cordes	1.2440.000 (9%)
Polychlorure de vinyle	Films d'emballage, bâches agricoles, pellicules, bouteilles, paquets à œufs, conduites d'eau, tôles ondulées, planche, textiles, gaines de câbles électriques	2.270.000 (16%)
Polyéthylène basse densité	Sachets en plastique, matériau stratifié, gaines de câbles électriques et de communication	1.950.000 (14%)
Polypropylène	Baignoire, articles sanitaire, conteneurs, récipients, gourdes, matériaux d'emballages, appareils électriques, seringue, cordes, pièces de machines et d'automobiles	2.500.000 (18%)
Polystyrène	Boîte d'appareils électriques, boîte à cassette, plateaux, pièces électriques, outils de jardinage, polystyrène expansé, articles divers	1.480.000 (11%)
Résine ABS	Boîte d'appareils électriques, jouets, pièces d'automobile	540.000 (4%)
Résine AS, Résine pétrolière, Alcool polyvinylique, Résine méthacrylique, Polycarbonate, Polyamide (Nylon) etc.	Stylos, couvercles transparentes de récipients Produit d'enrobage, peinture, encre Films d'emballage alimentaire, textiles Panneaux, aquariums Pièce de machines, biberons Filets de pêche, cordes et cordons (pneus), biberon, pièces de machines	1.550.000 (11%)
Résine phénolique  Résine d'urée Résine mélamine Résine polyester non-saturé Mousse polyuréthane Résine époxy etc.	Base de circuit imprimé, pièces de machines, colle et peinture  Bouton, capuchons, colle pour contre-plaqué Articles ménagers, instrument de circuit, Plastique renforcé, baignoires, bateau de pêche, yachts  Matériau de charge, éponges artificielles Résine époxy, etc.	1.890.000 (13%)
Total		14.030.000 (100 %)

Source : Tokyo Recycle Handbook 1997 (Direction de la Propreté, Municipalité de Tokyo)

Le tableau 5.6-6 ci-dessous montre la proportion des usages de produits en plastique.

Tableau 5.6-6 Proportion des usages au Japon (1994)

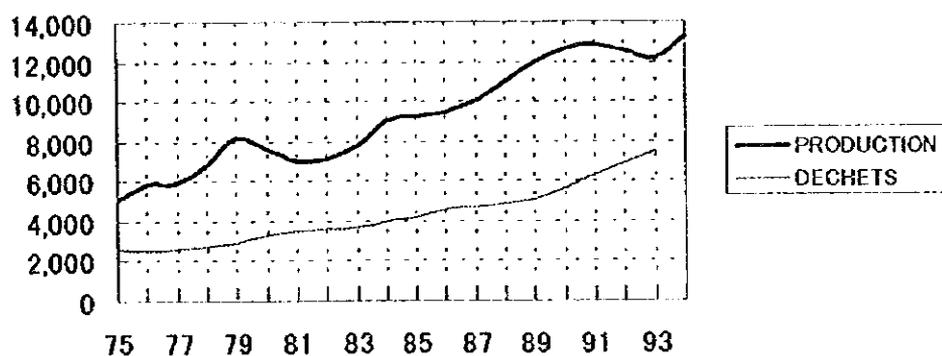
Films d'emballages	37,1 %
Pièces de machines et appareils	12,7 %
Tuyaux, joints	11,9 %
Produits expansés	7,8 %
Articles ménagers	5,4 %
Matériaux de construction	5,2 %
Récipients	4,9 %
Cuir artificiel	3,6 %
Plaques	2,7 %
Produits renforcés	1,8 %
Autres	6,9 %

Source : Connaissance de base sur le recyclage du plastique,  
Association pour la promotion du traitement de plastique

## (2) Evolution du volume de produits et de déchets en plastique

La figure 5.6-2 présente l'évolution du volume de produits et de déchets en plastique de ces 20 dernières années. La production et la quantité de déchets ont doublé durant ces 10 dernières années.

Figure 5.6-2



(Unités : 1.000 tonnes/an)

Figure 5.6-2 Evolution du volume de produits et de déchets en plastique

Source : Connaissance de base sur le recyclage du plastique,  
Association pour la promotion du traitement de plastique

Les listes ci-dessous présente la proportion des produits en plastique, à titre d'exemple, respectivement par catégorie de produits et par types de résines plastiques, mis en décharge comme déchets combustibles à la ville de Funabashi en 1993.

Proportion pas catégorie de produits	(%)
Films d'emballages, sachets	39,3
Bouteille	20,4
Verres, plateaux	17,2
Autres que récipient et emballage	12,0
Récipient et emballage divers	9,2
Corde	1,9

Proportion par types de résines plastiques	(%)
Polyéthylène	38,4
Polystyrène	18,2
Polypropylène	12,9
PET	9,9
Résine PVC	6,9
Divers	13,7

Source : Rapport de l'étude de base sur les matières plastiques pour le recyclage de déchets urbains, Association pour la promotion du traitement de plastique, mars 1994

### (3) Réalité des produits et déchets en plastique, et du recyclage

Comme le montre la figure 5.6-3 présentant le flux de plastique, le volume de plastique usagé qui est recyclé soit en matériaux soit en produits ne représente que 10 % du volume total mis en décharge en 1994. Le taux de valorisation n'est que de 23 %, même en incluant la part utilisée comme combustible dans les centres électriques.

Les problèmes à résoudre restent encore dans les domaines de la collecte et du tri de déchets de plastique, des technologies de réutilisation, et surtout du coût de régénération et valorisation, ainsi que du développement des circuits de distribution des produits recyclés.

### (4) Exemples d'utilisation efficace de déchets de plastique

Comme le présente la figure 5.6-3, les méthodes pratiquées pour valoriser les déchets de plastique sont les suivantes.

#### a) Régénération en matériaux de produits recyclés

Il s'agit de la régénération des déchets et copeaux de plastique générés dans les industries de transformation ou bien dans les usines utilisant des pièces en plastique. Ces déchets sont transformés en granulés comme ceux de la résine vierge pour utiliser à la fabrication des produits. Plus concrètement, des coussins d'emballage et des caisses de poissons sont fondus en blocs pour être transportés aux usines de régénération de plastique où ces blocs sont recyclés en granulés utilisables comme matière brute. Une telle manière de réutilisation est largement pratiquée.

Par ailleurs, les bouteilles en PET qui sont rapidement répandues comme récipient de boisson, sont classées comme produits de deuxième classe dans la loi relative au recyclage. Les bouteilles récupérées sont recyclées en résine de PET en forme de flocon pour être réutilisées à la production de tapis, de fibres et d'articles moulés.

b) Régénération en produits transformés recyclés

Les déchets de produits usagés en plastiques peuvent être recyclés en matériaux du génie civil tels que les panneaux d'indication, les poteaux de bornage, les matelas pour des routes, les supports d'arbres d'alignement, les bouches d'égout, les couvercles de regards, les grillages, les bancs dans des parcs, etc. ainsi qu'en matériaux d'emballage comme les palettes, les conteneurs, les boîtes à outils, ou bien en pots à pulpe d'usage halieutique.

c) Valorisation énergétique

La modalité du recyclage de déchets de plastique la plus avantageuse du point de vue de coût et de compétitivité sur le marché, pour le moment, est la valorisation énergétique comme combustible alternatif de fours à ciment, de centrales électriques (les déchets peuvent être incinérés avec des déchets ménagers), ou de hauts fourneaux dans des usines sidérurgiques. Par ailleurs, des techniques de leur transformation en combustible solide sont mises au point, et seront pratiquées, pour faciliter le stockage et le transport.

(5) Techniques de recyclage

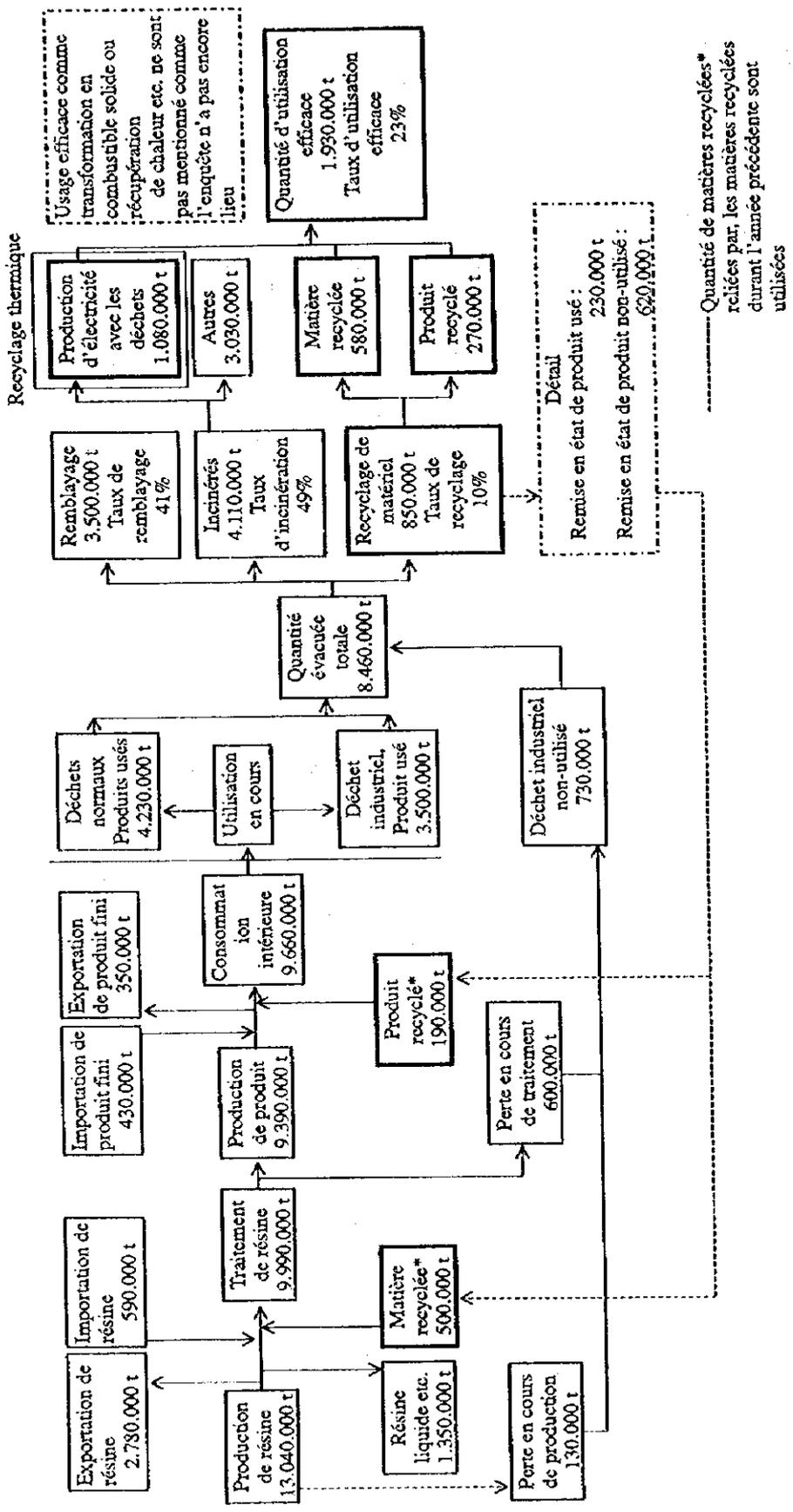
a) Régénération en grains de résine

Les déchets de matières plastiques tels que les ébarbures et les produits défectueux ou hors de série, ainsi que les produits usagés en polystyrène expansé sont régénérables en grains de résine. Le procédé de régénération consiste en tri par type de résine, en élimination des impuretés, en broyage et en ajout du colorant, du stabilisant et de l'agent de consolidation (qui consolide la matière et facilite sa transformation).

b) Transformation en produits recyclés

Ce mode de recyclage consiste en trois procédés ; le prétraitement, la fonte et le moulage. A la première étape, les déchets de plastique subissent des traitements tels que le tri par type de résine et par forme, l'élimination des impuretés, la déshydratation et le séchage. Ensuite, ils sont broyés et formés comme grains ou flocons. Les entreprises de régénération fournissent le plastique ainsi prétraité aux usines de transformation. A l'étape de la fonte, les matériaux séparément fournis par type de résine sont mélangés de nouveau selon la nature à obtenir des produits, en y ajoutant du colorant ou des matières organiques selon la nécessité. Et à l'étape du moulage, la matière plastique fondue et pétrie est formée en produits en utilisant des moules ou des rouleaux.

La figure 5.6-4 présente le flux de procédés de ce type de recyclage.



Source: Fondation d'accélération du traitement plastique

Figure 5.6-2 Schéma du flux de plastique (de la production jusqu'à la valorisation) au Japon

#### c) Technique de liquéfaction

Les technologies de thermolyse de plastique pour obtenir des carburants liquides tels que l'essence, le mazout, le gasoil, ou le kérosène sont en voie de développement. Il existe quelques exemples de la mise en pratique à petite taille, mais ce mode de recyclage n'est pas encore répandu en raison du coût élevé.

Le développement des technologies est en cours en visant à liquéfier simultanément les matières plastiques de divers type contenues dans les déchets urbains. La figure 5.6-5 en montre le flux de procédé.

#### d) Techniques de réduction de volume et de solidification

En vue du transport rationnel et la décharge efficace des déchets de plastique, diverses techniques de réduction de volume et de solidification sont mises au point et pratiquées.

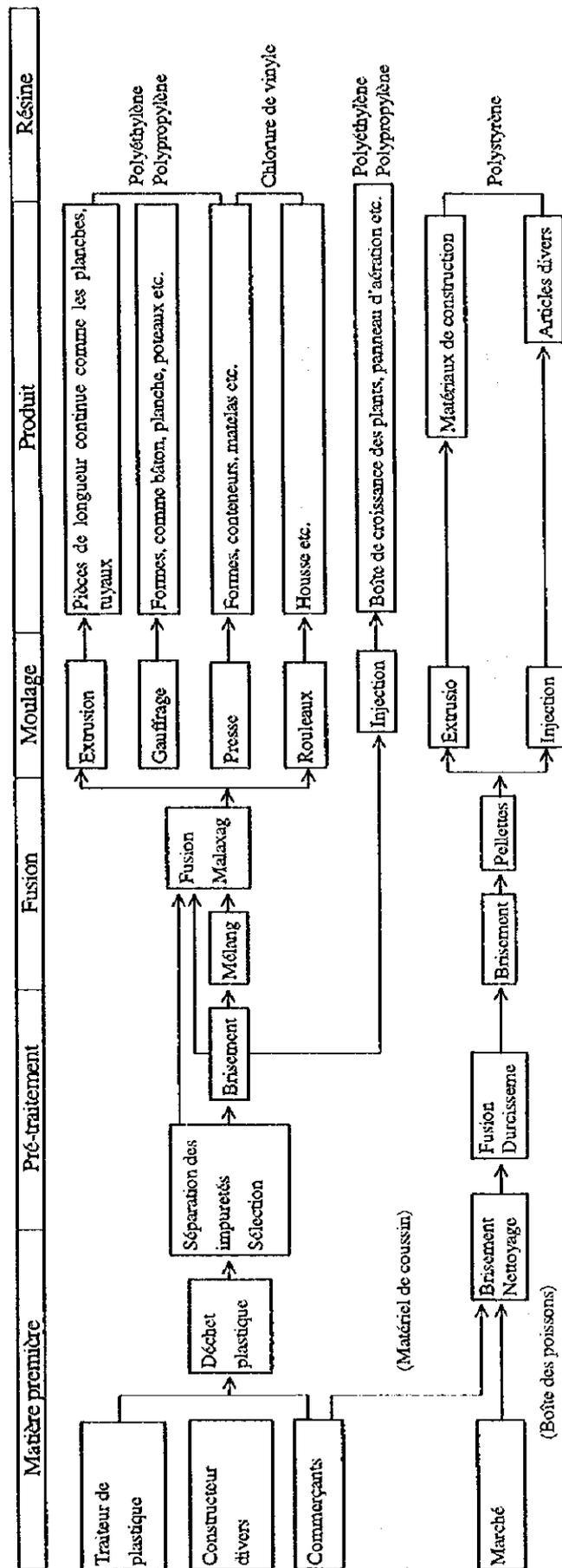
Il y a deux méthodes de réduction de volume ; le compactage mécanique par presse et la solidification par fonte. Le compactage ne peut réduire le volume qu'en 1/10, mais il se fait à la température ambiante et peut accepter sans problème les déchets de plastique mélangés avec plus ou moins d'impuretés. La solidification peut réduire le volume en 1/15, mais il faut procéder à éliminer des impuretés.

Le tableau 5.6-7 montre les techniques principales de réduction de volume et de solidification.

Tableau 5.6-7 Technique de réduction de volume et de solidification

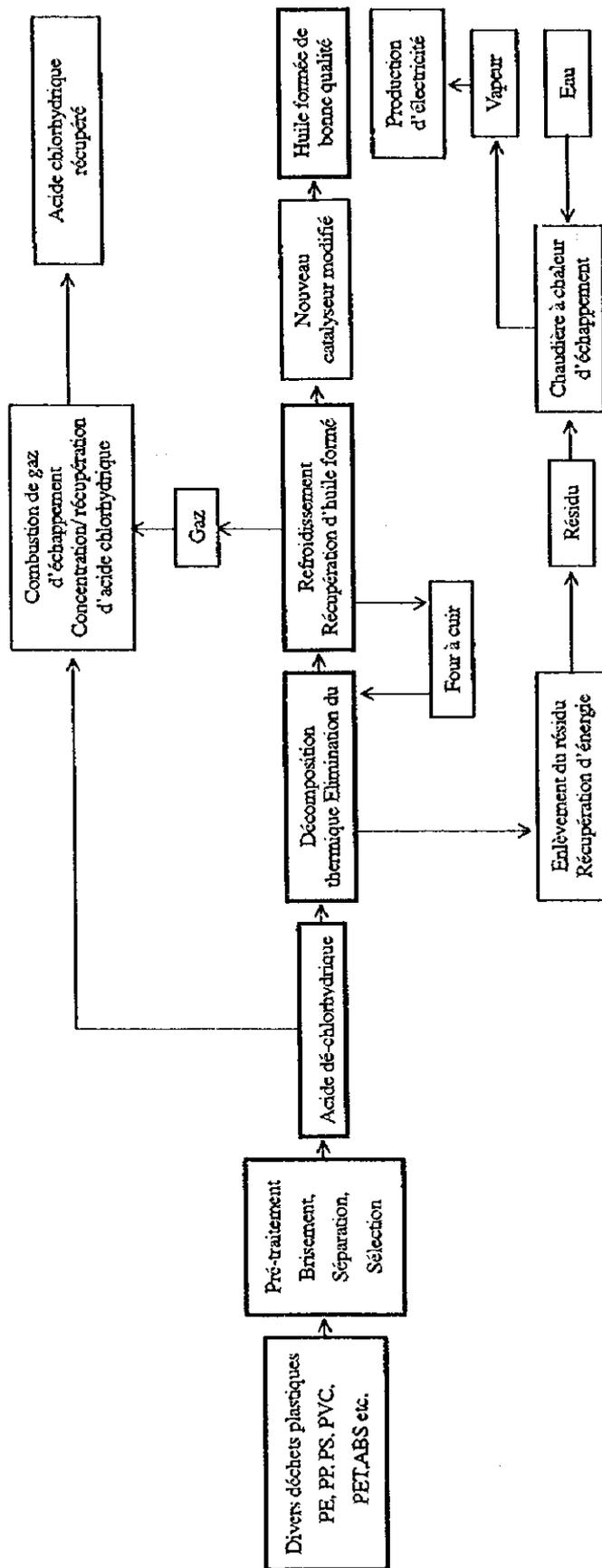
Mode de traitement	Méthode de traitement	Méthode de chauffage	Température de fusion et de durcissement	Forme de corps solide	Taux de réduction de volume
Emballage à compression	Emballage par bande métallique compressé par circuit hydraulique		Température normale	voilée 85×85×100cm	1/4 ~ 1/5
Liant chaud	Compression hydraulique de trois côtés	Compression et chauffage par induction	moins de 160°C	forme de bloc	1/11 ~ 1/14
Compression, fusion et durcissement (Chaleur de friction)	Compression par pré-plastification à vis, et fusion par chaleur de friction		Chaleur de friction 100~130°C	Diamètre 3~5mm Longueur env. 5cm	1/15 ~ 1/20
Four rotatif	Soufflage d'air chaud à l'intérieur du four rotatif pour la fusion et la granulation	Air chaud	Air chaud de 200~250°C	Morceau d'environ 5cm	1/11
Contraction, Réduction de volume et compression	Soufflage direct d'air chaud humide à l'intérieur du four pour adoucissement, contraction, et durcissement	Air chaud	Air chaud humide 250~380°C	Par exemple morceau de diamètre 22×50cm	
Fusion, compression	Soufflage d'air chaud à l'intérieur du four pour contraction et adoucissement	Air chaud	Air chaud de 180~200°C	Bloc de 7×40×50cm	1/20 1/30

Source : Connaissance de base sur le recyclage du plastique,  
Association pour la promotion du traitement de plastique



Source: Fondation d'accélération du traitement plastique

Figure 5.6-3 Procédé de transformation de déchets de plastique en produits



Source: Fondation d'accélération du traitement plastique

Figure 5.6-4 Procédé de liquéfaction de plastique

### **5.6.7 Investissement en biens d'équipement par les recycleurs**

Les entreprises tunisiennes de régénération de plastique pensent que la régénération à l'échelle actuelle n'est pas rentable, et certaines d'entre elles pensent que cette activité serait rentable avec une capacité de 5.000 tonnes/an. Mais la réalité est qu'il n'y a aucun mouvement d'investissement en biens d'équipement. C'est dans un certain sens raisonnable. Probablement, l'impression de la situation actuelle ne leur suscite pas d'investissement. Toutefois, il faudra encourager l'investissement pour l'aménagement des systèmes de récupération de déchets de plastique et leur valorisation énergétique, suivant la tendance et l'orientation mondiales. Dans ce cas, les utilisateurs de ces combustibles devront également investir en biens d'équipement.

### **5.6.8 Rôle des industriels et des organismes concernés**

En Tunisie, un décret fixant les conditions et les modalités de reprise et de gestion des sacs d'emballages et des emballages utilisés a été mis en vigueur le premier janvier 1998. Ce décret qui oblige la reprise de déchets de plastique pourra accélérer leur récupération. Maintenant, il faut fixer l'orientation de la valorisation de déchets de plastique récupérés, le plus tôt possible, en unifiant les efforts des industriels, des organismes concernés et des autorités compétentes.

## 5.7 Pneus

### 5.7.1 Situation actuelle du recyclage

La quantité estimée de pneus usagés mis en décharge est estimée à environ 1 million d'unités en 1996. Les pneus usagés sont générés par les garages ou les usines de démontage. La plupart des pneus usagés provenant des voitures particulières, ils sont usés jusqu'à ce qu'il est impossible de les réutiliser, et ils sont stockés temporairement dans les usines ou laissé à l'abandon sur leur site. Les pneus de bus et de poids lourd sont une partie rechapés dans certaines usines de rechapage. Environ 10.000 unités/an de pneus usagés sont recyclées en pneus rechapés.

Par ailleurs, la Tunisie importe des pneus usagés de voitures de tourisme pour les rechapier en vue de les commercialiser sur le marché local ou de les exporter aux pays voisins.

Le production locale de pneus entre 1990 et 1995 est indiqué dans le tableau 5.7-1, et les quantités de pneus importés et exportés entre 1995 et 1997 sont montrées respectivement dans les tableaux 5.7-2 (pneus neufs) et 5.7-3 (pneus usagés).

Tableau 5.7-1 Production des pneus (1.000 unités)

Usage	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Voiture de tourisme	232,9	252,5	307,8	283,9	237,9	248,8
Camion	195,5	204,8	86,0	170,3	167,4	190,4
Poids lourd	51,8	52,5	45,2	53,6	57,7	65,3
Tracteur agricole	98,3	85,9	86,4	82,6	81,7	65,3
Autre véhicule	-	-	0,8	11,5	29,2	13,4
Total	2591	2611	2538	2621	2594	2598

Source : Annuaire statistique de la Tunisie, mai 1997, p.131, Institut National de la Statistique

Tableau 5.7-2 Importation et exportation des pneus neufs (Unité : tonne)

Usage	Importation			Exportation		
	1995	1996	1997	1995	1996	1997
Voiture de tourisme	731	970	879	3.005	2.369	1.920
Autobus, Camion	2.018	6.210	2.474	2.682	6.106	2.223
Avion	25	17	14	0	0	0
Moto	28	25	38	1	0	0
Bicyclette	133	135	111	2	17	0
Autres véhicule	36	18	21	10	3	0
Tracteur agricole	889	1.425	1.361	2.261	1.544	1.113
Pneus recyclés pour Avion	5	6	1	14	26	0
Pneus recyclés pour voiture de tourisme	0	0	0	0	61	0
Pneus spéciaux	59	86	96	4	12	40
Total	3.924	8.892	4.995	7.979	10.138	5.296

880.000 pneus neufs sont produits chaque année, à côté de 220.000 à 300.000 pneus qui sont importés. La moitié des pneus importés sont d'origine japonaise, le reste provenant de l'Europe.

Tableau 5.7-3 Importation et exportation des pneus d'occasion  
(unité : tonne)

Année	Importation			Exportation		
	1995	1996	1997	1995	1996	1997
Aéronautique	3	5	14	0	0	0
Automobile	95	94	163	45	0	0
Total	98	99	177	45	0	0

### 5.7.2 Situation actuelle du recyclage

Les pneus usagés sont générés lors du renouvellement de pneus dans les garages ou bien quand les voitures hors d'usage sont démontées dans les usines de démontage. Actuellement, les pneus de voitures particulières sont extrêmement usés jusqu'à ce qu'il soit impossible de les rechapier. De tels pneus, après avoir été enlevés par les entreprises de démontage, sont laissés à l'abandon dans le site de leur usine ou incinérés en plein air.

### 5.7.3 Situation actuelle des recycleurs

Il existe quelques entreprises de rechapage, mais toutes de petite taille. On peut les classer en 2 types suivant le mode de rechapage.

- ① Les sculptures sont refaites physiquement sur la couche de caoutchouc appliquée sur la bande de roulement par un adhésif.
- ② Les sculptures sont refaites par la vulcanisation thermique sur la couche de caoutchouc appliquée sur la bande de roulement par un adhésif.

La méthode ② peut perfectionner la qualité des pneus rechapés. Mais il n'y a qu'une seule entreprise qui adopte cette méthode dans le pays. Cette société qui est la plus grande dans ce secteur en Tunisie, rechape 50.000 pneus/an dont la plupart est destinée à la vente sur le marché local, et 10 % à l'exportation principalement en Algérie. La décomposition de pneus rechapés par cette entreprise ainsi que leurs provenance est indiquée par catégorie dans le tableau 5.7-4.

Tableau 5.7-4 Quantité de pneus rechapés et leur provenance

Catégorie de pneus	Quantité annuelle	Provenance des pneus
Voiture de tourisme	6.000	Importation de l'Europe
Camion	12.000	Importation de l'Europe
Bus, Poids lourd	32.000	Approvisionnement local

Les entreprises de démontage apportent 10.000 à 11.000 pneus de bus ou de poids lourds à cette entreprise. Après un contrôle de la qualité, les pneus qui sont jugés inaptes au rechapage sont rendus à ceux qui les ont apportés.

Étant donné que les consommateurs deviennent de plus en plus conscients de la qualité suffisante des pneus rechapés, le besoin en pneus rechapés tend à s'accroître.

#### **5.7.4 Filière de recyclage, traitement et élimination**

##### **(1) Pneus des voitures de tourisme**

Comme ils sont usagés au point de rendre le rechapage impossible, presque la totalité est mise en décharge après leur utilisation. Une partie est mise aux décharges publiques, mais une grande quantité est laissée à l'abandon dans le site des entreprises de démontage ou bien rejetés illégalement.

##### **(2) Pneus de bus et de poids lourds**

Ces pneus usagés générés dans le pays est rechapés partiellement. Ceux qui sont jugés inaptes au recyclage sont mis en décharge, légalement ou illégalement, comme au cas des pneus de voitures de tourisme.

#### **5.7.5 Mesures préconisées au niveau de la génération**

Les pneus usagés de bus ou de poids lourds récupérés sont apportés directement par les commerçants de pneus ou par les propriétaires de véhicules aux sociétés de rechapage qui achètent les pneus ayant une qualité apte au rechapage. Quant aux pneus usagés de voitures de tourisme générés dans le pays, comme la plupart présente une qualité défectueuse, les sociétés de rechapage sont réticentes à les reprendre. Les pneus usagés inaptes au rechapage peuvent être valorisés comme combustible dans les usines telles que les cimenteries, mais à cause de la faible dimension de l'industrie de démontage des véhicules, la récupération systématique visant la valorisation énergétique des pneus usagés s'avère pour le moment impossible.

#### **5.7.6 Développement d'une filière de recyclage**

##### **(1) Pneus de bus et de poids lourds**

Les pneus usagés de bus sont actuellement apportés directement aux usines de rechapage par les garages qui ont fait le rechange des pneus ou bien par les propriétaires eux-mêmes. Ce système persistera toujours même si les entreprises de rechapage se seront multipliées.

##### **(2) Pneus de voitures de tourisme**

Etant donné que les pneus de voitures de tourisme sont trop usés pour pouvoir les rechapier, il est souhaitable d'examiner leur valorisation énergétique. Dans ce cas, comme il est nécessaire d'installer des dispositifs de prévention de la pollution atmosphérique, l'utilisation dans les cimenteries paraît prometteuse pour le moment. Cependant, la plupart des entreprises de démontage étant de petite taille. Comme la quantité de pneus usagés récupérés par chacun reste faible, il est impossible que ces entreprises récupèrent eux-mêmes des pneus usagés en raison du coût de collecte élevé. Mais comme elles tendent à se regrouper dans des quartier déterminés, la récupération systématique semble être possible s'il y a des recycleurs qui ont la volonté de collecter les pneus usagés.

### **5.7.7 Techniques et procédés de recyclage des pneus**

#### **(1) Rechapage**

La méthode de rechapage qui consiste à former les sculptures thermiquement sous pression sur le caoutchouc appliqué sur la bande de roulement est recommandée, car les pneus rechapés par ce procédé présentent une performance supérieure à ceux rechapés par creusement physique.

#### **(2) Valorisation énergétique de pneus usagés**

Le rechapage d'un pneu ne peut pas se répéter éternellement. Les pneus usagés doivent être finalement valorisés comme combustible alternatif, mais pour ce faire, ils doivent être broyés dans des installations spéciales et brûlés convenablement dans des fours munis de dispositifs de prévention de la pollution atmosphérique.

### **5.7.8 Investissement en biens d'équipement par les recycleurs**

Actuellement en Tunisie, il n'y a pas de four capable de brûler des pneus usagés adéquatement. Cependant, la valorisation énergétique des pneus usagés dans les cimenteries est déjà pratiquée dans plusieurs pays. Comme il y a 6 cimenteries dans le pays, la future valorisation énergétique des pneus usagés est attendue.

### **5.7.9 Rôle des organismes concernés**

#### **(1) Rechapage**

Il faut récupérer efficacement les pneus recyclables générés par les entreprises de démontage. Pour ce faire, il est nécessaire d'élaborer un programme de collecte régulière pour faciliter leur collaboration.

#### **(2) Valorisation énergétique**

Il faut que les utilisateurs mettent en place une installation apte à l'utilisation des pneus. L'utilisation dans les cimenteries est le plus probable. Par ailleurs, il faut établir un système qui assure un approvisionnement stable des pneus combustibles, d'où la nécessité de la présence des récupérateurs des pneus usagés.

## 5.8 Boues organiques

### 5.8.1 Situation actuelle du recyclage

D'après les résultats de l'enquête sur la génération de déchets industriels, 997.500 tonnes/an de boues organiques, inorganiques et mixtes sont générées au total. La part des boues organiques est estimée entre 400.000 et 500.000 tonnes. Les secteurs suivants sont les générateurs de ces boues organiques.

① Alimentation

- Usines de produits laitiers
- Brasseries et usines de boissons et d'eau minérale
- Usines d'huile d'olive
- Sucrieries
- Usines de conserve (transformation de produits agricoles et halieutiques)

② Pétrochimie

③ Papeteries (fabricants de papier et de pâte)

④ Tanneries

⑤ Abattoirs

⑥ Station d'épuration des eaux usées

Actuellement, le recyclage des boues organiques n'est presque pas organisé. Les résidus de fermentation générée dans les brasseries est utilisée comme aliment de bétail, mais il s'agit d'un exemple particulier.

Le compostage des boues provenant du traitement des eaux usées a été examiné dans le passé. Les boues d'épuration séchées au soleil sont épandues sur les terres cultivées. Les eaux usées traitées sont également réutilisées pour l'irrigation.

### 5.8.2 Orientation du recyclage

Le compostage des boues générées par le secteur d'alimentation peut être utile, mais le problème de rentabilité posera lors de la commercialisation du compost en tant que produit. Actuellement, les effluents ne sont pas traités suffisamment, et des matières qui doivent être normalement récupérées comme boues organiques sont déversées dans le réseau d'assainissement ou dans les eaux de surface. Le recyclage des boues organiques ne peut être examiné qu'après avoir effectué un traitement qui permet la génération des boues séparées des effluent. Il faut tout d'abord procéder au traitement des effluents qui constitue la première étape du recyclage des boues.

## 5.9 Boues inorganiques

### 5.9.1 Génération et recyclage des boues par le générateur

Les boues inorganiques sont générées par le traitement des effluents provenant de divers procédés tels que le traitement de surface avec de l'acide ou de l'alcali, l'attaque à l'acide et la galvanisation, mais en faible quantité en Tunisie. Lors de la visite des usines, l'équipe d'étude a constaté seulement les boues de neutralisation provenant des effluents de décapage des usines de taille importante. Il y a quelques usines de galvanisation, mais comme les effluents ne sont pas traités, les boues ne sont pas générées. Normalement, ces effluents devront être traités avant d'être déversés dans le réseau d'assainissement. Etant donné que le traitement des boues de galvanisation deviendra le majeur problème en Tunisie, compte tenu de la toxicité des effluents et de l'importance du recyclage des boues, l'équipe d'étude mentionnera le traitement des boues de galvanisation en particulier.

Au Japon, environ 400.000 tonnes/an de boues de galvanisation sont générées (en 1991). Etant donné que l'évacuation des effluents acides ou alcalins et des eaux contenant des métaux toxiques est contrôlée par la loi relative à la prévention de la pollution des eaux, il faut traiter les effluents pour qu'elles satisfassent aux critères définis. Ceci oblige de procéder à la neutralisation et l'élimination des matières toxiques, d'où la génération d'une quantité importante de boues de galvanisation.

La société AFRICHRÔME est une usine qui dispose du procédé de galvanisation du nickel et du chrome, mais n'a pas encore d'installation de traitement des effluents dont la mise en place est actuellement examinée.

Le procédé de galvanisation comprend, en général, le prétraitement (dégraissage, décapage) qui génère des effluents acides et alcalins, et le post-traitement (lavage à l'eau) qui génère des eaux contenant des métaux, ce qui engendre des boues comprenant des métaux. Au Japon, le recyclage des boues de galvanisation s'effectue par le biais des usines de raffinage. Dans ce cas, la teneur en métaux et leur valeur unitaire sont des critères importants. Par exemple, le recyclage des boues contenant du chrome qui est le métal utilisé le plus souvent en galvanisation, n'assure pas la rentabilité des activités en raison de la faible valeur du chrome.

Le tableau 5.9-1 montre, à titre d'exemple, les conditions d'acceptation des boues de galvanisation par une raffinerie.

Tableau 5.9-1 Condition d'admission des boues de galvanisation

Métaux	Teneur en métaux et autres conditions
Cu	Cu plus de 15 %, teneur en eau moins de 75%
Ni	Ni plus de 15 %, teneur en eau moins de 75%
Zn	Zn plus de 30 %, teneur en eau moins de 75%
Au	Au plus de 10 g/tonne, teneur en eau moins de 75%
Ag	Ag plus de 100 g/tonne, teneur en eau moins de 75%

La teneur en métaux contenue dans le liquide de galvanisation est appliquée à la surface de la matière à traiter seulement à un taux de 15 à 20 %, et le reste est évacué,

pour la plupart des cas, dans les effluents, d'où la nécessité de suppléer le liquide. Il est donc important d'éviter le passage du liquide de galvanisation aux effluents.

### 5.9.2 Situation actuelle du recyclage

Les boues inorganiques générées par l'usine sidérurgique sont issues de la neutralisation des effluents de décapage par l'acide chlorhydrique. La substance neutralisante utilisée est la chaux éteinte. Ces boues inorganiques contiennent  $\text{CaCl}_2$  mais sa faible valeur rend le recyclage difficile. Actuellement en Tunisie, elles sont mises en décharge, et la récupération des métaux à partir des boues inorganiques n'est pas encore pratiquée.

Les conditions nécessaires pour le recyclage des boues inorganiques sont ; la quantité importante des boues, la facilité de la récupération et du transport, la haute valeur du métal, et la demande sur le marché. L'aménagement futur des réglementations concernant les effluents de galvanisation causera la multiplication des boues générées, ce qui nécessitera le recyclage des boues inorganiques.

### 5.9.3 Réduction de la quantité des boues générées et orientation du recyclage

Pour restreindre la génération des boues, il faut soit réduire le volume des effluents, soit récupérer les matières métalliques contenues dans les effluents.

La méthode la plus efficace du recyclage des boues inorganiques est la récupération des métaux compris dans les boues. Pour la faciliter, il est souhaitable d'extraire les boues séparément suivant le type du métal contenu. Dans cette section, l'équipe d'étude présente des méthodes de traitement qui permettent de réduire la génération des boues et de recycler les métaux de valeur.

#### (1) Réduction du volume des effluents générés par le décapage

Dans les usines disposant des procédés de traitement de surface ou de galvanisation, les matériaux à traiter sont décapés pour éliminer la rouille, en utilisant l'acide chlorhydrique ou l'acide sulfurique en général. Dans ce procédé, il est possible de réduire le volume des effluents en réutilisant les eaux usées du lavage. Par exemple, en cas de décapage à l'acide sulfurique, les eaux usées contiendront  $\text{FeSO}_4$  qui est facilement récupérable en faisant précipiter les cristaux par le refroidissement. Les effluents acides ainsi traités peuvent être réutilisés au lavage en ajustant la concentration. Au Japon,  $\text{FeSO}_4$  récupéré est utilisé comme réducteur des composés chromiques ou bien comme flocculant. Cependant, il faut éviter le mélange des impuretés dans les effluents. La récupération de  $\text{FeSO}_4$  n'est pas techniquement difficile, mais la présence des impuretés rend le procédé compliqué, ce qui n'est pas apprécié par les entreprises de recyclage.

Pour réduire la consommation de l'acide, il est nécessaire de diminuer le volume de l'acide qui reste attaché au matériau à décapier. Pour ce faire, il est utile d'insérer un procédé de récupération de l'acide entre le bain de décapage et le bain de lavage, comme le schématise la figure 5.9-1. L'acide ainsi récupéré est réintroduit dans le procédé de décapage. L'efficacité de la réduction de l'acide consommé dépend de la surface du matériau à décapier, de l'état de la rouille et de la concentration de l'acide.

Cependant, cette méthode permet de réduire non seulement la consommation de l'eau de lavage mais aussi les hydroxydes générés par la neutralisation.

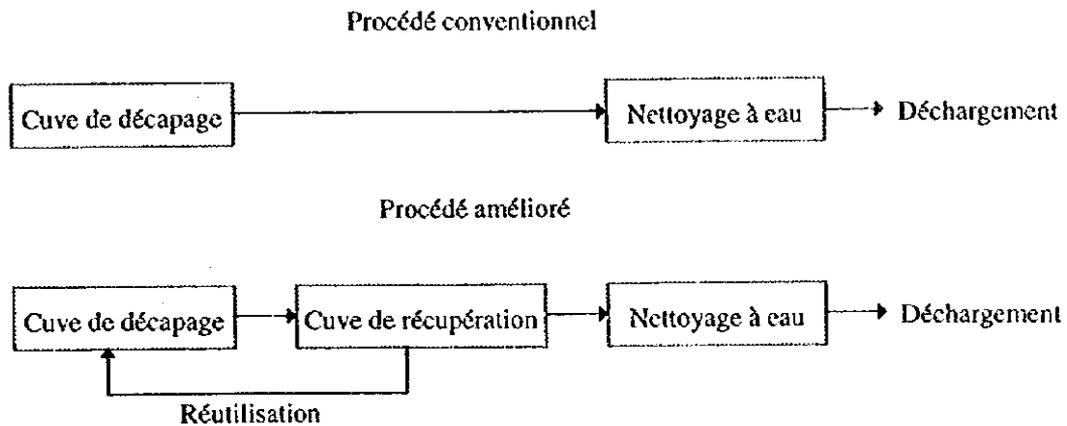


Figure 5.9-1 Procédé de décapage amélioré

(2) Réduction du volume des effluents et des boues générés par la galvanisation et récupération des métaux

Avant d'examiner le recyclage des boues de galvanisation contenant des métaux lourds, il faudra changer fondamentalement le procédé actuel de traitement des effluents qui génère des boues. Les méthodes telles que l'échange d'ions ou le traitement par la membrane échangeuse d'ions ne génèrent pas de boues et facilitent la réutilisation des eaux ainsi que la récupération des métaux lourds. Par ailleurs, de même que pour le procédé de décapage, il importe de réduire le volume des effluents en adoptant des procédés qui les rendent condensés en métaux. De plus, pour faciliter la récupération des métaux, il faut traiter les effluents séparément suivant le genre de métal utilisé comme le cuivre ou le nickel.

a) Réduction des eaux usées

Pour réduire le volume des effluents, il faut soit réutiliser le liquide attaché au matériau, soit économiser l'eau de lavage.

① Réduction d'évacuation du liquide attaché au matériau

Le liquide galvanoplastique qui ne s'est pas bien adhérent aux objets est également prélevé lorsque ceux-ci sont retirés du bain galvanoplastique, d'où la nécessité du lavage à l'eau. En réutilisant l'eau de lavage utilisée contenant du liquide prélevé du bain galvanoplastique (après les avoir condensé si nécessaire), il est possible de réduire le volume des effluents.

La réduction du prélèvement du liquide galvanoplastique permet non seulement de diminuer la consommation d'eau pour le lavage, mais également assure une utilisation efficace des ressources. C'est pour cela qu'il est utile de vibrer les objets venant d'être

galvanisés pour laisser tomber le liquide excédentaire attaché sur la surface dans le bain galvanoplastique.

## ② Réduction de l'eau de lavage

En général, le procédé de lavage est composé de plusieurs étapes. Les eaux du bain de lavage juste après le bain galvanoplastique présente la teneur en métaux la plus élevée, et celles du bain final le moins. Pour réduire les effluents générés par ce procédé, le lavage multiple à contre-courant est largement pratiqué (Figure 5.9-2). Ce mode de lavage consiste à réutiliser les eaux évacuées par un bain comme eaux de lavage du bain précédent. Il permet non seulement de réduire le volume des effluents finalement évacués, mais aussi d'économiser les réactifs pour le traitement et d'augmenter la teneur en métaux des boues, étant donné que la concentration d'ions métalliques est élevée dans les eaux usées. Il permet donc une utilisation efficace de l'eau de lavage et d'augmenter la concentration du métal (la figure ci-dessous présente le cas du nickelage) à l'intérieur de la cuve de lavage (1). Comparé à la méthode ordinaire, le volume d'eau nécessaire est de 10% en cas de lavage à 3 étapes, et en cas de lavage à 5 étapes, 2 % seulement.

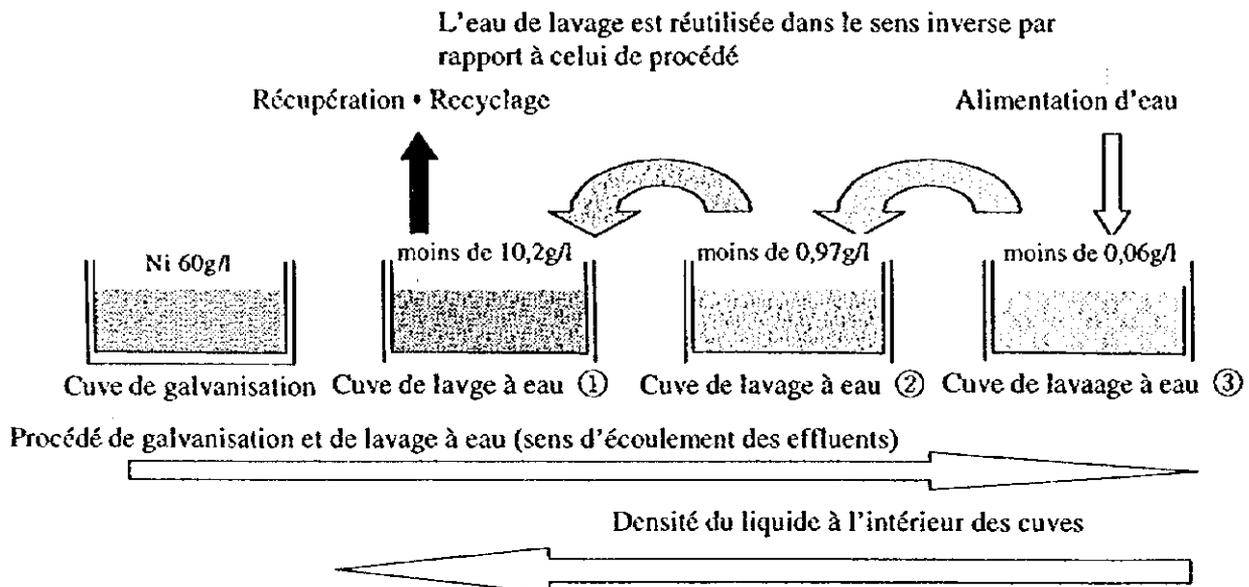


Figure 5.9-2 Procédé de lavage l'eau convenable au recyclage des effluents  
(Lavage à contre-courant à étages multiples)

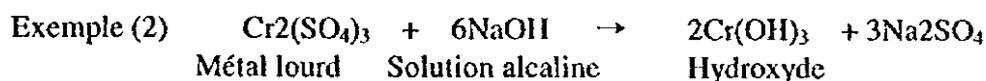
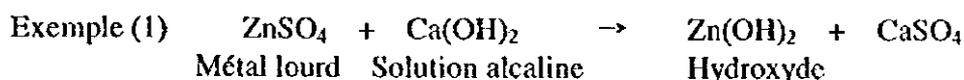
Source: "Pratique de la technologie de pointe du recyclage" par Tokuji MURATA

## b) Récupération du métal galvanoplastique

Pour la récupération du métal galvanoplastique, il existe ① la méthode de récupération de ressources, et ② le système fermé.

## ① Récupération de ressources

Au Japon, la séparation du solide et du liquide a été effectuée ordinairement en ajoutant une solution alcaline dans les effluents de galvanisation contenant des métaux lourds pour les précipiter sous forme d'hydroxyde métallique. Des flocculants de polymère organique peut y être ajoutés pour faciliter la précipitation. Actuellement en Tunisie, les eaux usées du lavage sont évacuées sans subir d'un tel traitement. Les formules ci-dessous montrent des exemples de la réaction de la formation de l'hydroxyde.



L'hydroxyde ainsi formé est récupéré sous forme de coulis contenant 99 % d'eau qui est déshydraté pour devenir boues (teneur en eau de moins de 80 %). Il est possible de récupérer le métal contenu dans les boues par raffinage, mais à condition que ce métal ait une teneur importante et que les boues soient sèches. En général, les boues contenant du chrome ou du zinc ne peuvent être soumises à la récupération des raffineries à moins que leur générateurs paye les frais de la prise en charge, en raison de la faible valeur des métaux. Les boues contenant du nickel ou du cuivre seront achetées par des raffineries de recyclage si la teneur en métaux est importante.

## ② Système fermé

Le métal galvanoplastique contenu dans les eaux usées de lavage est nocif, mais constitue en même temps une ressource de haute valeur. Sa récupération et son recyclage peuvent réduire les impacts sur l'environnement et aussi économiser la consommation des ressources minérales par le recyclage. L'introduction d'un système fermé utilisant des résines ou des membranes échangeuses d'ions, qui combine le lavage multiple à contre-courant susmentionné, permet de récupérer le métal sans causer la génération des boues. Ce système est applicable à la galvanisation de toutes sortes de métaux.

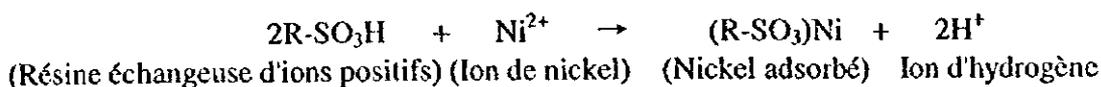
La résine échangeuse d'ions est faite en plastique spécial granulé qui adsorbe les ions. Il existe deux sortes de résine échangeuse d'ions ; l'une destinée à l'adsorption des ions positifs et l'autre des ions négatifs. Il faut choisir ce qui s'adapte le mieux au métal concerné. L'équipe d'étude présente ci-après, 1) les techniques de traitement des eaux usées du nickelage, et 2) les techniques du traitement des eaux usées du chromage et du traitement du chromate.

### ① Traitement des eaux usées du nickelage (Lavage multiple à contre-courant par lots utilisant la résine échangeuse d'ions)

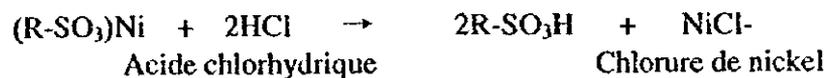
Il s'agit d'une combinaison du lavage multiple à contre-courant par lots, et de la résine échangeuse d'ions, qui permet de récupérer la totalité des composants prélevés des

bains. L'eau s'évapore constamment du liquide de nickelage qui est chauffé normalement à 50 ~ 60 °C. Dans ce système, on fait circuler l'eau du bain contenant le moins de métal (cuve de lavage 3 indiqué dans la figure 5.9-2) après les avoir fait passer par la résine échangeuse d'ions, pour maintenir une qualité d'eau proche de l'eau pure en récupérant constamment le nickel prélevé. Il suffit de compenser la perte d'eau par l'évaporation par l'apport d'eau de robinet ou d'eau ayant subi un échange d'ions.

L'adsorption de l'ion de nickel par la résine échangeuse d'ions est présentée par la formule suivante :



Le nickel adsorbé est réduit par l'acide chlorhydrique. Cette réaction est appelée régénération (élimination), et peut être présentée par la formule suivante :



Le chlorure de nickel ainsi récupéré peut être réutilisé comme réactif du nickelage après la purification.

## ② Traitement des eaux usées de chromage et de traitement du chromate (Récupération du chromate par la résine échangeuse d'ions)

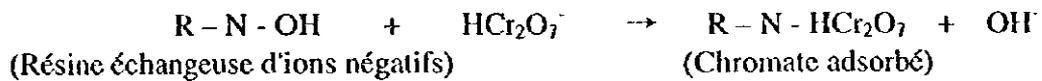
Ce procédé consiste à éliminer les ions chromiques par l'adsorption à partir des eaux usées contenant des combinés de chrome (VI) (Ion chromique  $CrO_4^{2-}$ , ion d'acide dichromique  $CrO_7^{2-}$ ) telles que celles provenant du chromage et du traitement du chromate, à l'aide des tubes à résine échangeuse d'ions négatifs portables. Les tubes à résine échangeuse d'ions qui ont adsorbé le chromate jusqu'à la saturation sont envoyées à l'usine de recyclage pour valoriser le sel chromique contenu dans les eaux de ces tubes. Par conséquent, ce système ne génère pas de boues contenant du chrome.

Au Japon, il existe des entreprises qui louent ces tubes à résine échangeuse d'ions et qui les récupèrent après qu'elles ont adsorbé jusqu'à la saturation, jouant ainsi un rôle important pour le recyclage.

### Aperçu du système :

En principe, les tubes à résine échangeuse d'ions négatifs portables sont utilisées en joignant constamment 2 du même type. Les eaux usées pompées du réservoir et contenant du chromate, après avoir traversé les filtres, sont envoyées dans la première tube et ensuite dans la deuxième pour être évacuées après que le chromate soit complètement éliminé par l'adsorption. Ces eaux ainsi traitées peuvent être utilisées, dans la plupart des cas, au lavage.

La formule suivante explique l'adsorption du chrome.



Le système fermé de récupération du chromate est schématisé dans la figure 5.9-3.

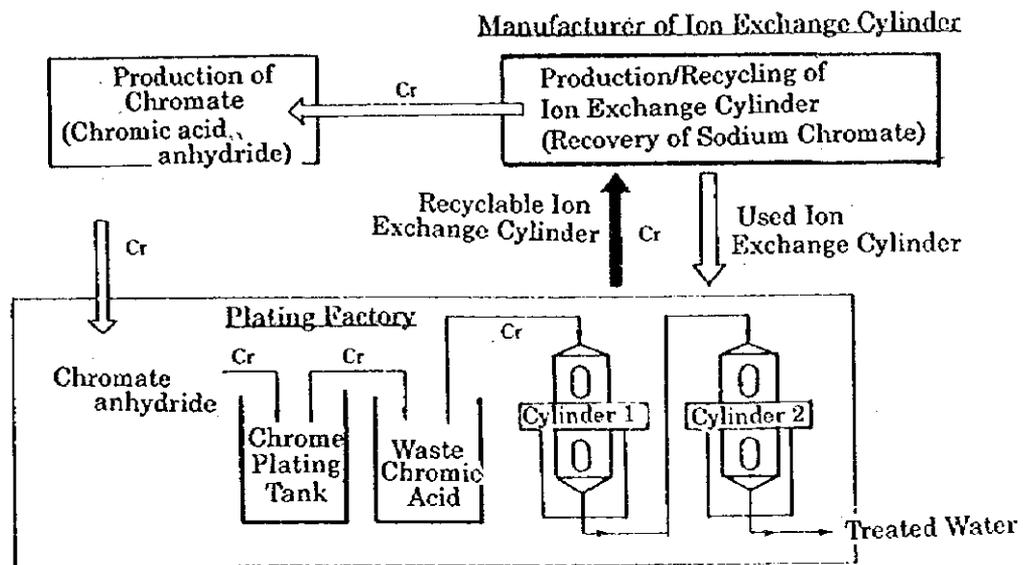
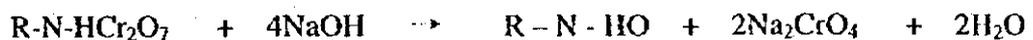


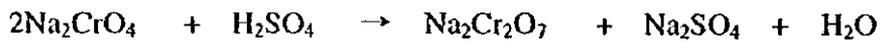
Figure 5.9-3 Système fermé pour la récupération du chromate

Source: "Pratique de la technologie de pointe du recyclage" par Tokuji MURATA

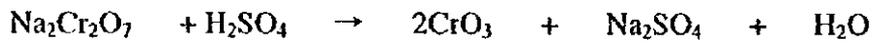
La résine saturée sont prise en charge par un producteur de combinés chromiques, pour être régénérée avec de la soude caustique. La régénération (élimination) s'opère comme le montre la formule suivante :



L'acide sulfurique est ajouté à la solution de soude chromique qui ensuite subi la concentration et la cristallisation pour rendre possible la récupération de la soude dichromique.



Ensuite la soude dichromique et l'acide sulfurique se sont fondus pour former le sulfate de sodium qui sera séparé pour obtenir le chrome anhydre.



Le flux de récupération des combinés chromique est schématisé dans la figure 5.9-4.

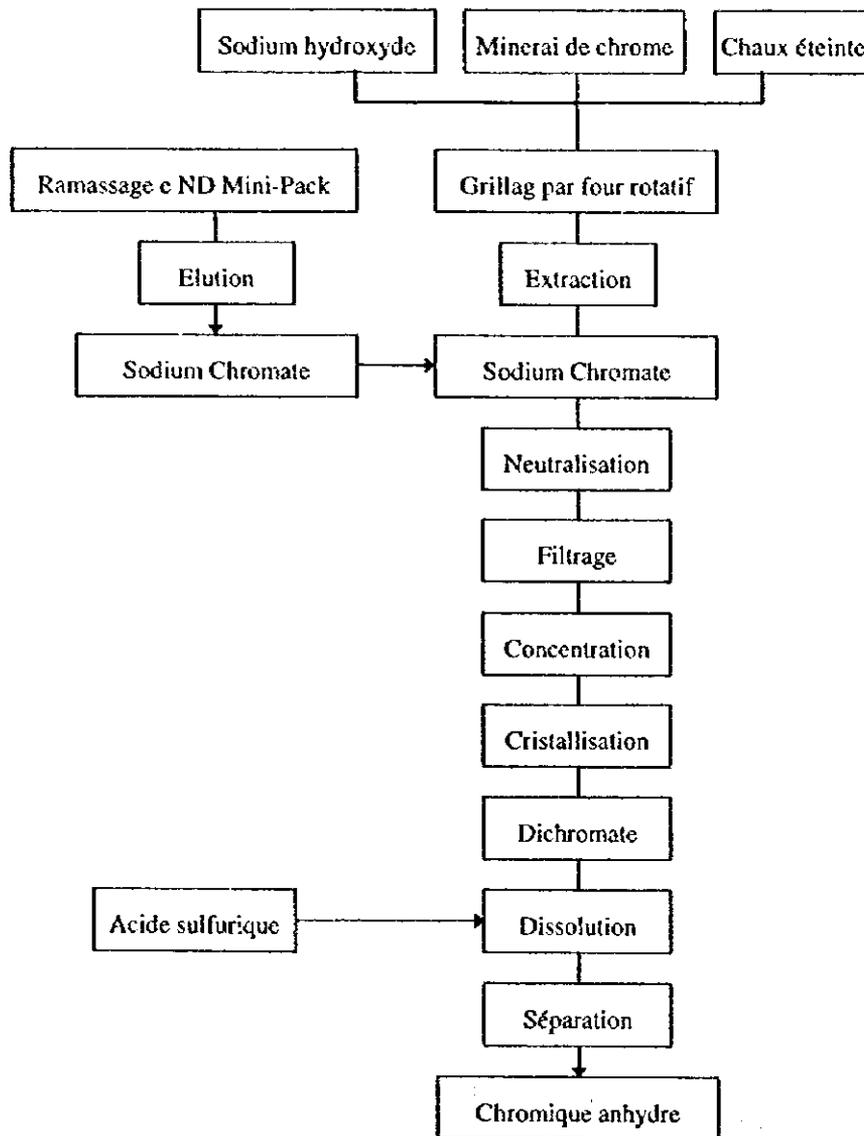


Figure 5.9-4 Récupération des combinés chromique

Source: "Pratique de la technologie de pointe du recyclage" par Tokuji MURATA

#### **5.9.4 Mesures à prendre en Tunisie**

En Tunisie, pour réduire les déchets provenant du décapage et de la galvanisation, il est souhaitable de fixer les objectifs suivants :

- ① Réduction d'évacuation des polluants dans l'environnement
- ② Récupération des métaux lourds contenus dans les eaux usées
- ③ Récupération des métaux à partir des boues

Les dirigeants des usines de galvanisation sont suffisamment conscients de la nécessité d'introduire des installations de traitement des eaux usées. Une de ces usines que l'équipe d'étude a visitées, examinait, sous la direction de l'ONAS, l'introduction d'une installation de traitement des effluents dont la conception était déjà confiée à un fabricant étranger. Mais, il serait difficile d'évaluer correctement les propositions avec de telles mesures individuelles.

Il est souhaitable d'organiser, avec l'assistance de l'Etat, des cours et des séminaires pour les responsables des usines disposant de mêmes procédés. Par ailleurs, l'élaboration d'une ligne directrice spécifique qui expose en détail le contenu mentionné dans la présente section est également souhaitable. De plus, il est préférable d'établir un projet pour l'élaboration de cette ligne directrice, qui contiendra l'envoi sur place de spécialistes et l'organisation de visites vers les pays industrialisés pour les personnes concernées en collaboration avec les institutions de coopération.

#### **5.9.5 Rôle des organismes concernés**

Ce qui importe le plus dans le recyclage de l'acide usé et des eaux usées contenant des boues inorganiques, c'est l'effort des usines de galvanisation à éviter la pénétration des impuretés et maintenir l'unité et la haute concentration de ces liquides usés. Par conséquent, en Tunisie, il faut faciliter le recyclage de l'acide et des effluents, en définissant clairement la méthode de stockage, par une ligne directrice sur le traitement effectué dans les usines de galvanisation.

## 5.10 Laitiers

### 5.10.1 Génération des laitiers et leur recyclage

Les laitiers sont des impuretés générés par la fonte de métaux dans des hauts fourneaux ou des fours électriques. En général, les laitiers ferreux provenant des trois principales activités du secteur sidérurgique (haut fourneau, convertisseur et four électrique) sont appelés laitiers sidérurgiques, alors que les laitiers générés par les procédés métallurgiques non ferreux sont appelés laitiers non ferreux. En Tunisie, la plus grande partie de laitiers est issue de la sidérurgie. La principale origine des laitiers sidérurgiques est le complexe d'El Fouladh qui est la seule usine sidérurgique du pays. Le reste du laitier sidérurgique est issu de quelques fonderies.

Il y a deux types de laitiers sidérurgiques. L'un est le laitier de haut fourneau, et l'autre est le laitier d'aciérie comprenant le laitier de convertisseur et le laitier de four électrique. La seule usine génératrice de laitier sidérurgique en Tunisie est le complexe d'El Fouladh ; les quantités annuelles s'élèvent respectivement, à environ 30.000 tonnes de laitier de haut fourneau et à 38.000 tonnes de laitier d'aciérie. Les taux de génération des laitiers sont, en général, de 317 kg de laitier de haut fourneau, de 130 kg de laitier de convertisseur, et de 100 à 200 kg de laitier de four électrique pour la production d'une tonne de fer.

La quantité annuelle de laitier généré par les fonderies fabriquant des pièces d'automobiles, est estimée à 92,5 tonnes au total.

Les principaux générateurs de laitiers non ferreux sont les entreprises de régénération de lingots d'aluminium, de fabrication des produits coulés sous pression en aluminium et en zinc, de galvanisation et de fabrication de batteries. En Tunisie, il existe 4 principales entreprises de régénération de lingots d'aluminium qui génèrent du laitier appelé crasses d'aluminium dont le génération est de 5 à 10 % de la production. Les 3 fabricants de batteries dans le pays génèrent des crasses de plomb lors du recyclage des électrodes en plomb qui sont utilisées dans les batteries de démarrage d'automobiles. Le taux de génération de ces crasses atteint 3 à 5 % de la production. La situation actuelle des usines génératrices de ces laitiers non ferreux (régénération de lingots d'aluminium, fabrication de pièces coulées sous pression, etc.) que l'équipe d'étude a visités est présentée dans le tableau 5.10-1.

La quantité annuelle de laitiers non ferreux générés en Tunisie est estimée entre 2.000 et 3.000 tonnes au total, ou même plus.

Parmi les laitiers générés dans le pays, le laitier de haut fourneau, les crasses d'aluminium et les mattes de galvanisation sont actuellement valorisés.

Une partie du laitier de haut fourneau (16.000 tonnes/an) est vendue aux cimenteries pour être utilisée comme matériau de ciment de haut fourneau. Le reste de laitier de haut fourneau (14.000 tonnes/an) et la totalité de laitier d'aciérie sont enfouis dans des terrains voisins.

Tableau 5.10-1 Génération des laitiers non ferreux (Excepté l'industrie sidérurgique)

Société (Activité)	Type de laitier	Quantité (tonnes/an)	Situation de traitement/ recyclage
Fonderie REKIK (Régénération de lingots d'aluminium)	Crasses d'aluminium (teneur incertain)	25 ~ 50	Conservées sur le site depuis l'entrée en service de l'usine
FONDAL (Pièces d'aluminium coulées sous pression)	Crasses d'aluminium (teneur incertain)	incertain	Exportées en Pologne
NOUR (Batterie)	Crasses de plomb (teneur 3 ~ 5%)	1.000 (*1) au moins	Mises dans les décharges publiques
ASSAD (Batterie)	Crasses de plomb (teneur incertain)	1.000	Mises dans les décharges publiques
SAGRI (Galvanisation)	Mattes de zinc (teneur 60 à 70%)	60	Vendues aux intermédiaires à 800 DT/tonne (destiné à l'exportation)
Fonderie J.F. (Pièces de zinc coulées sous pression)	Crasse de zinc (teneur incertain)	40 ~ 45	Exportés.

(\*1) Quantité estimée : Société NOUR est le plus grand fabricant de batterie du pays. Sa production étant plus que celle d'ASSAD, la quantité de crasses est estimée à plus de 1.000 tonnes/an.

Au Japon aussi, la plus grande partie de laitier est utilisé comme matériau de ciment. En 1995, 14.788.000 tonnes de laitier de haut fourneau, soit 65,2 % de la génération totale qui était de 22.678.000 tonnes, ont été valorisées dans les cimenteries. Le reste est utilisé principalement comme agrégats pour les travaux de construction et de génie civil.

Quant aux laitiers non ferreux générés en Tunisie, comme il n'existe pas d'entreprise de raffinage des métaux non ferreux dans le pays, ils sont exportés tels quels après la récupération. Parmi les laitiers non ferreux, les crasses des usines de régénération d'aluminium sont exportées. La matre de zinc générée à raison de 60 tonnes/an dans l'usine de galvanisation, et qui a une teneur importante en zinc de 60 à 70 %, est également exportée.

## 5.10.2 Techniques de recyclage des laitiers sidérurgiques

### (1) Composition des laitiers

Le laitier de haut fourneau généré par la sidérurgie est en général composé principalement d'oxyde de calcium (CaO), de silice (SiO<sub>2</sub>) et d'oxyde d'aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Cette composition chimique est proche de celle du ciment. Par conséquent, le laitier de haut fourneau est normalement utilisé comme matériau de ciment. Le tableau 5.10-2 présente la composition chimique du ciment (ciment Portland), du laitier de haut

fourneau, du laitier de convertisseur et du laitier de four électrique (laitier d'oxydation, laitier de réduction).

Tableau 5.10-2 Composition chimique du ciment et de divers laitiers (%)

	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	T.Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	TiO <sub>2</sub>	CaO/SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
Ciment	21	64	6,5	-	2,5	-	2,5	-	-	3,05	1,3
Laitier de haut fourneau	33,8	42,0	14,4	0,3	6,7	0,3*	-	0,84	1,0	1,24	-
Laitier de convertisseur	13,8	44,3	1,5	5,3	6,4	17,5	-	0,07	1,5	3,21	-
Laitier de four électrique (Laitier d'oxydation)	19,0	38,0	7,0	6,0	6,0	15,2	-	0,38	0,7	2,0	-
Laitier de four électrique (Laitier de réduction)	27,0	51,0	9,0	1,0	7,0	1,5	-	0,50	0,7	1,89	-

Note) T = Total, \* = en tant que FeO

Source: "Pratique de la technologie de pointe du recyclage" par Tokuji MURATA et Livret du traitement de déchet

## (2) (2) Recyclage du laitier de haut fourneau

Normalement, la production d'une tonne de fer génère 317 kg de laitier de haut fourneau, mais cet indice de laitier varie selon la teneur en fer dans le minerai. La composition chimique du laitier de haut fourneau dépend des conditions de fonctionnement du haut fourneau et de la qualité du minerai. Le tableau 5.10-3 présente les différents types de laitier selon les modes de leur traitement.

Tableau 5.10-3 Types de laitier par mode de traitement

Mode de traitement	Types de laitier de haut fourneau
Vitesse de refroidissement	Refroidissement lent, refroidissement rapide (à l'eau)
Réglage de composants	Réglé par additif, sans réglage
Traitement par chaleur	Réchauffement en état de dissolution Refonte après la solidification Traitement par sa propre chaleur sensible

Le contrôle de la vitesse de refroidissement est la méthode la plus largement pratiquée. La nature de laitier change selon la vitesse de refroidissement, et on observe une certaine variation au niveau de la composition.

### a) Recyclage du laitier à refroidissement lent

Il s'agit du laitier de coulée étalé sur un bassin à laitier, à une épaisseur de 30 à 50 mm, pour être refroidi lentement à l'air ou en combinaison avec l'arrosage d'eau. En général, ce type de laitier devient dur avec une structure cristalline dense. La plus grande partie du laitier à refroidissement lent est cristalline, mais pour faciliter le broyage, il arrive parfois de refroidir une partie du laitier rapidement par arrosage de l'eau ou par un autre moyen. La partie rapidement refroidie devient vitreuse.

On dit que le minéral qui constitue le principal composant du laitier à refroidissement lent est le méllilite, fait en solution solide de la gehlénite ( $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ) et de l'akermanite ( $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ ).

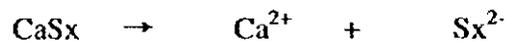
Ce laitier contient des sulfures tels que  $\text{CaS}$ ,  $\text{MnS}$  ou bien le soufre même. Au contact de l'eau, le laitier dégage une odeur d'acide sulfhydrique, du liquide jaune provenant du polysulfure, et du liquide à pH élevé généré par  $\text{CaO}$ . Le polysulfure de calcium contenu dans le laitier produit du carbonate de calcium, de l'acide sulfhydrique, et du soufre, en se dégradant par le gaz carbonique dans l'air.

Les ions de soufre  $\text{S}^{2-}$  disposent d'une forte capacité de générer dans l'eau, des sulfures de métaux insolubles en réagissant avec des composés de métaux lourds. Ils ont une toxicité envers les animaux et les végétaux étant donné qu'ils transforment les métaux nécessaires des organismes tels que le fer, le cuivre et le zinc en des sulfures insolubles.

Le  $\text{CaS}$  échappe de l'acide sulfhydrique au contact de l'eau par l'hydrolyse. L'acide sulfhydrique ( $\text{H}_2\text{S}$ ) est un gaz hautement toxique émanant une mauvaise odeur.



A mesure que la réglementation sur la prévention de la pollution devient sévère, le refroidissement rapide est devenu nécessaire au Japon aussi, pour se substituer au refroidissement lent qui libère  $\text{SO}_x$  et  $\text{H}_2\text{S}$  dans l'air.



Au Japon, le laitier de haut fourneau à refroidissement lent a été utilisé depuis longtemps aux matériaux de travaux de génie civil et au ciment. Quand il est utilisé comme pierre concassée de chaussée, la matière vitreuse contenue dans le laitier se durcit comme le ciment, ce qui affermit le sol. Par ailleurs, comme il absorbe de l'eau, les travaux sont possibles même sous la pluie, et une fois compacté par le rouleau il adhère bien, ce qui donne une résistance qui serait supérieure à celle des pierres concassées naturelles.

#### b) Recyclage du laitier à refroidissement rapide (laitier hydrogéné)

Le laitier hydrogéné est obtenu par un refroidissement rapide du laitier de haut fourneau. Ce type de laitier est produit en refroidissant rapidement le laitier de coulée par un jet d'eau sous pression. Le refroidissement rapide rend le laitier vitreux au lieu d'être cristallin. Le complexe d'El Fouladh adopte cette méthode. Cette matière vitreuse qui est chimiquement instable, se durcit comme du ciment au contact des matières alcalines qui jouent le rôle de catalyseur (propriété hydraulique latente). Le ciment de haut fourneau est fait en se servant de cette propriété.

Suivant le changement des conditions telles que la température du laitier, le volume d'eau de refroidissement ou la pression d'eau, on peut obtenir du laitier mou ou du laitier dur.

Comme critère pour évaluer la propriété hydraulique latente, on utilise la basicité et le taux de vitrification du laitier hydrogéné. Plus ces valeurs sont importantes, plus le laitier concerné est apprécié ; le laitier qui présente une basicité de plus de 1,75 et un taux de vitrification de plus de 95 % peut être utilisé comme matériau de ciment de haut fourneau. La basicité dépend de la manière d'exploiter le haut fourneau, mais le taux de vitrification peut être amélioré en refroidissant rapidement le laitier de coulée de la température la plus haute possible.

Le laitier hydrogéné dur a une teneur importante en matière vitreuse et présente une propriété hydraulique latente, ce qui rend possible la production du ciment de haut fourneau, en mélangeant la poudre du laitier hydrogéné et le ciment Portland (le ciment artificiel ordinaire composé principalement de pierre à chaux  $\text{CaCO}_3$  et de silicate de calcium  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ). Le ciment de haut fourneau est un ciment à faible chaleur d'hydratation qui a une haute résistance à la corrosion. Il est également valorisable en matériau de fondation solide grâce à sa propriété hydraulique latente.

En Tunisie, le laitier hydrogéné est produit en arrosant simplement le laitier généré. La figure 5.10-1 montre un exemple du procédé de production du laitier hydrogéné pratiqué au Japon.

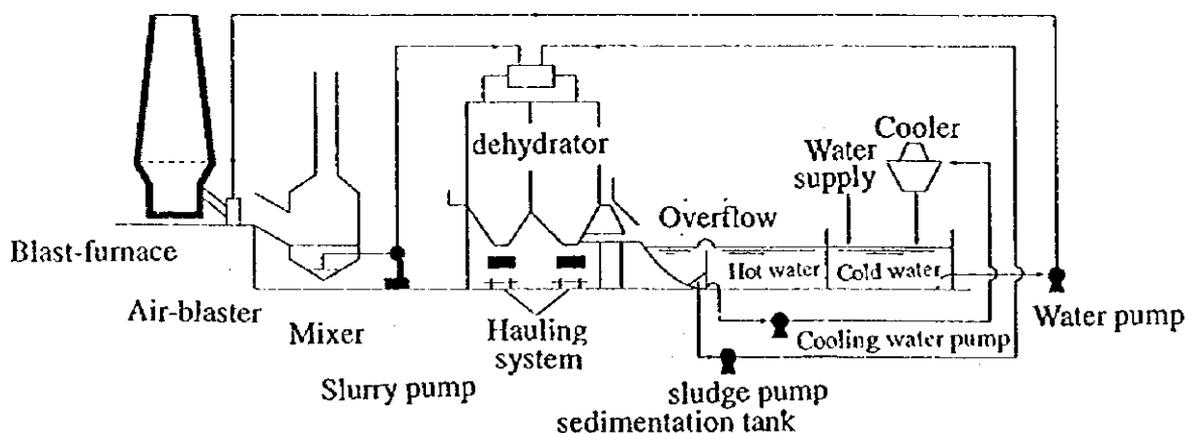


Figure 5.10-1 Procédé de production du laitier hydrogéné (Exemple)

Source : "Technologie de production de type sauvegarde de l'environnement" sous la direction de la Section de l'Environnement de la Terre de l'Agence Nationale de l'Environnement

Comparé au refroidissement lent, la méthode du laitier hydrogéné, qui est une production propre, présente des effets écologiques favorables suivants :

- Contribution à la prévention de la pollution atmosphérique par la réduction des émissions de SOx et de H<sub>2</sub>S.
- Contribution à l'économie des ressources en chaux par son utilisation comme matériau de ciment de haut fourneau.
- Contribution à la protection de l'environnement par la réduction de volume mis en décharge.

#### c) Recyclage en matériau de ciment de haut fourneau

Le laitier hydrogéné de haut fourneau vitrifié par le refroidissement rapide est composé de verre aluminosilicate ayant une forte teneur en chaux. La présence du catalyseur tel que les matières alcalines et CaSO<sub>4</sub> exerce à ce type de laitier un effet de durcissement qui est durable.

Le ciment composé de laitier hydrogéné de haut fourneau et de clinker du ciment Portland est appelé ciment de haut fourneau ; il est classé comme suit selon la proportion des composants.

Type	Teneur en laitier
Ciment de haut fourneau A :	moins de 5 à 30 %
Ciment de haut fourneau B :	30 à 60 %
Ciment de haut fourneau C :	60 à 70 %

Le béton fait en ciment de haut fourneau n'a pas de haute résistance initiale après sa fixation en raison de sa prise peu rapide, mais il dispose des points forts suivants :

- Approprié à la construction d'ouvrages de béton de masse tels que les barrages, grâce à sa faible chaleur d'hydratation initiale.
- Approprié aux travaux d'assainissement et aux travaux maritimes et portuaires, en raison de sa forte résistance à la détérioration chimique.
- Forte résistance à la chaleur.
- Durabilité de résistance à long terme.

On dit que la prise initiale est assurée par le ciment Portland et la prise finale par l'hydratation du laitier hydrogéné. En Europe, du ciment contenant environ 15 % de laitier hydrogéné est vendu comme ciment Portland.

#### d) d) Autres modes de recyclage du laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau peut également recyclable en matériaux de ciment, de ciment de laitier à chaux, et de ciment de laitier sursulfaté ainsi qu'en agrégats fins en récupérant la chaleur.

## ① Matériau de ciment

Le clinker, qui est le matériau intermédiaire du ciment, est formé par la cuisson des constituants tels que le calcaire, l'argile, la pierre siliceuse et l'oxyde de fer mélangés avec une proportion adéquate, mélangés et broyés. On ajoute du plâtre au clinker qui est broyé en poudre pour obtenir enfin du ciment. En cas du ciment de haut fourneau, le laitier de haut fourneau est mélangé avec du ciment Portland. Mais il est également possible de remplacer le calcaire et l'argile par le laitier de haut fourneau broyé en poudre. Ce remplacement qui réduit le volume d'argile et de calcaire à ajouter, permet d'économiser largement l'énergie nécessaire pour la cuisson du clinker. Comme le laitier de haut fourneau est déjà chauffé à 1500 °C dans le haut fourneau, sa chaleur sensible suffit pour la cuisson du clinker. Par contre, le calcaire et l'argile nécessitent de consommer plus d'énergie pour leur décomposition.

## ② Production des agrégats fins (sable) et récupération de la chaleur

Du sable peut être produit à partir du laitier de haut fourneau, soit par le broyage à l'eau, soit par le broyage à l'air. Le sable fait à partir du laitier hydrogéné est cristallin et dur, disposant de qualités comparables à celle du sable naturel. Quant au broyage à l'air, parmi les méthodes différentes, celle qui récupère la chaleur au cours du procédé mérite attention.

Le broyage à l'air est constitué des procédés suivants :

- a) Dispersion du laitier de haut fourneau fondu par un volume d'air important
- b) Granulation du laitier par l'air
- c) Transformation des granules dissipés en sphères par la tension superficielle
- d) Refroidissement et solidification des particules par un volume d'air important
- e) Récupération de ces particules par le transport à l'air.

Etant donné que le broyage à l'air n'utilise pas d'eau au cours des procédés de refroidissement et de récupération, on peut obtenir du sable artificiel vitreux et dur en forme sphérique précise avec une surface lisse, sans être poreux comme le laitier hydrogéné. Le sable broyé à l'air dispose de qualités supérieures au sable naturel en matière de poids spécifique, de coefficient d'absorption d'eau, de résistance, et de forme. Surtout à l'utilisation au béton, sa forme sphérique améliorera la fluidité du béton, ce qui permet de réduire le volume d'eau à ajouter, et donc de former un béton plus résistant. Par ailleurs, comme l'ajout de ciment peut être réduit, la chaleur d'hydratation diminue tout en économisant le coût de mélange.

La méthode de production d'agrégat fin de haute qualité tout en récupérant la chaleur est une voie sèche, combinée de la granulation par tambour rotatif et du refroidissement par la couche fluidisée.

Le laitier de coulée sorti du haut fourneau à 1400 °C environ, tombe par l'étuve pour se heurter contre le tambour granulateur afin d'obtenir la granulation. Les granules ainsi produits sont collectés dans la couche de refroidissement fluidisée qui se sert du poudre de laitier comme refroidisseur en suspension. Etant donné que les poudres de laitier s'appliquent à la surface des granules, ceux-ci ne peuvent plus adhérer entre eux.

L'échange thermique s'opère simultanément par la ventilation. L'air réchauffé à environ 600 °C est envoyé à la chaudière pour être utilisé comme source thermique de

la vapeur. Les granules de laitier solidifiés subissent un réglage granulométrique dans le procédé de broyage pour former des agrégats fins.

③ Recyclage en matériau de ciment de laitier à chaux

Il s'agit du ciment qui durcit lentement composé de laitier de haut fourneau avec une petite quantité de chaux.

④ Recyclage en matériau de ciment de laitier sursulfaté

Le ciment de laitier sursulfaté est composé principalement de laitier hydrogéné de haut fourneau, de la chaux anhydre insoluble (10 à 15 %), et d'une petite quantité (moins de quelques pour-cent) de matières alcalines. C'est un ciment à faible chaleur d'hydratation. En comparaison du ciment de haut fourneau, il présente une résistance initiale et une dureté superficielle inférieures, mais dispose d'une résistance à long terme et d'une résistance à la détérioration chimique supérieures. Il peut être utilisé pour la construction comme planche, etc.

Le laitier de haut fourneau peut être valorisé en divers produits figurant dans le tableau 5.10-4.

Tableau 5.10-4 Valorisation du laitier de haut fourneau

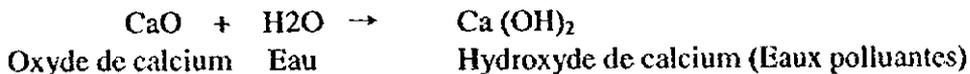
Types de laitier selon les méthodes de traitement	Exemple des modes de valorisation
Laitier à refroidissement lent	Route (Revêtement, fondation, remblai), Sol de chemin de fer. Agrégat pour béton, Matériau de construction portuaire, Amendement du sol (aux couches profondes), Matériau du clinker, Engrais chaux silicate (Caical), Matériau de calorifugeage, Autres (verre, carreau)
Laitier à refroidissement rapide (Il peut être moins poreux et plus lourd par le réglage de la quantité et la pression de l'eau de refroidissement)	Matériau du ciment de haut fourneau, Matériau du clinker, Matériau de mélange du béton, Matériau du béton léger, Amendement du sol et des déjections industrielles, Agrégat fin pour asphalte Route (sol, stabilisation de fondation, couche d'interruption), Engrais chaux silicate (Caical), Autres (Matériau de poterie)
Laitier expansé (expansé par ajout d'eau au cours du refroidissement ; léger et doux)	Agrégat pour béton léger, Matériau léger de scellement, Matériau de remblai, Autres (calorifugeage)

### (3) Recyclage du laitier de convertisseur

En Tunisie, environ 38.000 tonnes/an de laitier d'aciérie (laitier de convertisseur et de laitier de four électrique) sont générées. Le laitier de convertisseur ne contient que peu de  $\text{SiO}_2$ . La faible teneur en  $\text{SiO}_2$  permet de former du ciment à haute résistance initiale, mais si elle devient trop faible, le fonctionnement du four subira d'importants dégâts à cause de la formation anormale de couche de clinker. Le laitier de convertisseur est une substance hyper-alcaline, et un mélange des composants tels ceux qui figurent ci-après.

- Solution solide de chaux  $\text{CaO, MgO, MnO, FeO}$
- Solution solide de calcium siliceux  $2\text{CaO, SiO}_2\text{-}2\text{CaO, P}_2\text{O}_3$
- Ferrite de calcium  $\text{Ca (FeO}_2)_2$
- Chaux vive radicale  $\text{CaO}$  (la plus sensible aux agents atmosphériques)

Parmi ces 4 composants du laitier de convertisseur, la chaux vive radicale et la solution de chaux se détériorent facilement à cause des agents atmosphériques, d'où la difficulté de utiliser ce type de laitier comme agrégat. Par ailleurs, quand il est utilisé comme matériau de fondation, des eaux de pH élevé sont générées par la réaction de  $\text{CaO}$  avec l'eau ambiante. De plus, il risque de se détruire par foisonnement. Par conséquent, il n'est pas approprié à la fondation et au remblai (voir la formule suivante).



Pour transformer cette chaux radicale ( $\text{CaO}$ ) en  $\text{Ca(OH)}_2$  ou en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) qui sont stables, le laitier doit subir une maturation. Normalement, le laitier de convertisseur nécessite une maturation de plus de 6 mois, mais le développement de la maturation rapide qui consiste à diminuer sa durée à l'aide de la vapeur ou de l'eau chaude est en cours. Le laitier de convertisseur sera donc utilisable comme matériau de travaux de la voirie après avoir subi un tel traitement.

Etant donné que ce laitier contient de l'oxyde de fer, il peut être utilisé également comme source de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  à la formation du ciment. Par ailleurs, comme il contient des substances nécessaires au clinker tels que  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en plus de l'oxyde de fer, sa valorisation en matériau de clinker est également envisageable.

### (4) Recyclage du laitier de four électrique

Le laitier de four électrique se divise en laitier d'oxydation et en laitier de réduction. Dans l'exploitation ordinaire du four électrique, après avoir fondu les ferrailles, les substances inutiles sont oxydées en injectant de l'oxygène dans l'acier fondu. Ces substances qui sont combinées par exemple avec  $\text{CaO}$  contenu dans la chaux vive ajoutée comme matériau secondaire, sont séparés et évacués en forme de laitier. Comme ce procédé s'effectue dans une ambiance oxydante, le laitier ainsi généré est appelé laitier d'oxydation. Le procédé suivant consiste à introduire un réducteur tel que le métal d'aluminium et le coke en poudre avec de la chaux vive, en vue d'éliminer

l'oxygène excédentaire (désoxydation) et de désulfurer. Comme l'intérieur du four devient réducteur, le laitier généré par ce procédé est appelé laitier de réduction.

a) Récupération de l'oxyde de fer

Etant donné que la composition chimique du laitier d'oxydation est presque pareille à celle du laitier de convertisseur, il est possible d'en récupérer de l'oxyde de fer qui peut être utilisé comme source ferreuse du ciment. Quant au laitier de réduction dont plus de 70 % sont composés de CaO et de SiO<sub>2</sub>, il contient peu d'oxyde de fer (dix fois moins que le laitier d'oxydation) et sa récupération n'est pas rentable.

b) Utilisation aux travaux de la voirie

Toutes les deux types de laitier de four électrique contiennent une certaine dose de chaux radicale, et présentent le risque de destruction par foisonnement, ce qui fait que leur utilisation comme agrégats de béton reste encore au banc d'essai. Cependant, si ces laitiers subissent une maturation convenable, ils seront valorisables en matériaux de routes, avec une durée de 3 mois de maturation.

c) Valorisation en matériau de clinker

De même que le laitier de convertisseur, le laitier de four électrique peut être valorisé en matériaux du clinker (source de CaO), ce qui permet d'économiser la consommation du calcaire. Cependant, dans ce cas, il faudra éliminer les substances inadéquates au ciment telles que le magnésium contenu dans le laitier.

### 5.10.3 Crasses et mattes de métaux non ferreux

Les laitiers non ferreux provient principalement des fonderies. Par ailleurs, les crasses, contenant des métaux lourds dans la plupart des cas, sont générées par les usines de régénération de lingots d'aluminium, des pièces en aluminium coulées sous pression, des batteries, des pièces en zinc coulées sous pression, ainsi que de galvanisation.

Au Japon, de tels laitiers et crasses sont recyclés dans la plupart des cas, mais en Tunisie où leur production n'est pas importante et il n'y a pas d'affinerie, le recyclage à l'intérieur du pays s'avère difficile. Par conséquent, pour le moment, le seul moyen est de les récupérer et les exporter.

Parmi les laitiers non ferreux, ce qui est le plus volumineux est la crasse de plomb. La quantité dépasse 2.000 tonnes/an, et la totalité est mise en décharge. Les laitiers des autres métaux ne sont générés qu'à raison d'une cinquantaine de tonnes par an. La crasse de plomb est principalement issue du procédé de recyclage des plaques en plomb des batteries.

La teneur en plomb contenue dans la crasse de plomb générée en Tunisie, selon toute apparence, est estimée supérieure à celle générée au Japon (moins de 5 %). Le plomb est récupérable par l'affinage avec le convertisseur.

### 5.10.4 Recyclage des poussières

Les poussières se dégageant du convertisseur du complexe sidérurgique d'El Fouladh sont émises directement à l'air libre.

Les poussières générées au cours de l'aciérage contiennent principalement les matériaux utilisés dans la sidérurgie tels que le fer et le calcaire. Des techniques qui permettent de les réutiliser dans l'usine génératrice sont actuellement mises au point. Par ailleurs, étant donné qu'elles sont composées principalement de fer, elles peuvent être utilisées comme source ferreuse de clinker.

#### 5.10.5 Mesures souhaitables à prendre au niveau des producteurs

Le laitier peut contenir des substances telles que le magnésium qui dégradent la qualité du ciment. Par conséquent, les cimenteries qui sont les utilisateurs finaux devront définir clairement les critères d'admission des laitiers. Au niveau des générateurs, il est préférable qu'ils adoptent des procédés adéquats pour rendre leur laitier aptes à la valorisation. Le tableau ci-après présente un exemple de critères d'admission d'une cimenterie japonaise.

Tableau 5.10-5 Critères d'admission d'une cimenterie (Exemple au Japon)

	Critères d'admission
Teneur en fer (Laitier, etc.)	$Fe_2O_3 > 30 \%$ , Collecte $< 100$ ppm Faible teneur en métaux tels que Cr et Mg En poudre, en flocon ou bien en forme broyable

## 5.11 **Sable de moulage**

### 5.11.1 **Génération et recyclage du sable de moulage**

En Tunisie, il existe 2 fonderies de taille importante (SOFOMECA et Fonderies Réunies) et 5 fonderies de petite taille. Les deux premières fonderies produisent 80 % de la production totale. Les données sur la génération de sable de moulage usagé ne sont pas disponibles, mais il est certain qu'une partie importante de sable usagé est réutilisée dans l'usine, jusqu'à ce qu'il est mis en décharge définitivement lorsqu'il perd sa viscosité.

De même, au Japon, le sable de moulage (90% du sable usagé en général) est réutilisé plusieurs fois. Les moules sont donc formés principalement avec du sable réutilisé, en y ajoutant du sable neuf, du liant et des additifs.

Le sable de moulage usagé mis en décharge est également valorisable. Au Japon, une partie du sable usagé est recyclé en matériau de ciment et en filler d'asphalte, mais le reste est mis en décharge.

Les poussières générées par le recyclage du sable usagé (poussière de fonderie) sont collectées par un dépoussiéreur. Les poussières de fonderie sont mises en décharge, car elles sont formées de poudres minuscules qui ne sont plus réutilisables comme sable de moulage. Mais comme les poussières de fonderie disposent d'une composition chimique similaire au sable de moulage, elles sont également valorisables en filler d'asphalte.

Les cimenteries tunisiennes qui peuvent être des valorisateurs importants, n'ont actuellement pas l'intention d'utiliser le sable de moulage usagé comme matériaux.

### 5.11.2 **Méthode de recyclage**

Le sable de moulage est recyclé, soit dans l'usine, soit hors de l'usine. Dans l'usine, le sable usagé peut être réutilisé de nouveau aux moules après la récupération et le traitement, ce qui est pratiqué en Tunisie. Le recyclage hors d'usine consiste à récupérer le sable usagé pour le valoriser en matériaux de ciment, de remplissage d'asphalte, de fondation, et de briques.

#### (1) **Composition du sable de moulage usagé**

Le sable usagé contient, à part le sable siliceux ( $\text{SiO}_2$ ) qui est la composante principale, le liant et une petite quantité d'additif. Le sable de mer peut être utilisé comme sable de moulage, mais il risque de contenir des impuretés. Le sable siliceux d'usage industriel doit normalement avoir une pureté de 95 %, mais la purification étant coûteuse, il est surtout difficile d'être utilisé dans des fonderies de petite taille. Les grandes fonderies importent des matières chimiques telles que la bentonite pour les utiliser comme liant. Pour de telles matières chimiques, les fournisseurs étrangers fixent la quantité minimum d'achat, mais comme il n'existe pas de grossiste qui les traite en Tunisie, il se peut que les fonderies de petite taille se servent de l'argile, sans utiliser de bentonite, ni de résine.

Le tableau 5.11-1 montre la composition chimique par catégorie de sables de fonderie. Il n'y a presque pas de différence entre le sable neuf et le sable usagé dans la composition, d'où la possibilité de le réutiliser. Cependant, il faut noter que le sable

usagé contient une proportion importante d'argile (liant) qui doit être éliminée pour la réutilisation.

Les poussières de fonderie ayant une teneur élevée en MgO, ne sont pas appropriés au matériau de ciment.

Tableau 5.11-1 Composition chimique de sable de fonderie

Catégorie	Argile	LOI	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO
Sable neuf	0,34	0,48	92,00	4,17	1,01	0,14	0,50
Sable usagé	8,54	2,64	90,60	4,19	0,39	0,30	0,51
Sable grillé	0,38	0,12	91,90	3,88	1,83	0,36	0,48
Sable recyclé usagé	0,41	0,11	92,90	3,74	1,87	0,46	0,55
Poussières de fonderie	-	-	80,10	10,20	2,70	1,66	1,37

LOI (Loss on Ignition) = Perte au feu

Le sable de moulage usagé peut être réutilisé pour le même usage en éliminant le liant et l'additif. De ce fait, des techniques de récupération de sable siliceux ont été développées. Il existe du liant inorganique et du liant organique qui nécessite chacun des techniques différentes d'élimination. Les additifs sont ajoutés pour améliorer la plasticité, faciliter le démoulage, et réduire le défaut des produits de fonte. Des matières carbonées, de l'amidon et des matières fibreuses figurent au rang des additifs.

#### Liant

- Liant inorganique : Argile (kaolinite, montmorillonite, illite), bentonite (une sorte d'argile disposant d'un fort pouvoir liant), verre soluble (silicate de sodium), ciment, chaux éteinte, alliage de silice, poudre d'aluminium, plâtre, etc.
- Liant organique : Résine phénolique, résine furannique, mélasse usagée, huile siccative, lignine (effluents de la fabrication de pâte à papier), alginate de sodium, etc.

#### Additif

- Additif carboné : Poudres de charbon, de coke, de graphite
- Additif contenant de l'amidon : Amidon de maïs, dextrine
- Additif fibreux : Poudre de bois

Les procédés de fonderie sont schématisés dans la figure 5.11-1.

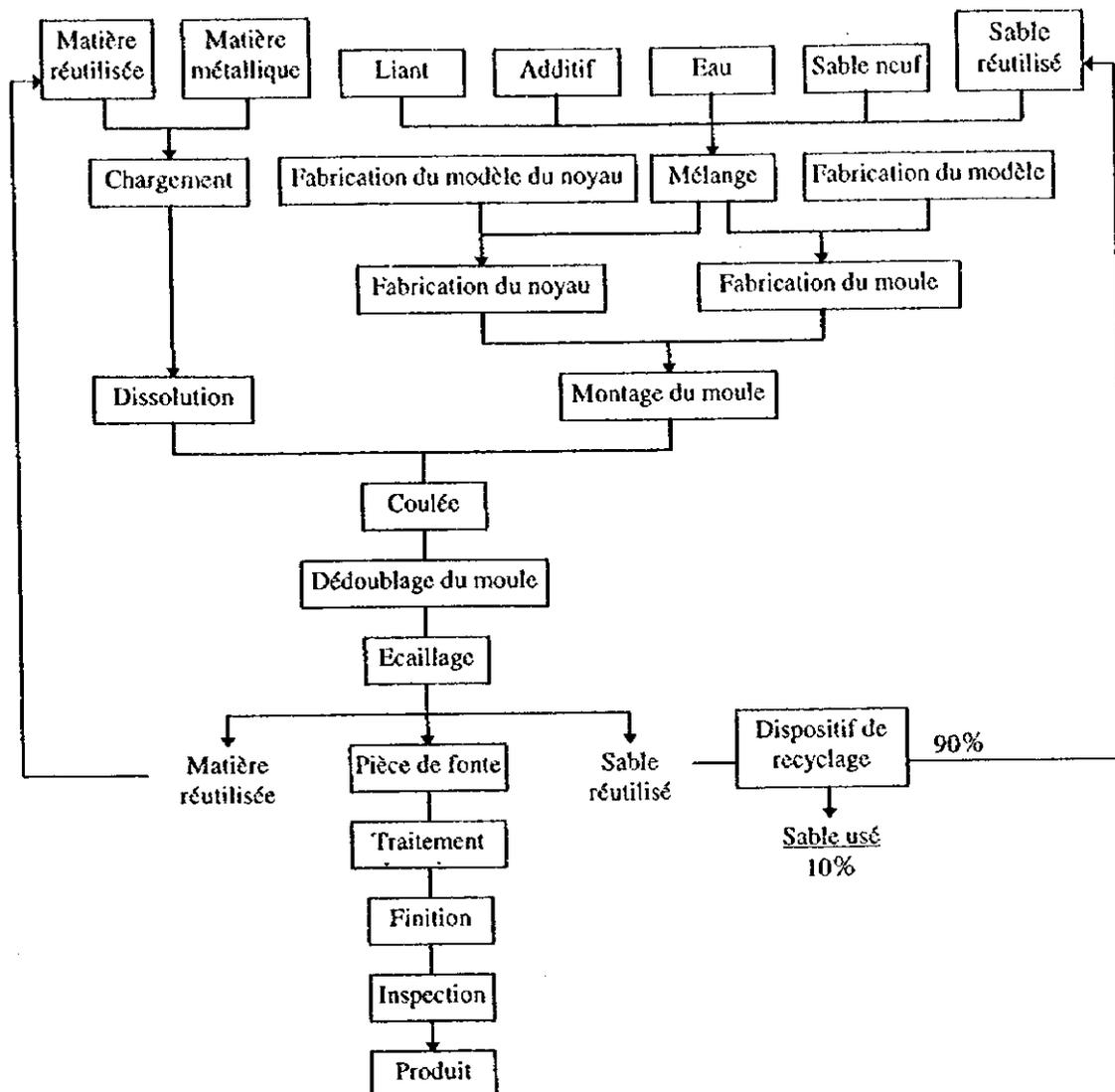


Figure 5.11-1 Procédés de fonderie

Source: "Manuel de la fonderie" par Fondation japonaise de la fonderie

## (2) Méthode de recyclage

### a) Méthode de recyclage dans l'usine

Le recyclage du sable de moulage usagé présente un avantage économique importante. Le coût du sable peut être économisé à 35 à 45 % en comparaison de l'utilisation du sable neuf sans recyclage.

Comme méthodes de recyclage, on peut citer 1) la voie sèche, 2) la voie humide, et 3) la cuisson. La voie sèche tend à être courante vu les coûts modérés d'installation, d'exploitation et du traitement des déchets. L'élimination de l'alcali du sable contenant du verre siccatif comme liant nécessite la voie humide. Pour les sables utilisant de la

résine comme liant, ce qui est le cas de la carapace, le recyclage par cuisson est pratiqué.

① Voie sèche

Il s'agit des méthodes à abraser le sable à sec pour enlever les substances déposées à la surface, telles que la projection mécanique (frotteur), la projection pneumatique (frotteur de sable pneumatique, récupérateur de sable pneumatique, et le grenailage (grenailleuse). La voie sèche est largement pratiquée en raison de son coût modéré. Le tableau 5.11-2 montre les coûts de recyclage par la voie sèche au Japon (selon le genre de moule).

Tableau 5.11-2 Coûts de recyclage par la voie sèche (selon le genre de moule)

		Coûts de fonctionnement (yens / tonne)	Taux de récupération
Sable naturel	Sable à haute teneur en argile	2.500 - 3.000	70 - 80 %
	Sable à basse teneur en argile	500 - 1.500	70 - 80 %
Sable inorganique (verre soluble)		1.500 - 2.000	85 - 95 %
Sable organique (furanne, phénol)		100 - 200	92 - 97 %

(Note 1) Coûts de fonctionnement = Coûts d'énergie + Coûts de consommables

(Note 2) 100 yens = 0,88 DT

Source : Manuel sur le traitement de déchets et la technologie de recyclage

Pour le recyclage du sable de moulage, après le prétraitement pour broyer les blocs de sable restants de la démolition du moule, il faut procéder à l'élimination des substances déposées à la surface des granules avant la récupération du sable. Le procédé de recyclage ordinaire est schématisé à la figure 5.11-2.

Il existe plusieurs types d'appareil de structure différente pour le prétraitement.

Récupérateur de sable :

Destiné principalement au broyage, il dispose d'un système giratoire spécial qui permet de broyer les blocs de sable par leur frottement réciproque, afin d'éliminer les déchets métaux tels que le noyau ferreux en même temps que les poudres fines.

Broyeur à impact :

Il s'agit d'un broyeur intermédiaire destiné à obtenir des granules uniformes. Il est adapté pour broyer les blocs de sable durcis provenant du moule afin de récupérer le sable.

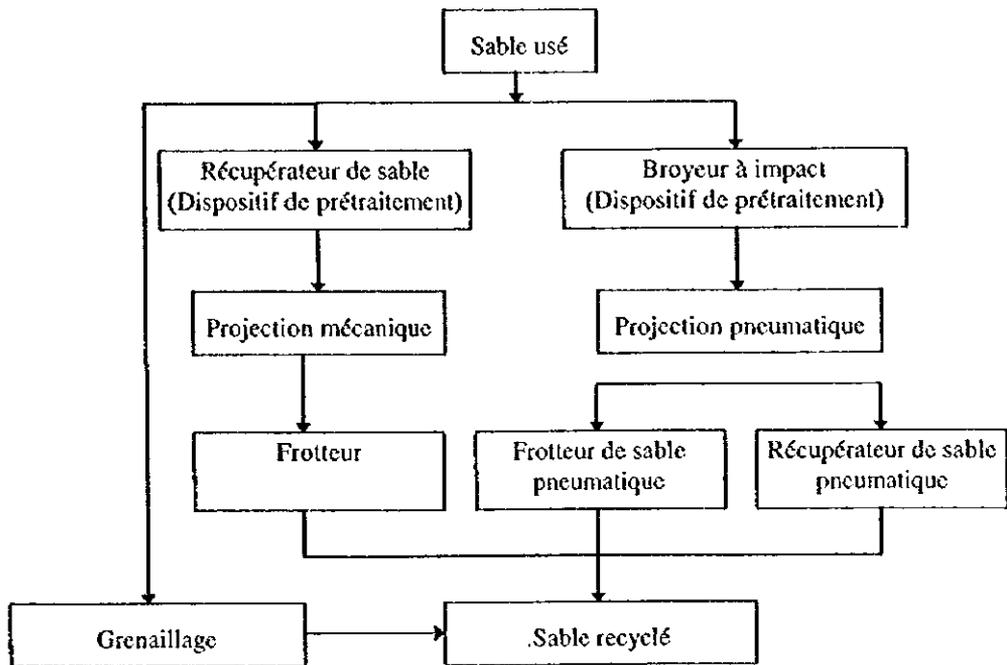


Figure 5.11-2 Equipements et système de dispositifs de recyclage du sable usagé de fonderie par la voie sèche

Source: "Pratique de la technologie de pointe du recyclage" par Tokuji MURATA

Comme dispositif de recyclage, il y a le frotteur à projection mécanique montré à la figure 5.11-3, et les appareils à projection pneumatique tels que le frotteur pneumatique et le récupérateur pneumatique.

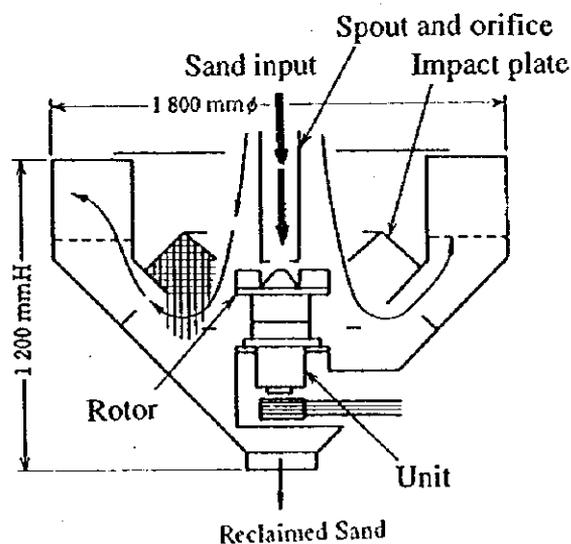


Figure 5.11-3 Frotteur à projection mécanique

Source: "Pratique de la technologie de pointe du recyclage" par Tokuji MURATA

L'appareil de recyclage à projection mécanique accomplit l'abrasion par la projection mécanique de sable. Comme le montre la figure 5.11-3, le sable usagé alimente un rotor tournant à grande vitesse à partir de l'orifice situé au bout du tuyau central. Le sable est projeté de manière centrifuge par les ailettes de projection du rotor pour percuter les plaques penchées en forme d'U. Le sable retombe après avoir percuté ces plaques. Par ailleurs, les granules de sable sont brassés par la rotation du rotor, ce qui donne une abrasion de leur surface par le frottement. Les matières déposées à la surface des granules de sable sont collectées sous forme de poudres fines par le dépoussiéreur.

Le frotteur pneumatique et le récupérateur de sable pneumatique qui sont des appareils de recyclage à projection pneumatique fonctionnent avec le même principe.

D'abord, le sable usagé alimenté à un volume fixe dans la chute (entrée du sable) remonte le tuyau de passage à force d'air comprimé qui sort du tuyère. Les grains de sable, en se frottant réciproquement, remontent pour percuter contre le collecteur supérieur. Le sable réfléchi brusquement par le collecteur est collecté au dépoussiéreur. Une partie de sable est renvoyé à l'entrée pour être traité de nouveau, et le reste descend le long du collecteur pour passer à la cellule suivante.

## ② Voie humide

Cette méthode consiste à immerger les granules de sable dans l'eau pour amollir le liant, et à éliminer les matières attachées à la surface de ces granules par le mixage dans un rotor ou bien par l'impact du jet d'eau. Cette méthode est efficace au cas où le liant est soluble ou décomposable dans l'eau. Il existe le lavage par broyage humide et le lavage ultrasonique. Cette méthode laisse des problèmes de traitement et d'élimination des boues générées par le procédé.

### • Lavage par broyage humide

Le sable usagé introduit dans le tambour rotatif est broyé à la face frontale du tambour et ensuite mixé par le jet d'eau à la partie arrière. Le frottement réciproque des grains de sable à force de rotation du tambour permet d'éliminer les soudes de la surface des grains afin d'obtenir du sable régénéré. Comme les eaux de lavage deviennent alcalines à cause du carbonate de soude et du verre soluble adhérents au sable, il faut les neutraliser avec de l'acide sulfurique pour que le pH soit autour de 8. Le taux de récupération de sable par cette méthode est d'environ 94 %.

### • Lavage ultrasonique

Le sable introduit dans le réservoir est mixé mécaniquement et prélavé. Le sable est ensuite envoyé par pompe à sable au cyclone où il est séparé de l'eau pour pénétrer dans le bain de lavage. Après le lavage ultrasonique dans le bain, le sable traverse la pompe à sable et le cyclone pour arriver à l'alimentateur électromagnétique où il est déshydraté, et prélevé après le séchage par un séchoir.

## ③ Cuisson

Cette méthode consiste à chauffer le sable usagé pour éliminer le liant par l'incinération ou bien par la fragilisation. Elle est destinée à éliminer les matières organiques appliquées au sable utilisant du liant organique en les décomposant par la

chaleur. Cette méthode est largement utilisée au recyclage du sable utilisant du liant résineux comme le cas de carapace.

On utilise soit le four rotatif, soit le four au lit fluidisé pour la cuisson. Du sable ayant une teneur en liant organique importante permet de réduire la consommation du carburant auxiliaire.

#### b) Recyclage hors de l'usine

Le sable qui n'est plus réutilisable aux moules, ainsi que les poussières fines et les boues générées dans le procédé de recyclage ne peuvent pas être recyclés dans l'usine génératrice. Ils n'ont qu'à être recyclés en divers matériaux pour les autres secteurs. Ces matières sont recyclées, selon la composition, soit en matériau de ciment, soit en filler d'asphalte.

Les poussières dégagées par le procédé de recyclage du sable sont en poudres très fines. Elles contiennent 80 % de  $\text{SiO}_2$  (voir le tableau 5.11-1). Mais en raison de sa teneur importante en  $\text{MgO}$  qui n'est pas convenable au matériau de ciment, ces poussières sont destinées principalement au filler d'asphalte. Par ailleurs, les poussières de fonderie contiennent une proportion importante d'argile.

##### Matériau de ciment

Le sable de moulage est composé principalement de  $\text{SiO}_2$  avec une certaine proportion de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et une dose minime de  $\text{CaO}$  et  $\text{MgO}$ , tandis que le matériau de ciment contient  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (4 composants principaux du ciment). Par conséquent, le sable de moulage peut être utilisé comme source siliceuse du ciment fait à partir de calcaire, de laitier de haut fourneau et de cendre de charbon. La présence des impuretés peut être admise à moins qu'elle ne modifie la qualité du ciment, mais les cimenteries sont réticentes à l'utiliser. Ce qui suit est un exemple de condition d'admission du sable de moulage d'une cimenterie japonaise.

- |                         |                             |
|-------------------------|-----------------------------|
| • $\text{SiO}_2$ > 75 % | • Eau < 10 %                |
| • Alcali < 1 %          | • absence (Magnésium, etc.) |

La qualité du sable usagé sera mise en question, si celui-ci est récupéré des fonderies en vue d'être recyclé. La difficulté en Tunisie est que les 8 fonderies génèrent des sables usagés de qualité différente (la proportion des 4 principaux composants n'est pas identique). De plus, si on se sert d'un parc de stockage pour un approvisionnement stable, le problème de la responsabilité de maintenir la qualité uniforme posera lors du livraison à la cimenterie.

##### Filler d'asphalte

Le sable usagé, les poudres fines (poussières) et les boues ayant une teneur importante en magnésium ne conviennent pas pour être utilisés comme matériau de ciment, car lors de la cuisson, le magnésium se transforme en oxyde de magnésium qui sera ensuite transformé en hydroxyde de magnésium en réagissant peu à peu avec de l'eau dans le béton. Cette réaction cause la destruction par foisonnement qui fissure le béton. Il existe une méthode d'utilisation de ce type de sable usagé comme filler en les mélangeant dans l'asphalte.

Par ailleurs, les poudres du carbonate de calcium sont utilisées depuis longtemps comme filler d'asphalte. Les poussières de fonderie peuvent remplacer le carbonate de

calcium. Les poudres de pierre utilisées comme filler d'asphalte doivent être des poudres de calcaire ou de roche magmatique qui ont une teneur en eau de moins de 1,0 % et qui forme des grumeaux de particules.

D'après les résultats des recherches au Japon, presque toutes les poussières de fonderie (collectées par le dépoussiéreur du procédé de recyclage) sont utilisables comme filler d'asphalte, à l'exception d'une partie de poussières qui ne peuvent pas satisfaire aux normes. Au Japon, en pratique, les poussières de fonderie sont mélangée dans l'asphalte à un taux de 5 % environ.

### 5.11.3 Système de récupération

L'utilisation comme matériau de ciment sera la principale voie de recyclage hors d'usine. Dans ce cas, il faut récupérer le sable usagé et le transporter jusqu'aux recycleurs. Etant donné que ceux-ci utilisent le sable usagé comme matière brute, leur activité sera stoppée en cas d'interruption de l'approvisionnement.

Le sable usagé généré dans les fonderies sera d'abord stocké en quantité suffisante pour être livré aux cimenteries. Au Japon, certaines fonderies ont créé ensemble un parc de stockage de sable usagé pour assurer un approvisionnement stable en quantité suffisante. Le tableau 5.11-3 montre les conditions nécessaires au recyclage du sable de moulage et les problèmes en Tunisie.

Tableau 5.11-3 Conditions nécessaires pour le recyclage du sable de moulage et problèmes en Tunisie

Conditions nécessaires	Problèmes en Tunisie
Approvisionnement en quantité	La quantité de génération n'est pas importante (par rapport à la génération du laitier de haut fourneau)
Approvisionnement stable	L'approvisionnement devient impossible quand les 2 premières fonderies sont en arrêt.
Tri, broyage, sélection et humidification	L'investissement en biens d'équipement est difficile pour les fonderies de petite et moyenne tailles.
Maintien de la qualité du sable usagé	Le sable de mer contenant des impuretés est utilisé comme matériau de sable de moulage.

Quant au problème de la quantité de la production, le développement du recyclage dans l'usine réduit la génération de sable de moulage usagé. Par conséquent, il faut améliorer la qualité du sable usagé afin d'en assurer la demande. Quant à la qualité, l'utilisation du sable de mer comme sable de moulage ne pose pas de problème s'il subit un traitement de purification avant son utilisation, mais ce traitement cause l'augmentation du coût.