

## 6 Etude sur le recyclage du phosphogypse

### 6.1 Besoins en produits de gypse

Les principaux débouchés du gypse sont les matériaux de construction et le régulateur de prise de ciment. En ce qui concerne les matériaux de construction, 4,3 milliards de m<sup>2</sup> de plaques de gypse ont été produits en 1996 dans le monde entier. La consommation annuelle moyenne de plaques de gypse par personne est de 10 m<sup>2</sup> aux Etats-Unis, 5,3 m<sup>2</sup> au Japon et 3,3 m<sup>2</sup> en Europe. Comme la population de la Tunisie est d'environ 9 millions de personnes, les besoins théoriques en gypse est attendu d'être de l'ordre de 30 millions de m<sup>2</sup> par an, sur l'hypothèse où le taux de consommation en gypse en Tunisie soit égal à celui de l'Europe.

Les plaques de gypse produites en Tunisie ne sont pas revêtues de papier de parement. Il s'agit de carreaux de gypse. Leur production annuelle est de 20.000- 40.000 m<sup>2</sup>/an, soit la consommation annuelle par personne est de 0,005 m<sup>2</sup> seulement.

La Tunisie, bien qu'elle soit riche en gypse naturel, la quantité de produits de gypse n'est point importante. Les principaux matériaux de construction utilisés en Tunisie sont des briques. Même comme mur de cloison, les briques sont utilisées en principe. Simplement, pour parement de leur surface, du mortier de ciment est utilisé en faible quantité. Le tableau 6.1-1 montre la production de chaque matériau de construction en DT et la proportion. Le pourcentage des produits de gypse dans tous les matériaux de construction n'est que de 0,3 % ce qui est très bas.

Par ailleurs, le tableau 6.1-2 montre la capacité de production de chaque matériau de construction en 1996. La quantité des installations de production des produits en gypse n'est que de 2 % par rapport à celle des installation de production des briques.

La plus grande partie de gypse produit en Tunisie est utilisée en tant que régulateur de prise de ciment. Sa consommation annuelle est de l'ordre de 300 à 400 mille tonnes. Le prix du gypse livré à la cimenterie est de 10 DT/tonne (3,5 DT/t pour le produit et 6,5 DT/t pour les frais de transport).

Il y avait auparavant plusieurs entreprises de fabrication de matériaux de construction en gypse, mais à cause de la faiblesse de la consommation soit 50.000 à 60.000 tonnes/an, seule "Les Plâtres Tunisiens" continue la production et la commercialisation des produits en gypse aujourd'hui. La capacité de production de cette entreprise est telle que l'indique le tableau 6.1-3.

La production de carreaux de plâtre est de 100.000 m<sup>2</sup>/an, à l'épaisseur de 7cm et de 10cm. Parmi tous ses produits de gypse de 65.000 tonnes, 35.000 tonnes sont distribuées sur le marché local et 30.000 tonnes sont destinées à l'exportation.

Actuellement, on doit dire que les besoins en plaques et carreaux de plâtre en tant que matériau de construction reste faible. En outre, ces produits étant fabriqués à partir du gypse naturel qui est abondant en Tunisie, la valorisation du phosphogypse en matériau de construction serait d'autant plus difficile.

Tableau 6.1-1 Production, exportation et importation de matériaux de construction

(unité : million de DT)

Branches	Production		Exportation		Importation	
		%		%		%
<b>Liants</b>	<b>1.192</b>	<b>31,1</b>	<b>334,1</b>	<b>66,5</b>		
1. Ciment	960,7	25,1	248,1	49,5		
2. Chaux artificielle	53,2	1,4				
3. Chaux naturelle	20,3	0,5				
4. Ciment blanc	146,8	3,8	86,0	17,0		
5. Plâtre	10,7	0,3				
6. Panneaux de plâtre	0,5					
<b>Dérivés de ciment</b>	<b>632,8</b>	<b>16,5</b>				
7. Carreaux mosaïque	368,4	9,7				
8. Tuyaux	182,3	4,7				
9. Ouvrages divers	82,1	2,1				
<b>Céramique</b>	<b>1.049</b>	<b>27,3</b>	<b>100,1</b>	<b>19,9</b>	<b>56,6</b>	<b>17,3</b>
10. Briques et hourdis	583,5	15,3				
11. Faïence	309,6	8,1	51,9	10,3		
12. Articles sanitaires	63,5	1,6	11,5	2,3	31,7	9,7
13. Articles ménagers	71,4	1,8	36,7	7,3	3,6	1,1
14. Réfractaires	21,5	0,5			21,3	6,5
<b>Verre</b>	<b>107,6</b>	<b>2,8</b>	<b>37,4</b>	<b>7,5</b>	<b>102,2</b>	<b>31,3</b>
15. Verre creux	87,6	2,3	27,4	5,5	58,9	18,0
16. Verre plat					43,3	13,3
17. Verre de sécurité	20	0,5	10,0	2,0		
<b>Diverses branches</b>	<b>857,4</b>	<b>22,3</b>	<b>30,5</b>	<b>6,0</b>	<b>167,9</b>	<b>51,4</b>
18. Granulats	535,5	14,0				
19. Marbre	204,1	5,3			28,2	8,6
20. Emaillage baignoires	39,9	1,0	5,7	1,1	11,4	3,5
21. Frittes et émaux	15,6	0,4	4,5	0,9	34,5	10,6
22. Activités diverses	62,3	1,6	20,3			
23. Produits semi-finis					93,8	28,7
<b>Total général</b>	<b>3.839</b>	<b>100,0</b>	<b>502,1</b>	<b>100,0</b>	<b>326,7</b>	<b>100,0</b>

Source : Les Industries des Matériaux de Construction, Céramique et Verre en Tunisie (juillet 1997)  
Agence de Promotion de l'Industrie, Ministère de l'Industrie

Tableau 6.1-2 Capacités de production de matériaux de construction (1996)

Catégorie	Capacité	Unité
Gravier et sable	30.000.000	m <sup>3</sup> /an
Ciment gris	4.700.000	tonnes/an
Ciment HRS	350.000	tonnes/an
Ciment blanc	222.000	tonnes/an
Chaux hydraulique artificielle	500.000	tonnes/an
Chaux hydraulique naturelle	200.000	tonnes/an
Plâtre	120.000	tonnes/an
Panneaux de plâtre	400.000	m <sup>2</sup> /an
Tuyaux béton armé	324.000	tonnes/an
Tuyaux amiante-ciment	92.000	tonnes/an
Carreaux mosaïque	16.000.000	m <sup>2</sup> /an
Marbre façonné	500.000	m <sup>2</sup> /an
Briques et hourdis	5.700.000	tonnes/an
Carreaux de faïence	20.000.000	m <sup>2</sup> /an
Brique réfractaire	10.000	tonnes/an
Articles sanitaires	15.500	tonnes/an
Baignoires émaillées	80.000	unités /an
Articles ménagers	6.000	tonnes/an
Bouteilles de verre	40.000	tonnes/an
Verre de sécurité	3.000	tonnes/an
Frittes et émaux	10.000	tonnes/an

Source: Les Industries des Matériaux de Construction, Céramique et Verre en Tunisie (juillet 1997)  
Agence de Promotion de l'Industrie, Ministère de l'Industrie

Tableau 6.1-3 Production de produits en plâtre

Forme	Type de produit	Production
Pulvérulent	1 Plâtre cuit (plafond)	3.000 t/an
Pulvérulent	2 Plâtre cuit (remplissage)	45.000 t/an
Pulvérulent	3 Plâtre cuit de porcelaine (fines)	3.000 t/an
Pulvérulent	4 Régulateur pour le ciment blanc	7.000 t/an
Massique	Carreaux de plâtre	8.000 t/an
	Total	65.000 t/an

Source: Les Plâtres Tunisiens

## 6.2 Génération et traitement du phosphogypse

La Tunisie exportait au départ uniquement les minerais de phosphate, mais dès les années 50, elle a entamé la production locale de l'acide phosphorique à partir duquel sont fabriqués les produits tels que le superphosphate et le supertriphosphate. Ces produits de phosphate sont exportés pour la plupart. Le tableau 6.2-1 montre l'évolution de la production des dérivés de l'acide phosphorique, et le tableau 6.2-2 montre l'évolution de leur exportation par type de produit.

Tableau 6.2-1 Production de dérivés de l'acide phosphorique (unité : 1.000 tonnes)

Type	1992	1993	1994	1995	1996
Acide phosphorique 54%	861	858	973	1018	1064
ASP: Acide superphosphorique 72%	34	12	-	-	-
TSP: Superphosphate triple (granulé)	786	642	820	780	785
DAP: Diammonium phosphaté	694	751	746	831	926
DCP: Phosphate Bi-Calcique	66	74	80	72	86
NA: Nitrate d'Ammonium (agricole)	206	167	103	171	169
NP: Nitrate d'Ammonium (poreux)	14	16	10	21	16
STPP: Triphosphate de soude	43,9	35,7	40,8	55,6	64,3
Engrais granulés (G27+G18)	35,3	26,5	27,5	23,0	34,7
Engrais composés (PK+NPK)	18,7	5,5	17,6	24,0	16,7
Super 16%	21,3	13,9	20,3	16,2	19,0
Engrais composés	2,4	3,9	3,8	3,6	3,3
<b>Total</b>	<b>2781,7</b>	<b>2605,5</b>	<b>2842,0</b>	<b>3015,4</b>	<b>3184,0</b>

Source : Les Industries Chimiques en Tunisie (juillet 1997), Agence de Promotion de l'Industrie, Ministère de l'Industrie

Tableau 6.2-2 Exportation de dérivés de l'acide phosphorique (unité : 1.000 tonnes)

Type	1992	1993	1994	1995	1996
Acide phosphorique 54%	506	492	610	633	635
ASP: Acide superphosphorique 72%	37	6	-	-	-
TSP: Superphosphate triple (granulé)	783	624	767	746	690
DAP: Diammonium phosphaté	657	717	698	750	840
DCP: Phosphate Bi-Calcique	54	68	68	62	74
NA: Nitrate d'Ammonium (agricole)	83	35	14	65	19
NP: Nitrate d'Ammonium (poreux)	7	4	4	8	4
STPP: Triphosphate de soude	34,8	33,7	40,5	47,6	56,5
Engrais granulés (G27+G18)	31,8	27,2	30,2	29,1	29,0
Engrais composés (PK+NPK)	16,3	7,6	13,2	26,9	17,7
Super 16%	19,3	17,5	17,0	16,9	15,0
Engrais composés	2,8	3,7	3,8	3,8	3,4
<b>Total</b>	<b>2232,0</b>	<b>2035,7</b>	<b>2265,7</b>	<b>2388,3</b>	<b>2383,6</b>

Source : Les Industries Chimiques en Tunisie (juillet 1997), Agence de Promotion de l'Industrie, Ministère de l'Industrie

Ces produits en acide phosphorique sont exportés principalement vers la France, l'Italie, l'Angleterre, l'Espagne, l'Inde, Cuba, la Chine, la Libye et la Turquie.

La majorité de ces produits sont fabriqués par utilisation de l'acide phosphorique fabriqué à partir du minerai de phosphate. Cet acide phosphorique étant issu du procédé SIAPE utilisant l'acide sulfurique en voie humide, une grande quantité de phosphogypse est générée en tant que produit secondaire. La fabrication de l'acide phosphorique est assurée exclusivement par le Groupe Chimique Tunisien. Le tableau 6.2-3 montre la capacité de production de chaque unité du Groupe Chimique ainsi que la quantité du phosphogypse généré à chaque unité.

Le phosphogypse issu du procédé est mis en décharge actuellement sans possibilité de valorisation. Le tableau 6.2-4 montre les situations de rejet du phosphogypse. Les piles (dites « Tabia » en Tunisie) et formant des trapèzes de phosphogypse sont rejetées à la terre et laissées dans des dépôts à ciel ouvert.

La quantité de phosphogypse mis en décharge est très importante, soit 23.750 tonnes par jour. En plus, ce rejet continue déjà depuis quelques dizaines d'années. La couleur du phosphogypse est noirâtre à cause peut-être des substances organiques qu'il contient. Ces décharges extérieures font craindre le risque de contamination des alentours à cause des matières nocives. Le rejet à la mer cause non moins de problèmes de pollution de l'environnement.

Tableau 6.2-3 Capacité de production de chaque unité du Groupe Chimique Tunisien et quantité du phosphogypse généré

	SFAX	SKHIRA	GABES	M'DILLA	Total
Production de l'acide phosphorique	360 t/j	110 t/j 2.550 t/j	2.210 t/j 310 t/j 400 t/j 350 t/j	500 t/j	4.170 t/j
Génération de phosphogypse	2.000 t/j	5.000 t/j	14.000 t/j	2.750 t/j	23.750 t/j

Source : Groupe Chimique Tunisien (enquête lors de la visite)

Tableau 6.2-4 Situations de rejet du phosphogypse

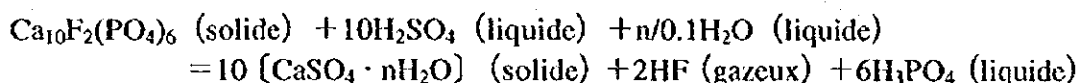
Unité	Méthode de traitement	Transport	Lieu de décharge
SFAX	Coulis (gypse 30%, eau 70%)	Canalisation	Tabia
SKHIRA	Cake de filtre	Courroie	Tabia
M'DILLA	Coulis (gypse 30%, eau 70%)	Canalisation	Tabia
GABES	Coulis (gypse 30%, eau de mer 70%)	Canalisation	Mer

Source : Groupe Chimique Tunisien (enquête lors de la visite)

### 6.3 Procédé de fabrication de l'acide phosphorique

La fabrication par voie humide de l'acide phosphorique se répartit en 5 différents procédés en fonction de la morphologie du phosphogypse dérivé, à savoir: dihydrique, hémihydrique, di- et hémihydrique, hémihydrique et enfin anhydrique.

Le procédé par voie humide est représenté par la formule ci-après. Ce procédé consiste à décomposer les phosphates par l'acide sulfurique à l'état solide :  $\text{Ca}_{10}\text{F}_2(\text{PO}_4)_6$  ( $=3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2$ ) de manière à obtenir l'acide phosphorique ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) en phase liquide et le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) en phase solide.



Le procédé de fabrication pratiqué en Tunisie est la "voie humide, à dihydrate" mis au point dans les années 1950 et nommé procédé "SIAPE" (Société Industrielle pour la Fabrication de l'Acide Phosphorique et d'Engrais).

Cette méthode permet d'obtenir de l'acide phosphorique d'une manière relativement simple et donc à un coût modéré. La société transfère la technologie aux plusieurs pays tels que la Turquie, la Grèce, l'Égypte, la Bulgarie, la Roumanie, la Syrie, la Yougoslavie, le Pakistan et le Sénégal.

Le flux de ce procédé est schématisé dans la figure ci-après. Ce qui est caractéristique est que le procédé SIAPE utilise une seule cuve de réaction, tandis que les autres procédés représentatifs à dihydrate tels que le procédé Dorr et le procédé Prayon en nécessitent plusieurs.

Le minerai de phosphate extrait et concassé en poudre à la carrière de Gafsa est transporté par chemin de fer. Pour la fabrication de l'acide phosphorique (28%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) est utilisé l'acide sulfurique produit à partir du soufre importé. Sur la base de l'acide phosphorique ainsi obtenu, divers types de produits phosphatés sont fabriqués.

La température de réaction est relativement élevée, soit entre 78 et 80 degrés. Comme filtre de séparation du phosphogypse, le filtre à courroie et le filtre à cuvette mobile sont utilisés.

Le tableau 6.3-1 montre l'exemple de teneur en acide phosphorique de liquide de lavage dans le filtre à chaque étape.

Tableau 6.3-1 Teneur en acide phosphorique dans le liquide de lavage

Étape	Teneur en acide phosphorique
Liquide original	28%
Liquide du 1er lavage	17% (à la cuve de réaction)
Liquide du 2ème lavage	5%
Liquide de lavage de filtre	0%

Source : Groupe Chimique Tunisien (enquête lors de la visite)

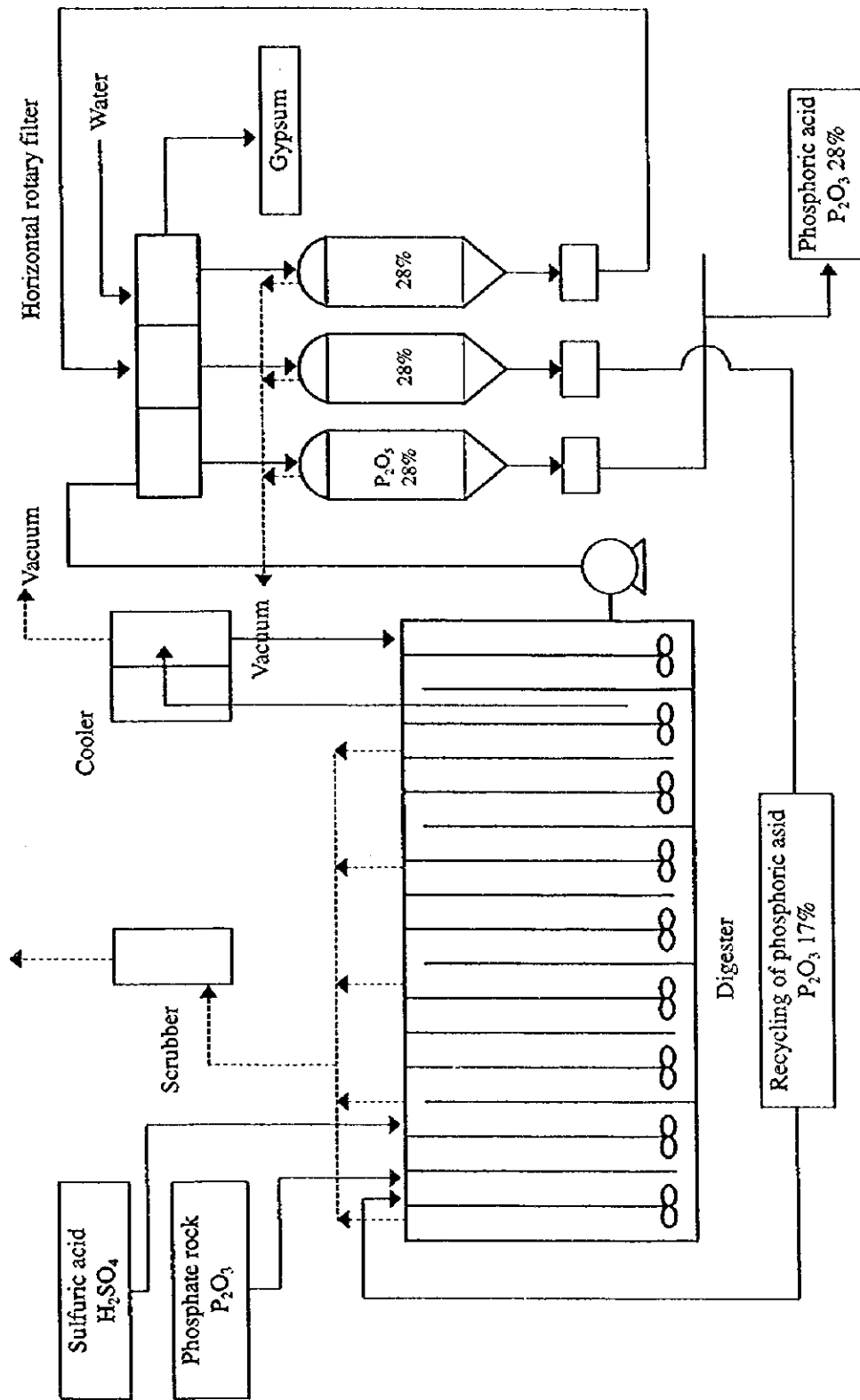


Figure 6.3-1 Méthode SIAP de procédé du phosphorique acide

#### 6.4 Qualité du minerai de phosphate et du phosphogypse

Le minerai de phosphate utilisé en fabrication de l'acide phosphorique provient de la carrière de Gafsa en Tunisie. Le minerai de phosphate qui est une sorte de roches sédimentaires est extrait, lavé à l'eau et concassé avant livraison. La principale composition chimique et la granulométrie sont enregistrées dans le tableau 6.4-1.

La teneur en phosphore de ce minerai est relativement plus basse que la plupart d'autres minerais de phosphate ( $P_2O_5$  32~39%, BPL 70~85%). Les teneurs en matières nocives du minerai de phosphate, à savoir ; l'arsenic (As), le cadmium (Cd) et le mercure (Hg) ne sont pas encore confirmées en raison du manque de données.

Tableau 6.4-1 Caractéristiques du minerai de phosphate

		Gafsa 65/68% BPL	Hyperphosphate
Principale composition	$P_2O_5$	29~30%	28~29%
	$SO_3$	3~4%	3~4%
	$SiO_2$	2.5~3.5%	3,6%
	$CaO$	48~49%	48~49%
	F	3,0~3,5%	3,3%
Traces	Zn		370ppm
	Cu		19ppm
	Co		20ppm
	Mn		27ppm
Granulométrie	500 $\mu$	10~20%	10~30%
	250 $\mu$	70~80%	60~80%

Source: Groupe Chimique Tunisien

En ce qui concerne du phosphogypse, la composition chimique est montrée dans le tableau 6.4-2, la granulométrie dans le tableau 6.4-3, et les caractéristiques physiques dans le tableau 6.4-4.



Tableau 6.4-2 Composition chimique du phosphogypse

Composition	Données du 01/05/1997		Données du 02/11/1997
	Gypse anhydrique	Gypse dihydrique	Gypse dihydrique
CaO	39	30,9	30,6
SO <sub>3</sub>	55	43,6	44,3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,5	2,8	1,2
SiO <sub>2</sub>	3,6	2,9	1,7
F	0,9	0,7	1,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,09	0,07	0,11
MgO	0,08	0,06	0,02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,05	0,05
Na <sub>2</sub> O			0,7
Matières organiques			0,4
Cl			0,045
Eau cristalline		(20,7)	19,5
Cd			5 ~ 20 ppm
Cr			10 ~ 30 ppm
Cu			5 ~ 18 ppm
Pb			>5 ppm
V			>5ppm
Sr			1100
Zn			50 ~ 100ppm
Ti			50 ~ 60ppm

Source: 1) Obtenues par la Mission d'étude préliminaire (Données du 01/05/1997)  
 2) Groupe Chimique Tunisien (Données du 02/11/1997)

Tableau 6.4-3 Granulométrie du phosphogypse

Granulométrie ( $\mu$ )	Fréquence	Distribution
1	0,6	0,6
1,5	0,1	0,7
2	0,4	1,2
3	0,4	1,7
4	0,6	2,3
6	1,1	3,5
8	1,5	5,0
12	3,7	8,7
16	6,1	14,9
24	8,6	23,6
32	8,3	31,9
48	18,6	50,5
64	10,6	61,2
96	22,4	83,7
128	15,5	99,2
192	0,7	100,0

Le diamètre médian moyen est de  $47,5 \mu$ .

Source: Données obtenues par la Mission d'étude préliminaire

Tableau 6.4-4 Caractéristiques physiques du phosphogypse

Caractéristiques physiques	Valeur
Poids spécifique (à l'état sec)	2,32
Poids spécifique (avec 30% d'eau)	1,67
Solubilité dans l'eau industrielle	2,3 g/l
Solubilité dans l'eau de mer	3,5 g/l
Densité du coulis (gypse 30%, eau 70%)	1,2
Teneur en eau après la filtration	32 ~ 35% (max.40%)
Température après la filtration	60 ~ 65% (max.80%)

Source : Groupe Chimique Tunisien

Les données mises à la disposition de l'équipe d'étude étaient limitées aux données montrées dans les trois tableaux ci-dessus. Sur la base de ces informations seulement, l'examen au détail est difficile, mais elles ont permis de savoir ce qui suit :

- 1) La teneur en  $P_2O_5$  du phosphogypse est importante. La donnée obtenue à cette mission a été de 1,2% (voir le tableau 6.4-2), mais l'équipe d'étude a obtenu verbalement une valeur de 3,0% ou de 1,2 ~ 2,5% lors de la visite d'une usine du Groupe Chimique Tunisien, et aussi une valeur de 3% lors de la visite de son siège social. Sur le questionnaire envoyé par la mission d'étude préliminaire, la valeur est de 2,8%. Cette valeur peut donc différer d'une unité à l'autre. Mais elle doit être de 1,2% au moins et 3% au maximum et s'étend normalement dans une plage de 2,5 à 3,0%, ayant quand même une fluctuation importante.

Cette valeur est nettement supérieure à la teneur normale en  $P_2O_5$  du phosphogypse (0,8 à 1,2%) dérivé d'une unité de production de l'acide phosphorique utilisant le procédé au dihydrate.

La teneur élevée en  $P_2O_5$  résiduaire dans le phosphogypse est le résultat d'un rendement insuffisant, car normalement la teneur en acide phosphorique doit être extraite au maximum comme produits.

L'équipe d'étude était prête à examiner la configuration du  $P_2O_5$  contenu dans le phosphogypse, mais les données qu'elle a obtenues n'étaient pas suffisantes pour l'éclaircir ; la seule information obtenue verbalement est la teneur en acide phosphorique soluble dans l'eau de 0,3 à 0,4 %.

- 2) En ce qui concerne la teneur en fluor, elle peut varier en fonction des caractéristiques du minerai de phosphate utilisé, mais cette valeur du phosphogypse généré en Tunisie est plus élevée que celle du phosphogypse ordinaire (0,24 à 1,27%).
- 3) La grosseur moyenne des grains du gypse est de  $50\mu$  qui est très fine. En plus, les cristaux du gypse sont aussi bien petits ce qui rend difficile d'obtenir la résistance mécanique voulue d'où ce gypse ne se prête pas à l'utilisation comme matériaux de construction.

## 6.5 Expériences japonaises et mondiales en matière de valorisation du phosphogypse

### 6.5.1 Procédé de fabrication de l'acide phosphorique et amélioration de la qualité du phosphogypse

Comme le gypse naturel est abondant dès l'origine dans les pays occidentaux, le phosphogypse généré par la voie humide de fabrication de l'acide phosphorique était toujours mis en décharge sans prendre sa valorisation en considération.

Par contre au Japon où il n'y a pas de ressources en gypse naturel, l'amélioration de la qualité a été étudiée afin de poursuivre deux buts ; la valorisation du phosphogypse et l'élévation du taux de récupération de  $P_2O_5$  lors de la fabrication de l'acide phosphorique.

La formation insuffisante des cristaux augmente la viscosité du coulis du phosphogypse et diminue la vitesse de décomposition du minerai de phosphate, ce qui rend les cristaux du phosphogypse généré par le procédé de fabrication de l'acide phosphorique encore plus petits. A cause de la petitesse des cristaux, le filtre est facilement bouché, et cela cause une capacité insuffisante de filtrage et enfin baisse le rendement du lavage. Par

conséquent, le taux de récupération de l'acide phosphorique se baisse. Pour résoudre ce problème, il faut favoriser la formation de gros cristaux de phosphogypse afin d'augmenter le rendement de la filtration et du lavage, et le taux de récupération de  $P_2O_5$ .

Le phosphogypse généré par le procédé au dihydrate contient en général 0,8% de l'acide phosphorique sous forme de  $P_2O_5$ . Comme cette teneur de l'acide phosphorique retarde la prise du ciment, le phosphogypse n'est pas utilisable au ciment. Il se pose le même problème en ce qui concerne son valorisation en matériaux de construction.

D'autre part, en ce qui concerne le procédé de fabrication de l'acide phosphorique lui-même, d'autres méthodes que le procédé dihydrique conventionnel ont été étudiées et mises au point, afin d'obtenir du phosphogypse d'une meilleure qualité. Comme résultat, la qualité du phosphogypse dérivé de ces nouveaux procédés ainsi que la grosseur des cristaux de celui-ci ont été améliorées. Le phosphogypse ainsi obtenu est donc immédiatement utilisable au ciment ou à d'autres matériaux de construction sans nécessité d'amélioration de la qualité.

Les principales méthodes de l'amélioration de la qualité du phosphogypse sont mentionnées ci-dessous.

#### (1) Traitement de l'acide phosphorique par ajout du lait de chaux

La teneur en acide phosphorique contenue dans le phosphogypse généré par le procédé au dihydrate est présente sous plusieurs formes :

- 1) attachée à la surface du phosphogypse sous forme de liquide d'acide phosphorique
- 2) introduites dans les interstices des cristaux du phosphogypse sous forme de liquide
- 3) mises sous forme d'ions de  $HPO_4^{2-}$  qui remplacent une partie d'ions de  $SO_4$  dans le phosphogypse
- 4) existantes sous forme de minéral de phosphate qui n'est pas décomposé

Parmi ces formes de présences, une grande partie de l'acide phosphorique résiduaire peut être éliminée par un bon lavage quand il s'agit du cas 1) et du cas 2). Quant aux cas 3) et 4), cette partie de l'acide phosphorique est existante sous forme d'apatite inactive, et comme la quantité est négligeable, elle n'exerce pas d'influence grave sur la qualité du phosphogypse.

La plus grande partie de l'acide phosphorique contenu dans le phosphogypse généré par le procédé au dihydrate est présente sous forme du cas 3).

Pour élimination ou neutralisation de cet acide phosphorique, les mesures suivantes ont été prises. D'abord il faut faire cuire le phosphogypse généré pour le transformer en gypse hémihydraté, puis, le faire hydrater de nouveau pour obtenir le gypse dihydrique. La teneur en acide phosphorique qui se dissocie à ce moment devient alors inoffensive grâce à sa transformation en sel de calcaire phosphaté inactif par ajout du lait de chaux. Ce traitement est efficace pour inoffensiviser en même temps l'acide phosphorique existantes sous forme du cas 1) et du cas 2).

## (2) Procédé hemi- et dihydrique

C'est une méthode qui divise la décomposition du minerai de phosphate par l'apport à l'acide sulfurique en 2 étapes, soit la décomposition proprement dite et l'hydratation. Moyennant des régulations de la température de réaction et de la concentration, on cause d'abord la cristallisation de  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$  du phosphogypse, puis, faire hydrater ces cristaux de façon à en former des cristaux de grandes dimensions de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Ce procédé a pour objectif d'augmenter le taux de récupération de l'acide phosphorique par formation des gros cristaux de dihydrates de phosphogypse qui améliore le rendement de filtration et de lavage, afin de pouvoir destiner phosphogypse généré à des fins diversifiées, telles que les plaques de gypse, ciment, etc.

Grâce à ce procédé, le taux de récupération de l'acide phosphorique est élevé et les cristaux obtenus ont de grosseur de 100 à 400  $\mu$  et le phosphogypse présente une bonne qualité (la teneur en  $\text{P}_2\text{O}_5$  total est moins de 0,3 %, et la teneur en  $\text{P}_2\text{O}_5$  soluble dans l'eau est d'environ 0,1 %). Par conséquent, le phosphogypse ainsi obtenu est immédiatement utilisable aux plaques de ciment sans nécessité d'amélioration de qualité.

Par ailleurs, il y a un autre procédé qui permet d'obtenir directement le liquide d'acide phosphorique concentré (la teneur en  $\text{P}_2\text{O}_5$  est de 40 à 45%).

## (3) Procédé di- et hemi-hydrique

Ce procédé est un procédé au dihydrate amélioré. La décomposition du minerai de phosphate est effectuée à la zone stable de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  à 70°C environ, comme au procédé au dihydrique. L'acide phosphorique est dissocié après la décomposition du minerai de phosphate. Le phosphogypse contenant la teneur en phosphate est de nouveau séparé de l'acide phosphorique par apport de l'acide sulfurique de 98%. Grâce à la chaleur de dilution obtenue lors de la réaction exothermique de décomposition, la température peut monter à la zone semi-stable du gypse hemi-hydrique ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) ce qui favorisera la cristallisation du gypse hemi-hydrique. En facilitant la récupération de l'acide phosphorique attaché à la surface, le rendement augmente.

La formation de ce gypse hemi-hydrique se faisant sous forme de mottes coagulées, sa filtration est facile et sa pureté est extrêmement élevée. Pour utiliser au ciment, la formation des cristaux se fait avec de l'eau. La teneur en acide phosphorique dans le liquide ainsi obtenu est plus élevée que celle du procédé au dihydrique. Par ailleurs, le procédé di- et hemi-hydrique peut se faire avec les installations existantes du procédé au dihydrique, en y ajoutant le procédé de l'amélioration de la qualité.

La qualité du gypse formé en hydratation pour l'utilisation en ciment est, d'après les études concernées, la suivante : la teneur en eau est de 10 % au plus, la teneur en  $\text{P}_2\text{O}_5$  total est de 0,1 %, et la teneur en  $\text{P}_2\text{O}_5$  soluble dans l'eau est d'environ 0,05 %.

### 6.5.2 Situation de génération / valorisation du phosphogypse au Japon et dans le monde

Les principaux pays qui valorisent le phosphogypse en ciment et en matériaux de construction sont les suivants :

#### (1) Japon

Au Japon, il n'y a plus d'entreprise utilisant le procédé au dihydrate. Les procédés actuellement utilisés et le nombre d'usines sont : le procédé au hemi- et dihydrique (3

unités) et le procédé au di- et hémihydrate (3 unités). La quantité totale du phosphogypse généré au Japon est d'environ 1.200.000 tonnes/an.

Le phosphogypse généré au Japon est totalement destiné à la valorisation en ciment, en plâtre, en plaques de gypse et en engrais.

(2) Corée

Le phosphogypse est mélangé avec du gypse naturel pour être valorisé en matériaux de construction et en ciment. Il est utilisable car, ayant été laissé stocké sous forme de terril à ciel ouvert pendant longtemps, la teneur en acide phosphorique a baissé par suite du lavage naturel à l'eau pluviale et de la recristallisation durant son stockage

(3) Indonésie

Le phosphogypse généré par le procédé hémihydrate et dihydraté est neutralisé avec du lait de chaux (le procédé est expliqué ci-dessus dans l'article 6.5.1 (1) Traitement de l'acide phosphorique par ajout du lait de chaux), pour être destiné au ciment. Le phosphogypse lavé à l'eau est également utilisé en matériaux de construction.

(4) Philippines

Le phosphogypse généré, ayant subi un lavage naturel à l'eau pluviale, est recristallisé durant son stockage à long terme. La partie dont la teneur en eau est de 12 à 13% et la teneur en  $P_2O_5$  de l'ordre de 0,15% est destinée à l'exportation en tant que matériau de construction. L'autre partie du phosphogypse dont la teneur en  $P_2O_5$  est de 0,3~0,4% est destinée au ciment.

(5) Brésil

Le phosphogypse à qualité améliorée par adjonction du lait de chaux (par le procédé (1) comme en Indonésie) est utilisé au ciment.

(6) Afrique du Sud

Le gypse ayant subi la thermolyse est destiné à la fabrication de l'acide sulfurique et du ciment. Le phosphogypse généré est transformé en gypse anhydre, et ensuite mélangé avec du schiste argileux qui alimente le  $SiO_2$  et le  $Al_2O_3$  nécessaires en tant que réducteurs pour la production du coke et du ciment artificiel (ciment portland). Pour produire le ciment et l'acide sulfurique, le phosphogypse mélangé est broyé dans un broyeur tubulaire jusqu'à ce que la part restante à  $90\mu$  devienne 3% environ, et puis décomposé à la chaleur dans un four à ciment. Le problème économique de ce procédé de fabrication de l'acide sulfurique est le coût d'équipement qui est environ 4 fois plus cher que celui de cuisson au soufre.

Cette méthode mise au point en Europe où le gisement du soufre est maigre, a été industrialisée en Allemagne et en Angleterre, etc. Actuellement, cette méthode est pratiquée en Afrique du Sud.

## 6.6 Etude des moyens possibles d'utilisation du phosphogypse

Comme modalités de valorisation du phosphogypse, les utilisations suivantes sont envisageables:

- 1) Utilisation en tant que régulateur de prise de ciment
- 2) Valorisation en matériaux de construction
- 3) Fabrication de ciment et de soufre
- 4) Fabrication de ciment spécial

La faisabilité de chaque méthode est examinée ci-dessous.

### (1) Régulateur de prise de ciment

D'une manière générale, une quantité de gypse correspondante à environ 5% de celle de ciment est utilisée comme régulateur de prise. Le gypse utilisé à cette fin est normalement le gypse naturel. Comme la teneur en acide phosphorique retarde considérablement le temps de la prise du ciment, son élimination ou inoffensivisation est indispensable si l'on envisage d'utiliser le phosphogypse.

La teneur admissible en  $P_2O_5$  soluble dans l'eau doit, de préférence, être d'au plus égale à 0,2% pour le gypse destiné au ciment. Le phosphogypse généré par le procédé au dihydrate contenant de 0,8 à 1,2% de teneur en acide phosphorique en général, n'est pas utilisable tel quel, mais demande une amélioration de la qualité comme présentée plus haut par adjonction du lait de chaux. Dans le cas où la teneur en acide phosphorique est élevée, l'amélioration de la qualité est techniquement faisable, mais ceci nécessite un coût très élevé à cause de la consommation d'une grande quantité du lait de chaux.

Comme le phosphogypse généré en Tunisie contient beaucoup d'acide phosphorique résiduaire, soit de l'ordre de 3%, le coût d'amélioration de sa qualité doit être très élevé même si c'est applicable du point de vue technique. Pour pouvoir efficacement améliorer la qualité du phosphogypse tout en restreignant le coût du traitement, il y a lieu d'envisager une amélioration du procédé de fabrication lui-même de manière à réduire la teneur en acide phosphorique résiduaire. Il est fort possible d'utiliser le phosphogypse généré par un procédé ainsi amélioré au ciment après un traitement d'amélioration de la qualité du phosphogypse.

En ce qui concerne la couleur, le phosphogypse est utilisable en le mélangeant dans le ciment artificiel, du fait que la couleur du ciment lui-même est noirâtre dès l'origine.

La production totale de ciment en Tunisie est de 5 à 6 millions de tonnes par an. Comme le taux de mélange du gypse est de 5% du ciment, la quantité de gypse à consommer dans les cimenteries doit donc être de 200 à 300 mille tonnes. Mais la Tunisie est un pays riche en gypse naturel, et son prix (livré à l'usine) n'est pas élevé, soit 10 DT/tonne. Pour que le phosphogypse soit compétitif vis-à-vis du gypse naturel, il faut restreindre le coût d'amélioration de sa qualité.

### (2) Matériaux de construction

Pour pouvoir utiliser le phosphogypse en matériaux de construction, la teneur en acide phosphorique et la grosseur des cristaux posent des problèmes importants. Pour l'utilisation du phosphogypse en tant que plaques de gypse par exemple, la résistance, l'adhésivité avec le papier, le temps de prise, etc. doivent être améliorés.

Comme la teneur en acide phosphorique résiduaire baisse le pH du phosphogypse et réduit l'adhésivité sur le papier de parement, et aussi retarde le temps de prise du gypse, il faut neutraliser le phosphogypse en utilisant du lait de chaux, etc.

La forme et le diamètre des cristaux du gypse exerce une influence importante sur la résistance. Normalement, les cristaux colonnaires ayant la grosseur de 100 à 200  $\mu$  est souhaitables. Dans le cas du phosphogypse généré actuellement en Tunisie, leurs cristaux sont trop fins, ce qui ne permet pas d'assurer la résistance suffisante. De ce fait, afin d'utiliser le phosphogypse en matériaux de construction, il faut procéder à l'amélioration de sa qualité. Mais, malgré la possibilité technique de l'amélioration de qualité, les débouchés du phosphogypse ne s'élargiront pas notablement puisque la consommation de gypse en tant que matériau de construction est très limitée en Tunisie.

### (3) Fabrication de ciment et d'acide sulfurique

La Tunisie importe du soufre pour fabriquer l'acide sulfurique nécessaire à la fabrication de l'acide phosphorique. Le procédé Müller-Kühne consiste à produire l'acide sulfurique et le ciment par thermolyse du phosphogypse. Grâce à cette méthode, on peut envisager la valorisation du phosphogypse tout en diminuant l'importation de soufre.

Cependant, du fait que le soufre peut s'obtenir sous forme de dérivés de la désulfuration du gaz naturel et du fuel lourd, le prix du soufre sur le marché mondial est très bas. Pour cette raison, il n'y a pas de nécessité absolue d'investir pour l'innovation du procédé de fabrication du ciment et de l'acide sulfurique. Il y a, par ailleurs, les problèmes techniques suivants qui entravent cet investissement.

#### ① Baisse de la résistance du ciment par l'acide phosphorique

Lors de la cuisson du clinker de ciment, la teneur en acide phosphorique empêche la formation du tri-calcium de silicate ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) qui est la matière minérale principale pouvant assurer la résistance du ciment. La résistance du ciment ainsi baissé est partiellement suppléée par les fluorures contenus dans le phosphogypse, mais le temps de prise est retardé.

La teneur admissible en  $\text{P}_2\text{O}_5$  soluble dans l'eau contenue dans le clinker est normalement d'inférieure à 1%, même au cas exceptionnel de 2 à 2,5% au maximum. Il faut maintenir la teneur en  $\text{P}_2\text{O}_5$ , soit soluble dans l'eau ou non, à inférieure à la teneur admissible, en effectuant un lavage à l'eau, etc., ce qui fait augmenter le coût de production.

#### ② Détérioration de la qualité de ciment causé par la teneur en soufre résiduaire par suite d'une désulfuration insuffisante de phosphogypse anhydrique

Le procédé de fabrication de clinker de ciment et de soufre à partir du phosphogypse pose un problème de la présence des composés de soufre résiduaire dans le clinker, à cause de la difficulté de désulfuration complète du anhydrite formé du phosphogypse.

Comme résultat de la réaction de  $\text{CaSO}_4$  avec  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , ou  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , le sel double formé au cours de cette réaction retarde la décomposition et empêche la formation du clinker. Par ailleurs, la réaction de  $\text{K}_2\text{O}$  et de  $\text{SO}_3$  cause, à l'intérieur du four, la formation d'une couche du dépôt des composés de  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{SO}_3$  qui empêche la désulfuration. Par conséquent, une quantité importante de  $\text{SO}_4$  est laissée résiduaire dans le clinker. Le ciment fabriqué de cette qualité de clinker risque la destruction par foisonnement de  $\text{SO}_4$ .



- ③ Baisse de la performance du catalyseur de fabrication de l'acide sulfurique par les fluorures contenus dans les gaz émanant du phosphogypse

Les fluorures contenus dans les gaz issus du phosphogypse empêchent la performance du catalyseur nécessaire pour la fabrication de l'acide sulfurique, et baissent le rendement de production.

#### (4) Production de ciment spécial

Il est à noter que, comme ciment spécial utilisant le gypse, il y a le ciment à prise accélérée. Ce type de ciment est muni d'une haute résistance initiale grâce à la formation d'ettringite par l'aluminate de calcium spécial et l'anhydrite.

Les principales caractéristiques du ciment spécial du type ettringite sont présentées dans le tableau 6.6-1 ci-dessous.

Une cimenterie tunisienne, Les Ciments Artificiels Tunisiens (CAT), en collaboration technique avec la marque brevetée Ultimax, produit un type de ciment à prise rapide. Les données détaillées ne sont pas fournies à l'équipe d'étude, mais il semble que c'est un type du ciment spécial mentionné ci-dessus. La production de ces types de ciment est techniquement réalisable, et plusieurs types de ciment spécial sont produits au Japon.

Mais, comme présenté dans le tableau, ce ciment est destiné principalement aux travaux d'urgence. A cause de son coût de production élevé, ce type de ciment ne peut pas remplacer le ciment artificiel ordinaire qui est produit en une grande échelle.

Même la société CAT a produit, en 1995, uniquement 1.000 tonnes de ce type de ciment dont la totalité était destinée à l'exportation, et ne l'a jamais commercialisé sur le marché tunisien.

Tableau 6.6-1 Fonctions et usages du ciment spécial du type ettringite

Fonctions	Composition principale	Usages
Prise prompt	12CaO 7Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (amorphe)	Béton à pulvériser, parafouille
Prise super accélérée	11CaO 7Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> CaF <sub>2</sub> ou 12CaO 7Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (amorphe)	Travaux d'urgence, réparation, amélioration de fondement
Haute résistance initiale	C <sub>3</sub> A + anhydrite ou verre CaO- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	Produits en béton à décoffrage rapide, travaux d'urgence
Haute résistance	C <sub>3</sub> A + anhydrite	Produits en béton à haute résistance, revêtement résistant à l'abrasion
Expansion	Haüyne (3CaO 3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> CaSO <sub>4</sub> )	Béton non-rétrécissable, béton précontraint chimique

## 6.7 Influence du phosphogypse sur les produits et leur contrôle de la qualité

En cas d'utilisation du gypse naturel, il suffit de contrôler la teneur de ses composants principaux tels que  $\text{SO}_3$  et  $\text{CaO}$ . Par contre, le phosphogypse contient des impuretés à un taux assez élevé. Les composants et leur quantité dépendent de la qualité initiale du minerai de phosphate et du procédé de fabrication de l'acide phosphorique ainsi que des modalités de traitement du phosphogypse. Toutefois, la présence des principaux composants des impuretés (quartz, fluorures, phosphate, matières organiques et composés de fer et d'aluminium) est fortement influencée par le procédé de fabrication, et les traces des composants tels que les métaux lourds et les matières radioactives varient selon la qualité du minerai de phosphate utilisé.

D'après un document mis à la disposition de l'équipe d'étude, la composition du phosphogypse généré en Tunisie est telle que l'indique le tableau 6.7-1. Dans l'ensemble, les matières sont des traces et ne posent pas de problème notable, mais, ce document ne précise pas la présence de Hg ou des matières radioactives.

Par ailleurs, il y a une autre étude sur les traces des composants contenues dans le phosphogypse généré en Tunisie dont les données sont résumées dans le tableau 6.7-1 (source : M. J. Rouissi, et A. Ben Salah "Phosphogypsum management in Tunisia : Environmental problems and required solutions", 1990 in Proceedings of the Third International Symposium on phosphogypsum, et, M. J. Rouissi et M. Zairi "Fermeture de l'ancienne décharge de phosphogypse de la NPK, Sfax 1994").

Tableau 6.7-1 Traces des composants dans le phosphogypse généré en Tunisie et leur concentration

Traces des composants	Concentration (mg/kg)	Normes au Québec (mg/kg)
Acide phosphorique ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )	31.000,0	*
Fluor	40.000,0	*
$\text{Zn}^{++}$	315,0	100,0
$\text{Cd}^{++}$	39,8	1,5
$\text{Hg}^{++}$	14,5	0,2
$\text{Ni}^+$	15,4	50,0
$\text{Fe}^{++}$	58,4	*
$\text{Cu}^{++}$	5,9	50,0
$\text{Mo}^{++}$	5,0	2,0
$\text{Co}^{++}$	7,6	15,0

Note : Faute de norme tunisienne applicable, les normes canadiennes au Québec est présentées à titre de comparaison.

D'après ces données, il est à remarquer que les taux de fluor, de cadmium et de mercure sont assez élevés.

Actuellement en Tunisie, le phosphogypse généré par les usines d'acide phosphorique est mis en décharge, soit empilé en tabia sur le site d'usine, soit en mer.

Les impacts nocifs connus de l'accumulation du phosphogypse sur l'environnement sont les suivants :

- (a) Pollution atmosphérique par des fluorures et d'autres matières nocives
- (b) Pollution du sol et de la nappe souterraines par des acides, des métaux lourds et des matières radioactives
- (c) Emission de radon gazeux
- (d) Risque d'aspiration des poussières radioactives
- (e) Exposition directe du corps humain au rayonnement gamma

En raison de la haute teneur en acide phosphorique et de la faible pH, le phosphogypse généré en Tunisie est considéré qu'il présente un risque notable de pollution du sol et des nappes souterraines par exsudation des métaux lourds tels que le mercure et le cadmium.

En ce qui concerne les matières radioactives, les matières contenues dans le phosphogypse sont U-238 et Th-232 qui proviennent du minerai de phosphate. L'équipe d'étude suggère que la matière radioactive contenue dans le minerai de phosphate extrait en Tunisie est pour la plupart U-238, et avec peu de Th, car le minerai provient de la couche sédimentaire. De ce fait, la matière radioactive contenue dans le phosphogypse doit essentiellement être Ra-226 issu de U-238.

La teneur en uranium dans le minerai de phosphate est montrée dans le tableau 6.7-2, mais les données sur le phosphogypse généré en Tunisie n'étaient pas disponibles.

Tableau 6.7-2 Teneur en uranium dans le minerai de phosphate

Type de minerai de phosphate	Provenance	Teneur en uranium (%)
Apatite	Floride (Etats-Unis)	0,0085 ~ 0,017
	Floride 68	0,014
	Floride 77	0,007
	Maroc	0,0093 ~ 0,0119
	Jordanie	0,007 ~ 0,0149
	Sahara	0,006
	Tunisie	0,0032 ~ 0,0047
	Algérie	0,011 ~ 0,0132
Apatite	Israël	0,012 ~ 0,014
	Togo	0,011
	Kossier	0,004
Minerai provenant du guano	Makatéa	0,006
Minerai de phosphate	Angaul	0,005
	Nauru	

Source : Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation, Tokai Laboratory : PNCT842-75-05 (1975)

La teneur en uranium dans le minerai de phosphate extrait en Tunisie est relativement basse par rapport à celle des minerais des autres régions. La teneur en matières radioactives dans le phosphogypse est donc faible, et les impacts sur l'environnement ne doivent pas être graves.

Les modalités pratiques de contrôle de la qualité des produits pour utiliser le phosphogypse sont les suivantes :

Au cas d'utilisation en tant que régulateur de prise de ciment, les matières faisant l'objet du contrôle de la qualité du phosphogypse sont les teneurs en  $SO_3$ , en acide phosphorique et en fluor, ainsi que la configuration du phosphogypse et sa granulométrie. Notamment l'acide phosphorique et le fluor, ayant une mauvaise influence sur la performance de la prise du ciment, doivent être contrôlés strictement. Quant à la configuration du phosphogypse, le gypse dihydrique est acceptable, mais le gypse hémihydrique n'est pas souhaitable. En ce qui concerne la granulométrie, ceci ne pose pas de problème chimique mais il faut prévoir des attentions pour la maniabilité.

Au cas d'utilisation en tant que matériaux de construction, il est nécessaire de contrôler la valeur de pH qui influence sur la résistance et l'adhésivité avec le papier, comme mentionné ci-dessus. Il faut également diminuer la radioactivité contenue dans le phosphogypse. Les problèmes envisageables sont les suivants ; le manque de résistance et une mauvaise adhésivité à cause de la valeur de pH trop faible, et la pollution éventuelle par le radon gazeux émis du Ra-226 comme influences des matières radioactives.

Il n'y a pas de normes spéciales relatives au rayonnement radioactif issu des matériaux de construction en gypse définies par l'Union Européenne ou l'Organisation Mondiale de la Santé. Toutefois, les normes en vigueur aux Etats-Unis et au Pays-Bas sont résumées dans le tableau 6.7-3. Par ailleurs, les valeurs moyennes de Ra-226 contenu dans le minerai de phosphate et le gypse ainsi que ses dérivés sont présentées par catégorie dans le tableau 6.7-4.

Comme le montre le tableau 6.7-4, le phosphogypse est un matériau qui a de la radioactivité. C'est pour cela qu'il faut prendre des mesures, lors de son utilisation en tant que matériaux de construction, pour que sa valeur soit inférieure à celle définie par les normes, en mélangeant avec du gypse naturel en général. Cependant, la valeur de radioactivité contenue dans le phosphogypse généré en Tunisie est évaluée relativement faible, heureusement, et le taux de mélange du gypse naturel ne sera pas forcément élevé.

Tableau 6.7-3 Normes relatives au rayonnement radioactif des matériaux de construction

Pays	Ra-226 (pCi/g)
Etats-Unis d'Amérique	10
Pays-Bas	5~10

Sources : J.J.Schultz, D.I.Gregory and O.P.Engelstad "Phosphate Fertilizers" in Conference on Ecologically Sustainable Industrial Development, United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), Copenhagen, 1991

Tableau 6.7-4 Radioactivité du minerai de phosphate, du gypse et de ses dérivés

Catégorie	Ra-226 (pCi/g)
Minerai de phosphate	38
Sol	0,5
Phosphogypse	30,8
Gypse naturel	0,1~2
Valeur admissible du phosphogypse	4~5
Matériaux de construction (excepté les dérivés de gypse)	0,1~2
Matériaux de construction : carreaux de phosphogypse	10
Matériaux de construction : panneaux de phosphogypse	1

Source: J.J.Schultz, D.I.Gregory and O.P.Engelstad "Phosphate Fertilizers" in Conference on Ecologically Sustainable Industrial Development, United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), Copenhagen, 1991

## 6.8 Problèmes à résoudre pour la valorisation du phosphogypse

Dans les unités de fabrication de l'acide phosphorique en Tunisie, une quantité énorme de phosphogypse est générée et empilée comme tabia pour être laissée à abandon, ou rejetée dans la mer. Sa valorisation est nécessaire du point de vue environnementale.

Il faut envisager ce problème des deux approches ; la valorisation du phosphogypse qui ne cesse de générer tous les jours des unités de fabrication, et le traitement du phosphogypse déjà accumulé sous forme de tabia.

### (1) Problème de valorisation du phosphogypse nouvellement généré

Le moyen le plus possible de la valorisation serait de l'utiliser comme régulateur de prise de ciment. La quantité annuelle de gypse demandé est de 200 à 300 mille tonnes ce qui représente à peu près 5% de sa génération, mais, cette solution peut être la plus réaliste du phosphogypse. Comme la grosseur et la forme de ses cristaux ainsi que sa couleur ne sont pas des problèmes graves qui empêchent son utilisation au ciment, la valorisation du phosphogypse en tant que régulateur de prise de ciment est faisable.

Toutefois, la teneur en acide phosphorique ( $P_2O_5$ ) du phosphogypse généré actuellement est de 3% ce qui est quand même importante, et les grains de cristaux sont très petits, d'où le phosphogypse tel qu'il est n'est pas immédiatement utilisable au ciment.

Pour améliorer la qualité de ce phosphogypse pour le destiner au ciment, il faudra une grande quantité de chaux. Comme ceci nécessite un coût élevé, le phosphogypse ne pourrait être compétitif vis-à-vis du gypse naturel.

Le procédé SIAPE est une méthode simple et appropriée à la fabrication de l'acide phosphorique à un coût modéré. Cependant, la teneur en acide phosphorique résiduaire est importante, étant donné que ce n'est pas un procédé qui tient compte de la récupération du phosphogypse généré. La valorisation du phosphogypse suppose donc, en premier lieu, l'amélioration du procédé de fabrication de l'acide phosphorique.

Un procédé amélioré de l'acide phosphorique permettra de favoriser la formation de gros cristaux ( $150\mu$  en moyenne), ce qui augmente le rendement de la filtration et du lavage, pour améliorer le taux de récupération de l'acide phosphorique, et en même temps, pour obtenir du phosphogypse ayant un taux moins élevé en acide phosphorique. Comme cette amélioration peut apporter deux avantages, elle doit être un moyen efficace du point de vue économique aussi.

Afin de former des grains de cristaux ayant un plus grand diamètre, la méthode la plus pratique est de mettre plusieurs cuves de réaction pour perfectionner la réaction en mettant plus de temps, pour que les cristaux originaux puissent circuler.

En ce qui concerne la teneur en acide phosphorique, quand elle est réduite jusqu'à 1%, le phosphogypse pourra être utilisé, après avoir subi un traitement de neutralisation mentionné plus haut, en tant que régulateur de prise de ciment.

Grâce à l'amélioration du procédé de fabrication de l'acide phosphorique, au Japon, le phosphogypse généré chaque jour est réutilisable tel quel à divers fins.

### (2) Traitement du phosphogypse accumulé sous forme de tabia

Par ailleurs, il y a une autre modalité d'amélioration de la qualité de phosphogypse pratiquée en Corée ou aux Philippines. Le phosphogypse généré est stocké pendant une longue période (5 à 10 ans) sur le site comme le cas des tabias. En subissant un lavage à l'eau pluviale, la teneur en acide phosphorique baisse, et les grains du phosphogypse sont

recristallisés. Par suite de ce stockage, le phosphogypse ayant de gros cristaux contenant moins d'acide phosphorique est réutilisé, soit directement, soit après un traitement d'amélioration de la qualité. Lors du stockage, il est nécessaire de prendre des mesures contre la pollution des nappes souterraines causée par les effluents, en recouvrant la terre des plaques en caoutchouc par exemple.

En Tunisie aussi, le phosphogypse empilé en tabia, ayant été exposé à la pluie, doit avoir subi plus ou moins le lavage et l'élimination de l'acide phosphorique ainsi que la recristallisation des grains, et doit avoir une qualité supérieure à celle du phosphogypse nouvellement généré.

Toutefois, le rendement de cette méthode de lavage dépend de la précipitations de la région ainsi que des caractéristiques originales du phosphogypse empilé (teneur en acide phosphorique, la grosseur et la forme des cristaux). Compte tenu de ces conditions, le phosphogypse généré en Tunisie actuellement demandera une très longue période pour obtenir des effets de cette méthode.

Les problèmes à résoudre pour la valorisation du phosphogypse sont mentionnés ci-après par modalité de réutilisation.

#### ① Régulateur de prise de ciment

Actuellement en Tunisie, le gypse naturel est utilisé comme régulateur de prise de ciment. Le pays est riche en gypse naturel, et son prix unitaire livré à l'usine est d'environ 10 DT/tonne. Par contre, pour une unité de fabrication de l'acide phosphorique d'une capacité de 300.000 tonne/an, le coût nécessaire pour améliorer la qualité du phosphogypse doit atteindre 20 DT/tonne en général. Le coût doit varier selon les coûts d'énergie et les coût des matières premières, mais en tout cas, l'utilisation du phosphogypse de qualité améliorée ne pourra pas être compétitive vis-à-vis du gypse naturel sur le plan commercial.

Au cas où on aurait à mettre un accent particulier sur la sauvegarde de l'environnement, il faut, non pas partir de la base commerciale, mais mettre en œuvre certaines mesures administratives dans le cadre de la politique environnementale. En l'occurrence, il faut envisager par exemple la consommation de la totalité du phosphogypse en Tunisie, et l'exportation de la totalité du gypse naturel.

#### ② Matériaux de construction

Les matériaux de construction en gypse est largement utilisés dans les pays étrangers y compris le Japon, mais la consommation est peu en Tunisie. Comme le pays est riche en argile, les briques rouges d'argile sont généralement utilisées, non seulement dans des maisons particulières, mais aussi dans des immeubles de grande taille pour les sols, les murs et les cloisons. D'après cette situation, les domaines d'application des produits en gypse seront très limités.

De toute manière, le phosphogypse ne pourrait pas être compétitive vis-à-vis du gypse naturel, même dans le domaine de matériaux de construction. La modalité de valorisation du phosphogypse la plus appropriée sera donc l'utilisation comme régulateur de prise de ciment.

## **6.9 Possibilité de fabrication de l'acide phosphorique et de l'engrais phosphaté non-accompagnée de la génération de phosphogypse**

### **6.9.1 Génération du phosphogypse**

Le procédé par voie humide de production de l'acide phosphorique et de l'engrais phosphaté connu sous le nom du procédé SIAPÉ présente l'inconvénient de donner lieu à la naissance d'une grande quantité du phosphogypse du fait que la dissolution du minerai se fait en utilisant l'acide sulfurique. Il y a 3 moyens de restreindre la génération du gypse.

Faire disperser dans le produit fini tout le gypse généré sans qu'il ne soit séparé (e.g. superphosphate de calcaire)

Utiliser l'acide phosphorique ou l'acide nitrique au lieu de l'acide sulfurique pour la dissolution du minerai de phosphate.

N'utiliser aucun acide (phosphate cuit, phosphate fondu)

Il va de soi que les procédés (2) et (3) ci-dessus ne donnent pas lieu à la production du gypse puisque l'acide sulfurique n'est pas utilisé.

Au fur et à mesure de l'évolution de l'engrais simple à l'engrais complet, et afin de répondre aux exigences du monde (Japon compris) de rationalisation de la production de l'engrais, de la baisse des coûts de sa circulation dans le marché et de l'économie de la main-d'oeuvre d'épandage, les engrais composés à haute analyse ont été mis au point.

Les engrais composés sont des engrais chimiques à base de superphosphate concentré de calcium, superphosphate de calcium, multi-phosphate de calcium et engrais phosphaté fondu. Les engrais composés dont la teneur totale en 3 éléments majeurs à savoir, azote, phosphate et potassium est de plus de 30% sont dits "à haute analyse" et ceux dont la teneur totale en 3 éléments précités n'est qu'inférieure à 30% sont dits "à analyse normale". Ils contiennent au besoin des éléments secondaires et traces d'autres éléments.

Les engrais composés à haute analyse sont très diversifiés. Ils sont essentiellement classés en fonction de la morphologie de l'azote (e.g. sulfo-phosphate d'ammonium, chloro-phosphate d'ammonium, mélange d'urée et de phosphate d'ammonium, mélange de phosphate d'ammonium et de phosphate de potassium, mélange d'oxyde de magnésium et de phosphate d'ammonium, mélange de phosphate d'ammonium et de nitrate d'ammonium). Parmi ces produits, ceux qui sont à base de phosphate d'ammonium voient, dernièrement, leur nombre augmenter.

Actuellement, la Tunisie importe le soufre à utiliser pour faire décomposer le minerai de phosphate, mais, nous proposons plutôt de produire l'hydrogène à partir du gaz naturel produit en Tunisie et l'utiliser pour produire l'ammoniaque par réaction de cet hydrogène avec l'azote présent dans l'air. L'ammoniaque ainsi obtenu servira à la production de l'acide nitrique par suite de son oxydation. En cas d'utilisation de l'acide nitrique, il n'y aura pas de formation du phosphogypse. Par contre, il y aura la chance de produire à la fois les engrais à haute analyse. Quant au nitrate de calcium produit à ce moment, celui-ci sera utilisable en tant qu'engrais azoté.

L'ammoniaque et l'acide nitrique sont tous les deux indispensables pour la fabrication de l'engrais phosphate d'ammonium à haute analyse communément utilisé dans le monde entier.

### **6.9.2 Engrais phosphatés non-générateurs du gypse**

Les engrais phosphatés au Japon sont tels qu'indiqués dans le tableau 6.9-1. D'après la norme officielle sur les engrais, ils se classent en engrais simple (engrais phosphaté)



garantissant seulement phosphate comme ingrédient et engrais garantissant non seulement phosphate mais le restant de 3 majeurs composants d'engrais comme azote et/ou potassium (engrais complet). Il existe par ailleurs divers types de produits selon leur formule et morphologie.

Tableau 6.9-1 Types d'engrais phosphatés utilisés au Japon (Norme)

Types	Ingrédients garantis			
	TP <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CP <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SP <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	WP <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Engrais phosphaté				
Superphosphate de calcaire			○	○
Superphosphate concentré de calcaire		○	○	○
Engrais phosphaté fondu		○		
Engrais phosphaté cuit				

note) La terminologie sur les types a été reprise sur celle de la norme officielle.

TP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: Acide phosphorique complet

CP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: Acide phosphorique soluble à l'acide citrique

SP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: Acide phosphorique soluble à la solution alcaline de citrate d'ammonium

WP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: Acide phosphorique soluble à l'eau

○ : garantie indispensable

△ : garantie d'un des ingrédients ci-dessus

Les plantes ont la propriété d'absorber les phosphates insolubles à l'eau en les dissolvant par de l'acide qu'elles secrète de leur racines (l'acide organique exsudé de leur racine) Ce qui fait considérer « L'acide phosphorique soluble à l'acide citrique » comme un élément composant l'engrais phosphaté au même titre que l'acide phosphorique soluble à l'eau, car il donne l'effet d'engrais en se dissolvant à l'acide organique comme citrate même s'il ne se dissout pas à l'eau.

Comme on voit sur le tableau 6.9-1, il existe divers procédés mis en œuvre dans le monde entier pour produire de l'engrais phosphaté. Citons notamment :

- Décomposition du minerai de phosphate par l'acide sulfurique permettant de produire le superphosphate de calcaire sans donner lieu à la séparation du gypse
- Décomposition du minerai de phosphate par l'acide phosphorique ou nitrique ; ce procédé est en soi exempt de formation du gypse
- Cuisson du minerai de phosphate à une haute température avec apport d'un élément magnésien comme la serpentine.

Parmi les engrais phosphatés contenant un seul élément (engrais simple), le superphosphate de calcium (produit qui existe depuis les premiers temps), l'engrais phosphate fondu et l'engrais phosphate cuit sont des produits qui ne génèrent pas de gypse.

Le superphosphate concentré de calcium, quant à lui, ne produisant certes pas de gypse au moment de la réaction entre le minerai de phosphate et la solution de l'acide phosphorique, il donne lieu à la formation de gypse dans le cas fréquent où l'acide sulfurique serait utilisé au cours de la préparation de la solution de l'acide phosphorique.

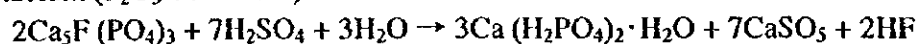
Mais si on utilise l'acide nitrique à la place de l'acide sulfurique dans la préparation de la solution de l'acide phosphorique, le problème de formation de gypse se résout.

La tendance mondiale veut que les engrais phosphatés soient composés des éléments de plus en plus concentrés et complets, et la production mondiale va en augmentant en faveur du phosphate d'ammonium utilisant l'acide phosphorique produit du procédé par voie humide, le superphosphate concentré de calcium, et les engrais composés à la base de phosphate d'ammonium ainsi que les engrais composés produits à la suite de la décomposition du minerai de phosphate par l'acide nitrique. Les procédés de production d'engrais phosphatés non-générateurs du gypse sont étudiés ci-après.

#### (1) Superphosphate simple

Alias : Superphosphate de calcium

A la suite de la décomposition du minerai de phosphate par l'acide sulfurique de 65 à 75%, et au terme d'un vieillissement d'environ 2 semaines qui s'en suit, on obtient un mélange du phosphate monocalcique et du gypse anhydre en tant que superphosphate de calcium ( $P_2O_5$  16 ~ 22%).



Le HF (fluorure d'hydrogène) ainsi généré forme en principe  $SiF_4$  en réagissant avec  $SiO_2$  se trouvant dans le minerai, mais les 15 à 20% de HF se disperse en vapeur (se gazéifie), et le restant demeure dans le produit.

Ce procédé ne crée pas de problème de traitement du gypse, car le produit se vend tout en contenant le gypse généré qui en est indissociable.

(Propriétés)

Composition: « Mélange du hydrate du phosphate de calcium primaire,  $3Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$  (poids moléculaire : 252,07) et du gypse » Poreux et en couleur cendrée, il contient aussi une petite quantité de l'acide phosphorique libre et du phosphate de calcium secondaire. Dans le cadre de la loi contrôlant les engrais, les teneurs en acide phosphorique soluble à l'eau et acide phosphorique soluble à la solution alcaline de citrate d'ammonium sont garanties. La teneur en ce dernier dépend du minerai de phosphate, mais dans la plupart des cas japonais, elle se situe actuellement entre 16 et 20%, et entre 20 et 29% si l'acide sulfophosphorique ou l'acide phosphorique est utilisé. Il est de faible acidité (près de pH 3) du fait de l'acide phosphorique libre qu'il contient en petite quantité. Il existe aussi des produits granulés facilitant l'épandage.

Une partie du superphosphate de calcium est directement utilisée comme engrais simple, tandis que sa majeure partie est utilisée en tant qu'ingrédient des engrais complets (engrais composé, engrais mixte) tout en étant associée avec le sulfate d'ammonium, l'urée, ou le sel potassique. La poudre de serpentine ou l'engrais phosphaté fondu y sont ajoutés ou mélangés pour être mis en vente comme superphosphate magnésique ou superphosphate fondu.

(Matières brutes)

Minerai de phosphate, acide sulfurique / acide phosphorique

(Procédé de production)

Le procédé pour produire le superphosphate de calcium est comme ci-après.

Broyage de minerai de phosphate

Réaction entre la poudre phosphorique et l'acide sulfurique

Vieillessement et dépôt de matière décomposée par acide

## (2) Superphosphate concentré de calcium

Alias : Superphosphate double; superphosphate triple

Le superphosphate concentré de calcium est un terme qui désigne globalement des produits contenant près de 30 à 50% du pentoxyde phosphoré ( $P_2O_5$ ). Le superphosphate concentré de calcium ( $P_2O_5$  44 à 46%) est obtenu à la suite de la décomposition du minerai de phosphate par l'acide phosphorique ( $P_2O_5$  40 à 50%).

Selon l'usage pratiqué aux Etats Unis d'Amérique, les produits contenant environ 30% de  $P_2O_5$  sont appelés « Double Superphosphate (DSP) » et ceux qui contiennent près de 45% « Triple Superphosphate (TSP) ». La concentration en  $P_2O_5$  de la solution d'acide phosphorique utilisée pour la production du superphosphate triple dépend plus ou moins de l'usine, mais elle se situe en général entre 25 et 50%.

Le procédé de production est presque identique à celui de superphosphate de calcium sauf que l'acide phosphorique ou l'acide mixte (sulfurique/phosphorique) est utilisé au lieu de l'acide sulfurique.

Le superphosphate concentré de calcium est utilisé comme engrais simple ou en tant qu'ingrédient d'engrais composé à haute analyse.

(Propriétés)

$CaH_4(PO_4)_2 \cdot H_2O$  poids moléculaire : 252,07

Composé principalement du phosphate monocalcique, il se présente en poudre ou granule en couleur cendrée ou brune foncée. Il se compose en 28 à 46 % d'acide phosphorique soluble à l'eau, 30 à 48 % d'acide phosphorique soluble à la solution alcaline de citrate d'ammonium, 0,5 à 1,5 % d'acide libre, 7 à 8 % d'eau et 20 à 30 % de calcaire.

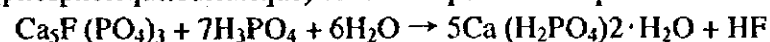
Il existe dernièrement des produits en version granulée.

(Matières brutes)

Minerai de phosphate, solution de l'acide phosphorique, acide sulfurique

(Procédé de production)

On prépare de l'acide phosphorique en ajoutant de l'acide sulfurique au minerai de phosphate tout en éliminant du gypse qui se génère. L'acide phosphorique ainsi préparé est ajouté au minerai de phosphate en poudre pour le faire réagir et granuler. Pour produire le superphosphate concentré de calcium contenant 30 à 37% d'acide phosphorique soluble à la solution alcaline de citrate d'ammonium, l'acide mixte (phosphorique/sulfurique) est utilisé pour décomposer le minerai de phosphate.



Lorsque la décomposition s'effectue à l'aide de l'acide mixte (phosphorique / sulfurique), on obtient un mélange du superphosphate de calcium et du superphosphate concentré de calcium, dont la qualité est intermédiaire en fonction du taux de mélange. Au Japon, on appelle le superphosphate concentré de calcium pour la teneur en  $P_2O_5$  de 30% ou plus, et le superphosphate de calcium pour la teneur de  $P_2O_5$  inférieure à 30%.

Au marché international, la teneur de  $P_2O_5$  46% est dominante. La température de réaction étant assez basse (environ  $90^\circ C$ ), la vitesse de réaction est lente ce qui nécessite un vieillissement de 4 à 6 semaines.

Le procédé de production du superphosphate de calcium ne donne naturellement pas lieu à la génération du gypse. Le gypse ne se génère non plus dans le procédé de production du superphosphate concentré de calcium sauf que l'acide sulfurique est utilisé au cours de la préparation de la solution de l'acide phosphorique.

### (3) Engrais phosphaté fondu

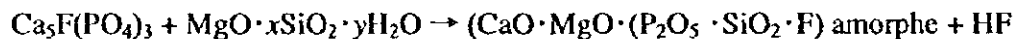
Alias : Engrais phosphaté de magnésium

On mélange le minerai de phosphate avec les granules ou petits morceaux de la serpentine ( $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ) ou de l'olivine, fait fondre à la température entre  $1350$  et  $1500^\circ C$  au four électrique ( $1500$  à  $6600$  kWh), et refroidit rapidement ce mélange

fusionné par l'eau courante pour qu'elle soit broyée en granules vitreux de 2 mm ou moins. On broie, essore, puis sèche ces granules au moyen de séchoir tournant jusqu'à ce que la teneur en eau soit inférieure à 0,1%. On les broie enfin avec broyeur à billes pour qu'ils soient finis.

Dans la plupart des usines, le four électrique à sole est utilisé. Le phosphate fondu est un engrais phosphaté typiquement japonais, mais il est produit aussi dans certains pays étrangers. Le phosphate fondu est un acide phosphorique soluble à l'acide citrique et sa teneur en ( $P_2O_5$  se situe autour de 20%. Outre le procédé au four électrique, il existe également le procédé au four à sole alimenté en fuel.

Le rapport du minerai de phosphate à la serpentine est considéré approximativement de 7 à 5 ( $P_2O_5$  1 mol  $CaO + MgO$  6 à 7 mol  $\cdot SiO_2$  2 à 3 mol).



Le dosage des ingrédients doit se faire de manière à obtenir  $m = 2$  ( $2 \sim 4$ ),  $m/n = 1$  pour la composition molaire du verre de  $lCaO \cdot mMgO \cdot P_2O_5 \cdot nSiO_2$ . L'engrais phosphaté fondu se compose en règle générale de 20% d'acide phosphorique soluble à l'acide citrique, 40 à 50 % de substance alcalin, 12% ou plus de magnésie soluble à l'acide citrique et contient éventuellement l'acide silicique soluble à l'acide citrique, le manganèse, et le bore. Selon une explication, le mécanisme de réaction ferait qu'une partie du calcium se trouvant dans le minerai de phosphate serait substituée par le magnésium, et le fluor se fixerait comme le fluorure de calcium. Tout au moins, l'engrais phosphaté fondu consiste en un mélange à miscibilité complète du phosphate de magnésium soluble à l'acide citrique, et de l'acide silicique.

(Propriétés)

A titre d'exemple, vous trouverez ci-dessous un résultat d'analyse effectuée sur un produit qui utilise comme matière brute le minerai de phosphate de Floride contenant 33% de  $P_2O_5$ .

Acide phosphorique complet  $P_2O_5$  : 22,19%, Acide phosphorique soluble à l'acide citrique  $P_2O_5$  : 21,95%, MgO: 18,62%, CaO : 31,23%,  $SiO_2$  : 22,12%,  $Fe_2O_3$  : 4,06%,  $Al_2O_3$  : 1,14%.

Les 99% d'acide phosphorique est soluble à l'acide citrique de 2% et le taux de dissolution de  $MgO \cdot CaO \cdot SiO_2$  à l'acide citrique se situe autour de 99%.

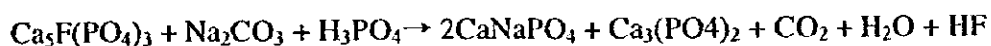
La spécificité de l'engrais phosphaté fondu est que l'acide phosphorique qu'il contient n'est pas soluble à l'eau comme dans le cas du superphosphate de calcium, mais près de 99% de  $MgO \cdot CaO \cdot SiO_2$  sont solubles à l'acide citrique. Les faits que l'acide phosphorique soluble à l'acide citrique ne se fixe que peu dans le sol, et que la magnésie, le calcaire et l'acide silicique sont aussi soluble à la solution alcaline de citrate d'ammonium, font l'engrais phosphaté fondu un bon produit améliorant la qualité de sols acides et les rizières épuisées. Il existe également des produits contenant le manganèse et le bore appelé « phosphate fondu BM ».

L'engrais phosphaté fondu est utilisé non seulement en tant qu'engrais à part, mais aussi comme ingrédient d'engrais mixte associant le superphosphate de calcium ou d'engrais mixte basique.

#### (4) Engrais phosphaté cuit

Ayant été mis au point au Japon, il est aussi produit dans certains pays étranger.

Au minerai de phosphate, on ajoute de la soude calcinée et de l'acide phosphorique, puis on fait la cuisson à 1300 à 1500°C au four tournant tout en y injectant du fuel et de la vapeur.



Le produit est le tétraphosphate pentacalcique de sodium,  $Ca_5Na_2(PO_4)_4$ , qui correspond à une substance solide-liquide (2:1) entre Révanite,  $CaNaPO_4$ , et le phosphate tricalcique  $Ca_3(PO_4)_2$ . Du fait qu'il est soluble à l'acide citrique, il est transformé en engrais multi-phosphaté ensemble avec le phosphore soluble à l'eau. Il est également utilisable comme additif alimentaire pour le bétail grâce à sa faible teneur en fluor résiduel (égale ou inférieure à 0,1 % F).

#### (5) Multi-phosphate (magnésique)

L'engrais phosphaté cuit n'agit pas vite sur les plantes du fait qu'il est soluble à l'acide citrique. Mais on peut le transformer en un engrais rationnel en y ajoutant de l'acide soluble à l'eau, car il permet aux plantes d'absorber d'abord de l'acide phosphorique soluble à l'eau pendant leur croissance initiale et ensuite de l'acide phosphorique soluble à l'acide citrique à mesure qu'elles croissent davantage. C'est à ce titre que le multi-phosphate est produit en faisant réagir l'engrais phosphaté cuit par la solution d'acide phosphorique, et que le multi-phosphate magnésique est produit sous forme de l'acide phosphorique magnésique. Ce dernier est obtenu en ajoutant de la solution de l'acide phosphorique sur l'engrais phosphaté cuit et la source magnésifiée comme la serpentine en poudre ou autre substance magnésifiée basique. Par ailleurs, en cours de la production de l'engrais ci-dessus, si la poudre du minerai de carbonate de manganèse cuit, ou l'engrais

boraté est ajouté, on peut produire le multi-phosphate magnésique contenant du manganèse ou du bore.

(Procédé de production)

On décompose le minerai de phosphate avec l'acide mixte (phosphorique/sulfurique), et ajoute de l'engrais phosphaté cuit, la serpentine, l'acide phosphorique pour obtenir le produit en granule.

(6) Engrais composé à haute analyse

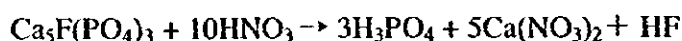
- a) Production de l'engrais composé au mélange de phosphate d'ammonium et de nitrate d'ammonium

On appelle «l'engrais composé au mélange de phosphate d'ammonium et de nitrate d'ammonium» les engrais obtenus de la réaction du minerai de phosphate par l'acide nitrique suivie de l'ammonisation par ajout du sel potassique ajouté.

- b) Décomposition du minerai de phosphate par l'acide nitrique

La méthode de production de l'engrais composé, qui consiste à décomposer le minerai de phosphate par l'acide nitrique était étudiée depuis longtemps en Europe. Au Japon, c'était Asahi Chemical qui avait produit l'engrais nitrique/phosphorique composé du nitrate de calcium et de l'acide phosphorique. Dans cette production, l'acide nitrique recyclé était employé au lieu de l'acide sulfurique afin de produire de l'engrais phosphaté. L'acide nitrique était alors récupéré en grande quantité de la production de Nylon.

Lorsque le minerai de phosphate est décomposé par l'acide nitrique de 58 à 60 %, l'acide phosphorique et le nitrate de calcium se génèrent selon la formule suivante.



Etant soluble à l'eau, le nitrate de calcium ne se sédimente pas comme le gypse et il reste dissous dans la solution de l'acide phosphorique. Si on ajoute de l'ammoniac dans cette solution, l'acide phosphorique forme le phosphate bicalcique selon la formule ci-après. Mais avec la valeur pH égale ou supérieure à 1.5, la solubilité baisse du fait de la fluoro-apatite,  $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$ , qui se forme.



La méthode pour y remédier consiste soit à éliminer le calcium en partie, soit à rehausser le taux de phosphore/calcium en ajoutant de l'acide phosphorique.

Asahi Chemical adopte la méthode montrée à la figure 6.9-1 dans laquelle le calcium est éliminé sous forme de gypse sous l'effet de l'acide sulfurique. Mais une autre méthode est également pratiquée. Elle consiste à former le phosphate bicalcique et le phosphate d'ammonium avec apport en quantité excessive de l'acide phosphorique.

Avec cette méthode, le gypse ne se forme pas.

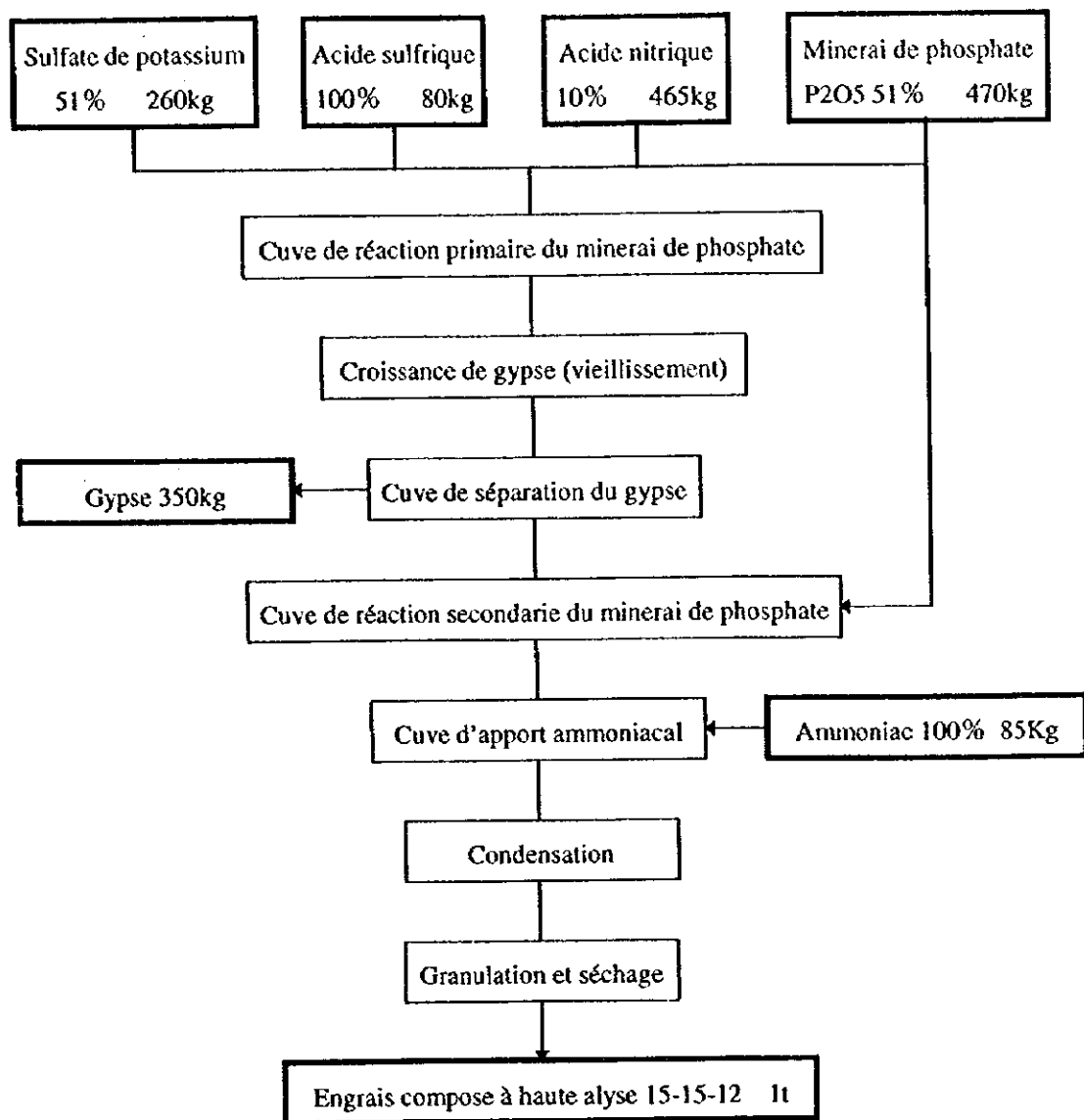


Figure 6.9-1 Procédé de production de l'engrais à l'acide nitrique  
(Méthode ASAHI CHEMICAL)

- c) Préparation de la solution de l'acide phosphorique en tant qu'ingrédient de l'engrais à haute analyse

Pour produire l'engrais à haute analyse, il est nécessaire de préparer la solution d'acide phosphorique. Nous étudierons ci-après les méthodes de préparation de la solution de l'acide phosphorique permettant de freiner la génération de gypse généré du procédé par voie humide de production de l'acide phosphorique.

① Acide phosphorique de grande pureté

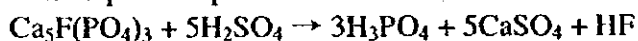
L'acide phosphorique de grande pureté peut être produit par une des deux méthodes : procédé par voie sèche ou procédé par voie humide. Le premier consiste à brûler d'abord

le phosphore jaune obtenu par la désoxydation au four électrique du minerai de phosphate avec apport du coke/ la roche siliceuse, et à faire réagir ensuite avec de l'eau le  $P_2O_5$ , résultant de cette combustion pour produire de l'acide phosphorique. Le procédé par voie humide consiste quant à lui, en la décomposition par l'acide sulfurique du minerai de phosphate en l'acide phosphorique et le gypse, la séparation du gypse résultant de cette décomposition, et l'épuration à grande pureté de l'acide phosphorique au moyen d'extraction par solvant ou autre méthode. Le phosphore jaune, dont la production consomme beaucoup d'énergie, étant une substance toxique, comporte un risque important d'entraîner la maladie professionnelle. La maladie professionnelle due au phosphore jaune est reconnue et appréhendée depuis toujours.

N'utilisant pas d'acide sulfurique, le procédé par voie sèche ne produit évidemment pas de gypse.

Parmi les produits commercialisés d'acide phosphorique de grande pureté, « 75 · 85 · 89 %  $H_3PO_4$  » est prédominant. Quant aux produits au-dessus de 100%  $H_3PO_4$  appelés l'acide phosphorique concentré, « 105 · 116 %  $H_3PO_4$  » est disponible au marché.

L'acide phosphorique obtenu à travers la décomposition du minerai de phosphate par l'acide sulfurique et l'élimination du gypse conséquent, est appelé l'acide phosphorique produit du procédé par voie humide.



Le fluor se trouvant dans le minerai de phosphate forme en principe HF, se pulvérise en partie sous forme de  $SiF_4$  en réagissant avec les impuretés siliceuses et se dissout en partie comme  $H_2SiF_6$  dans l'acide phosphorique.

La méthode de production se diversifie en fonction de l'étape de production et de la morphologie d'hydratation ( $X=0, 1/2, 2$ ) du gypse ( $CaSO_4 \cdot XH_2O$ ) où intervient son élimination. L'acide phosphorique produit par la méthode à dihydratation (acide phosphorique brut) présente une concentration se situant entre 25 et 31 %  $P_2O_5$  qui est trop faible en tant qu'ingrédient de l'engrais à haute analyse tel que le phosphate d'ammonium, le superphosphate concentré de calcium qui demande une concentration égale ou supérieure à 40 %  $P_2O_5$ .

La concentration s'effectue généralement par l'élimination de l'eau au moyen d'évaporateur sous vide. L'acide concentré pour sa commercialisation est d'habitude de 54 %  $P_2O_5$ . A cette concentration, l'acide phosphorique se condense en partie. Bien que l'acide orthophosphorique 100 % corresponde théoriquement à 72,4 %  $P_2O_5$ , la condensation se produit à la concentration 54~55 %  $P_2O_5$  qui est inférieure à la valeur théorique du fait que l'acide phosphorique produit du procédé par voie humide contient une quantité importante d'impuretés. L'acide superphosphorique dont la concentration s'élève jusqu'à 69~72 %  $P_2O_5$ , contient près de 10 % de l'acide pyrophosphorique. L'appareil de combustion par brûleur immergé est beaucoup utilisé pour cette concentration.

Au cours de la concentration, on constatera l'augmentation de la viscosité et l'apparition de la boue qui sont dues à l'accroissement de la concentration des impuretés métalliques dissoutes.

Bien que la consommation au Japon de l'acide phosphorique par voie humide ait chuté considérablement durant les 10 dernières années, le domaine d'application de l'acide



phosphorique raffiné s'est au contraire étendu sauf pour la pâture et la lessive, ce qui témoigne de la tendance de diversification de l'emploi en fonction des destinations.

Contenant beaucoup d'impuretés, l'acide phosphorique produit par voie humide se prête à la production de l'engrais, mais ne sera utilisable à des fins agro-alimentaires ou industrielles qu'après raffinage.

## ② Méthode de raffinage de l'acide phosphorique produit du procédé par voie humide

Pour raffiner l'acide phosphorique obtenu à la suite de la décomposition du minerai de phosphate par acide (procédé par voie humide), il existe deux méthodes de raffinage à savoir la méthode par extraction par solvant et la méthode par décantation par solvant.

### 1) Méthode par extraction par solvant

C'est une méthode d'extraire de l'acide phosphorique produit du procédé par voie humide, au moyen du solvant organique pouvant séparer le mélange liquide en deux phases grâce à son insolubilité dans l'eau. Le procédé se compose en prétraitement, extraction, concentration, et raffinage final.

La gamme du procédé Prayon est un cas typique.

Divers procédés ont été mis au point selon le solvant qu'on utilise. Dans le cas du procédé Prayon, on utilise un solvant mixte d'isopropyléther et de phosphate tributylque. Les solvants employés dans d'autres procédés sont; l'alcool butylique et l'alcool amylique (procédé mis au point par la Société Hoechst, Israëli Mining Industries, Azote et Produits Chimiques), amine (Monsanto), phosphate tributylque (Rhône-Poulenc), etc.

Tosoh Corporation produisait l'acide phosphorique de grande pureté à partir de l'acide phosphorique généré à la suite de la décomposition du minerai de phosphate par l'acide sulfurique, à travers un procédé d'extraction par alcool butylique. On dit que Tosoh a cessé la production d'acide phosphorique pour des raisons inconnues. On disait qu'avec ce procédé, on pouvait produire de l'acide phosphorique de grande pureté (qualité de réactif) tout en consommant peu d'énergie.

### 2) Méthode par décantation par solvant

Alors que la méthode par extraction par solvant utilise un solvant non soluble dans l'eau, cette méthode utilise un solvant soluble dans une quantité voulue d'eau. (par exemple, éthanol, isopropylalcool, acétone). En ajoutant ce solvant dans l'acide phosphorique par voie humide, les impuretés dans l'acide phosphorique se précipitent sous forme de sel non-soluble dans l'eau. La méthode consistant à séparer ce sel et à éliminer le solvant par distillation est dite "Décantation par solvant". La méthode la plus couramment utilisée aujourd'hui est une méthode améliorée de cette méthode (procédé Budenheim). Ce procédé consiste à ajouter de l'isopropylalcool dans l'acide phosphorique obtenu par voie humide, et éliminer les impuretés sous forme de boue. Après élimination des impuretés, laver par une petite quantité de solution saturée d'acide phosphorique (par exemple solution de phosphate de sodium 46%). (Comme il s'agit d'une solution saturée, il y a séparation en deux phases). Ensuite, faire passer le tout par des résines échangeuses du type H pour adsorption des ions résiduels d'impuretés. Et par distillation du solvant afin d'obtenir l'acide phosphorique raffiné.



## 7 Examen de la possibilité du recyclage des matières préférentielles

### 7.1 Fer

#### 7.1.1 Demande en produits intermédiaires ainsi qu'en produits finis et consommation des ressources

##### (1) Demande et offre en produits intermédiaires et en produits finis

La demande et l'offre de l'acier brut, des produits ferreux et de la ferraille figurent dans le tableau 7.1-1. La production de l'acier brut, l'importation de produits ferreux semi-finis (billettes, etc.), la production locale et l'importation et l'exportation de barres, de fils ou d'autres matériaux en acier, sont mentionnés au Chapitre 5. L'équipe a schématisé par ailleurs, l'évolution de la production et la consommation locales de l'acier brut, la production locale des produits ferreux, ainsi que le volume de ferraille récupérée dans le pays, évalués suivant les données susmentionnées.

Tableau 7.1-1 Demande et offre de l'acier brut (produits semi-finis)

	(tonnes/an)		
	1995	1996	1997
Production locale	194.000	186.000	220.000
(produits au four électrique)	46.000	46.000	70.000
Importation	34.000	73.700	113.200
Exportation	7.900	2.500	5.390
Consommation	220.100	257.200	327.810

Tableau 7.1-2 Demande et offre de produits ferreux (produits finis)

	(tonnes/an)		
	1995	1996	1997
Production locale	274.800	271.900	303.300
Importation	581.600	474.200	497.400
Exportation	146.000	115.000	129.800
Importation indirecte	130.000	120.000	137.000
Demande	840.400	751.100	807.900

Tableau 7.1-3 Demande et offre de ferraille (Ressources consommées)

	(tonnes/ an)		
	1995	1996	1997
Récupération à l'intérieur du pays	40.000	50.000	96.000
Importation	800	900	1.300
Exportation	2.500	3.100	3.900
Recyclage	45.500	47.800	93.400

Note) Le volume de ferraille récupérée dans le pays est une estimation étant donné que la génération des déchets provenant des ouvrages usagés n'est pas stable.  
Par ailleurs, le volume de ferraille récupérée dans le pays ne comprend pas la part des déchets de production réutilisés dans l'usine génératrice.

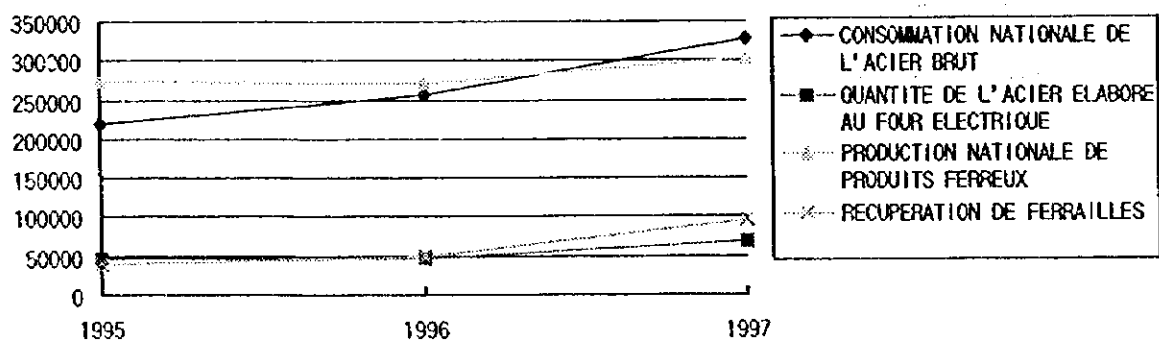


Figure 7.1-1 Tendence de demande et d'offre de l'acier brut, de produits ferreux, et de ferraille (tonnes/an)

La dernière décennie n'a pas connu de fluctuations importantes dans la production de l'acier brut et des produits ferreux, mais la tendance de ces 3 années montre que la consommation locale de l'acier brut augmente. Ceci est dû à l'augmentation de la production de l'acier brut en conséquence de l'agrandissement de la capacité du four électrique du complexe d'El Fouladh en 1997.

Par ailleurs, l'évolution de la demande et de l'offre des 3 dernières années indique ce qui suit :

- La production de l'acier brut s'accroît en même temps que le volume de produits semi-finis importés.
- La consommation de ferraille a largement augmenté en conséquence de l'agrandissement du four électrique.

## (2) Génération potentielle de ferraille

Au Chapitre 5, l'équipe a présumé séparément les sources et la quantité potentielle des déchets générés, concernant les déchets de production, les déchets de transformation, et les déchets des ouvrages usagés. En fin de compte, la quantité potentielle de ferraille générée est estimée à 226.000 tonnes / an au total.

Tableau 7.1-4 Quantité potentielle de ferraille générée (estimation)

Catégorie	Source, raison d'estimation	tonnes/an
Déchets de production	Usine sidérurgique	48.000
	fonderie	17.000
Déchets de transformation	7% de quantité traitée de l'acier	55.000
Déchets des ouvrages usagés	2% de l'accumulation totale	103.000
<b>Total</b>		<b>223.000</b>

### 7.1.2 Perspective de la capacité des récupérateurs et des recycleurs

#### (1) Capacité des équipements des récupérateurs

Comme il a été mentionné au Chapitre 5, le syndicat de ferrailleurs en banlieue de Tunis peut être cité comme récupérateurs représentatifs de ferraille, mais sa capacité de 14.000 tonnes/an ne représente qu'une faible partie de la quantité potentielle de génération des déchets des ouvrages usagés. Si la génération de ce genre de ferraille augmente, le marché de ferraille s'activera. Dans ce cas, les équipements seront renforcés. Actuellement, la récupération des déchets des ouvrages usagés est effectuée principalement à Grand Tunis, mais il est souhaitable d'aménager, à l'avenir, un système de récupération dans le sud-est du pays comprenant la ville de Sfax par exemple.

#### (2) Capacité des équipements des recycleurs

Comme l'indique le tableau 7.1-5, la capacité actuelle des équipements des recycleurs qui sont l'usine sidérurgique et les fonderies, est largement inférieure à la quantité potentielle de ferraille générée de 222.600 tonnes/an. Un renforcement d'environ 118.000 tonnes / an de la capacité des équipements est attendu.

Tableau 7.1-5 Capacité des équipements des recycleurs

	tonnes/an
Usine sidérurgique	85.000
Fonderies	20.000
<b>Total</b>	<b>105.000</b>

### 7.1.3 Examen de la perspective de l'insuffisance en capacité des équipements

Comme susmentionné, la capacité des équipements des récupérateurs et des recycleurs n'est pas suffisante pour la quantité potentielle de ferraille. Autrement dit, cette capacité insuffisante peut être le facteur qui empêche la valorisation, et freine la génération. En fait, l'agrandissement du four électrique du complexe d'El Fouladh a entraîné l'augmentation en quantité de consommation et de récupération de la ferraille.

Les équipements et leur capacité qui manquent pour un recyclage suffisant sont comme suit :

Type d'équipement	Four électrique et équipement de coulée continue annexe
Manque de capacité	11.000 tonnes / an de prise en charge de ferraille
(capacité à compléter)	95.000 tonnes / an de production d'acier brut

L'augmentation de la capacité du four électrique permettra de produire 95.000 tonnes/an d'acier brut en plus, il faut donc prévoir le renforcement de la capacité des laminoirs, etc. en même temps. Les conditions pour examiner le renforcement des laminoirs, prélevées à partir de la tendance de la demande et de l'offre d'acier brut et des produits ferreux, sont les suivantes :

- La consommation locale en produits ferreux a tendance d'augmenter malgré de certaines fluctuations.
- L'importation des produits semi-finis (billettes d'acier brut) montre une progression importante. Les entreprises de laminage achètent la plupart de ces billettes importées.
- La quantité annuelle de billettes d'acier brut importées et utilisées au laminage et à la fonte a été de 107.000 tonnes en 1997.
- L'importation des produits finis est également en hausse, le volume de barres d'acier importées étant de 130.700 tonnes/an en 1997.

Il est probable que les entreprises de laminage qui achètent actuellement des billettes importées opteront pour les billettes tunisiennes si celles-ci peuvent être fournies à des prix plus modérés.

#### 7.1.4 Dimension prévue du recyclage

La dimension du recyclage de fer est prévue, à partir de ce qui a été mentionné dans les sections précédentes, comme suit :

(1) Prise en charge de ferraille	110.000 tonnes / an
(2) Production d'acier brut	95.000 tonnes / an
(3) Principaux équipements d'aciérie	Four électrique au courant alternatif : 30 tonnes/lot, coulée continue, installation électrique, séparateur d'oxygène, installation de matériaux secondaires, bâtiments d'usine

L'équipe ne précise pas les sites de construction de ces installations, étant donné que le projet n'est encore qu'en phase d'étude préliminaire de faisabilité. Mais il faut, tout de même, que le site de ces installations satisfasse les conditions suivantes en tenant compte par exemple du besoin en utilités.

- a. L'approvisionnement de la ferraille est facile (le site est proche du lieu de consommation des produits ferreux).
- b. L'alimentation en électricité est aisée.
- c. Le site est proche du port commercial, et dispose si possible d'un quai.

L'équipe a inclus la proximité du port commercial dans les conditions en prévoyant d'importer ponctuellement la ferraille au cas où la quantité de ferraille locale est insuffisante.

### 7.1.5 Examen de la rentabilité

En Tunisie, la capacité des équipements sidérurgiques présente une insuffisance par rapport à la demande en produits ferreux qui augmente d'année en année. Surtout dans la production d'acier brut, le fait que l'importation de billettes a augmenté même après le renforcement du four électrique du complexe d'El Fouladh en 1997 prouve que la capacité n'arrive pas à satisfaire la demande locale. Par ailleurs, la quantité potentielle de ferraille générée dans le pays atteignant 226.600 tonnes/an donne une large possibilité de développer la valorisation de la ferraille.

L'équipe a supposé l'installation d'un nouveau four électrique d'une capacité de 100.000 tonnes/an dans l'évaluation du projet du recyclage. N'ayant qu'une faible capacité en tant que four électrique, cette taille est adéquate compte tenu de la situation actuelle de génération et de demande en ferraille en Tunisie, et en même temps rentable comme entreprise.

Le volume de ferraille récupérée dans le pays a augmenté suivant l'agrandissement du four électrique du complexe d'El Fouladh, mais la capacité des ferrailleurs qui sont les premiers intervenants de la récupération est presque en état de saturation. Etant donné que l'on prévoit désormais une augmentation de la demande en ferraille, l'expansion de la capacité des ferrailleurs et la participation de nouvelles entreprises à la récupération de ferraille sont attendues. Pour récupérer efficacement la ferraille du pays, il est souhaitable d'aménager des équipements adéquats selon la situation de génération de ferraille et les conditions locales. Dans le cas de la mise en place de 2 ou 3 établissements de récupération dans tout le pays, la capacité d'un établissement est estimée à 30.000 ~ 50.000 tonnes/an. La ferraille sera collectée et déchiquetée pour être vendue après l'élimination des métaux non ferreux et des plastiques. Etant donné qu'il faut des établissements de spécifications diverses, l'examen détaillé est présenté dans l'étude préliminaire de faisabilité (Chapitre 9).

## 7.2 Papier

### 7.2.1 Estimation de la demande en produits intermédiaires et en produits finis et de la consommation des ressources

La demande et la consommation de pâte, de papier et de cartons ainsi que de déchets de papier en Tunisie de ces 3 dernières années sont indiquées dans les tableaux 7.2-1, 7.2-2 et 7.2-3. Leur production, leur volume des échanges et leur consommation sont mentionnés au Chapitre 5. La figure 7.2-1 montre l'évolution de la production et la consommation locales de la pâte, de la production locale des produits papetiers, ainsi que du volume de déchets de papier récupérés, estimés à partir des données susmentionnées.

Tableau 7.2-1 Demande et offre de pâte à papier (produits intermédiaires de papier)

	(tonnes/an)		
	1995	1996	1997
Production locale	13.800	16.000	16.000
Importation	54.700	44.600	50.400
Exportation	7.600	9.000	10.200
Consommation	60.900	51.600	56.200

Tableau 7.2-2 Demande et offre de papier et de carton (Produits finis de papier)

	(tonnes/an)		
	1995	1996	1997
Production locale	86.000	82.500	86.000
Importation	86.400	90.100	114.200
Exportation	19.800	15.300	21.700
Consommation	152.600	157.300	178.500

Tableau 7.2-3 Demande et offre de déchets de papier (Ressources consommées)

	(tonnes/an)		
	1995	1996	1997
Récupération à l'intérieur du pays	20.000	23.100	34.000
Importation	13.000	11.900	5.800
Exportation	0	0	0
Recyclage	33.000	35.000	39.800

D'après la tendance de la demande et de l'offre de ces 3 dernières années, la consommation de papier et de cartons enregistre une augmentation alors que la production reste stagnante. Aussi, l'importation présente une rapide hausse pour suppléer cette différence.

Par ailleurs, le volume de déchets de papier récupérés à l'intérieur du pays s'accroît rapidement, tandis que l'importation des déchets est en baisse.



Les taux de récupération et de valorisation des déchets de papier en 1997 sont comme suit :

Taux de récupération = 19 % = Volume de déchets de papier récupérés dans le pays (34.000 tonnes) / Consommation de papier et de cartons (178.500 tonnes)

Taux de valorisation de déchets de papier = 46 % = Volume de déchets de papier recyclés dans le pays (39.800 tonnes) / Production de papiers et de cartons (86.000 tonnes)

Taux d'autosuffisance pour le papier = 24 % = (Pâte fabriquée en Tunisie + Volume de déchets de papier récupérés dans le pays  $\times 0,8$ ) / (Consommation de papier et de cartons) =  $(16.000 + 34.000 \times 0,8) / 178.500$

D'après ce taux de récupération de 19 %, il faut dire que le recyclage du papier n'est pas encore suffisamment développé.

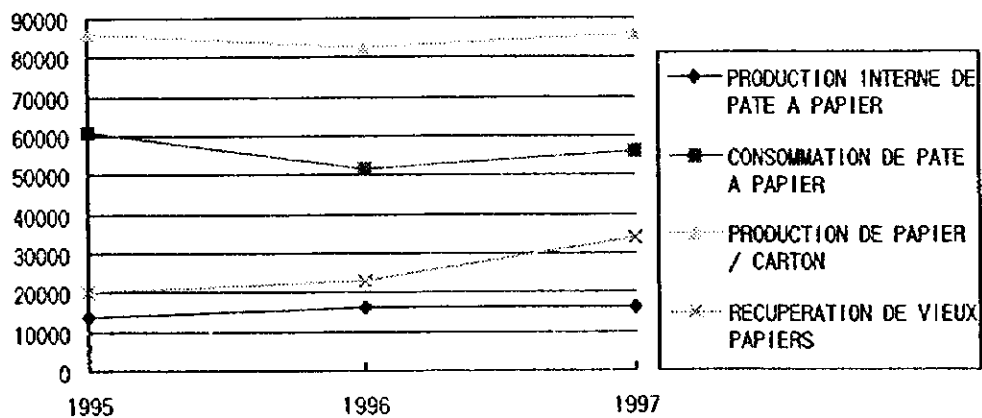


Figure 7.2-1 Tendances de demande et d'offre de pâte à papier, de papier, et de carton

À l'an 2000, on prévoit que la consommation en papiers et cartons atteindra 200.000 tonnes / an. Si on suppose un taux de récupération de 50 % (augmentation d'environ 30 % par rapport au taux actuel), le volume de papiers récupérés augmentera de 60.000 tonnes / an.

Avec un rendement de 80 %, ces déchets de papier pourront être recyclés à 48.000 tonnes de pâte régénérée au total. Si on suppose que la production de pâte à usage chimique à l'an 2000 restera au niveau de 1997, le taux d'autosuffisance pour le papier atteindra 48 %.

### 7.2.2 Perspective de la capacité des équipements des récupérateurs et des recycleurs

La récupération des déchets de papier est assurée actuellement par les récupérateurs de faible taille de Tunis et de Sfax, ainsi que par les recycleurs eux-mêmes. Les recycleurs viennent d'établir enfin un système de récupération par la mise en place des presses.

Dans l'avenir où le volume de papier récupéré se redouble, il faudra mettre en place des centres de collecte qui assurent la prise en charge des déchets de papier. En supposant un volume de traitement de 35.000 tonnes/an par centre, il faut prévoir la création des 3 centres.

Pour se servir de conditions de base à l'examen de la perspective de la capacité des équipements des recycleurs (producteurs de pâte/papier régénérés), l'équipe a estimé, à partir de la production locale et de l'importation de l'an 1997, la production de papier à partir de la totalité de pâte régénérée de 80.000 tonnes/an. Le tableau 7.2-4 montre les volumes estimés de chaque type de papier à produire à partir de pâte régénérée.

Tableau 7.2-4 Prévion de la production de papier à partir de pâte régénérée

	Production (tonnes/ an)
Papier d'impression	15.000
Papier hygiénique	15.000
Papier d'emballages	20.000
Cartons ondulés et autres cartons	30.000
<b>Total</b>	<b>80.000</b>

La production susmentionnée ne tient compte que de l'utilisation de la pâte régénérée. Dans le procédé réel de la production, la pâte vierge sera mélangée à la pâte régénérée.

La capacité de production des cartons ondulés et des autres cartons pourrait être supplée en renforçant les équipements existants.

Pour produire la pâte régénérée à partir des déchets de papiers d'impression, d'emballages et hygiénique, il faut mettre en place des équipements modernes munis de procédés de désencrage et de blanchissement.

A l'état actuel, la capacité de tissage est également insuffisante pour utiliser la totalité de la pâte ainsi régénérée.

### 7.2.3 Prévion de manque de capacité des équipements

Pour réaliser la production future de pâte régénérée de 80.000 tonnes/an, la pâte régénérée de 30.000 tonnes/an pour les cartons peuvent être produite avec les équipements existants, mais il faut créer une nouvelle usine pour produire encore 50.000 tonnes/an de pâte régénérée qui reste.

Par ailleurs, la capacité actuelle de tissage, à part celle des cartons ondulés et d'autres cartons, est d'environ 80.000 tonnes/an avec un taux de fonctionnement d'environ 80%. Par conséquent, la capacité de tissage à ajouter sera de 20.000 tonnes/an environ.

### 7.2.4 Dimension prévue du projet de recyclage

Le tableau 7.2-5 montre la consommation de papier, le volume de déchets de papier récupérés, la demande et l'offre de pâte régénérée par catégorie de papier, ainsi que la perspective de la capacité des équipements de la Tunisie dans cinq ans (en 2003).

Pour la production de 80.000 tonnes/an de pâte régénérée, en plus des équipements existants, il faut construire une nouvelle fabrique d'une capacité de 50.000 tonnes/an..

Par ailleurs, il faut agrandir la capacité actuelle de tissage pour ajouter encore 30.000 tonnes/an de capacité.

Tableau 7.2-5 Prévion de consommation de papier, de volume de déchets de papier récupérés, et de demande et offre de pâte régénérée à l'an 2003

		tonnes/an	
Prévion de consommation de papier et de cartons		200.000	
Prévion de volume des déchets de papier récupérés		100.000	
Prévion de quantité de pâte régénérée par destination		80.000	
Détail	Papier d'impression		15.000
	Papier hygiénique		15.000
	Papier d'emballages		20.000
	Cartons ondulés et autres cartons		30.000
Capacité d'équipements			
	Nouvelle fabrique de pâte régénérée	50.000	
	Augmentation de la capacité de tissage	30.000	
Unités de recyclage (Collecte des déchets de papier)		35.000	× 3 unités

### 7.2.5 Examen de la rentabilité

Comparé à la dimension de la production papetière actuelle de la Tunisie, un projet de régénération de 50.000 tonnes/an de pâte semble quantitativement important. Cependant, l'installation papetière ne peut être rentable qu'à un certain niveau de taille. Autrement dit, l'industrie papetière est un secteur dont la rentabilité dépend de la capacité des installations. Du point de vue de la taille, une usine de pâte régénérée de 50.000 tonnes/an est relativement petite.

Par ailleurs, la rentabilité dépend également de la compétitivité de la pâte régénérée contre la pâte importée, donc du prix de la pâte.

Actuellement, le prix de la pâte chimique blanchie importée est de 550 à 650 DT/tonne, auquel un droit de douane de 20 % est ajouté. Dans le pays, cette pâte importée circule à un prix de 660 à 780 DT/tonne auquel sont ajoutés les frais de transport et la TVA. Pour que la pâte régénérée soit compétitive, il faut réaliser un prix cible de 500 DT/tonne. Sur la base de ce prix de vente, le chiffre d'affaire total sera de 25.000.000 DT/an.

La décomposition approximative du coût de production est présumée comme le montre le tableau 7.2-6. Le détail est présenté dans l'étude préliminaire de faisabilité au chapitre 10.

Tableau 7.2-6 Décomposition approximative du coût de production

Articles	Pourcentage (%)
Déchets de papier en tant que matière première	10 ~ 15
Utilités et produits chimiques	30 ~ 35
Frais du personnel	15 ~ 20
Amortissement des équipements	20 ~ 25
Maintenance	5
Coût de gestion, Bénéfice	15

La part des frais de gestion et du bénéfice de 15 % est quelque peu sous-évaluée. Si les frais de recherche/développement sont réservés dans les frais de gestion, la part de ceux-ci doit être prévue à un niveau un peu plus élevé. L'amortissement des équipements a été estimé en supposant un financement en biens d'équipement dans les conditions les plus avantageuses. L'évaluation de la rentabilité plus détaillée est présentée dans l'étude préliminaire de faisabilité (Chapitre 10) en comparant de diverses conditions de financement.

## 7.3 Plastique

### 7.3.1 Estimation des demandes en matières intermédiaires et en produits finis et de la consommation en ressources

Les tableaux 7.3-1 et 7.3-2 montrent respectivement les quantités d'importation et d'exportation des résines plastiques et des produits en plastique ainsi que la quantité de consommation des 3 dernières années en Tunisie. Les quantités de consommation des différentes résines plastiques sont présentées ci-dessous. Les quantités de l'importation et de l'exportation des différentes résines plastiques ainsi que de leur consommation sont présentées au chapitre 5.

Tableau 7.3-1 Demande et offre en résines plastiques

	(tonne/an)		
	1995	1996	1997
Importation	121.200	134.500	140.900
Exportation	2.100	1.200	3.000
Consommation (transformation en produits)	119.100	133.300	137.900

Tableau 7.3-2 Demande et offre en produits en plastique

	(tonne/an)		
	1995	1996	1997
Production locale	86.000	82.500	86.000
Importation	86.400	90.100	114.200
Exportation	19.800	15.300	21.700
Consommation locale	152.600	157.300	178.500

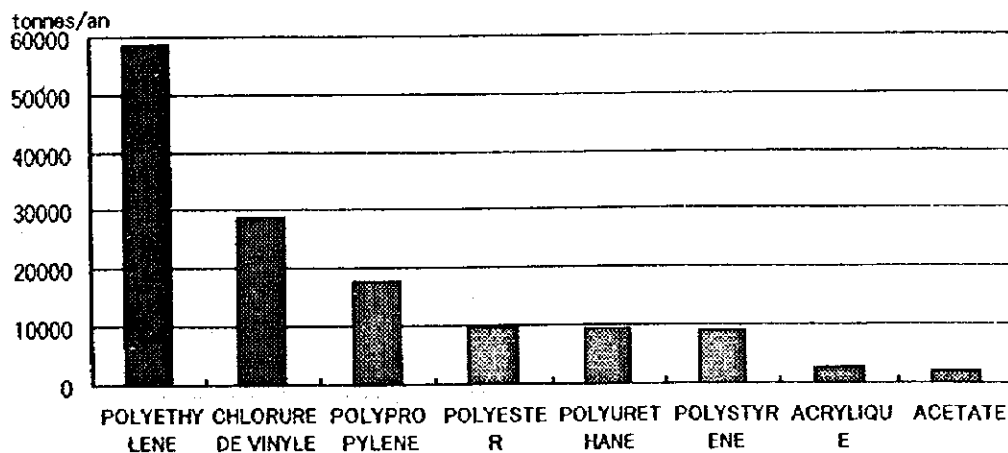


Figure 7.3-1 Consommation des résines plastiques par type

Comme les résines plastiques ne sont pas produites en Tunisie, elles sont entièrement importées. C'est-à-dire, le plastique est importé en totalité soit sous forme de résines plastiques soit sous forme de produits. Le tableau 7.3-2 montre la quantité des produits classifiés comme produits en plastique dans la nomenclature des statistiques du commerce extérieur, tels que les récipients ou les lavabos en plastique, etc.. A part ces produits, il y a entre autre la part de l'importation indirecte comme appareils ménagers ou magnétophones en plastique, composants en plastique de véhicules ou les matériaux d'emballages des autres produits importés, mais ceux-ci ne sont pas inscrits dans la quantité des produits importés en plastique. Etant donné que le plastique est une matière utilisée à diverses fins, il n'est pas facile d'identifier ses usages et estimer sa quantité totale d'importation. La quantité de déchets de plastique générés comme déchets ménagers est de l'ordre de 120.000 tonnes/an (estimation en 1994 par le PRONAGDES), et celle de déchets générés comme déchets industriels est d'environ 50.000 tonnes/an (estimation de 1997 par l'équipe d'étude; la quantité totale de déchets de plastique générés est de 128.000 tonnes/an dont environ 60 % est régénérés. Donc le reste qui est d'environ 40 % est mis au rebut). Bien que l'année de prospection soit différente, la quantité totale des déchets de plastique générés est estimée à 180.000 tonnes/an environ au total. Par conséquent, la quantité de l'importation indirecte se chiffre au moins à 1.500 tonnes. Mais compte tenu de la quantité accumulée des produits de consommation durables, la quantité de la portion de l'importation indirecte devrait être en réalité supérieure à cette quantité. Cette portion a du s'accroître en flèche ces dernières années par l'utilisation des matières plastiques devenue courantes pour les appareils ménagers.

Comme déchets de plastique générés dans les déchets ménagers, il y a des sachets et des emballages tels que les films d'emballage en polyéthylène ou en chlorure de vinyle ainsi que des bouteilles d'eau minérale en polyéthylène téréphtalate (PET), etc. Les bouteilles en PET pour la boisson mises en circulation en Tunisie sont fabriquées dans le pays par quelques fabricants de boisson et de bouteilles en PET. La quantité de résine de polyéthylène téréphtalate importée est de 1.970 tonnes (1997), ce qui correspond à 3,4 % de la totalité de résine de polyéthylène et à 1,4 % de la quantité totale des résines.

### 7.3.2 Prévision de la capacité d'équipements des récupérateurs et des recycleurs

A l'heure actuelle, les matières plastiques sont recyclées seulement par les usines génératrices eux-mêmes. Il existe deux modes de recyclage suivants :

- 1) Régénération des grains de résine excédentaires mélangés et préparés pour la fabrication d'un type de produit vers un autre type de produit. Ceci se fait dans l'usine génératrice des déchets en plastique en utilisant également les articles défectueux.
- 2) Réutilisation de matériaux comme ficelles d'emballage en vinyle tels qu'ils sont.

Actuellement le recyclage du type 1) est pratiqué couramment du fait qu'il ne demande ni un système de récupération particulier ni une technologie de recyclage. Dans le cas du recyclage 2), les matériaux sont réutilisés plusieurs fois tels qu'ils sont, mais ils seront rebutés un jour ou l'autre, à l'extérieur de l'usine en tant que déchets.

Cependant, les déchets de plastique une fois mis à l'extérieur des usines génératrices, soit comme déchets industriels et soit comme déchets ménagers, sont rarement recyclés.

Il n'existe aucune entreprise spécialisée en collecte, et seules les usines de régénération-transformation qui utilisent les déchets de plastique comme matière première font la collecte pour leur compte. Autrement dit, il n'existe pas d'entreprises de recyclage qui assurent la collecte et la valorisation des déchets de plastique.

Il y a deux manières possibles de valorisation des déchets de plastique. En Tunisie, la régénération de matière plastique est pratiquée seulement dans les usines de transformation de petite taille, en utilisant les déchets de plastique qui ne sont pas triés suffisamment. Comme la valorisation énergétique n'est pas effectuée, les petites usines de transformation sont les seuls recycleurs des déchets de plastique.

#### 1) Régénération des matières plastiques

Il s'agit d'un mode de recyclage qui consiste à régénérer le plastique à partir du plastique récupéré. Cette méthode est techniquement difficile, et pour la régénération en tant que matière, les déchets de plastique doivent être classés suivant leur type de résine plastique par une collecte sélective stricte. Il est donc difficile d'appliquer cette méthode aux déchets de plastique rebutés en dehors des usines et à ceux récupérés comme déchets ménagers. Il est possible de fabriquer les produits recyclés à partir des matières plastiques composites, mais leurs usages sont limités à des seaux ou des sachets, à cause de la qualité et de la couleur hétérogènes.

#### 2) Valorisation énergétique

Il s'agit ici d'un mode de recyclage qui consiste à utiliser le plastique tel qu'il est ou liquéfié comme combustible. Ce mode de recyclage ne demande pas un tri rigoureux suivant leurs composantes comme le cas de la régénération des matières. Toutefois pour utiliser les déchets de plastique comme combustible tel qu'il est, le chlorure de vinyle doit être éliminé, car le chlorure de vinyle peut dégager la Dioxine lors de la combustion. Le procédé de liquéfaction est déjà développé, mais elle reste au stade de l'examen aux usines pilotes à cause de ses coûts d'exploitation élevés, et donc n'est pas encore généralisée.

### 7.3.3 Examen de la prévision du manque de capacité d'équipements

Par suite de l'entrée en vigueur en janvier 1998 du Décret fixant les conditions et les modalités de reprise et de gestion des sacs d'emballages et des emballages utilisés, la Tunisie va aborder effectivement le recyclage des emballages en plastique. Ce système public de reprise et de valorisation des emballages utilisés appelé "ECO-LEF" (LEF signifie l'emballage) consiste à accorder les subventions aux collectivités locales pour les coûts de collecte, aux entreprises de recyclage pour les coûts de tri et d'emballage des déchets et aux entreprises de valorisation pour les coûts de régénération des matières, moyennant les fonds qui proviennent des droits d'adhésion à l'utilisation du logo ECO-LEF perçus des producteurs des articles d'emballages ou des produits emballés sous l'initiative de l'ANPE. Le détail du système ECO-LEF est expliqué dans le chapitre 11. Dans le système ECO-LEF, ce sont les collectivités locales qui sont supposées comme récupérateurs des déchets plastiques générés comme déchets ménagers. L'ANPE envisage un projet pilote de la collecte sélective des déchets de plastique dans la ville de Tunis afin de promouvoir la récupération des emballages utilisés. Cependant, du fait qu'en Tunisie il n'existe pas suffisamment d'entreprises de recyclage et de régénération des matières plastiques, et que la méthode

de valorisation des déchets de plastique récupérés ne s'est pas encore établie, l'ANPE ne peut pas encore le mettre en œuvre. Les petites usines de transformation existantes ne peuvent pas prendre en charge la totalité des déchets récupérés, et de plus la demande en produits recyclés fabriqués par cette méthode ne sera pas importante du fait de leur qualité médiocre. En outre, les collectivités locales ne disposant pas suffisamment de moyens financiers et matériels, la collecte et le recyclage ne peuvent pas encore être généralisés en province.

De même, en raison du manque des entreprises de recyclage et de régénération des matières plastiques, la collecte et la valorisation des déchets de plastique générés comme déchets industriels ne sont effectuées que très peu.

Comme il en est mentionné ci-dessus, le fait que ni la technologie de valorisation des déchets de plastique ni les débouchés des produits en plastique recyclé ne sont encore établis freine la promotion de la collecte des déchets de plastique.

#### 7.3.4 Taille du projet de recyclage

La quantité actuelle des déchets de plastique mis aux décharges est de l'ordre de 180.000 tonnes/an, dont les origines sont récapitulées dans le tableau suivant. Une quantité de 78.000 tonnes environ sur 128.000 tonnes de déchets industriels est recyclée.

Tableau 7.3-3 Quantité des déchets de plastique générés et mis aux décharges

	Quantité de génération (tonne/an)	Quantité de mise aux décharges (tonne/an)	Sources
Déchets ménagers	130.000	130.000	1994, PRONAGDES
Déchets industriels	128.000	50.000	1997, estimée par l'équipe d'étude

Note : La quantité de génération est celle des déchets générés totale, et la quantité des déchets mis en décharge.

Le tableau ci-dessus montre que déjà environ 60 % des déchets industriels en plastique sont recyclés. En effet, tant que les nouvelles technologies telles que la liquéfaction ne sont pas introduites, il sera difficile d'améliorer ce taux de recyclage. L'appréhension de l'avenir est plutôt l'abaissement du taux de recyclage actuel, car le recyclage pourra être moins rentable que la mise aux décharges à cause de l'excès de l'offre ou de la baisse des prix des produits en plastique.

Concernant les déchets ménagers, il faudra aménager des usines de valorisation des déchets de plastique pour promouvoir le recyclage des emballages en plastiques. Actuellement, le projet ECO-LEF prévoit une quantité de collecte de 23.400 tonnes/an dans l'immédiat. Les déchets faisant l'objet du projet sont des bouteilles en polyéthylène téréphtalate (PET), en polyéthylènes autres que le PET et en chlorure de vinyle. Parmi eux, la quantité de bouteilles en PET sera de l'ordre de 2.000 tonnes/an au maximum d'après la quantité de la matière première importée. Le reste, soit



21.000 tonnes/an environ, sera constitué de celles en polyéthylènes autres que le PET et celles en chlorure de vinyle.

La quantité de 23.400 tonnes/an correspond à environ 18 % de la quantité des déchets de plastique générés comme déchets ménagers (130.000 tonnes/an).

A part les bouteilles, il y a d'autres types d'emballages plastiques tels que les films en polyéthylène, sachets en chlorure de vinyle, plateaux en styrène, etc., mais les bouteilles sont plus faciles à collecter sélectivement pour la raison que la population peut se convaincre et participer plus à l'aise qu'aux autres formes de collecte.

Le projet ECO-LEF prévoit, comme modalité de recyclage, la régénération en tant que matières plastiques à partir des déchets de plastique récupérés. La capacité des équipements de 25.000 tonnes/an serait raisonnable pour le moment.

### 7.3.5 Evaluation de la rentabilité

La régénération des matières plastiques nécessite un tri rigoureux selon les différentes matières, notamment le polyéthylène téréphtalate et le polyéthylène, etc. Le tri se fait le plus efficacement au moment de génération des déchets et par les générateurs eux-mêmes. Il est évident que le tri après la collecte est nécessaire pour avoir de meilleurs résultats, mais c'est toujours le tri effectué par les habitants au moment même de la génération qui est décisif.

La qualité du plastique recyclé est fonction du degré du tri à ce stade. C'est-à-dire, la qualité du plastique recyclé étant l'élément déterminant de son prix, la réussite du projet rentable de recyclage du plastique dépend du degré de ce tri.

Toutefois, il est très difficile d'effectuer un tri strict en distinguant les différentes matières plastiques. En premier lieu, la coopération de la population est indispensable, mais quand même le tri a des limites du fait que les produits en plastique ne sont pas toujours constitués d'une seule matière; fois ils sont constitués de matériaux composites. Il est vrai que la récupération limitée aux bouteilles uniformes, par exemple seulement les bouteilles en polyéthylène téréphtalate d'eau minérale d'une certaine marque qui est commercialisée en grande quantité, pourra augmenter la pureté d'une matière, mais la quantité de récupération sera limitée. Le plastique recyclé contiendra donc de différentes matières; ce qui rend en conséquence inévitablement le prix et la qualité inférieurs à ceux de nouvelles résines. Pour le succès du projet de recyclage du plastique, il faut savoir à quels usages ce plastique recyclé dont le prix et la qualité sont inférieurs, doit être affecté; il reste donc à développer ses usages.

Pour que le projet de recyclage des emballages puisse réussir, il est question de savoir comment effectuer efficacement la collecte sélective des déchets urbains en plastique. C'est pour cela que le rôle des collectivités locales et la participation de la population sont essentiels dans l'aménagement du système, et la rentabilité du projet peut être évaluée seulement avec la probabilité du tri des différentes matières plastiques récupérées par ce système.

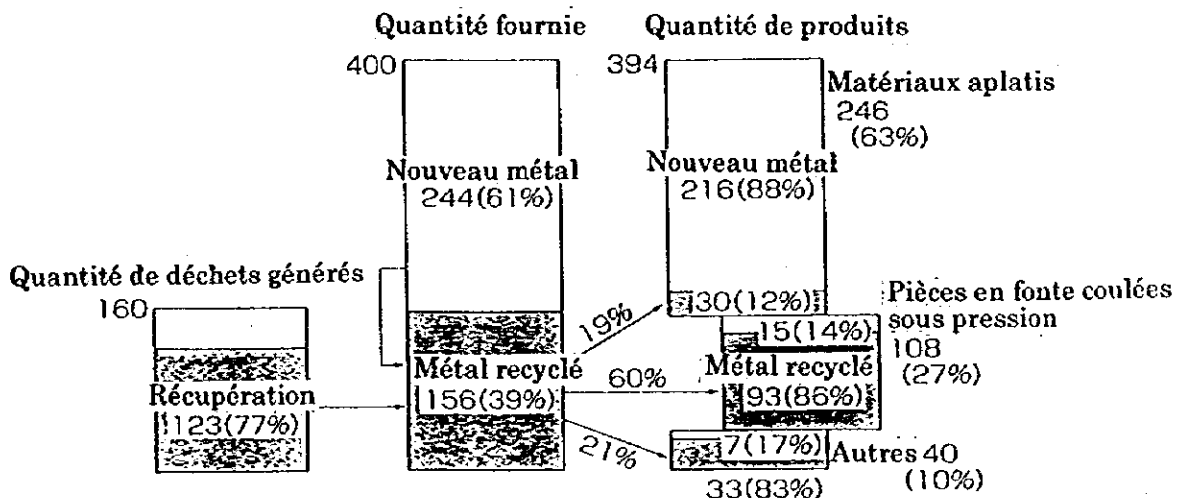
Par conséquent, le succès du projet de recyclage des matières plastiques ne peut pas être jugé simplement dans ce chapitre. Le recyclage des matières plastiques est un problème difficile à résoudre même dans les pays industrialisés, et du fait que la part générée de la consommation quotidienne étant importante, la contribution des collectivités locales est indispensable. D'autre part, il est à remarquer que les fabricants et les distributeurs qui bénéficient de leurs articles d'emballages ou de leurs produits emballés sont obligés de

prendre leurs responsabilités de leurs emballages utilisés. Dans ce sens, le système d'ECO-LEF qui consiste à percevoir les droits du logo des fabricants et distributeurs, pour utiliser les fonds ainsi collectés pour apporter les appuis à la partie chargée du recyclage comme collectivités locales, récupérateurs et recycleurs, a une grande signification. Il est souhaitable que ce système fonctionne efficacement et que l'industrie du recyclage du plastique se développe grâce aux activités des récupérateurs (tri et paquetage) et des recycleurs (usines de régénération des matières plastiques).

## 7.4 Aluminium

La taille du marché tunisien des produits en aluminium reste encore très petite, soit 1/300 à 1/400 de celle du Japon. Toutefois, du moment que l'aluminium est un métal précieux dont la totalité est importée, et que l'énergie nécessaire pour la régénération de lingots n'est que de 2,8 % de celle nécessaire pour la production de lingots neufs à partir du minerai, il y aura intérêt à récupérer et recycler l'aluminium dans la mesure du possible. A l'heure actuelle, les déchets de transformation générés dans les usines secondaires et tertiaires sont déjà très bien recyclés. Quant aux déchets provenant des ouvrages usagés générés en ville, le recyclage est pratiqué par les entreprises de régénération de lingots ainsi que les récupérateurs des déchets de métaux, bien que leur taille soit petite comme celle du marché local. Le recyclage de l'aluminium s'est donc ancré comme affaire rentable. Il est à noter toutefois que les performances et la capacité des équipements ainsi que les procédés de traitement et de rejet des crasses issues du recyclage du métal restent à améliorer. En effet, pour l'avenir du recyclage du métal qui devrait se développer parallèlement avec l'expansion du marché, il y a lieu d'étudier comment aborder ces problèmes.

En ce qui concerne les situations actuelles du recyclage au Japon, comme il en est mentionné ci-dessus, la consommation annuelle en aluminium se chiffre à environ 4 millions de tonnes, et l'accumulation de l'aluminium dans le pays est estimée à environ 60 millions de tonnes. La quantité de déchets générés en 1995 a été de 1,6 millions de tonnes dont 1,23 millions de tonnes correspondant à 77 % des déchets ont été récupérés (environ 31 % de la consommation en lingots).



(Unité : 10.000 tonnes)

Figure 7.4-1 Circulation des ressources d'aluminium au Japon(1995)

(Sources: Figure 7.4.1: Rapport de l'étude sur le recyclage du type circulation des ressources en 1997, mars 1998, Fédération japonaise de l'industrie mécanique, Association des métaux légers)

Il est à noter que sur 4 millions de tonnes en circulation, la part des lingots neufs n'est que de 2,46 millions de tonnes, et le reste soit environ 40 % des lingots régénérés. La quantité estimée des déchets de l'aluminium est de 1,6 millions de tonnes dont 1,23 tonnes (environ 77%) sont récupérées et recyclées. La figure ci-dessus montre également que, la quantité de l'aluminium récupéré dans le pays ne pouvant pas satisfaire la demande, les déchets et les lingots recyclés sont importés. (En 1996, 730.000 tonnes de lingots recyclés et environ 150.000 tonnes de déchets ont été importés)

La figure 7.4-2 montre l'évolution de la quantité de déchets générés au Japon ainsi que la prévision pour l'an 2000.

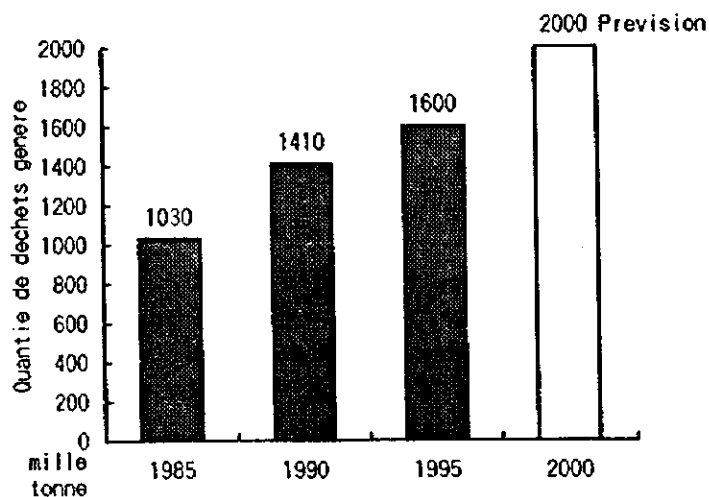


Figure 7.4-2 Evolution de quantité déchets genere et prévision

Source : même que celle de la figure 7.4.1

Compte tenu du fait que, en Tunisie, la quantité de consommation annuelle en aluminium est de l'ordre de 10.000 tonnes, que les produits distribués sur le marché sont encore neufs, et que la quantité de l'aluminium accumulé est faible, la quantité estimée des déchets d'aluminium récupérés et recyclés de 2.500 tonnes est un résultat appréciable. Toutefois, étant donné que la Tunisie devrait suivre la même voie que celle du Japon qui est dépourvu des ressources naturelles, l'équipe mentionne ci-dessous les points à étudier pour promouvoir davantage le recyclage dans le futur en présentant la technologie japonaise.

#### 7.4.1 Génération et de récupération des déchets d'aluminium

La quantité de déchets générés est estimée sur la base de la quantité de fabrication des principaux articles en aluminium, de l'offre en produits en aluminium sur le marché local de ces dernières décennies, et de la durée de vie de chaque produit. La quantité des déchets d'aluminium recyclables aux lingots est ensuite calculé en application du taux de collecte estimé.

a) Matériaux de construction

Châssis de fenêtre (en Tunisie, 90 % des produits extrudés sont les châssis) ; la durée de vie est estimée entre 25 à 30 ans au Japon.

b) Pièces coulées

Les types de produits et leur quantité devront être connus.

c) Produits coulés sous pression

Les types de produits et leur quantité devront être connus. La durée de vie d'un échangeur de chaleur est estimée à 9 ans au Japon.

d) Composants de véhicules (Composants coulés sous pression tels que les radiateurs, les pistons, les blocs moteurs, etc. et composants en pièces coulées, plaques)

La quantité de déchets en aluminium peut être estimée sur la base du nombre de véhicules mis en décharge et de la quantité des composants en aluminium par véhicule. La quantité totale des pièces d'aluminium utilisées a été de 66 kg par véhicule au Japon en 1995 (cas d'une voiture de catégorie 1.500 à 1.800 cc, poids 1,1 tonne). La durée de vie moyenne d'une voiture de tourisme est de 9 ans.

e) e) Câble électrique

Les déchets sont générés lors du renouvellement des câbles de transport et de distribution de l'énergie électrique des sociétés d'électricité.

f) Ustensile

La durée de vie varie selon la mentalité et le mode de vie des utilisateurs.

g) Canettes de boissons

La quantité annuelle de canettes de boissons commercialisées est égale à la quantité de déchets générés.

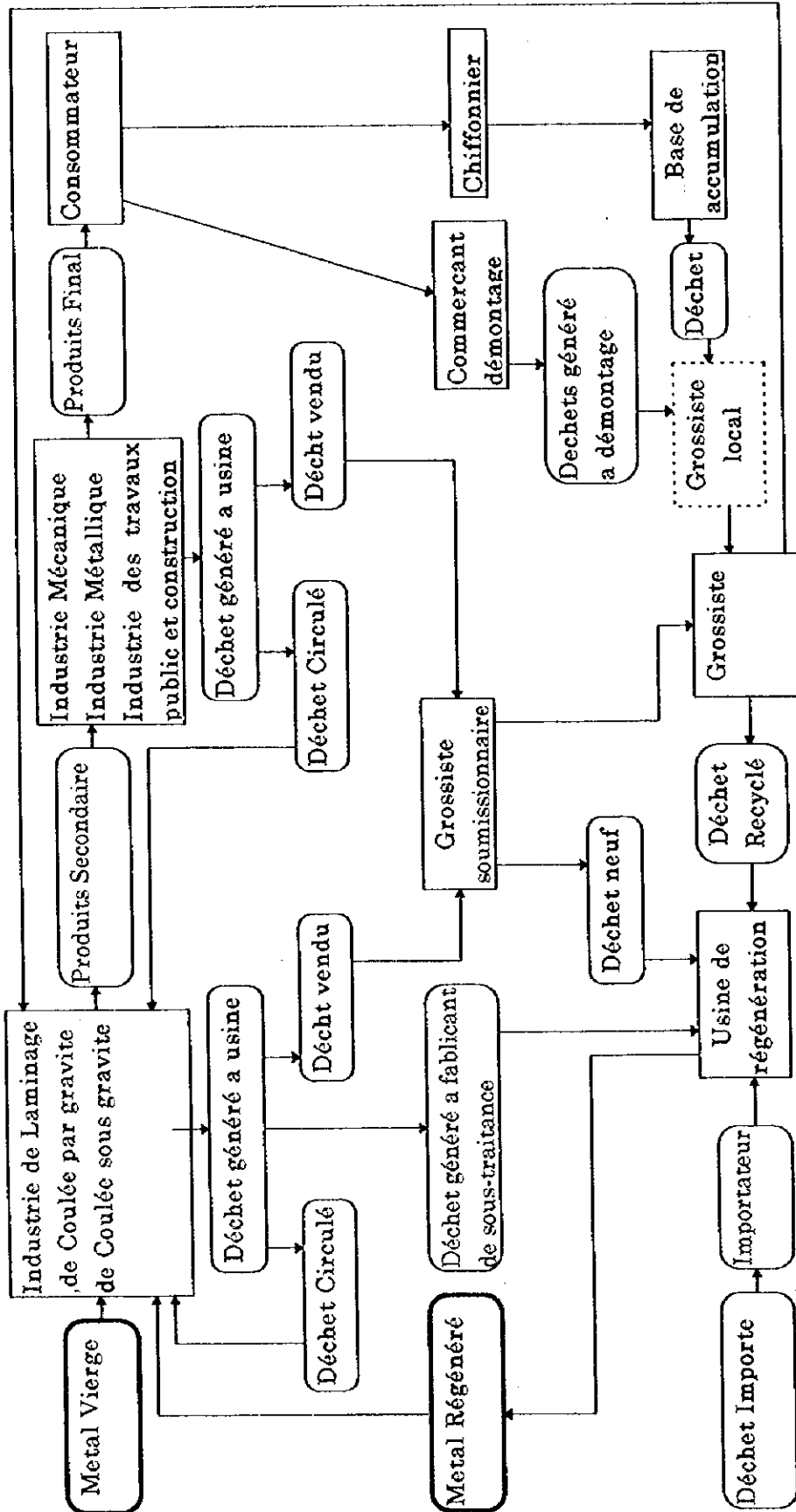
h) Plaques d'impression

La demande annuelle est égale à la quantité de déchets générés

#### 7.4.2 Aménagement de la filière de recyclage des déchets métalliques

Actuellement, il semble que de nombreuses petites entreprises de récupération alimentent les entreprises de régénération de lingots en petits lots de déchets. Toutefois, il est plus rentable et avantageux pour les deux côtés, si les déchets passent par des grossistes qui s'occupent du tri des déchets par catégorie des métaux et alimentent les entreprises de lingots régénérés en quantité plus ou moins importante. Voici un exemple des travaux peu productifs ayant été constatés par l'équipe d'étude. Certains récupérateurs de petite taille fondent les déchets eux-mêmes dans leur petit four à creuset installé au coin de leur dépôt. Mais le métal ainsi recyclé n'étant pas de véritables lingots régénérés, la qualité est médiocre et la composition n'est pas identifiable.

Fig. 7.4-3 SCHEMA D'ECOULEMENT DE DECHET DE L'ALUMINIUM EN JAPON



Ce type du métal, appelé au Japon métal de base, est normalement destiné, après une refonte, à la réutilisation comme matière première par les producteurs de lingots régénérés. Voici un exemple des inefficacités sous différents aspects.

A titre de renseignement pour la promotion future du recyclage, le schéma du flux de déchets d'aluminium au Japon est présenté dans la figure 7.4-3.

### 7.4.3 Amélioration de fours de fusion

Dans les fours existants, des feuillets d'aluminium et des copeaux d'usinage ne sont pas valorisables comme matière première, car dans ce type de fours, ces déchets seront brûlés avant d'être fondus. A cause de ce problème, ils sont exportés tels quels. Compte tenu de la capacité des entreprises, l'innovation des fours de fusion qui nécessite de nouvel investissement en équipements ne serait pas facile, mais il est souhaitable d'implanter dans le futur les fours de fusion pourvus d'un avant-creuset. Grâce à cet avant-creuset, les feuillets et les copeaux peuvent être fondus sans être brûlés ou oxydés. La figure ci-dessous montre la vue en coupe d'un four pourvu d'un avant-creuset.

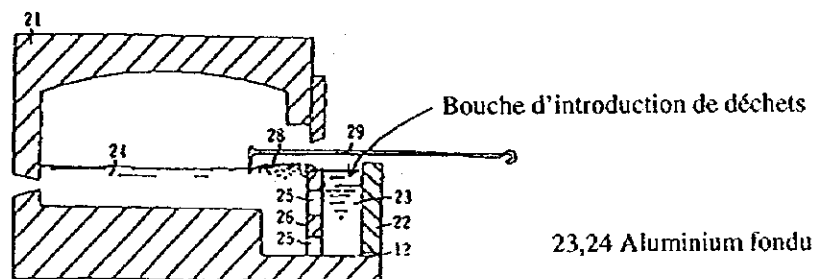


Figure 7.4-4 Vue en coupe d'un four à réverbère

### 7.4.4 Valorisation des crasses

Lorsque les déchets d'aluminium sont fondus pour la régénération en lingots, environ 20 % des déchets introduits dans le four devient des crasses (se formant sur la surface de l'aluminium fondu) qu'il faut éliminer de temps en temps. Etant donné qu'elles contiennent encore environ 60 à 70 % d'aluminium, elles sont normalement à récupérer. Toutefois, elles ne sont pas valorisées actuellement en Tunisie et déposées en plein air au coin du site d'usines. Bien que la quantité de crasses d'aluminium générées soit encore faible, il est quand même dommage de laisser à l'abandon les crasses contenant 70 % d'aluminium. Lors de la visite d'une fonderie d'aluminium, le patron disait qu'il avait une fois été consulté pour l'exportation de ces crasses, mais que cette affaire n'a pas abouti. En effet, le mode de manutention après décrassage reste à améliorer (avec le mode de manutention actuel, l'aluminium contenu est brûlé et perdu). La valorisation des crasses qui sont déposées actuellement en plein air semble a priori impossible. Il est vrai que la récupération de la teneur en aluminium des crasses nécessite des investissements en équipements, mais il est à remarquer qu'une partie

assez importante d'aluminium résiduel sera tout de même récupérable manuellement aussi. Ce moyen manuel de récupération devra au moins être mis en œuvre.

La relation entre la quantité de crasses générées et la quantité d'aluminium récupéré par la méthode de traitement couramment utilisé est comme suit. Lorsque 100 tonnes de déchets sont fondus, environ 20 tonnes de crasses se produisent. Des déchets issus du décrassage du four devront être, soit rapidement refroidies pour éviter leur oxydation, soit pressées pour en extraire la matière d'aluminium au moyen d'une poche de reprise du métal. Ce faisant, environ 10 tonnes de matière d'aluminium sont récupérées et environ 10 tonnes de cendre restent. Etant donné que dans cette cendre, il reste encore 30 à 50 % de matière d'aluminium, la cendre sera ensuite broyée et criblée pour récupérer encore environ 4 tonnes de matière d'aluminium. En général, le traitement de cendre est confié aux sous-traitants. D'autre part, bien qu'il ne reste que quelques pour cent d'aluminium dans la cendre résiduaire, du fait qu'elle contient des impuretés telles que des composés d'azote et des métaux lourds, il faut prêter une attention particulière pour éviter la pollution du sol, de la nappe phréatique et de l'environnement d'alentours lors de sa mise en décharge par l'enfouissement.

Le nitrure d'aluminium dans la cendre résiduaire peut dégager l'ammoniac en réaction avec la teneur en eau, ce qui peut être la cause de l'odeur nauséabonde. Son traitement final (enfouissement) devra donc se faire avec une attention suivie. Cette cendre résiduaire peut être valorisée comme agent de formation de scorie dans l'aciérie à condition d'avoir la teneur en métal supérieure à 20 ~ 50 %.

La figure 7.4-5 montre le schéma de concept de la poche de reprise du métal (presse primaire de cendre) brevetée au Japon.

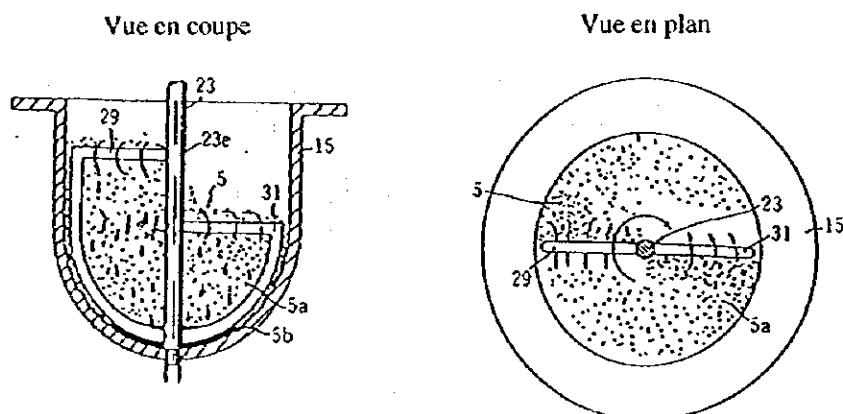


Figure 7.4-5 Schéma de concept de la poche de reprise du métal

(Presse primaire de cendre)

Des crasses sont introduites dans un bac en fonte et mélangées par palettes. Moyennant quoi, le liquide d'aluminium s'écoulant par le trou du fond du bac sera récupéré. La cendre résiduaire est envoyée à l'atelier de traitement de cendre.



L'essentiel de cette technique consiste à procéder à la récupération de l'aluminium résiduel dès après dégrassage sans avoir laissé dans l'air les crasses chaudes.

La figure 7.4.6 montre les procédés de traitement des crasses pratiqués au Japon.

#### **7.4.5 Récupération et valorisation des déchets de procédés de traitement de surface (revêtement par anodisation et électrodéposition) des profilés extrudés**

A l'heure actuelle une seule entreprise fabrique environ 2.000 à 2.500 tonnes de profilés extrudés. Il est vrai que ses activités sont encore à petite échelle, mais l'équipe va présenter ci-après les techniques de récupération et de valorisation des substances recyclables contenues dans des déchets de production. En effet, la mise à niveau technologique devra tôt ou tard être considérée à mesure que les activités de l'entreprise vont s'étendre dans le futur.

La figure 7.4-7 montre le schéma de circulation typique du procédé de revêtement par anodisation au Japon.

##### **(1) Récupération de l'hydroxyde d'aluminium et de la soude caustique**

Dans le premier procédé du traitement, la surface est décapée par la soude caustique. Lors de ce décapage, l'aluminium de surface est dissous dans la soude caustique. Lorsqu'on ajoute des graines (cristaux) d'hydroxyde d'aluminium dans cette solution dans les conditions requises, des cristaux d'hydroxyde d'aluminium se forment. Après la séparation par filtrage, ceci peut être vendu aux papeteries, etc., comme hydroxyde d'aluminium dérivé utilisable pour le traitement des effluents. La soude caustique séparée de l'hydroxyde d'aluminium peut être réutilisée pour le prochain décapage.

##### **(2) Récupération des acides**

Les acides utilisés pour l'anodisation (acide sulfurique, etc.) peuvent être récupérés par la dialyse pour réutiliser.

##### **(3) Récupération des peintures**

Les peintures dans le bain de coloration électrolytique ou d'électrodéposition peuvent être concentrées, récupérées et réutilisées par osmose inverse.

Les procédés mentionnés ci-dessus permettent non seulement de protéger l'environnement mais encore de réduire les coûts. Cependant, les installations de récupération nécessitant un investissement en bien et équipements assez important, les entreprises doivent être d'une taille supérieure à un certain niveau pour que l'introduction de ces procédés puisse être rentable. Toutefois, ils mériteront d'être considérés un jour ou l'autre.

#### **7.4.6 Réexamen de la politique relative à l'exportation des déchets et du métal régénéré**

Comme il en est mentionné dans le chapitre 5, il semble que les producteurs de lingots régénérés et les entreprises de collecte des déchets de métaux sont orientés vers l'exportation en quête des bénéfices plus avantageux. Par conséquent, les entreprises de transformation qui utilisent ces déchets et les lingots régénérés ne peuvent pas facilement s'approvisionner de matières premières. Dans de telles situations, il faudra mettre en place une politique qui tient compte de l'accumulation des ressources dans le pays, ou une orientation vers l'exportation de ces matières.

**Fig.7.4.5 SCHEMA PRINCIPLE DE RECYCLAGE DE SCOLIE D'ALUMINIUM**

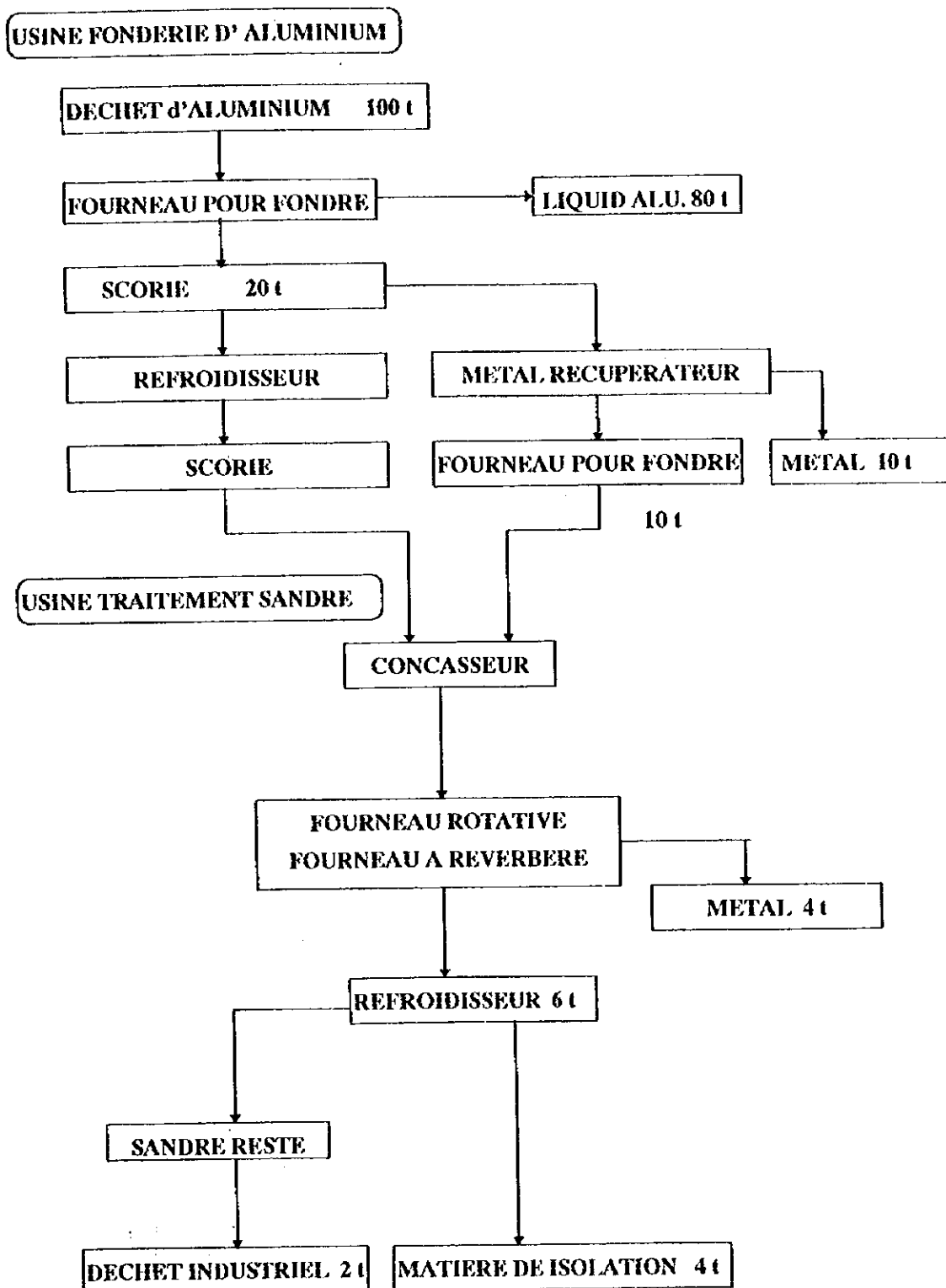


Fig.7.4.6 Récupération d'acides,bases,aluminium et peinture d'annodisation de profilés d'aluminium

