



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

94 INPL 082 N

Institut National Polytechnique
de Lorraine

Laboratoire Environnement et Minéralurgie
C.N.R.S. - U.A. 235

Ecole Nationale Supérieure
de Géologie - Nancy

Centre de Recherche sur la Valorisation
des Minerais

Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Brabois

THESE

présentée à

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'I.N.P.L.

"GEOSCIENCES, MATIERES PREMIERES ET ENVIRONNEMENT"

par

Arian KALTANI

TRAITEMENT DE LA FRACTION FINE DES RESIDUS DU
BROYAGE D'AUTOMOBILES (R.B.A.)

Soutenue publiquement le 07 Juillet 1994

Membres du Jury

MM.

P. BLAZY

F. ESPIELL

O. EVRARD

J.-M. DEL VECCHIO



D 136 028357 1

Président

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

136028357 1

94 INPL 082 N

[M] 1994 KALTANI, A.

Institut National Polytechnique
de Lorraine

Laboratoire Environnement et Minéralurgie
C.N.R.S. - U.A. 235

Ecole Nationale Supérieure
de Géologie - Nancy

Centre de Recherche sur la Valorisation
des Minerais

Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Brabois

THESE

présentée à

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'I.N.P.L.

"GEOSCIENCES, MATIERES PREMIERES ET ENVIRONNEMENT"

par

Arian KALTANI

TRAITEMENT DE LA FRACTION FINE DES RESIDUS DU
BROYAGE D'AUTOMOBILES (R.B.A.)

Soutenue publiquement le 07 Juillet 1994

Membres du Jury

MM.

P. BLAZY

F. ESPIELL

O. EVRARD

J.-M. DEL VECCHIO

A. MARCE

C. RIANI

Président

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

*à mes parents
à tous les miens*

AVANT PROPOS

Ce travail est le résultat d'une étroite collaboration entre l'Université et l'Industrie. En effet, il a été nécessaire de réunir des industriels qui traitent les broyats des véhicules hors d'usage, des constructeurs et des chercheurs.

Mes remerciements vont en priorité à la Société LORMET (ex NEWELL INTERNATIONAL), qui m'a permis d'effectuer cette recherche et qui m'a employé à temps partiel. Pour ce faire, cette société, a été liée contractuellement avec :

- un organisme Universitaire de l'INPL-CNRS : le Centre de Recherche de Valorisation des Minerais - Laboratoire Environnement Minéralurgie (CRVM - LEM) ;

- des sociétés de constructeurs spécialisés :

- "BIRTLEY" (B 1040 - Bruxelles), pour le tablage pneumatique ;

- "ERIEZ MAGNETICS EUROPE Ltd" - (Bedwas, Newport - U.K), pour la séparation magnétique et séparation par courants de Foucault ;

- "S.G.M. SpA" (25025 Manerbio, Brescia - ITALIE), pour la séparation par courants de Foucault.

Au terme de ce travail, il m'est agréable de témoigner ici ma reconnaissance et d'exprimer mes remerciements à toutes les personnes qui ont aidé à sa réalisation :

Que Monsieur le professeur P. BLAZY, Professeur à l'I.N.P.L.- E.N.S.G., Directeur du CRVM - LEM, trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour avoir dirigé avec talent ce travail. Il a toujours su me conseiller avec générosité et il n'a pas ménagé son temps pour soutenir et critiquer ce mémoire. Sa compétence et son efficacité m'ont été très profitables. Je le remercie sincèrement pour son soutien et pour avoir accepté de présider ce jury.

Monsieur F.ESPIELL, Professeur titulaire à l'Université de Barcelone, Département d'Ingénierie Chimique et Métallurgique, qui a montré beaucoup d'intérêt pour ce travail et n'a pas hésité à entreprendre un long voyage pour faire partie du jury en temps que rapporteur.

Je remercie également Monsieur O EVRARD, Professeur de chimie minérale à l'Université de Nancy I, d'avoir accepté d'analyser ce travail et d'en être également rapporteur malgré son emploi de temps chargé.

Je remercie Monsieur J.-M. DEL VECCHIO, Directeur Industriel de la Compagnie Française des Ferrailles et Monsieur A. MARCE (ADEME), qui ont accepté de faire partie du jury et d'apporter leurs critiques à mon travail.

Monsieur C.RIANI, Directeur Général de la Société "LORMET", doit être remercié pour m'avoir conseillé et aidé à poursuivre cette recherche, en assurant tous les contacts avec les fabricants des appareils et machines utilisés. Je le remercie d'avoir accepté de participer à ce jury.

Ce travail a été démarré grâce à Monsieur J.-L. BELARDELLO, ancien Directeur Général de la société NEWELL INTERNATIONAL et réalisateur de l'usine de Pagny-sur-Meuse, qui avec Monsieur J.-L. PINEAU du CRVM-LEM, ont été les initiateurs de ce travail. Ils m'ont orienté, encouragé et aidé à surmonter les premières difficultés et à acquérir des reflexes industriels. Je tiens à les assurer ici de ma sincère reconnaissance. Celle-ci dépasse le cadre de la thèse, car ils m'ont permis de faire mes premières armes dans l'industrie du recyclage.

Mes remerciements vont également à Monsieur F. SIEBERT et ses collaborateurs de l'Institut des Recherches Hydrologiques (I.R.H.) pour leur aides concernant la plupart des analyses, ainsi qu'à Monsieur M. PELLETIER, responsable du laboratoire d'analyses à la Société des Fours à Chaux de SORCY S.A., pour les analyses des PCI et des teneurs en cendre.

Je remercie aussi mon ami A. SHTUKA, chercheur au CRPG et tous mes amis étudiants et chercheurs de l'ENSG pour leur amicale collaboration. Je n'oublie pas d'associer à mon travail le personnel technique et administratif de LORMET et de l'ENSG / INPL, en particulier Mme A. TRUR, qui m'a soutenu encouragé et aidé dès le début.

INTRODUCTION GENERALE

La protection de l'environnement est une préoccupation mondiale ; c'est non seulement une obligation morale, mais également un intérêt économique. L'automobile fait l'objet, depuis quelques années, d'une réflexion des constructeurs sur les différentes phases de son recyclage, sur les recherches et les actions à mener dans ce secteur. Cette réflexion démarre dès la conception de l'automobile et continue jusqu'à la fin de son utilisation.

Le traitement ou recyclage des VHU (véhicules hors d'usage) permet de valoriser 75 % des composants métalliques ferreux et non ferreux des automobiles. Seuls les 25 % des résidus du broyage automobile (RBA), échappent encore à tout traitement et sont mis en décharge.

C'est à ce niveau qu'apparaît aujourd'hui le problème de la pollution de l'environnement et auquel ce travail s'efforce de répondre.

Difficilement recyclables en raison de leur composition hétérogène et de leur finesse, les RBA représentent environ 400.000 tonnes pour 2 millions de VHU. Leur mise en décharge dans les Centres d'Enfouissement Technique de classe II, implique, d'une part des coûts élevés et d'autre part des risques de saturation des décharges.

Les techniques et méthodes utilisées dans ce travail cherchent à proposer de façon pratique des solutions raisonnables pour la valorisation de la fraction "fine", contenue dans les RBA, satisfaisant à la fois les objectifs économiques et écologiques.

La politique économique du traitement des VHU, les normes législatives en vigueur, les objectifs écologiques et contraintes économiques, font l'objet du premier chapitre. Ensuite nous décrivons la composition des voitures, la récupération actuelle des pièces réutilisables, ainsi que l'évolution des différents composants.

Dans le chapitre suivant, on trouve une description détaillée sur les broyeurs et l'usine de LORMET S.A. à Pagny-sur-Meuse, à laquelle la plupart de cette recherche a été liée.

Le chapitre III est consacré à la caractérisation physique de la fraction fine, à l'étude de sa variabilité dans le temps et par provenance, ainsi que son comportement vis-à-vis d'un traitement ultérieur.

En ce qui concerne la mise en oeuvre de nouvelles techniques (chapitre IV) de valorisation des fines, trois voies de traitement ont été développés.

En premier lieu, la recherche a porté sur des essais en laboratoire, en voie humide (tablage et magnétisme). Les essais ont été effectués dans l'usine pilote de l'ENSG. Ensuite, des essais en échelle semi-industrielle et industrielle ont été effectués, en voie sèche (tablage pneumatique, magnétisme et séparation par courants de Foucault) à l'usine de la société LORMET S.A. à Pagny-sur-Meuse, ainsi que chez les fabricants des appareils utilisés (comme c'est le cas des sociétés : ERIEZ MAGNETICS Ltd. et BIRTLEY).

Enfin, nous avons imaginé des concepts nouveaux pour le développement des opérations de valorisation sur les fractions fines et présenté des données économiques concernant le traitement des RBA (chapitre V et VI).

Ce travail se veut d'être original en ce qui concerne le sujet et la méthode de traiter le problème des RBA. Il a été mené en laboratoire, en station d'essais et en usine. Mais, il faut ajouter que cette démarche imposée par la situation peut nuire parfois à l'homogénéité du travail. Par contre elle a le mérite de montrer qu'une expérience en laboratoire ou en station d'essais n'est pas directement exploitable par l'industrie, qui est avant tout soumise aux contraintes économiques.

Il n'en demeure pas moins que le recyclage des produits issus des RBA est possible, utile et nécessaire.

INTRODUCTION

SITUATION DU PROBLEME ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

A - SITUATION DU PROBLEME

Les déchets industriels représentent environ 150 millions de tonnes par an au niveau français (figure A). Une partie non négligeable est récupérée et réutilisée (voir tableau A) :

Matériaux	Quantité récupérées (t/an)	Taux d'utilisation (%)
Ferrailles	9 800 000	38,0
Aluminium	284 000	30,0
Plomb	139 400	61,0
Cuivre	150 000	28,0
Zinc	156 000	24,5
Plastiques	100 000	28,0

Tableau A : Matériaux récupérés et réutilisés à partir des déchets industriels

Les déchets provenant des automobiles hors d'usage, soit environ 1.800.000 véhicules/an, représentent :

- **1.400.000** tonnes de carcasses broyées;
- **350.000** tonnes de résidus de broyage produits.

Chaque année, les véhicules hors d'usage (VHU) génèrent aussi :

- **400.000** tonnes de pneumatiques.
- **6 millions** de vieilles batteries, soit **90.000** tonnes;
- **290.000** tonnes d'huiles usagées (dont 126.000 tonnes provenant de voitures particulières et commerciales);

Au total, c'est une moyenne de **38 kg** de déchets, par an et par habitant, que l'usage de l'automobile génère en France. (ADEME 1993)

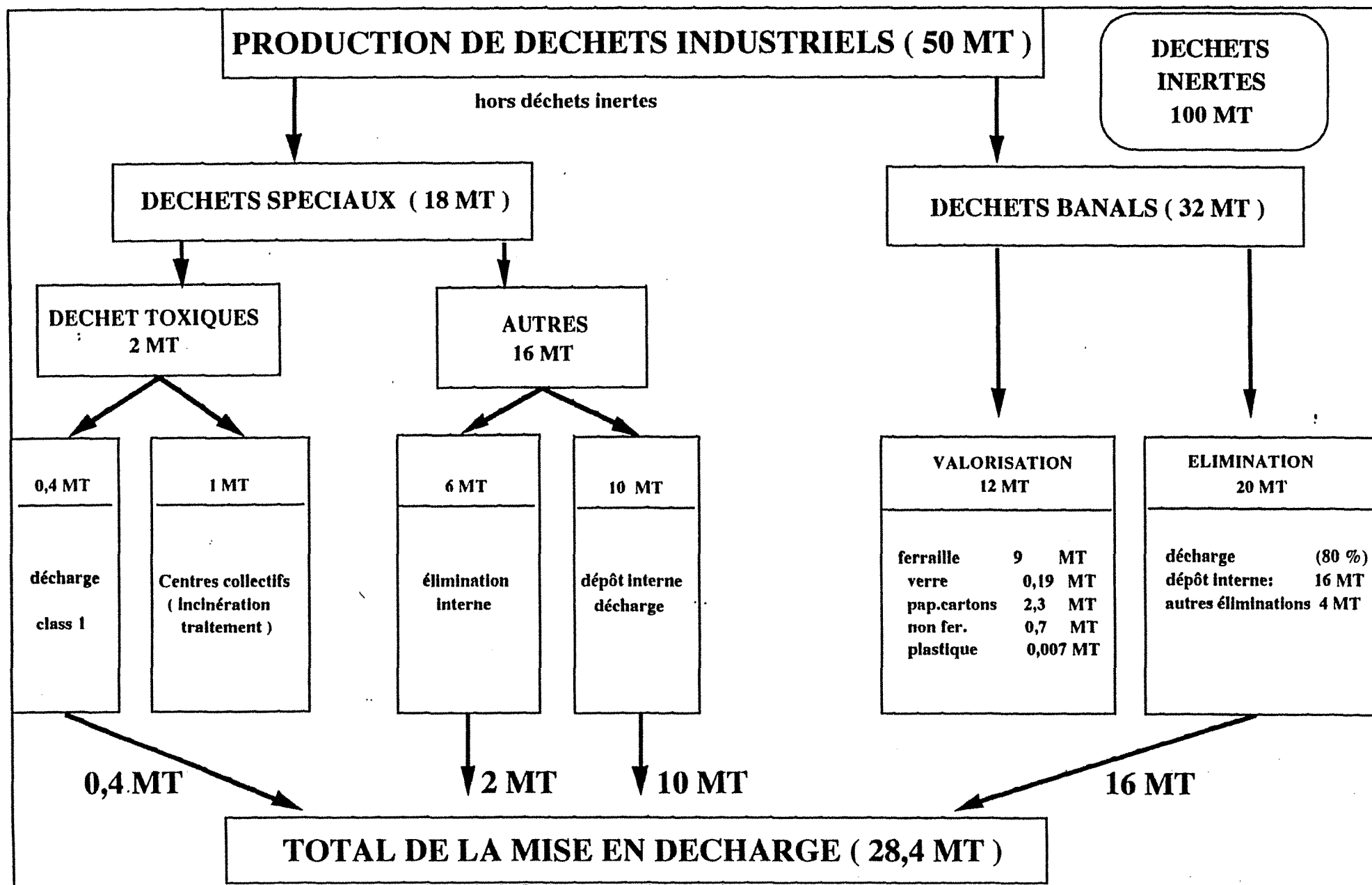


Figure A : Production de déchets industriels (année '90 - source ANRED Ministère de l'environnement.

La valorisation des véhicules hors d'usage est réalisée comme suit :

- **1.750.000** véhicules ont été traités dans 34 grands chantiers de broyage qui ont permis la valorisation de **1.200.000** tonnes de ferrailles.
- **376.000** tonnes de vieux pneus ont fait l'objet d'opérations de valorisation ou de minéralisation :
 - **72.000** tonnes sont rechappées;
 - **11.000** tonnes sont valorisées sous forme de poudrette;
 - **14.000** tonnes sont valorisées sous forme de caoutchouc régénéré;
 - **9.000** tonnes sont incinérées avec récupération d'énergie;
 - **12.000** tonnes sont valorisées de diverses façons.

En outre :

- **100.000** tonnes de plomb de batteries sont recyclées;
- **114.000** tonnes d'huiles usagées sont régénérées et **70.000** tonnes sont brûlées en cimenterie.

Globalement cette activité de récupération des déchets représente environ **30 %** des approvisionnements en matières premières non énergétiques et constitue le premier "gisement minier" français, sans oublier par ailleurs les économies de devises correspondantes.

La voiture hors d'usage échoue à la casse. Elle y est broyée, déchiquetée en petits morceaux. On récupère les métaux ferreux et ensuite on valorise les métaux non ferreux, en les triant pour les commercialiser vers les industries utilisatrices.

B - BUT DE LA RECHERCHE

B.1 - Evolution de l'activité industrielle des ferrailles et métaux

L'économie mondiale et Française ont bénéficié de 1987 à mi-1989 d'une croissance, dont les récupérateurs de métaux ont bénéficié largement.

Puis un ralentissement s'est opéré dont témoignent les variations des prix de l'aluminium secondaire ainsi que les fluctuations de prix des déchets d'aluminium.

Les prix de vente des produits finis sont passés de 4.000 F/tonne fin 1986, à 11.000.F/tonne en mi-1989, pour redescendre et stagner en 1990 autour de 6.000 F/tonne. Aujourd'hui le prix plafonne à 4.000 F/tonne, retrouvant ainsi le niveau de 1986.

B.2 - Actualité de l'industrie de recyclage des métaux

Cette période de récession est le fruit de différents facteurs : résultat de l'ouverture à l'Est, du conflit du Golfe, de la perspective du grand marché Européen, des désordres politiques mondiaux en voie de généralisation dans les pays tiers et enfin des contraintes de sauvegarde de l'environnement. Parmi ces facteurs, trois d'entre eux paraissent les plus significatifs :

a) Ouverture à l'Est :

Si l'on peut se réjouir de l'ouverture des pays de l'Est, des effets pervers se sont cependant fait sentir :

Investir à l'Est est économiquement alléchant mais la rentabilité est à long terme. En attendant, des usines sont démolies et la ferraille envahit les marchés et fait chuter les prix. Par exemple : 240 vaisseaux en construction dans les chantiers navals russes risquent d'être ferrailés (1993).

Des véhicules, habituellement mis à la casse pour leur vétusté, sont "bricolés" pour être revendus à l'Est. Les "Ferrailleurs-broyeurs" subissent durement ces changements. Les approvisionnements s'en trouvent diminués.

Les clients affineurs, sont touchés aussi du fait de la récession économique et de l'arrivée sur le marché, à bas prix, de lingots venus de l'Est. Les cours s'effondrent, il leur est difficile d'écouler leur production.

C'est ainsi qu'en 1992 l'ex URSS a encore mis sur le marché mondial l'équivalent d'un million de tonnes d'aluminium de première fusion, cela à un moment où les principaux débouchés de l'aluminium (bâtiment et automobile) s'engageaient dans un mouvement de contraction. L'effet de "ciseaux", consécutif à l'apparition d'une part d'une offre supplémentaire et, d'autre part d'un tassement des débouchés a provoqué une chute exceptionnellement forte des prix.

b) La perspective du grand marché Européen :

Depuis 1988, l'évolution du marché permet de constater une tendance au regroupement de petites et moyennes compagnies et la prise de participation accentuée de groupes importants au capital d'entreprises, en amont et en aval de leurs activités, ou à leur capital respectif.

La profession s'organise pour faire face aux difficultés et aux opportunités nouvelles. On voit ainsi de nouveaux lobbies Européens planter leurs jalons et accaparer les marchés.

Il apparaît qu' à terme, la "solitude" des indépendants leur coûtera cher et il leur sera difficile de concurrencer ces lobbies face à des gouvernements qui leur sont favorables et à une législation de plus en plus contraignante.

L'introduction au LME de l'aluminium secondaire a entraîné un léger mieux qui n'a pas duré du fait de la précarité de l'économie mondiale.

c) L'environnement :

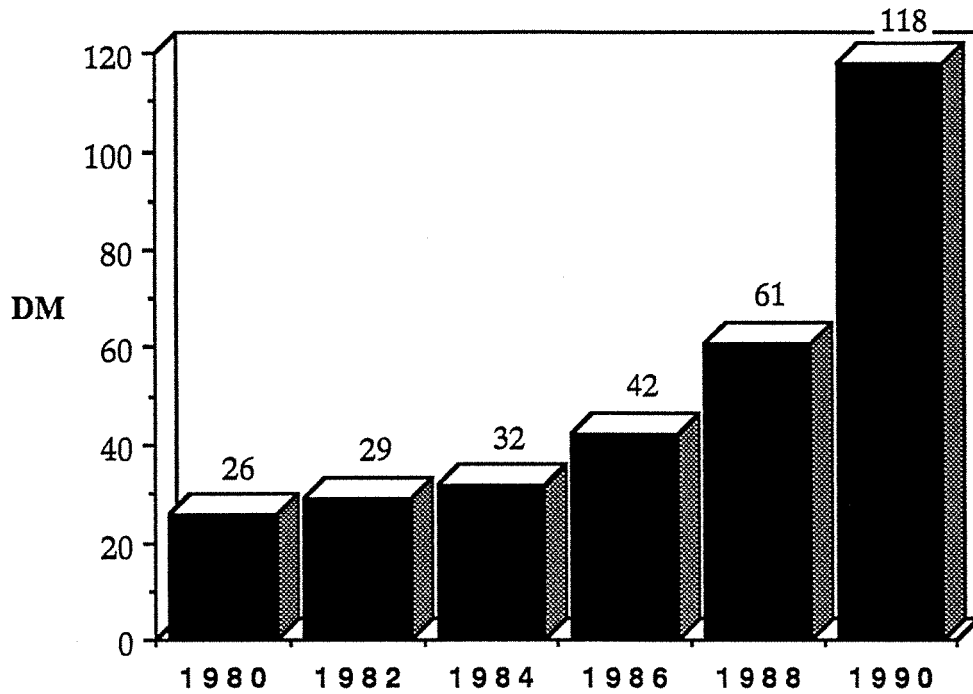
La législation sur l'environnement rend difficile la profession des récupérateurs et particulièrement onéreuse. Dans certains pays, l'élimination des déchets devient impossible. De nouvelles réglementations et des taxes grèvent les comptes d'exploitation.

L'heure est donc à la "valorisation" et les entreprises responsables doivent dépenser des budgets de plus en plus importants à la recherche pour trouver des procédés de valorisation de ce qui est aujourd'hui "déchets" mis en décharge.

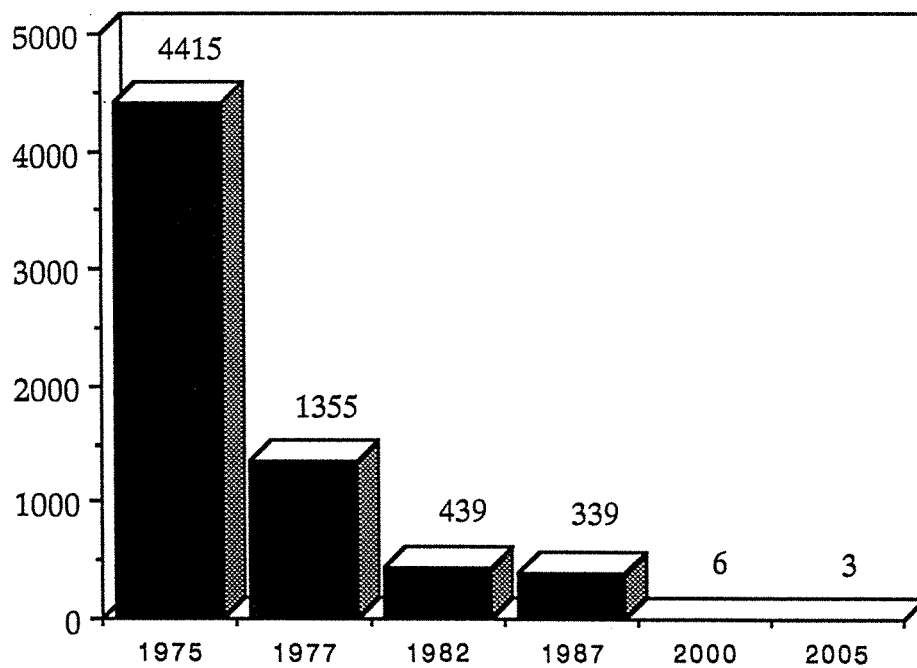
B.3 - Conséquences techniques

Une des conséquences est l'adaption d'une stratégie d'ensemble pour les industriels dont la vocation est de broyer les véhicules hors d'usage.

Leur regroupement justifie l'installation, au sein de ces groupes, de procédés plus ou moins performants de séparation des métaux et des déchets. Ce rapprochement est nécessaire pour assurer l'approvisionnement. Par exemple l'usine de la société "LORMET" traitait avant 1990 des produits dont la composition métallique moyenne était de 40 %.



Le coût de la décharge allemande (en DM)



Nombre des décharges en Allemagne

Figure B : Situation des décharges en Allemagne
(selon Voy C. et Schmidt J. - 1992)

Aujourd'hui une mutation sur la qualité des produits s'est opérée. On trouve en effet :

⇒ plus de produits très riches (70 % à 90 % de métal) du fait de système de "nettoyage" en aval des broyeurs (système d'aspiration et de séparation magnétique).

⇒ beaucoup plus de produits très pauvres (inférieurs à 8 % de métal) du fait des difficultés et des coûts de mise en décharge en France mais surtout à l'étranger.

En Allemagne, particulièrement, la législation ne permet plus aux "broyeurs" de mettre leurs déchets en décharge. Le coût français de traitement est inférieur aux coûts allemands de mise en décharge. La situation est décrite, selon VOY C. et SCHMIDT J. - 1992, sur la figure B

Le traitement des RBA et en particulier de la partie "fines" (< 15 mm), généralement non-traitée, qui représente aujourd'hui plus de 50 % de la mise en décharge, est le but primordial de la présente recherche. Elles méritent donc d'être valorisées afin de réduire leur volume.

Afin d'obtenir une solution la démarche doit être double :

- ⇒ a) Rechercher les méthodes de traitement les plus économiquement viables.
- ⇒ b) Rechercher des applications et des clients en fonction de la qualité des produits séparés.

Les textes et directives de mise en décharge ainsi que les teneurs d'acceptabilité par les sidérurgistes, les cimentiers et les autres consommateurs potentiels ont été les guides de notre recherche.

CHAPITRE II

Politique économique et méthodes du traitement des VHU

CHAPITRE I

I.1- ECONOMIE

I.1.1.- Mécanismes intervenant dans la fixation du prix des métaux

Sur un marché mondial les prix des métaux résultent d'un réseau complexe de rapports de force. Trois cas de figure peuvent se présenter :

- ⇒ soit l'acheteur, soit le vendeur dispose d'une position dominante;
- ⇒ soit les deux partenaires sont égaux;
- ⇒ soit ils font appel à un tiers.

Il peut aussi y avoir un panachage de ces formules.

1- Aujourd'hui, dans plusieurs cas, un nombre limité de producteurs assure une grande part de l'approvisionnement mondial. Ils peuvent fixer des "prix producteurs" auxquels l'acheteur doit plus ou moins se plier. Cette position, étant donné la situation économique présente, est de moins en moins fréquente.

2- Beaucoup d'acheteurs et de vendeurs traitent à égalité. Il se retrouvent en général sur les bourses de métaux et, en particulier, sur celle de Londres, le London Metal Exchange (LME). Sur ce marché, tout le monde peut négocier du métal : du cuivre, du plomb, du zinc, du nickel, de l'or, de l'argent, etc....

Des consommateurs, des transformateurs, des négociants ou des producteurs de métal viennent donc là pour s'approvisionner ou, au contraire, pour vendre. Parfois aussi, des investisseurs interviennent, non parce qu'ils ont besoin de métal mais pour spéculer.

3- Les acheteurs et les vendeurs établissent des contrats de longue durée. Mais ils ne peuvent pas fixer un prix définitif pour plusieurs années, ni renégocier tous les trois mois. Ils acceptent donc d'avoir recours à un arbitrage et prennent ainsi souvent comme référence le prix de la bourse des métaux.

4- Il faut noter enfin l'importance croissante du marché "spot" à la suite des ventes massives de métaux par l'ex URSS, les PECO (les pays de l'Europe Centrale et de l'Est), la Chine, etc....

I.1.2.- Politique économique du traitement de véhicules hors d'usage (VHU)

L'industrie automobile a produit depuis longtemps des véhicules dont la technologie, l'architecture, le design ont suivi ou précédé la demande du consommateur. C'est dans une concurrence extrême entre les constructeurs que s'est déroulée la bataille pour conquérir les marchés.

Les contraintes économiques de la concurrence ne laissaient pas beaucoup de place à la prise en compte des conséquences que les véhicules en fin de vie pouvaient avoir sur l'environnement, d'autant que le consommateur lui même ne s'en préoccupait pas.

Les bases d'une politique actualisée du traitement de VHU doivent tenir compte des données suivantes (présentés par J.-M. Del Vecchio et FEDEREC - 1993):

Le nombre de véhicules hors d'usage :

En FRANCE le nombre de VHU croit sans cesse. En effet la projection économique prévoit en l'an 2000 un nombre de VHU de **2.300.000** voitures, alors qu'en 1992 elle a été de **1.800.000**. Cette anticipation est basée sur la durée de vie moyenne d'une automobile. La durée de vie moyenne étant statistiquement de **10 ans**, les prévisions sont fondées sur le nombre des voitures immatriculées 10 années auparavant. Le nombre de VHU recensés chaque année dans la CEE est de **12 millions**. Plusieurs facteurs sont à la base de la politique du traitement des épaves :

La composition moyenne des VHU

Les véhicules de tourisme n'ont pas été conçus pour être recyclés en fin de vie.

L'évolution des 10 prochaines années se situera essentiellement dans l'augmentation en quantité et en diversité des matières plastiques, conséquence des décisions antérieures concernant la conception des véhicules.

Les circuits actuels d'élimination des VHU

Les circuits actuels sont très complexes et y participent :

- Les concessionnaires;
- Les transporteurs;
- Les démolisseurs;
- Les recycleurs.

Les étapes sont nombreuses avant l'arrivée d'un VHU dans un centre de broyage.

Le recyclage actuellement pratiqué

Le recyclage des VHU est assuré par les techniques du broyage-déchiquetage et de ses annexes.

Les centres de broyage assurent un recyclage à 75 % du poids des VHU, correspondant à 72 % de métaux ferreux et de 3 % de métaux non ferreux, véritables matières premières secondaires pour la sidérurgie et la métallurgie. Mais, il reste 25 % de Résidus de Broyage Automobiles (RBA) dont la destination actuelle est le Centre d'Enfouissement Technique (CET) de classe II. Les RBA ont une composition complexe, d'où la difficulté de leur recyclage.

Le recyclage écologique des VHU : un enjeu majeur pour l'environnement

Le recyclage des véhicules hors d'usage n'est pas uniquement un problème industriel important par ses implications économiques et sociales : il représente, bien au delà, un aspect majeur de l'environnement et, à ce titre, il relève de la politique écologique non seulement française, mais européenne.

La situation actuelle n'est satisfaisante pour personne :

- ➡ les professionnels connaissent une baisse d'activité due à la fois au climat économique et à un système inadapté de modifier les textes afin d'aboutir à une réglementation applicable dans tous les pays de la Communauté;
- ➡ les usagers et le public en général sont de plus en plus sensibilisés à la pollution représentée par les véhicules hors d'usage (VHU).

En recyclant les déchets de toutes sortes, on contribue à réduire le problème crucial des décharges publiques.

Chaque année, 15 millions de tonnes de déchets sont ainsi transformés en matières premières, dont plus de 50 % proviennent des rejets de consommation. Cinq millions proviennent de rebuts de toutes sortes: épaves automobiles, appareils ménagers, démolition, etc..., récupérés à plus de 90 %.

La crise qui frappe depuis plusieurs années les économies mondiales a fait que, quantitativement, en France, le tonnage des ferrailles à broyer a diminué de 2.000.000 de tonnes en 1990 à 1.600.000 en 1991. En 1993 on assiste à une escalade des prix des ferrailles (30 F en plus par tonne).

Les véhicules hors d'usage ont été particulièrement touchés en raison notamment du plus faible renouvellement du parc automobile et de l'exportation d'une partie des VHU hors de l'hexagone.

Le recyclage à l'échelon européen

La volonté affichée des constructeurs automobiles européens de mettre au point une chaîne de production de véhicules "propres", c'est à dire recyclables dans l'industrie à plus de 90 %, est louable. Bien que tardive, elle est d'autant plus impérative. Mais cela ne résout pas le problème de l'élimination des véhicules qui sont déjà dans les broyeurs, non plus que celui des épaves des années immédiatement à venir, d'ici l'échéance de fin de vie des nouveaux modèles.

D'autant que, à ce jour, la réalité de recyclabilité de ces nouveaux modèles est loin d'être démontrée.

Et de même que la peur n'enlève pas le danger, la fermeture des décharges n'empêchera pas les déchets générés par la technologie d'hier d'être la pollution d'aujourd'hui.

Les VHU sont de provenances diverses : compagnies d'assurances 27,7 % (soit 500.000 véhicules), constructeurs 16,7 % (soit 300.000 véhicules), fourrières (16,7 %), garages individuels (16,7 %), particuliers (16,7 %) et domaines 5,6 % (soit 100.000 véhicules).

Après intervention d'une chaîne complexe d'intervenants, le traitement ou recyclage des VHU permet de valoriser 75 % des composants métalliques ferreux et non ferreux des automobiles. Seuls les 25 % des résidus du broyage automobile (RBA), échappent encore à tout traitement et sont mis en décharge.

Trois étapes et trois types d'intervenants caractérisent la filière actuelle du recyclage :

a)- **les détenteurs, concessionnaires de marques, particuliers, assureurs, garagistes indépendants, fourrières et administration des Domaines, personnes physiques ou morales qui vendent un objet en fin de vie, le VHU.**

b)- **les collecteurs-démolisseurs**, qui assurent la fonction matérielle de collecte, de prélèvement et de désassemblage des pièces récupérables et susceptibles d'être commercialisées, avant transmission aux spécialistes de l'étape suivante.

c)- **les broyeurs**, qui représentent la phase finale du cycle en broyant et déchiquetant les véhicules et en séparant par tri les métaux ferreux (72 % du poids du véhicule) et non ferreux (3%). Les 25 % restant constituent les RBA (résidus de broyage automobile).

Difficilement recyclables en raison de leur composition hétérogène, ces résidus représentent environ **400 000 tonnes /an pour 2 millions de VHU /an.**

Leur mise en décharge (dans les Centres d'Enfouissement Techniques de classe II) pose des problèmes certains en raison des coûts d'une part et de la saturation des décharges, d'autre part.

Mais les propriétés des RBA, polymériques notamment, incitent à trouver et à mettre en pratique des solutions de valorisation énergétique. Il s'agit d'atteindre l'objectif "déchets ultimes" satisfaisant à la fois les objectifs économiques et écologiques, de par la valorisation presque totale des RBA recyclés en combustibles de substitution.

I.1.3 - Législation

Les activités de récupération métallique sont régies par un ensemble complexe de textes français et européens dont les principaux sont :

*** sur le plan français :**

- L'article R 40/15 du code pénal;
- Le décret 73.438 du 27 mars 1973;
- La loi du 15 juillet 1975 (élimination des déchets) modifiée le 16 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets et aux installations classées.

Cette nouvelle loi devrait contribuer à une amélioration du système grâce aux nouvelles notions de premières importances :

- Les déchets ultimes;
- Le traitement de proximité;
- Plans régionaux;
- L'interdiction du transport transfrontalier.

*** sur le plan européen :**

La DG XI de la Communauté Européenne a mis en place depuis décembre 1991 un groupe de travail devant aboutir début 1994 à une proposition de Directives Européennes pour le traitement des VHU. Cette étude a été confiée à la France. (J.-M. Del Vecchio - février '93.)

I.1.4 - Objectif écologique et contraintes économiques

La résolution du problème passe essentiellement par de nouvelles technologies de traitement des RBA, déjà en cours d'expérimentation et prêtes à être mises en place sur une plus grande échelle dans le cadre d'une réorganisation globale.

La France est le premier pays européen à posséder un centre de traitement intégral des VHU, projet pilote né de l'initiative conjointe du Ministère de l'Environnement, de PSA et de la Compagnie Française des Ferrailles. Il traite actuellement 3 500 VHU par an. Le cycle de dépollution, de désassemblage et de valorisation a permis à ce jour de ramener la part des RBA de 25 % à 14 %.

L'objectif est double :

- ☐ Seulement **5 %** du poids total d'une automobile doit se retrouver en décharge après traitement contre 25 % aujourd'hui.
- ☐ Afin d'éviter de favoriser les voitures les plus lourdes, un plafond de 50 kilos de déchets "ultimes" (non valorisable) par véhicule et par constructeur, est fixé.

Constructeurs et éliminateurs estiment que l'efficacité maximale ne pourra être atteinte qu'avec les véhicules dont la conception commence aujourd'hui, qui seront sur le marché vers l'an 2000, et que l'on retrouvera à l'état d'épave vers 2010. (ESCANDE Ph. 1993)

A partir du 1er juillet 2002, seuls les déchets ultimes, c'est-à-dire retraités, pourront être mis en décharge. Par exemple : actuellement, la Lorraine enfouit 75 % de ses déchets industriels bruts, soit 525.000 tonnes annuelles, dans des décharges classées. (ANONYME 1993 - "L'avenir des déchets industriels")

I.2 - PROBLEMATIQUE DU TRAITEMENT DES VHU

En résumé le double objectif du traitement des VHU est le suivant:

- **écologique** : améliorer la collecte et le traitement des véhicules hors d'usage afin de réduire de manière significative les nuisances sur l'environnement et notamment les volumes de déchets mis en décharge;
- **économique** : modifier et développer les filières de valorisation pour rentabiliser jusqu'aux déchets ultimes les VHU, créer des sources nouvelles d'énergie utilisables dans de nombreux secteurs de l'industrie et ainsi permettre aux multiples intervenants de la profession de retrouver une rentabilité normale.

La problématique du traitement est axée sur le développement de cinq étapes motivées par l'opération de recyclage.

Les préconisations des professionnels reposent sur la mise en place d'une étape préalable et de quatre étapes successives constituant un cycle complet permettant le recyclage optimum des VHU avec réemploi maximum des RBA (FEDEREC - Commission Broyeurs - Syndicat National des Ferrailles) :

Etape préalable : Collecte

Elle est assurée par des opérateurs homologués tant par les constructeurs que par les pouvoirs publics et obéit au principe de traitement de proximité grâce auquel les véhicules doivent être traités par des Centres proches de leur zone régionale de ramassage.

Première étape : Dépollution

La dépollution, phase préalable au broyage, est une phase essentielle. Il s'agit d'une dépollution liquide (carburants, huiles, liquide de freins, de refroidissement), gazeuse (GPL) et solide (batterie, pièces en PVC). Tous ces éléments sont traités par des centres spécialisés agréés.

Deuxième étape : Désassemblage

Le désassemblage consiste à extraire du véhicule les pièces réemployables ou recyclables. Il s'agit essentiellement des pièces mécaniques pour la rénovation (sur avis du constructeur), des vitres, des mousses et des pneumatiques. Cette phase s'effectue en étroite collaboration entre les constructeurs et leur fournisseurs. Grâce à ces opérations de base, une épave "assainie" entre dans le broyeur.

Troisième étape : Broyage-déchiquetage

Le VHU ainsi prétraité, est alors broyé dans une ligne spécialisée incluant la séparation et le tri par ventilation, séparation magnétique, flottation⁽¹⁾, triage manuel ou par induction suivant le cas. Les métaux ferreux sortent sous forme de tôles froissées "33"⁽²⁾ destinées à l'industrie sidérurgique de seconde fusion, les métaux non ferreux quant à eux doivent subir de nouveaux traitements (flottation, criblage, etc) avant d'être traités par la métallurgie.

Une quarantaine de broyeurs sur le territoire français (voir figure II.2) a permis de recycler un million de tonnes de ferrailles.

Quatrième étape : Valorisation des RBA

Compte-tenu de la phase de dépollution et de désassemblage, il reste néanmoins 14 % de RBA (estimés à 280.000 tonnes par an en France).

Les RBA subissent des phases de séparation et de tris successifs par aspiration, magnétisme, induction et criblage permettant d'obtenir des matériaux séparés :

- ⇒ les minéraux fins (39 %), qui pourront être utilisés pour les remblais ou autres utilisations;
- ⇒ les particules ferreuses et non ferreuses (3,5 %), qui seront remises dans le circuit sidérurgique et métallurgique;
- ⇒ les caoutchoucs (20 %);
- ⇒ les particules restantes (mousses, tissus, papier, polymères, bois), qui seront rebroyées pour obtenir des particules homogènes constituant un véritable combustible de substitution pour le four à ciment.

Ce type de four possède deux avantages majeurs : une très grande capacité thermique avec une température de plus de 1500 °C et le caractère basique de la matière première, ainsi les composés organiques détruits et les divers sels métalliques sont piégés dans la masse. En fin d'opération il ne reste pratiquement plus de mâchefer ni de cendres.

 (1) - Il ne s'agit pas de l'opération de flottation telle qu'elle existe en minéralurgie, mais d'une opération de flottage, opération gravimétrique où les éléments légers "flottent" à la surface d'un bain de densité voulue. Donc dans le "jargon de métier" des recycleurs, le mot flottation signifie flottage. Pour répondre aux exigences du métier de recycleur, nous emploierons le mot flottation à la place de flottage.

(2) - On appelle "33" les fractions magnétiques issues du traitement magnétique après le broyage. Il s'agit encore d'une appellation des professionnels.

I.3 - LES METHODES CLASSIQUES DE TRAITEMENT DES VHU

Les méthodes doivent tenir compte de l'expérience du passé, de l'évolution des composants des automobiles, des techniques de récupération, qu'il s'agisse de produits directement recyclables ou devant subir des opérations de triage. Le problème des matériaux plastiques et leur évolution méritent une attention particulière.

I.3.1 - Historique

L'historique des RBA est liée à la reconversion d'une partie de la sidérurgie française et à l'adaptation de la profession de la récupération. Une partie de la filière fonte-haut fourneau avec l'aciérie à l'oxygène a été reconvertie dans la filière électrique.

Il y a 30 ans, une des solutions envisagée au traitement des VHU était l'immersion en mer pour favoriser le développement de la faune marine. Des essais ont été faits en Méditerranée!!! Un autre débouché beaucoup plus réaliste était la sidérurgie qui pouvait accepter jusqu'à 25% des ferrailles dans le four "Martin". En fait les RBA terminaient dans des cimetières de voitures.

A la fin des années '60, il devenait de plus en plus difficile d'abandonner les vieilles épaves dans ces cimetières : la place manquait, et les paysages étaient défigurés. Dans son discours sur l'environnement prononcé devant le Congrès Américain en 1970, le président Richard Nixon appelait de ses vœux un système permettant d'encourager le recyclage des vieilles voitures. En fait, aucune action gouvernementale ne fut nécessaire. Le marché conçut son propre système à l'aide du développement de deux technologies qui transformaient les vieilles épaves en une matière première utile (CAIRNCROSS F.,1993).

La fin des années '60 fut marquée par la transition des aciéries à ciel ouvert à des aciéries à l'oxygène, procédé qui consomme moins de mitraille d'acier. Mais en même temps, un autre procédé sidérurgique, l'aciérie électrique (four à l'arc), trouvait une application commerciale, permettant de fabriquer de l'acier presque exclusivement à base de mitraille et pouvait être mis en place à une échelle beaucoup plus petite, d'où des coûts d'investissement moindres.

Une nouvelle technologie fut aussi le développement des concasseurs de voitures, machines qui broient une épave, à laquelle on a auparavant retiré les pneus, le radiateur, le réservoir d'essence et la batterie, en morceaux de la taille d'un poing. Normalement les

broyeurs à marteaux peuvent en une seule minute déchiqueter toute la voiture. Des séparateurs retirent ensuite les pièces non métalliques et les métaux non ferreux(CAIRNCROSS F.,1993).

Dans les années '70, les débouchés du "33" étaient nuls en France, parce que son prix était trop élevé compte-tenu que le four "Martin" ne nécessitait pas de produits triés. Ce furent les Italiens qui consommèrent les premiers la ferraille broyée sortant des déchiqueteurs, classée "33" dans la classification CECA modifiée.

Une autre moyen utilisé à cette époque pour le recyclage des automobiles fut l'incinération. Cette méthode comprend l'enlèvement préalable des pneus, batteries, câbles, radiateurs et moteurs et après, grâce à l'incinération, permet d'emballer et de préparer un acier propre et acceptable pour le marché. Par comparaison avec le broyage, l'opération d'emballage demande des investissements modestes et une petite capacité de 250 voitures par semaine. L'inconvénient de cette méthode résidait dans le fait que pendant le "brûlage" (combustion) des matériaux fibreux, la température augmentait rapidement et les métaux comme le zinc et le plomb fondaient en bloc rendant la séparation individuelle impossible.

I.3.2 - Composition des voitures

D'ici à l'an 2000, les automobiles vont assimiler une part croissante de nouveaux matériaux, et qui ne seront pas forcément ceux auxquels on se serait attendu...

La grande industrie, celle qui produit mille à deux mille véhicules par jour, prouve qu'un matériau est "nouveau" dès lors qu'on l'utilise dans une fonction qui lui était inaccoutumée.

Innover, ce n'est plus introduire uniquement des thermoplastiques, des composites organiques et des composites à matrice métallique (CMM et autres céramiques). Mais plutôt des tôles sandwiches, des aciers à haute limite d'élasticité (HLE) et des alliages d'aluminium. Si les matériaux avancés n'ont procuré qu'un seul avantage, c'est bien celui d'avoir fait progresser les matériaux réputés classiques. (COUZON J.-P.; LABAT F. 1993).

Les composants d'une voiture américaine en 1972 étaient les suivants :

acier, cuivre, laiton, fer, fonte, aluminium, verres, zinc, plomb, textiles, plastiques, caoutchouc, bakélite, polyéthylène, polystyrène, polypropylène, céramique, acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS).

La répartition des composants d'une voiture pour les années 1960 à 1982 selon les auteurs : BAHR A. 1982; BASTEN A.TH. et DUBOIS L.E.M. 1986; WIJNARD L. et DALMIJN L. 1982, est donnée dans le tableau I.1 :

Composants	1960	1978	1981	1982
Fonte	14,3	17,6	7,8	6,2
Acier	70,8	67,0	69,7	69,3
Total métaux ferreux	85,1	84,6	77,5	75,5
Aluminium	1,4	2,9	2,8	4,2
Cuivre	0,9	0,8	1,3	1,3
Plomb	0,6	0,7	0,9	0,1
Zinc	1,5	0,8	0,1	0,1
Total métaux non-ferreux	4,4	5,2	5,1	5,7
Total métaux	89,5	89,8	82,6	81,2
Verres	2,4	2,5	3,7	3,2
Inertes	0,4	0,4	0,2	0,3
Total inertes	2,8	2,9	3,9	3,5
Plastiques	0,9	2,4	5,4	5,6
Caoutchouc	4,1	1,3	5,5	6,5
Autres combustibles	2,7	3,6	2,8	3,1
Total combustibles	7,7	7,3	13,7	15,1
Total non-métaux	10,5	10,2	17,6	18,6
Total voiture	100,0	100,0	100,0	100,0

Tableau I.1 : Répartition (en %) des composants d'une voiture entre 1960 et 1982

La composition des voitures de l'année 1982 par rapport à 1960, montre qu'il y a une diminution de poids pour les métaux ferreux (11 %). Par contre les métaux non-ferreux enregistrent une augmentation d'environ 29 %. On remarque la forte augmentation de l'aluminium et des plastiques.

Les composés précédents offrent des densités bien échelonnées (selon BASTEN A.TH. et DUBOIS.L.E.M. 1986) - tableau I.2, et laissent augurer d'un succès probable de traitement gravimétrique.:

Densité (g/cm ³)	%	Composants
< 1,8	25	polystyrène, mousse, bois, caoutchouc, plastiques
1,8 - 2,6	15	verre, non métaux
2,6 - 2,8	20	principalement Aluminium
2,8 - 3,3	5	alliages
> 3,3	35	fraction lourde (Pb, Cu, Zn)

Tableau I.2 : Densités des différents groupes-composants d'une voiture.

Dans les années '80, le principal souci des constructeurs automobiles fut de faire face à la concurrence étrangère de se mettre en conformité avec les réglementations relatives aux émissions et à la consommation de carburant de plus en plus sévères et de diminuer la consommation énergétique.

Un bon moyen d'améliorer le rendement énergétique d'un véhicule est de l'alléger, et un bon moyen de l'alléger est de substituer des composés de plastique de diverses sortes aux métaux ferreux. Le danger n'est pas ici l'augmentation du volume des plastiques dans le flux de déchets, bien qu'elle soit inévitable. Le plus inquiétant est la diminution de la valeur des carcasses de voitures et l'utilisation de plastiques indésirables, et souvent toxiques. En fait le matériau idéal est celui qui permet un recyclage facile et rentable, des faibles coûts de collecte et une forte demande finale.

Dans le domaine de l'allègement de la carrosserie, la France se situe en tête de la recherche européenne. Le résultat actuel est le suivant :

Une voiture de gamme moyenne, représente environ 60 % en poids d'alliages ferreux, 10 % de polymères, 6 % d'aluminium, 5 % de textiles et d'isolants, 4 % d'élastomères et 3,5 % de verre.

L'acier présente les qualités d'un matériau idéal pour le recyclage. En Grande-Bretagne, par exemple, la mitraille représente 44 % de la production d'aciers, dont une petite partie seulement provient des déchets municipaux (CAIRNCROSS F., 1993).

Suite à une récente étude, réalisée par l'Institut International de l'Acier et du Fer (I.I.S.I.), il résulte que l'acier garde toujours une importance majeure (par rapport aux autres composants) dans l'industrie de la construction des automobiles. (O'TOOLE J.P. 1991)

Malgré la diminution générale de la quantité de l'acier (Tableau I.3 et I.4) dans la construction des automobiles, après l'opinion de I.I.S.I., il va être encore pour longtemps le matériau "leader" dans cette industrie.(O'Toole 1991).

Les avantages de l'acier sur les autres composants sont :

- le coût de production;
- la stabilité;
- la qualité de surface;
- la propriétés de soudage.

Composants	voitures allemandes		voitures japonaises		voitures américaines	
	1975	1988	1977	1986	1977	1987
Acier	60	50	83,0	76,6	60	56
Fonte	15	10	-	-	15	15
Plastiques	7	13	3,5	7,3	5	7
Aluminium	2	7	2,6	3,9	4	5
Autres	16	20	10,9	12,2	16	17

Tableau I.3 : La composition des voitures des trois continents

Composants	Voiture européenne actuelle (% poids)	Voiture européenne de l'avenir (% poids)	Voiture américaine 1980 (% poids)
Acier	57.0 - 76.5	59.7	54.1 - 56.9
Fonte		14.6	7.9 - 13.6
Aluminium	2.0 - 10.4	3.0	6.3 - 11.9
Cuivre et alliages	1.0 - 2.2	1.4	0.6 - 1.0
Plomb	1.1 - 1.5	1.4	sans batterie
Zinc	0.4 - 0.7	1.3	0.3 - 0.4
Étain	< 0.3	0.1	n.a.
Plastiques	1.2 - 12.6	6.7	6.7 - 9.2
Caoutchouc, verre	reste	11.8	15.1 - 16.0
Total poids (kg)	700 - 1350	1000	1140 - 1280

Tableau I.4 : La composition des voitures Européennes (selon Rousseau M.; Melin A.)

L'acier reste toujours supérieur vis-à-vis des plastiques aussi grâce aux propriétés mécaniques (résistance à la torsion, tension et flexibilité).

Comme pour les métaux, le recyclage quant à l'acier, est une seconde nature. Certaines pièces de l'automobile sont actuellement fabriquées avec de l'acier recyclé.

Pour un véhicule européen, si l'on considère les masses utilisées, l'acier a diminué, les fontes un petit peu (les fontes pour les blocs moteur ont augmenté), l'aluminium, le plastique progressent. Un cinquième du marché de l'acier est concerné par le secteur de l'automobile.

Ce sont principalement des produits plats qui sont utilisés (pour la carrosserie), des produits longs (pièces de transmission, et de mécanique), et les inox, qui sont peu répandus (pots d'échappement).

L'automobile tient une grande place dans l'approvisionnement du marché des ferrailles, dont les besoins sont actuellement satisfaits à 32% par l'automobile (VHU, chutes de fabrication, pièces de rechanges, etc.).

A l'horizon 1995, on pense que cette part diminuera parce que l'on aura accru très certainement des techniques dans d'autres domaines, permettant un usage moindre de l'acier dans les automobiles. (TAQUET S., R/R 14/05/1993). En an 2000, le poids d'une voiture américaine sera d'environ 1.350 kg, où la partie plastique occupera environ 135 kg (c.a.d. un dixième du poids total) - selon JODY B.J et DANIELS E.J. (1994).

L'aluminium se présente comme un matériau à usage limité pour être utilisé dans l'industrie de l'automobile. Son coût et la variation des prix rendent difficile son utilisation. Ses propriétés mécaniques limitent aussi ses emplois.

Cependant, l'utilisation de l'aluminium sera intéressante si son prix descend jusqu'à un tiers du prix 1991. (O'TOOLE 1991). Par contre, de nouveaux matériaux composites à base de fibres d'alumine et de carbone seront mis en oeuvre au niveau des chemises des blocs-moteurs.

La position actuelle du recyclage des VHU peut être résumée ainsi :
Sur un véhicule moyen d'une tonne environ (de 800 à 1200 kg), nous avons 75 % de ferrailles qui repartent dans les aciéries électriques. En incluant les métaux non-ferreux, on arrive sans difficulté à recycler 80 % d'une automobile.

Restent environ 250 kg de verre, plastiques, mastics, déchets de peinture, qui constituent le résidu de broyage automobile (RBA). Ce résidu est mis aujourd'hui en décharge, au coût de 130 à 160 francs la tonne, transport compris.

L'enjeu est donc de rendre ce résidu inerte, de le stabiliser, ou de l'utiliser complètement.

I.3.3 - Récupération actuelle des pièces réutilisables

Alors que les usines de broyage-déchiquetage sont confrontées avec l'accroissement des composants non-métalliques, des efforts sont déployés pour un "déshabillage" en amont, - au moins sommaire (grosses pièces telles que boucliers de protection, etc.) - (BERTOLINI G. 1992). Les figures I.1 et I.2 montrent l'importance du déshabillage en amont (selon VOY C. et SCHMIDT J. - 1992).

Si l'on examine ce qui est aujourd'hui récupérable, on obtient la liste suivante des composants réutilisables : (ANONYME 1992).

- **Batteries** : Les batteries apparaissent de plus en plus comme un produit complexe. Elles contiennent du plomb, métal réputé dangereux, de l'acide et du plastique, trois ingrédients mis à l'index qui sont récupérés et recyclés.

Ainsi l'action de récupérer les batteries est devenue une obligation autant qu'un acte économique et industriel. Quelque soit le prix du plomb contenu, il faut les collecter et les traiter écologiquement. (DOMMANGET PH.1993)

Près de 5.5 millions de batteries sont ainsi remplacées chaque année sur un parc de près de 30 millions de véhicules circulant en France. L'enveloppe plastique est destinée à fabriquer d'autres batteries. Cependant, si la majorité des batteries est récupérée par les professionnels, une partie restante finit le plus souvent dans la nature. Selon BASTEN A.TH et DUBOIS L.E.M. 1986) les densités des parties d'une batterie sont :

Composants	Densité en g/cm ³
Polyéthylène	0,94
Polypropylène	< 1,0
Polystyrol	1,05
PVC	1,3
Ebonite	1,8
Plomb	11,3

Tableau I.5 : Densités des différentes parties d'une batterie

- **Huiles, Fluides** : (moteur et boîte) et les fluides (acide de batterie, liquides de freins, de refroidissement) sont récupérés par les démolisseurs et recyclés par les industries pétrolières et chimiques.

- **Pneus** : 15 % des pneus de voiture sont recyclés. 5 % servent à fabriquer des dalles de sol, des tapis de sport, ou des roues d'engin de manutention. Les cimenteries peuvent les utiliser comme combustible, les centres d'incinération d'ordures ménagères pour aider à la combustion.

Parties composantes

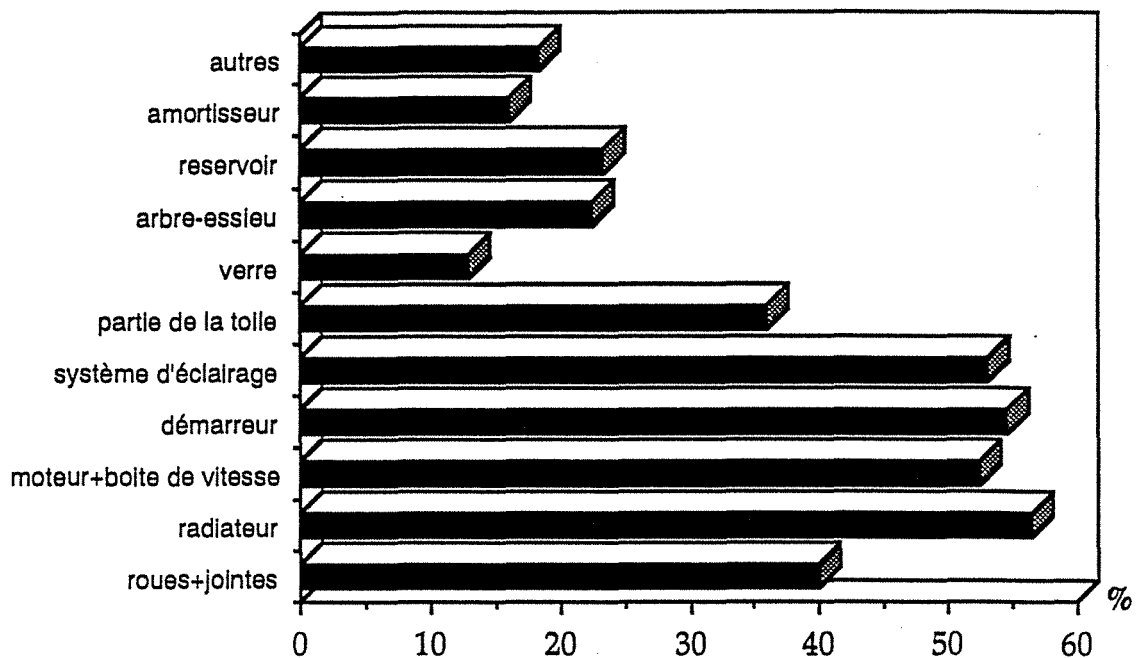


Figure I.1 : Fréquence de démontage des pièces d'un VHU

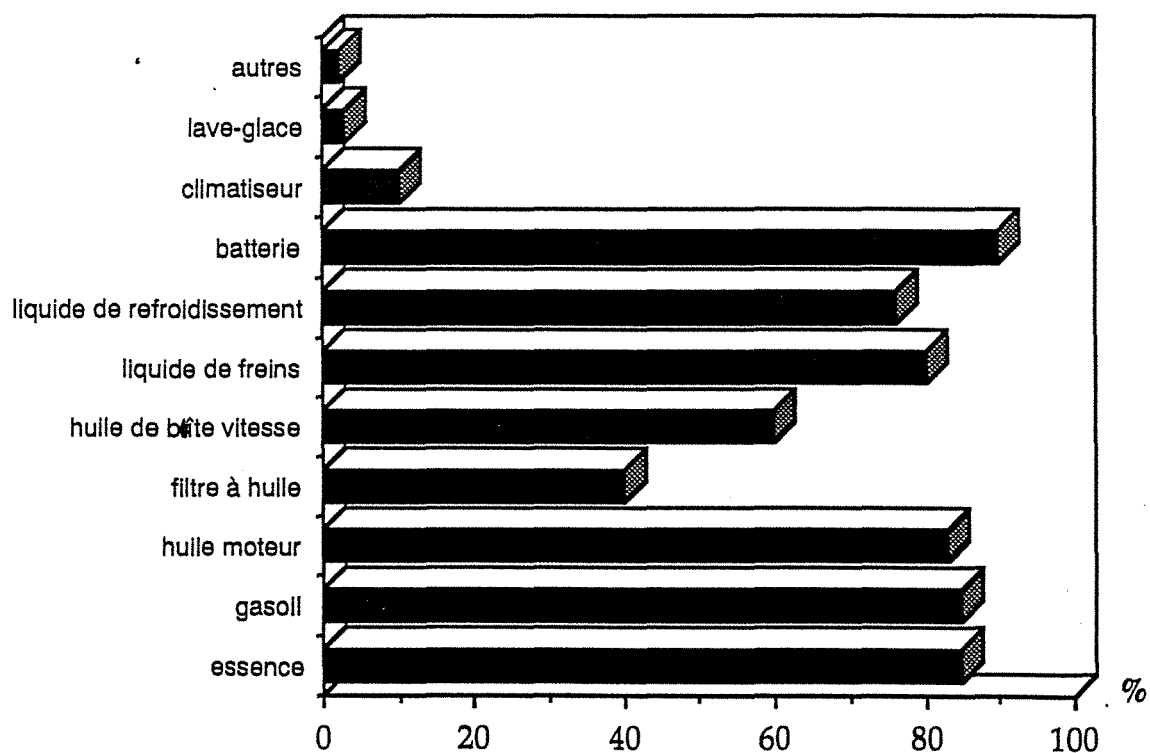


Figure I.2 : Récupération de la matière par les opérations de déshabillage d'un véhicule, avant les opérations de broyage-triage (selon Voy C. et Schmidt J.)

Un pneu a, en moyenne, le pouvoir calorifique de 27 litres de pétrole. Les murs antibruit peuvent être aussi un débouché. Sous l'égide du Ministère de l'Environnement, un groupe de travail, depuis juin 1989, tente de définir des solutions aux problèmes de l'élimination des pneus usagés non rechapables (PUNR). Ces pneus ont un pouvoir calorifique inférieur moyen d'environ 7200 Kcal/kg, équivalent à celui du charbon. (TAQUET S. 1992)

L'incinération avec valorisation énergétique n'est qu'une des voies possibles; les recycleurs en font aussi des granulats et de la poudrette. Dans ce cas, il est nécessaire de séparer les divers composants d'un pneumatique à savoir la ferraille de la carcasse, le textile et le caoutchouc. (DOMMANGET PH. 1993)

- **Moteur, roues, carrosserie** : les organes sains sont démontés pour la revente. Certains moteurs sont remis à neuf pour le marché. Les autres sont triés pour les fonderies (aluminium, acier, cuivre, fonte).

L'acier sert à la fabrication de tôles et de structures (fer à béton) pour le bâtiment, ou l'électroménager.

Le zinc, qui protège les carrosseries de la corrosion augmente le coût de leur recyclage. L'alliage de certaines jantes rend ces dernières difficilement recyclables.

- **Mousses** : la mousse des sièges est en partie récupérée pour l'ameublement, la literie, les tapis de sport, etc.

- **Plastiques** : les boucliers commencent à être recyclés. Les grosses pièces plastiques (boucliers, planche de bord, habillages de portes, réservoirs, pavillon, etc...) peuvent être refondues et fournir les piquets de vignes, bâches, caissettes de manutention, outillage, plastiques de bâtiment, électroménager, matériel de bureau, etc. Les boucliers et certaines pièces pour lesquelles l'aspect visuel importe peu, pourront, à plus long terme, comporter 50 à 70 % de plastiques recyclés.

- **Verre** : le pare-brise et la lunette arrière ne sont pas recyclables. Aux Etats-Unis, les verres et les plastiques sont broyés et servent de soubassement autoroutier. Les vitres latérales pourront être recyclées, avec le verre d'emballage, mais leur traitement est coûteux.

Tel que la situation actuelle le laisse présager, il faudrait se rapprocher d'ici la fin de la décennie d'un objectif de zéro décharge. La situation actuelle peut se résumer aussi :

- L'**acier** constitue 73 % de l'épave et s'en va dans les aciéries locales, qui le refondent dans leur fours électriques.

- Les autres **métaux** sont revendus aux industries.

- Le **reste**, 25 % en poids du véhicule, pose des problèmes, excepté le verre en partie recyclable. Les plastiques vont en décharge, ou sont incinérés, venant gonfler davantage le flot des ordures ménagères.

- Les déchets synthétiques (tapis, polyuréthanes, etc) sont reconditionnés en combustibles pour l'industrie du ciment.

Toute la difficulté consiste donc à trier et à réutiliser les résidus du traitement des broyats, constitués environ de 60 % de matière minérale (verre⁽¹⁾ et éléments terreux de salissage à parts égales) et de 40 % de polymères (caoutchouc, mousse, plastiques).

Par contre les polymères, triés grâce à des procédés de séparation chimiques, puis réduits en granulés, sont en grande partie recyclés aujourd'hui comme combustibles, en particulier dans les cimenteries et les aciéries.

 (1)- Le verre automobile n'étant pas toujours recyclé en totalité.

LA VOITURE ZÉRO DÉCHET

VERRE

Origine Vitres et pare-brise

Transformation Broyage, tri par couleurs, refonte du calcin

Produits obtenus Fibres de verre de renfort, bouteilles, emballages alimentaires



MÉTAUX NON FERREUX

Aluminium, magnésium, zinc et alliages (zamac, etc.), plomb, cuivre. Métaux précieux (platine, rhodium)



Origine Pièces de moteur (bloc moteur, carburateur, etc.), structures de carrosseries, équipement électrique, pots catalytiques (métaux précieux)

Transformation Broyage, tri (séparation des métaux), refonte

Produits obtenus Nouvelles pièces automobiles et toute utilisation MNF de première ou seconde fusion

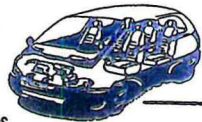
MATIÈRES PLASTIQUES

Thermoplastiques et thermodurcisseurs

Origine Pare-chocs, calandre, tableau de bord, réservoir d'essence, passage de roues, bas de caisse, filtre à air, enjoliveurs de roues, etc.

Transformation 1 - Broyage, tri par familles (avant ou après broyage) puis extrusion ou injection
2 - Broyage

Produits obtenus 1 - Pièces plastiques automobiles.
2 - Combustible pour fours industriels



BATTERIE

Transformation Broyage, neutralisation des acides, séparation du plomb et du polypropylène (boîtier). Refonte et affinage du plomb, extrusion du polypropylène

Produits obtenus Batteries, mais aussi plomb pour toute utilisation et autres pièces plastiques automobiles

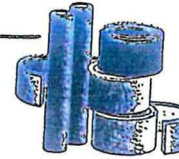


MOUSSES POLYURÉTHANNES

Origine Sièges, insonorisants de tôlerie

Transformation Broyage en flocons, collage à la chaleur

Produits obtenus Articles en flocons agglomérés (insonorisants, isolants, etc.)



CAOUTCHOUC

Origine Pneumatiques, joints, tapis, moteur

Transformation 1- Utilisation sans transformation (pneus)
2 - Rechapage (pneus en bon état)
3 - Broyage et production de poudrette de caoutchouc

Produits obtenus 1 - Pneusol : matériau de génie civil (mêlé à terre, béton, etc). 2 - Pneus rechapés. 3 - Produits de seconde catégorie (roues de brouette), enduits routiers drainants (mêlé à asphalte), combustible pour fours industriels



ACIER

Origine Carrosserie (tôles), pièces mécaniques

Transformation Broyage, tri magnétique, refonte

Produits obtenus Aciers mécaniques pour la fabrication de pièces de moteur

I.3.4 - Les techniques utilisées pour la valorisation des RBA

Différentes méthodes de séparation sont proposées pour la valorisation des RBA, comme : classification pneumatique, concassage, lavage (séparation à densité $1,0 \text{ g/cm}^3$), tri manuel, séparation en milieu dense, incinération, bac à piston ("jigging"), séparation magnétique, criblage et tablage.

La classification pneumatique par soufflage sur une bande transporteuse est une méthode très simple et efficace. Grâce à cette technique on peut enlever les papiers, le polystyrène, les matières plastiques légères etc...

Ensuite s'effectue un criblage à 4,75 mm. La fraction supérieure à 4,75 mm se traite dans une colonne d'eau à courant ascendant afin d'enlever principalement tous les résidus non métalliques du concentrat lourd (voir Annexe 7).

Pour séparer individuellement les métaux entre eux, on applique classiquement la séparation magnétique du fer, suivie par la sélection à la main du cuivre et du laiton et après la séparation en milieu dense de l'aluminium.

Le tri manuel précède la séparation en milieu dense pour éviter la contamination du cuivre et du laiton par le ferrosilicium du milieu dense.

Le schéma de la figure I.4 est un schéma classique pour la récupération des métaux non ferreux contenus dans les RBA :

L'aluminium est séparé des autres métaux lourds (mixtes) dans un séparateur en milieu dense, où la galène était utilisée comme médium, pour atteindre des pseudosolutions d'une densité 3 g/cm^3 . La galène est moins coûteuse que le ferrosilicium, mais à cause de sa fragilité et friabilité, elle est difficilement récupérable et son recyclage cause de fortes variations de viscosité dans le milieu dense à la suite de sa dégradation en très fines particules.

En outre, des essais en laboratoire ont montré que l'utilisation du ferrosilicium est plus avantageuse que la galène, parce que le premier est plus facile à récupérer en voie magnétique.

Le produit léger, récupéré dans la fraction flottante contenait 97 % en poids d'aluminium, soit alliages d'aluminium; 1 % d'autres métaux; 2 % non métaux. Cette fraction légère compte environ 2 % du poids de tous les RBA traités.

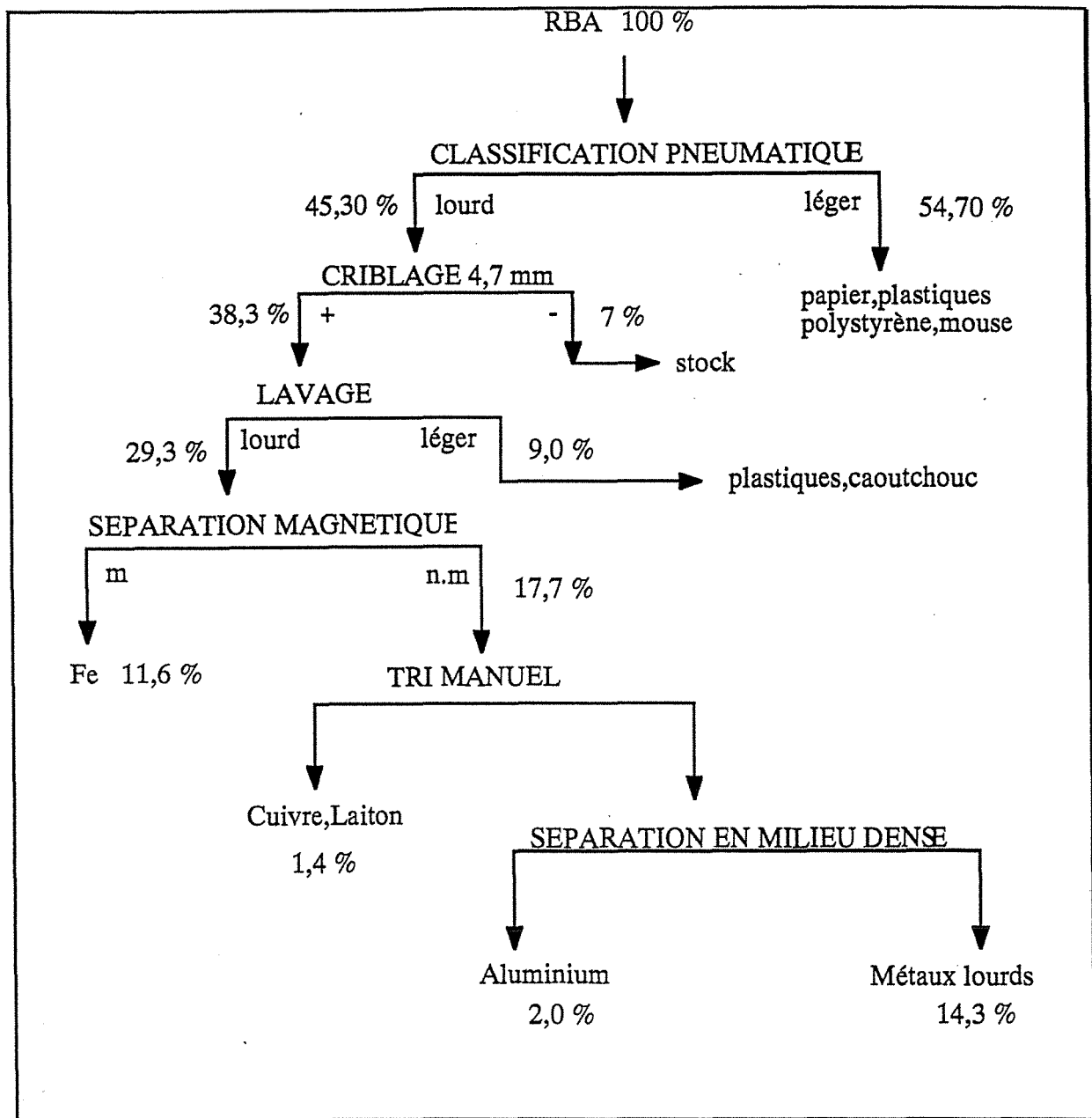


Figure I.4 : Schéma classique de récupération des métaux dans les RBA

Dans un tel schéma de traitement, on traite les produits entrants dont la composition figurent dans le tableau I.6 :

Composants	Ech. A	Ech. B	Ech C	Ech.moyene
Al	1,7	1,4	8,2	3,8
Cu	2,1	4,2	3,6	3,3
Fe	15,8	6,9	13,1	11,9
Pb	1,3	1,6	1,1	1,3
Zn	7,0	14,8	17,1	13,0
verres et noncombustibles	49,4	42,3	35,3	42,3
c/c et combustibles	22,7	28,8	21,6	24,4
Total	100,0	100,0	100,0	100,0

Tableau I.6 : Composition des RBA avant traitement dans 3 différentes installations

Les métaux lourds recueillis dans la fraction plongeante sont composés :

- zinc	88 %
- plomb	9 %
- cuivre	2 %
- inox	1 %

Selon un autre auteur (MULLER H. 1982), la répartition des métaux non ferreux est la suivante : 39,97 % Al; 1,55 % Cu; 2,73 % Etain; 2,01 % Zn; 1,12 % câbles et fils de cuivre; 3,18 % acier léger et 5,52 % acier lourd avec des taux de rendement respectifs : zinc et plomb 100 %; cuivre et etain 99,86 %; aluminium 99,22 %.

Une autre méthode fait appel à un traitement original de lavage préalable, qui consiste à séparer dans une colonne d'eau les parties légères en les entraînant à la partie supérieure de la colonne par un courant ascendant. Le produit ainsi récolté est appelé "fluff" dans le jargon du métier et va actuellement en décharge. Sa composition est la suivante :

- polystyrène et mousse	19,3 %
- plastiques	22,2 %
- caoutchouc	33,3 %
- métaux (> 12 mesh)	6,1 %
- verres, sable, poussière	19,1 %

Les parties légères comme caoutchouc, polystyrène, mousse et bois peuvent être utilisées dans les cimenteries ou dans les fours à chaux si leur pouvoir calorifique est environ 9,6 à 10,5 MJ kg⁻¹, teneur en chlore environ 0,1 % et en SO₂ environ 0,8 % (MULLER H. 1982). On peut considérer qu'en 1992, les 75 % d'une voiture sont recyclés et que les 25 % restant constitués par le "fluff" et les fines de criblage, inférieures à 4,7 mm, peuvent faire l'objet d'une revalorisation énergétique.

La récupération des métaux lourds implique une adaptation des moyens d'affinage. On utilise surtout les méthodes pyrométallurgiques, bien que des voies hydrométallurgiques soient aussi mise en oeuvre (selon SHAMSUDDIN M., 1986). En effet les situations sont les suivantes selon la nature du métal :

Aluminium :

La récupération et la réutilisation d'aluminium pour donner un métal de deuxième fusion apporte des économies d'énergie par rapport à la métallurgie de première fusion. Une partie importante de la production d'aluminium est basée sur la récupération des métaux non ferreux, contenus dans les broyats de l'automobile. L'aluminium récupéré, doit être ensuite

affiné. La pureté de l'aluminium est un facteur très important et avec les technologies récentes on peut enlever Mg, Ca et Na de l'aluminium. Le gain énergétique de la deuxième fusion par rapport à la première fusion est de 90 à 95 %.

Zinc :

Le zinc est récupéré en général sous forme métallique. Seule une petite quantité (environ 10.%) de zinc, contenu dans les résidus, est récupérée généralement sous forme d'oxyde dans les fours. Environ un quart de la totalité du zinc produit, est utilisé pour des couvertures protectrices. Le gain énergétique de la deuxième fusion par rapport à la première fusion est de 55 à 60 %.

Plomb :

La récupération du plomb assure environ 40 % de la consommation totale mondiale, surtout sous la forme de "scraps". Le plomb des voitures est récupéré après le démontage, à partir des batteries des vieilles voitures. Après broyage et séparation gravimétrique de la bakelite et des métaux, le plomb est récupéré par pyrométallurgie (desantimoniage selon les utilisations). Une autre provenance sont les résidus broyés, où le plomb est contaminé par le zinc. La séparation est opérée par pyrométallurgie. Le gain énergétique de la deuxième fusion par rapport à la première fusion est de 25 à 30 %.

Cuivre :

La récupération du cuivre représente 30 à 35 % de la production. Le cuivre et les matériaux en contenant (câbles et fils de cuivre, radiateurs ainsi qu'une partie du bronze), peuvent être traités soit dans des fours rotatifs (si la qualité est supérieure à 40 % Cu), soit dans des hauts fourneaux (si la qualité est d'environ 5 % Cu). Le gain énergétique de la deuxième fusion par rapport à la première fusion est de 32 à 35 %.

Etain :

La quantité de l'étain dans les "scraps" est relativement faible. Il est récupéré souvent avec le zinc, par des opérations hydrométallurgiques. Dans la plus part des cas, il est utilisé pour l'étamage. Le gain énergétique de la deuxième fusion par rapport à la première fusion est environ 60 à 65 %.

I.3.5 - Evolution actuelle de différentes sortes de plastiques

Un des problèmes majeurs des constructeurs de voitures réside dans la diversité des formulations chimiques des polymères plastiques, employées pour la construction de certaines voitures.

A l'heure actuelle, le verre est un matériau facile à recycler, et le plastique l'un des plus difficiles. Bien qu'ils représentent tous deux 7 % du poids des déchets municipaux solides aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne, les Américains recyclent 1 % seulement de ces déchets, et les Britanniques quasiment pas. La raison est en partie que l'industrie du recyclage en est encore à ses débuts et que les plastiques augmentent le pouvoir calorifique dans les usines d'incinération des ordures ménagères.

L'industrie des plastiques n'a commencé à penser au recyclage qu'au milieu des années '80, non parce que c'était moins coûteux (comme dans le cas de l'acier), mais pour s'abriter des critiques de l'opinion publique devant l'envahissement des déchets d'usage de polymères organiques..

Le recyclage du plastique pose un problème parce que la plupart des plastiques disponibles pour le recyclage constitue un mélange dont les composants ont des natures très différentes et non compatibles entre eux pour donner un nouveau polymère. .

D'après les statistiques de l'Institut Hambourgeois de l'Environnement, la fabrication d'une seule voiture ne générerait pas moins de 25 tonnes de déchets de toute sortes. Les 14.6 millions de tonnes d'ordures ménagères rejetées chaque année par la consommation des ménages sont une quantité négligeable comparée aux rejets de l'industrie automobile.

Pour un véhicule de l'année 1985, pesant 800 kg, la répartition pondérale des composants est la suivante :

- acier et fonte	70.0 %	ou 560 kg;
- non métalliques	26.5 %	ou 212 kg;
- métaux non-ferreux	3.5 %	ou 28 kg

Dans les nouveaux véhicules, la part des plastiques tend à progresser jusqu'à 120 kg (TAQUET S. 1992). contre 80 kg dans le courant des années '85, soit une part estimée à 15 % au lieu de 12 %. Les figures I.5 et I.7 (selon VOY C. et SCHMIDT J., 1992), montrent bien l'évolution des composants des voitures et particulièrement des plastiques.

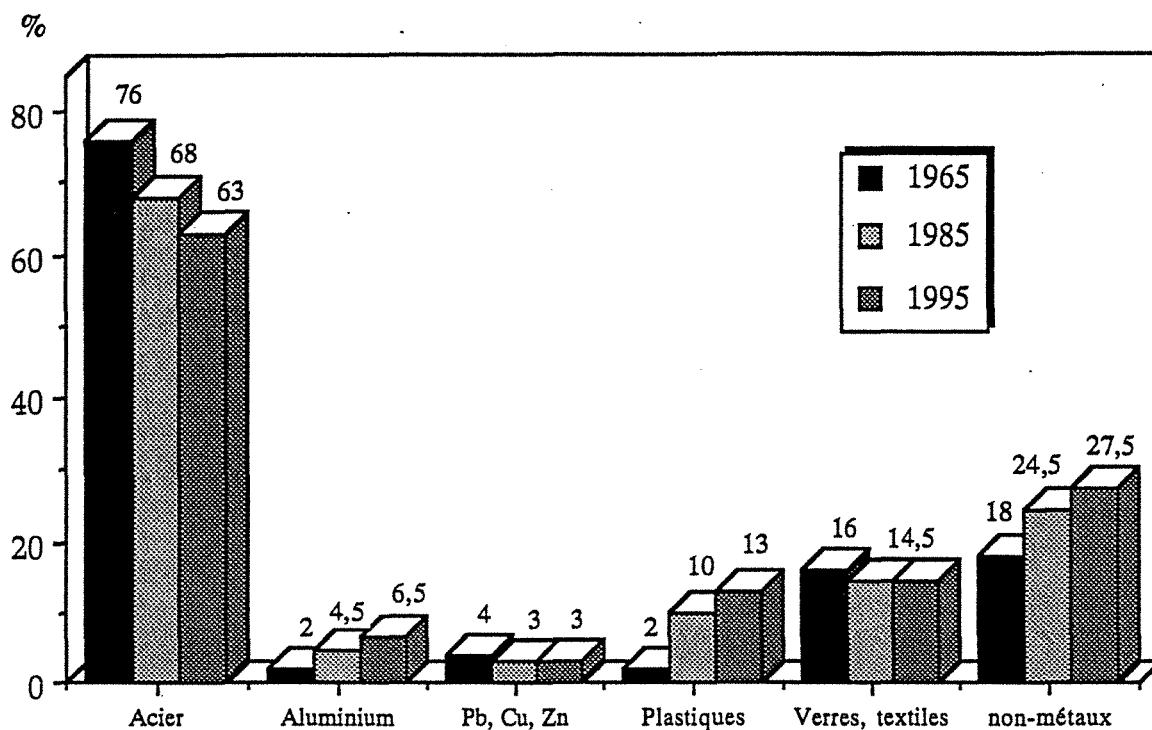


Figure I.5 : Evolution des composants des voitures entre les années 1965 et 1995

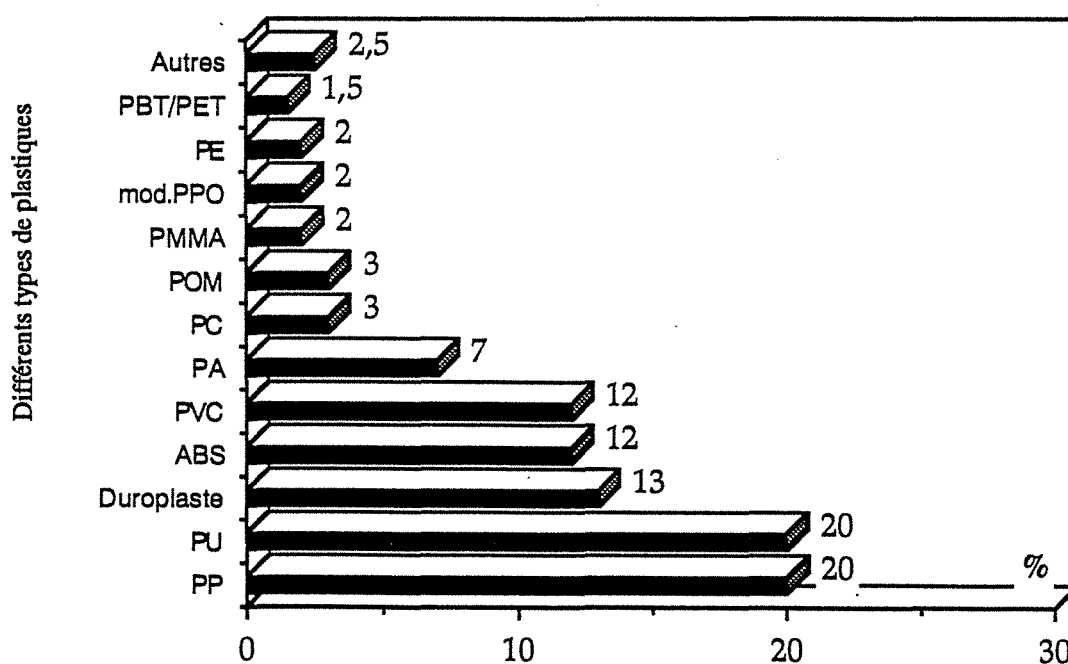


Figure I.6 : Consommation des plastiques dans l'industrie Européenne de l'automobile en 1988 (selon Voy C. et Schmidt J.)

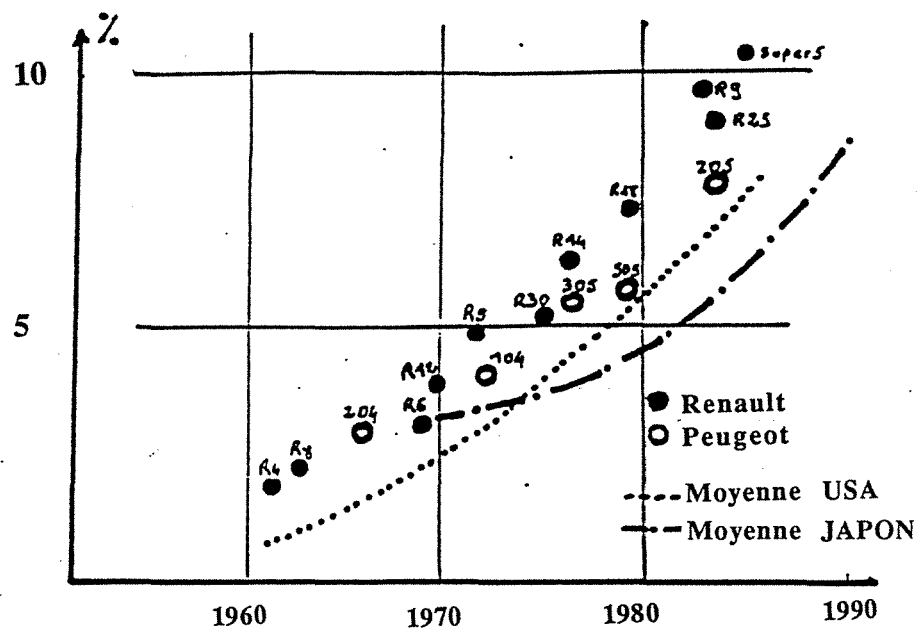


Figure I.7 : Proportion de plastiques dans les voitures

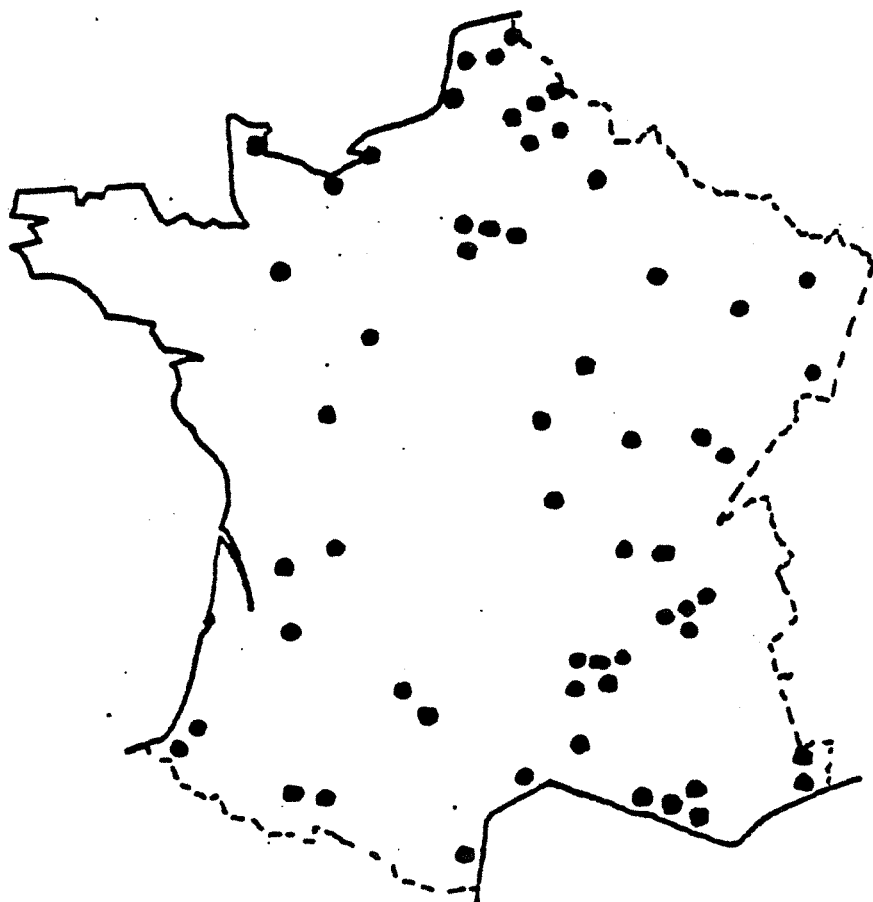


Figure I.8 : Répartition nationale des cimenteries

Un véhicule comprend en moyenne 12 % d'éléments en plastique de nature différente (tableau I.7 et figure I.6), soit 1200 à 1500 pièces sur les 5000 à 6000 qui composent un véhicule. Etant donné la tendance qui consiste à alléger le poids d'un véhicule au profit de la consommation de carburant, leur part devrait passer à 15 %.

Types de plastiques	CEE	USA	Utilisation
Polyuréthane PUR	23	22,6	siège, toiture, isolation du bruit
Polyvinylchloride PVC	22	15,5	simili-cuir, protection sous-sol
Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymère/Polystyrol (ABS,PS)	16	7,3	pare-chocs, toiture,rétroviseur
Polypropylène PP	16	19,2	pare-chocs, chauffage
Polyéthylène PE	6	-	couverture du radiateur, réservoir de carburant
Polyamide PA	6	-	tapis de sol
Duroplaste	3	-	partie isolante de moteur électrique
Polyméthyl-Methacrylat PMMA	2	-	feux arrières, essuie-glace
Polyoxyméthylène POM	1	-	pédale d'accélération
Autres	5	5,2	partie des feux arrières
Total	100	-	

Tableau I.7 : Répartition en % des différents types de plastiques utilisés dans la construction automobile (selon les auteurs européens et américains)

Si on fait une comparaison entre les voitures européennes et américaines, vis-à-vis des plastiques utilisés, on remarque que dans les dernières le PVC et ABS ont une diminution de poids, par contre le polypropylène enregistre une augmentation (selon JODY B.J. et DANIELS E.J.- USA) et (VOY C. et SCHMIDT J. - RFA).

La substitution acier-fonte par la matière plastique est cependant conditionnée par des impératifs de finition et de spécificité d'usage. Pour la construction des panels en plastiques le travail de finition est plus long que dans le cas de l'acier. Le type des plastiques le plus fiable pour arriver à la meilleure qualité de finition est l'oxyde de polyphénylène/polyamide, mais qui coûte cher.

Les plastiques ont le grand avantage d'une résistance anti-corrosive. Les polypropylènes, utilisés à plus de 30 %, les polyuréthanes, les PVC, les polyéthylènes haute densité, les polyamides et les composites sont les matériaux employés. Maintenant les constructeurs veulent n'utiliser qu'un type de matériau qui est recyclable (par exemple, les thermoplastiques comme le polypropylène qui est utilisé pour les pare-chocs).

Une grande part des composants plastiques utilisés dans l'industrie automobile est le polypropylène : la carrosserie de l'ASTRA, par exemple, témoigne de cet emploi. Les garnitures d'ailerons sont fabriquées, par exemple, à 100 % à partir de bacs de batterie et de pare-chocs recyclés. L'habitacle est représentatif de la boucle de recyclage du polyuréthane (mousse et coussins de sellerie sont recyclés pour fabriquer les tapis de sol et le matériau

d'isolation de la planche de bord). Il devrait être possible de recycler une pièce en polypropylène jusqu'à 100, ou peut-être 200 fois. (HANENBERGER P.H. 1992). La recyclabilité est donc "très élevée", mais il y a bien entendu une légère détérioration du matériau.

I.3.6 - Evolution des composants métalliques :

La recherche de nouveaux matériaux à la fois plus rigides et plus légers est impérative, afin d'alléger les carrosseries des voitures.

C'est ainsi que l'acier peut encore être allégé, l'aluminium et certains alliages s'adaptent à certains besoins, mais les structures "sandwich" et "nids d'abeille" répondent parfaitement à cet impératif. (DEL VECCHIO J.-M. 1992). En conséquence on s'attend à une augmentation de l'usage de l'aluminium, qui représentera en l'an 2000, 7 % en poids du véhicule, alors qu'il est actuellement de 5 %.

Il faut noter cependant une véritable "contre attaque" des métaux classiques ralentissant ainsi leur progressif effacement dans la construction automobile.

CHAPITRE II

Les installations de traitement des RBA

CHAPITRE II

II.1 - INTRODUCTION

Par le passé, la faible valeur commerciale des produits de récupération, l'aspect marginal de cette activité, ainsi que la faiblesse de la technologie du broyage et du tri en amont, ont fait que les résidus de fin de la chaîne de récupération automobile ne présentaient pas une valeur justifiant l'apparition d'entreprises spécialisées dans la valorisation des résidus contenant des métaux.

Il n'en demeurerait pas moins que les déchets du broyage automobile ont présentés depuis toujours une position attractive, autant pour leur teneur en métaux, que pour la qualité des métaux récupérables.

A la suite des dépenses énergétiques importantes nécessaires pour obtenir des métaux à partir de minerais notamment après les chocs pétroliers des années '70, l'industrie s'est intéressée aux produits de deuxième fusion, plus attractifs sur le plan des dépenses énergétiques, que les métaux de première fusion.

L'industrie du recyclage des déchets de l'automobile s'est progressivement développée, dans le vide de la réglementation.

Les installations artisanales de récupération et de broyage des épaves se sont transformées en usines de dimensions industrielles à la faveur des prises de participation des grands groupes dans leur capital ou leurs débouchés commerciaux.

Les installations importantes de broyage se sont modernisées et ont entamé la mise en place des moyens de tri en amont des produits métalliques recyclables :

- Tri manuel des éléments facilement identifiables,
- Extraction magnétique des éléments ferrés,
- Criblage des résidus.

Les produits sortant finalement de cette chaîne amont ne représentaient plus que des déchets ne contenant que de faibles proportions de métaux pour la plupart non-ferreux, de dimension ne facilitant pas leur traitement, et contenant des teneurs en éléments polluants. Traditionnellement, on a appelé ces produits "résidus de broyage d'automobile" (RBA).

II.2 - BROYAGE-TRIAGE

Le boom de la production nationale d'acier en 1974, avec 21 millions de tonnes, juste au moment de la crise de l'énergie et de la dépendance vis-à-vis du pétrole, a eu pour résultat une première vague d'implantation de broyeurs d'automobiles, afin de récupérer des scraps d'acier. Fin 1981 on comptait en effet 17 broyeurs-déchiqueteurs en France.

La deuxième vague se situe entre '85 et '87 et est liée au développement des aciéries électriques, provoquant un nouvel accroissement du nombre d'installations de broyage, qui au total est passé à 31 broyeurs. Cet effort a été maintenu jusqu'à aujourd'hui. (PINEAU J.L.; KALTANI A.1993)

Il y a actuellement 50 broyeurs répartis dans toute la France, avec une densité légèrement plus forte dans la partie au nord de la Loire (voir figure II.2).

En conséquence le nombre de VHU broyés a cru très rapidement comme le montre le tableau II.1:

année	1982	1983	1984	1985	1986	1987
nombre VHU broyées (* 1000)	452	559	752	837	871	1428

Tableau II.1 : Evolution du nombre de VHU broyés

Comme cela a été signalé précédemment, le VHU n'est pas directement envoyé au broyage. Il passe par la filière des démolisseurs qui récupèrent toutes les pièces encore utilisables et les parties facilement extractibles. La carcasse est ensuite dirigée vers l'unité de broyage d'où sortent 3 produits comme le montre la figure II.1 :

- ➡ le "33" extrait par magnétisme;
- ➡ le mélange métaux non ferreux, envoyé dans des unités spécialisées dans la récupération de ces métaux;
- ➡ le stérile constitué essentiellement par des fines et légers, récupérés au niveau de broyage/aspiration, par des produits fins récupérés au niveau du criblage des non ferreux et par des gros morceaux de caoutchouc ou plastiques, récupérés par cisaillement.

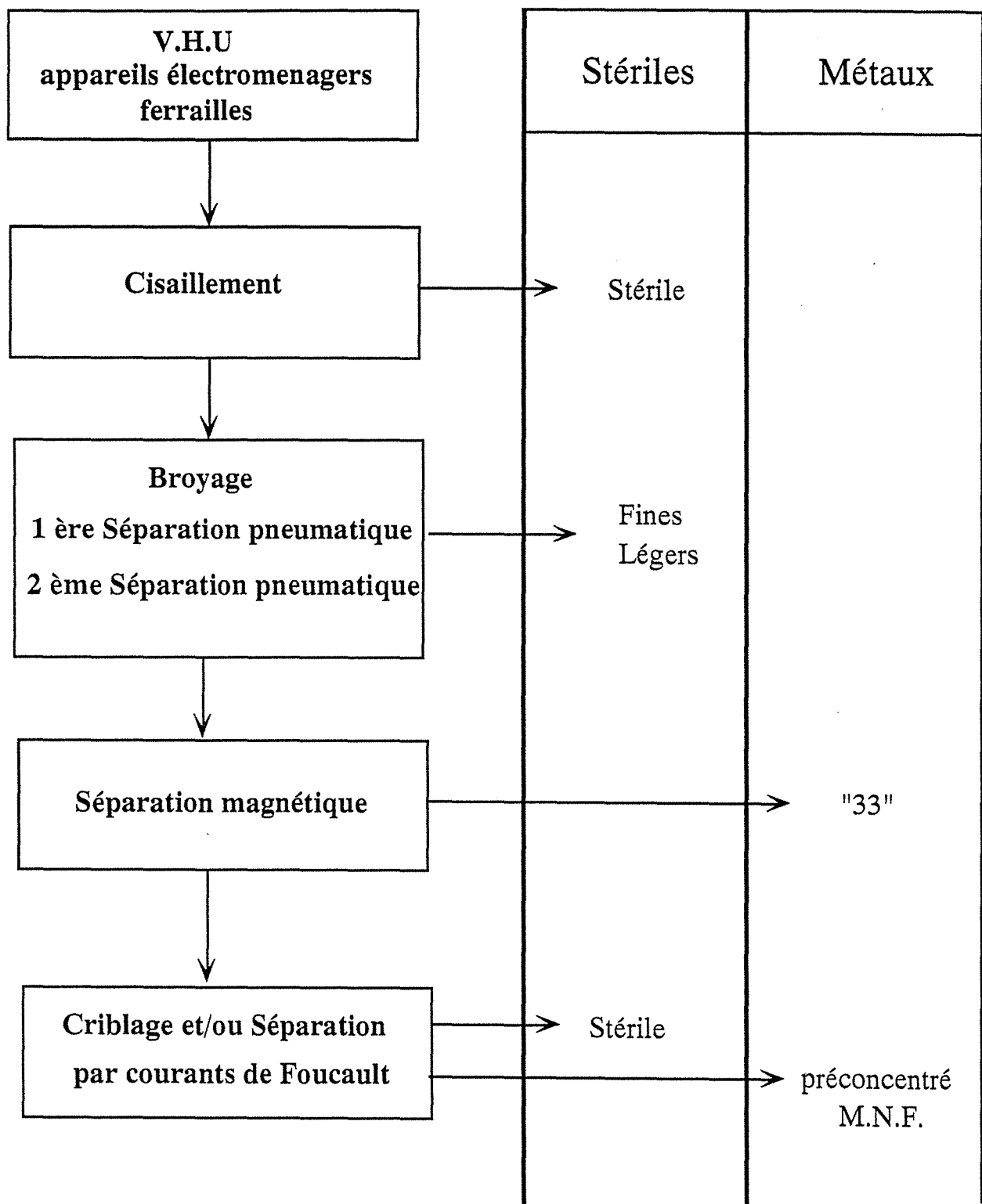


Figure II.1 : Unité de broyage

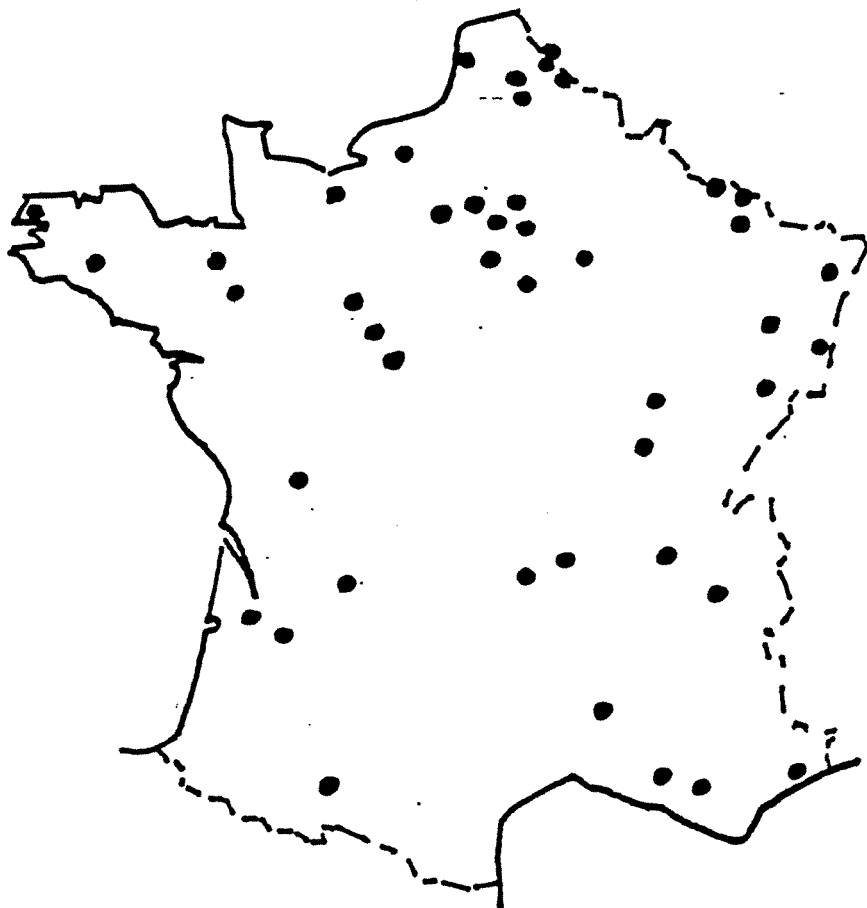


Figure II.2 : Répartition nationale des broyeurs

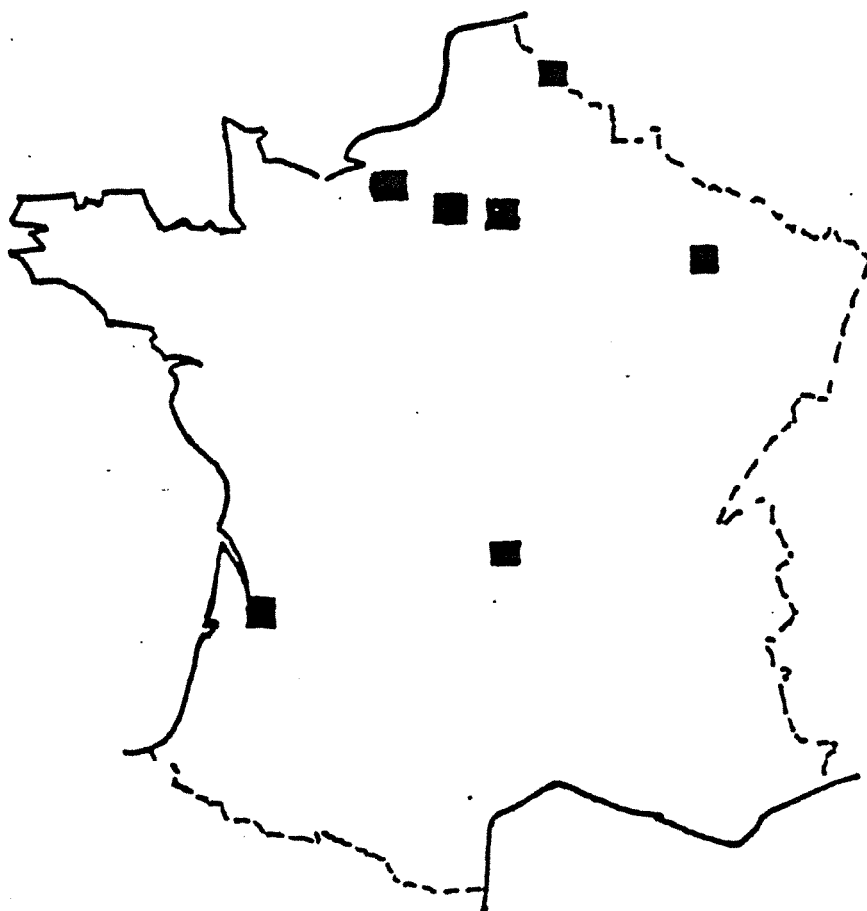


Figure II.3 : Répartition nationale des unités de traitement

L'unité de broyage inclut la fragmentation suivie par la récupération de la ferraille.

Aujourd'hui les broyeurs-déchetteurs reçoivent la totalité des VHU, mais également d'autres produits. En même temps que les VHU représentent 50 à 60 % de toute la masse broyée, le reste est composé de profilés en ferrailles, d'appareils électroménagers tels que machine à laver, réfrigérateur, chaudières, ou matériel informatique, de bureautique, etc. (DEL VECCHIO J-M. ; R/R 14/05/1993)

Les broyeurs-déchetteurs, d'une puissance d'environ 1250 chevaux, brisent l'épave ou le cube en petits morceaux. Une double aspiration élimine poussières et parasites. Puis un tambour magnétique sépare les métaux-ferreux des non ferreux (aluminium, cuivre, inox, etc.). Les métaux sont livrés aux affineurs, qui remettent les alliages au titre et fournissent parfois les fondeurs qui opèrent une fusion en poches de 6 tonnes de métal liquide à 700 °C. C'est le cas de l'aluminium réutilisé pour les carters de moteur. Une dizaine d'affineurs sont ainsi fournis en France, et autant dans la CEE.

Les déchetteurs LINDEMANN (figure II.4) sont les plus couramment utilisés et permettent depuis de nombreuses années et dans de nombreux pays, de transformer les épaves de voitures, les "slabs" de cisailage, les paquets légers et la ferraille mélangée, telle que réfrigérateurs, cuisinières, machines à laver, bicyclettes, carcasses de tôle légère etc... en petits fragments propres de grande densité et d'obtenir ainsi une matière première précieuse pour l'industrie sidérurgique.

Leur capacité varie de 6 à 150 t/heure, avec des équipements spécifiques pour l'alimentation des matières, le nettoyage, le dépoussiérage et l'évacuation de la ferraille déchetée.

Le résultat obtenu, en traitant des épaves de voitures et autres objets métalliques, se traduit, selon la composition, par les chiffres suivants :

- 67 à 75 % de ferraille propre;
- 24 à 30 % de matières stériles;
- 1,0 à 3,0 % de métaux non-ferreux

La ferraille traitée par les installations de déchetage se caractérise par :

- sa grande densité;
- une densité apparente de 1 à 2,5 kg/dm³
- sa granulométrie uniforme, en moyenne de 50 à 150 mm;
- sa propreté et sa haute qualité.

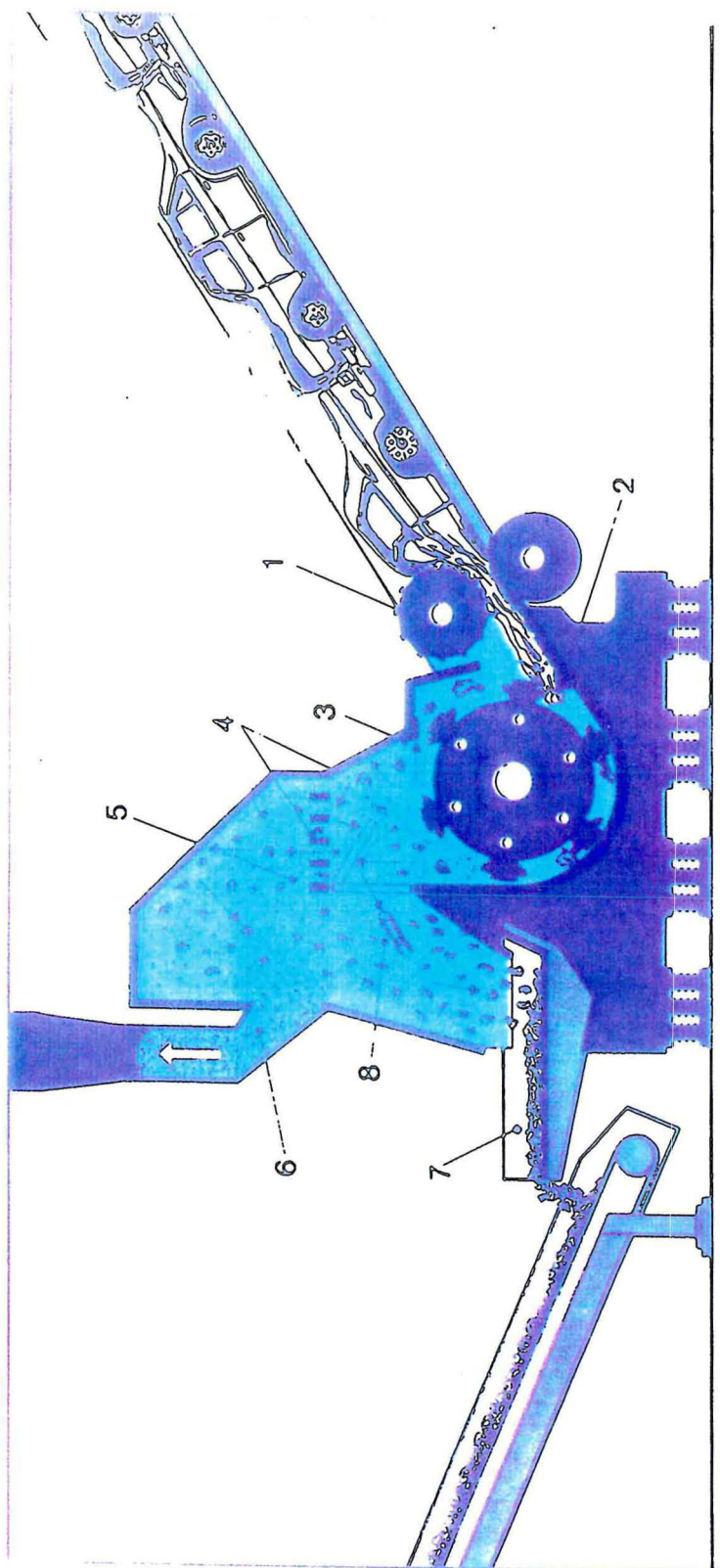


Figure II.4 : Schéma d'un broyeur

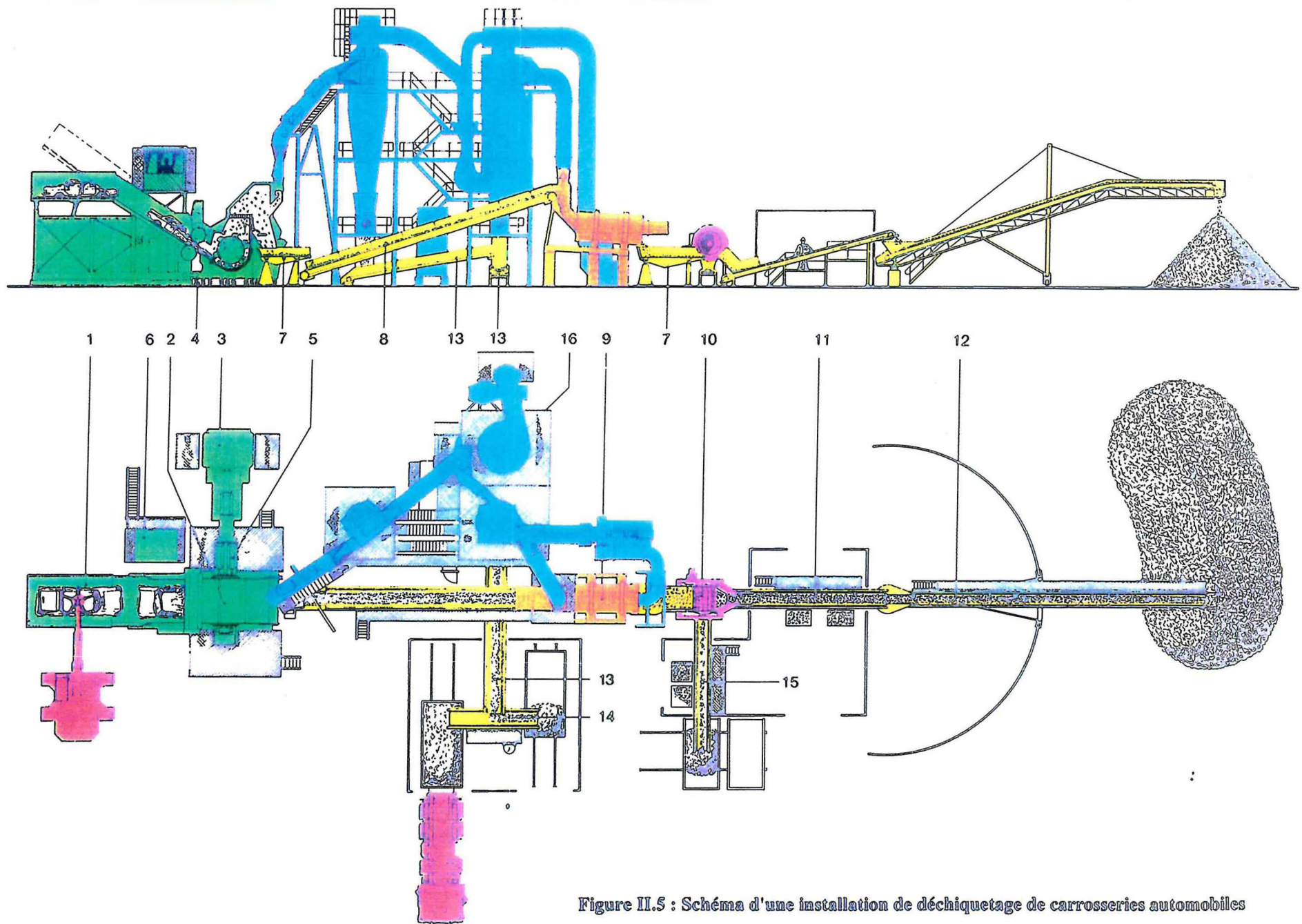


Figure II.5 : Schéma d'une installation de déchetage de carrosseries automobiles

Les déchets non-métalliques (caoutchouc, textiles, matières plastiques, bois, impuretés, sable etc...) ont une densité apparente d'environ 0,5 t/m³. Ils peuvent être déposés, comme les ordures ménagères, en décharge contrôlée.

Les déchiqueteurs fonctionnent selon un procédé spécial qui se caractérise essentiellement par la disposition de la grille au-dessus du rotor.

La figure II.5 montre le schéma d'une installation de déchiquetage LINDEMANN, avec les systèmes de transport et de tri correspondant, le mode opératoire du déchiqueteur ainsi que les phases suivantes de travail :

- 1- Dosage automatique de l'alimentation;
- 2- Déchiquetage par l'arête de l'enclume;
- 3- Déchiquetage par l'angle de rebondissement;
- 4- Compression par impact des fragments contre la paroi de rebondissement, contre la grille et par effet du rotor;
- 5- Sortie des fragments à travers les mailles de la grille;
- 6- Aspiration de la poussière et des déchets légers;
- 7- Evacuation de la ferraille déchiquetée;
- 8- Ejection des grosses pièces ne pouvant être déchiquetées.

La qualité des "scrap" est liée au type de marteau utilisé dans le broyeur-déchiqueteur, comme le montre le tableau II.2, qui donne une évaluation de la libération physique des métaux. La meilleure libération est obtenue, par exemple avec un marteau Becker 140 x 85 mm. Il existe donc une optimisation possible du broyeur-déchiqueteur vis-à-vis des potentialités de triage.

Type de marteau	Produit magnétique acier	Aluminium	Cuivre	Alliages de cuivre	Non-métaux
Becker 140x85 mm	93,2	97,9	99,7	95,4	88,5
Becker 210x180 mm	90,4	91,0	92,4	88,0	88,4
Henschel env. 50 mm	90,6	93,7	50,4	80,0	84,2

Tableau II.2 : Degré de la libération du "scrap" en relation avec le type de marteau utilisé selon SCHUBERT G. (1991)

Les photos 1 jusqu'à 6 montrent certains aspects particuliers des opérations sur les chantiers allemands de broyage à Francfort, Duisburg et Mannheim. Les photos 7 et 8 présentent les RBA sortant du broyeur et qui font objet de cette étude.

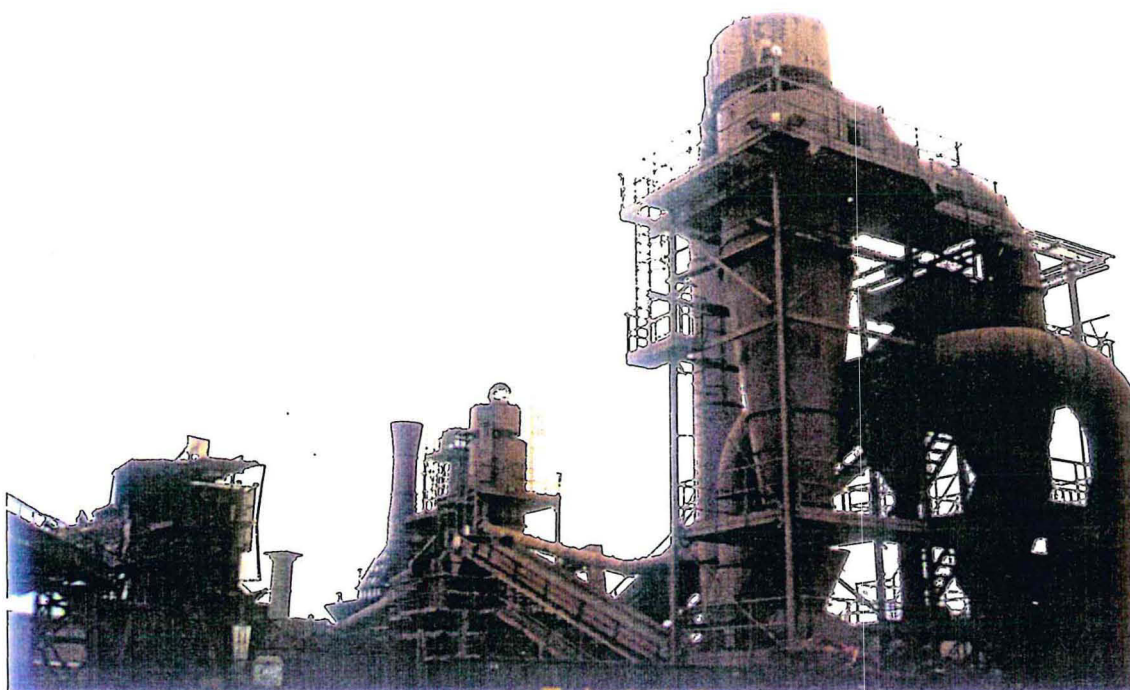


Photo 1 : Système du broyage et de l'aspiration



Photo 2 : Voitures et autres matériaux avant broyage



**Photo 3 : Mélange des carcasses de voitures et de matériels
de consommation courante hors d'usage**



**Photo 4 : Mélange des carcasses de voitures et de matériels
de consommation courante hors d'usage**



Photo 5 : Formation des tas pour reprise au broyeur



Photo 6 : Chargement du broyeur par grues, montées sur rails

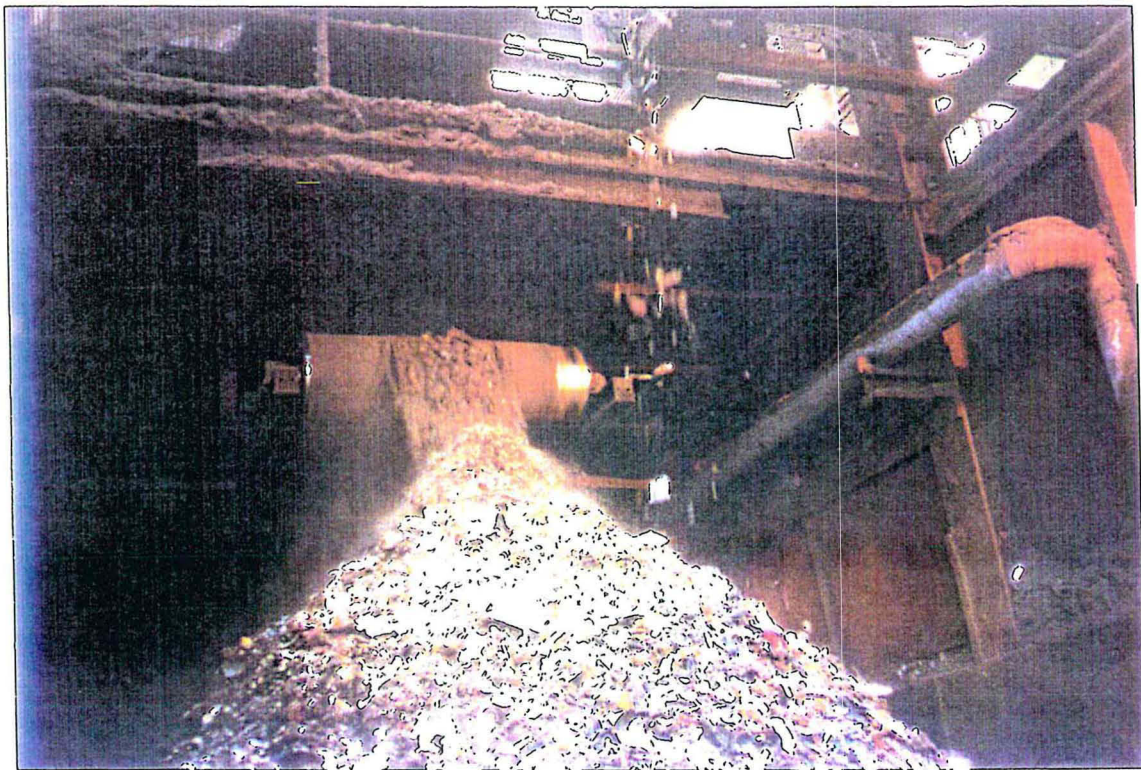


Photo 7 : Sortie des produits de l'aspiration



Photo 8 : RBA après broyage et aspiration des légers

II.3 - DEFINITION DES R.B.A.

Lors d'une interview par l'hebdomadaire "Recyclage/Récupération (n°16 de 1992), sur le recyclage des voitures hors d'usage, Mr. PERCIE DU SERT (Délégué Général de RENAULT), assimile la voiture à un nouveau minerai. Cette réflexion est très importante, car son auteur considère la voiture usée comme une source de matières premières, alors que pour des raisons physiques et techniques cette assimilation n'a jamais été faite auparavant. Cependant, le traitement des VHU et le traitement des minerais présentent des analogies évidentes à quelques détails près. La voiture ou VHU, considéré comme un minerai est caractérisé par la composition, obtenue généralement à partir de l'information donnée par le constructeur, qui connaît la répartition des différentes matières entrant dans le véhicule neuf. Il faut ajouter cependant que, si un minerai est déjà un objet complexe, un produit né de l'ingéniosité humaine est bien plus complexe et par conséquent, plus difficilement divisible en ses éléments constitutifs. D'un point de vue général (selon C.F.F. - voir figure II.6), une voiture de l'année 1988 contient :

- 70,0 % d'acier et de fonte (soit 560 kg);
- 3,5 % de métaux non ferreux;
- 26,5 % de non métalliques.

Les éléments métalliques sont parfois intimement associés (alliage, matériaux complexes avec dépôt de surface, etc...). Tout aussi complexes sont les non-métalliques (environ 26,5 % en poids de toute la voiture), composés par: plastiques, caoutchoucs, verres, tissus, papier-cartons, huiles-graisses, équipements électriques et divers. Ces éléments constituent en majorité les R.B.A. ou Résidus du Broyage d'Automobile.

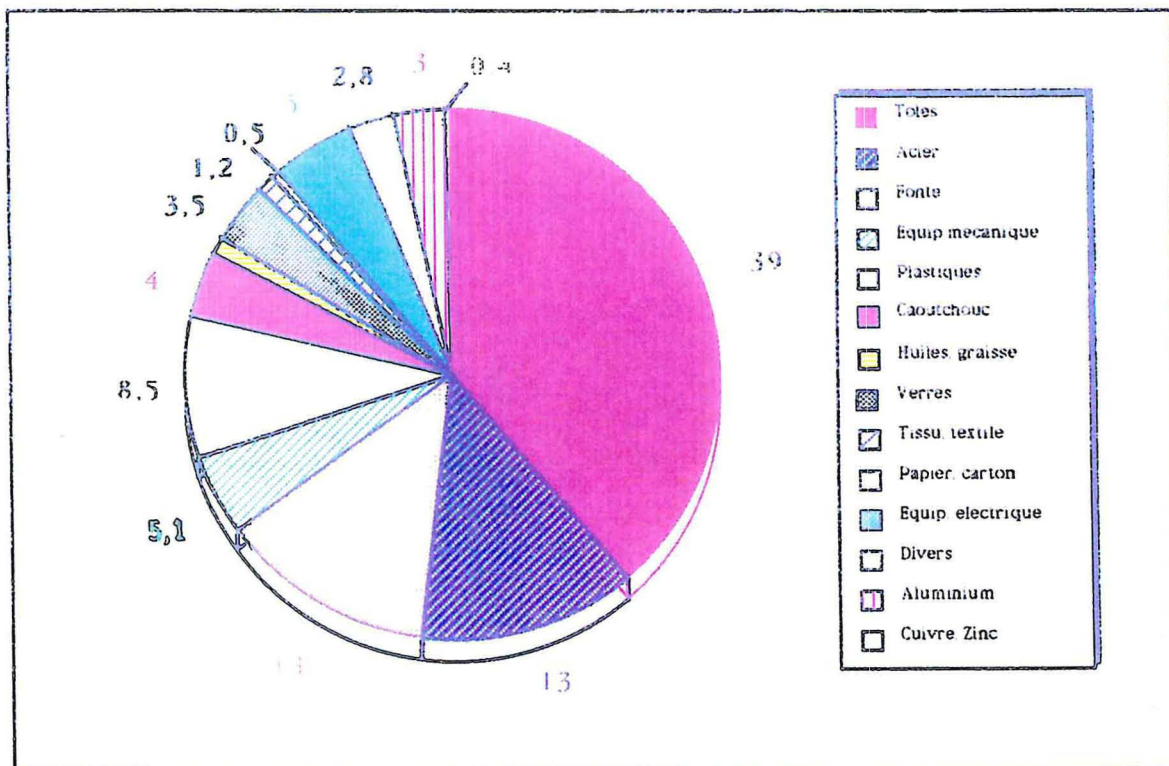


Figure II.6: Répartition (en %) des composants d'une voiture de l'année 1988 (selon CFF)

En décembre 1989 apparaît le terme de résidu de broyage dans un article relatant la demande des ferrailleurs allemands d'une nouvelle législation adaptée aux 30 % de produits qui ne sont pas recyclés et qui vont à la décharge. Ce terme est repris lors de la mise en place de la nouvelle ligne de broyage à St.Pierre de Chandieu par la société PURMET avec 25 % en poids de RBA, correspondant à 5 % de légers provenant de l'aspiration du broyeur; à 18 % de légers obtenus par soufflage et à 2 % résidus de séparation par courants de Foucault.

L'emploi du terme "stérile" est motivé par le fait qu'il s'agit d'une partie non récupérable à éliminer en décharge ; le terme déchet aurait créé une image par trop négative.

L'image négative du déchet :

Le déchet (résultant d'un bien de consommation) est un objet qui a perdu sa fonction. Dans l'esprit du public il n'a plus de valeur et il n'est pas tenu compte de sa composition. Il est rejeté, voué à l'abandon. Cette logique a permis de donner la notion juridique du déchet -article 1 de la loi de 1975 : "est un déchet au sens de la présente loi, tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné, ou que son détenteur destine à l'abandon".

Le producteur a proposé de substituer le terme "abandon" par "non valorisable", mais cette proposition n'a pas été retenue. La loi de juillet '92, introduit la notion du "déchet ultime" : "Le déchet ultime est un déchet qui est économiquement non viable ou polluant".

En France le classement du déchet diffère du classement allemand qui distingue le déchet qui a un caractère négatif, du résidu lié ou reliable à l'économie, donc valorisable.

La part des RBA dans la production des déchets

En Allemagne, selon les auteurs (VOY C. et SCHMIDT J.), la quantité de RBA mise en décharge est de 280.000 T/an (pour 2 M de VHU broyés), ou 397.500 T en 1990 (pour 2,69 M de VHU broyés). La quantité de plastiques mise en décharge oscille entre 100.000 T et 176.000.T, suivant les sources. De toutes façons, elle est modeste si on la compare aux 16 millions de tonnes de déchets domestiques mis en décharge.

Le devenir des RBA

1990 constitue un changement de mentalité dans le devenir des RBA:

- d'abord au niveau traitement avec la venue sur le marché du traitement des appareils à courants de Foucault ;
- avec la guerre économique entre les constructeurs d'automobiles ;
- avec le concept de la voiture verte démontable, recyclable et le "zéro décharge" (figure I.3) ;
- avec la contrainte imposée par les sidérurgistes sur la qualité de l'acier ;
- avec la prise en compte du bien national que sont les décharges contrôlées ou C.E.T ;
- avec les possibilités offertes par des traiters potentiels de déchets, les cimentiers, qui bien répartis sur le territoire national (figure I.8), peuvent éliminer les déchets à fort PCI dans les fours de clinkérisation, à condition qu'il n'altère pas la qualité du ciment.

❑ Les séparateurs par courants de Foucault, ou par induction, se sont développés à base des aimants permanents. Ils permettent de séparer les conducteurs des non conducteurs, ont une grande souplesse d'emploi et sont efficaces.

❑ La guerre économique entre les constructeurs : En 1992, le Ministère allemand de l'environnement a lancé un projet d'obligation pour les constructeurs ou importateurs d'automobiles de reprendre les véhicules en fin de vie. Les automobilistes pourront retourner gratuitement leurs véhicules que les concessionnaires seront tenus d'accepter, afin qu'ils soient détruits ou recyclés. Ceci est applicable aussi aux voitures japonaises. La justification de cette proposition est liée à l'augmentation du nombre de VHU en Allemagne : 200.000 en 1960, 2 millions en 1990 et 3 millions en l'an 2000. Ce projet fait suite à une étude demandée par les sidérurgistes allemands en 1987 sur l'évolution de la voiture où il apparaît que le pourcentage d'acier utilisé allait chuter au profit du plastique : de 70 % en 1984 à 63 % en 1995, et que le VHU doit être démonté avant broyage, afin de limiter la mise en décharge d'une quantité croissante de déchets. En janvier 1990, VOLKSWAGEN lance une unité pilote en collaboration avec la Chambre des Métiers et l'Entreprise EVERT HEEREN, un des plus gros importateurs de ferrailles. Le polypropylène des pare-chocs est envoyé à "DSM" (DUTCH STATE MINING) aux Pays-Bas pour être broyé, lavé et calibré, afin de refaire des nouvelles pièces. 30 épaves ont été démontées pendant l'année 1990. "B.M.W" intègre en 1990 une unité pilote de désassemblage dans son usine de production de LANDSHUT.

□ Zéro décharge : Du côté français, en 1991, PSA, la Compagnie Française des Ferrailles (C.F.F.) et VICAT s'associent pour monter une unité pilote de démontage et traitement des VHU, sur le site de la CFF, à Saint Pierre de Chandieu. Au départ, le nombre de VHU traités était de 16/jour. Ces VHU correspondent aux "5.000 F de reprise" par les garages. Ceci se concrétise avec le concept PSA - CFF sur le recyclage des VHU avec l'utilisation des RBA en cimenterie et le recyclage des pare-chocs, facilitée par une unité mobile de broyage. L'ambition de PSA est "zéro décharge". L'expérience actuelle montre que le pourcentage de RBA passe de 24 % à 15 %.

La politique de RENAULT est semblable, avec une unité de démontage et broyage sur le site de la CFF, à ATHIS-MONS, qui est dimensionnée pour le traitement de 200 véhicules par jour. Depuis l'expérience menée sur le site pilote de l'Est lyonnais, en partenariat avec le groupe PSA, puis à Athis-Mons avec RENAULT, CFF innove et se mobilise pour créer les centres "D2R" sur tout le territoire français. Dans cette expérience, CFF a confirmé son rôle de leader en créant un concept global de recyclage des biens de consommation en fin de vie.

□ La contrainte des sidérurgistes : Le développement de l'aciérie électrique et la rationalisation de l'approvisionnement en ferraille se traduisent par la mise en place de la stratégie de la "marguerite" (voir figure II.7), qui redéfinit le paysage du broyage des VHU. De 50 unités de broyage existantes en 1990, on passera en 2000 à 13 unités de broyage qui seront amenées tôt ou tard à affiner la ferraille suivant la demande, avec des teneurs en fer pouvant atteindre 98 % de fer, une densité proche de 2,5 et des teneurs en Cu inférieures à 0,005 % afin de produire des aciers spéciaux à coût réduit.

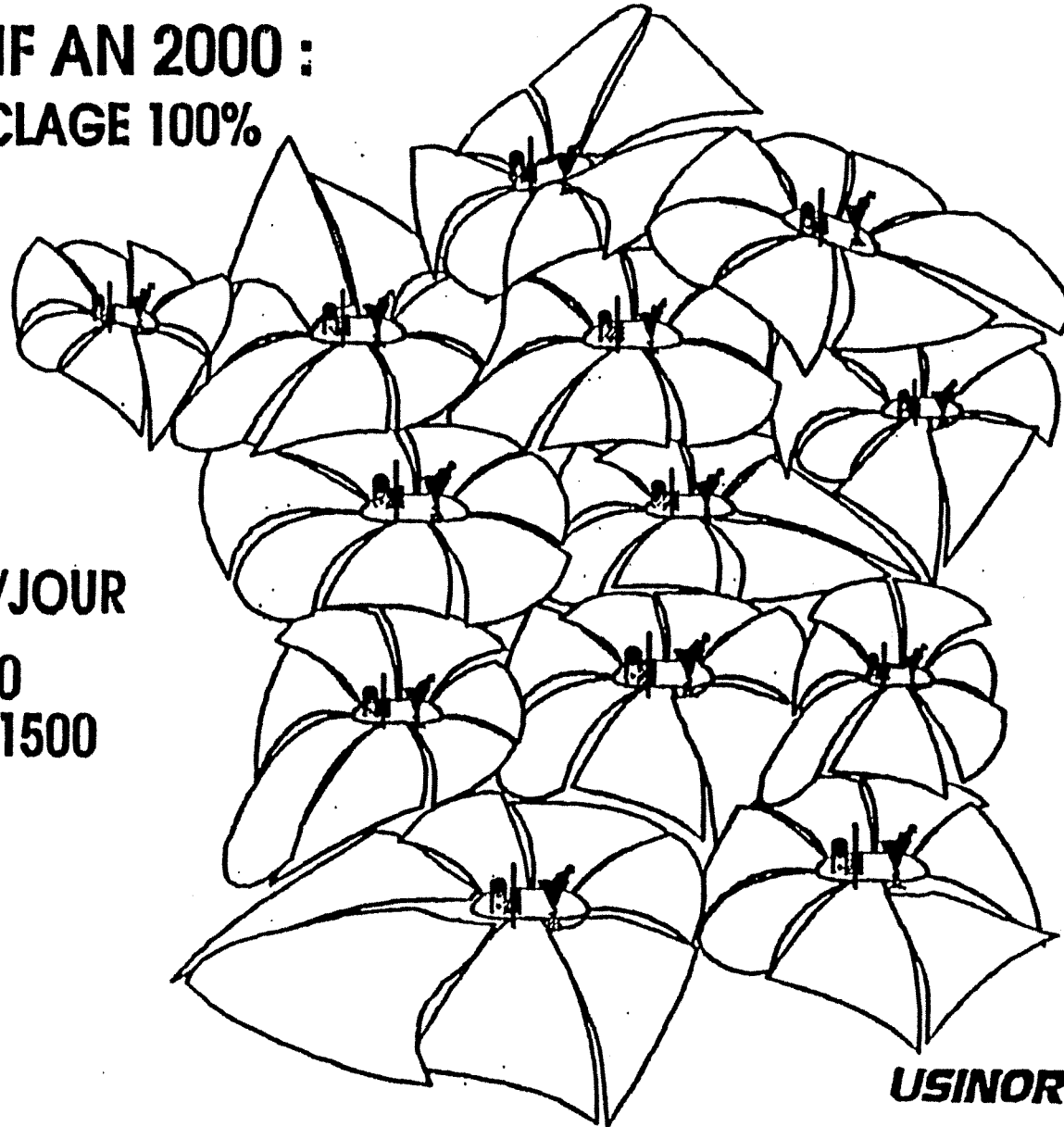
□ Les décharges contrôlées : Les coûts de décharge sont "le moteur" du changement de mentalité ou au minimum servent d'incitateur à la diminution de volume des RBA, donc à la diminution du tonnage mis en décharge (voir figure B- Introduction).

Le prix de la matière arrivant au broyeur est de 100 F/tonne. La faible marge disparaît car si 80 F/tonne était il y a 3 ans le coût de la mise en décharge de classe II, il passe en 1993 à 150 F/tonne.

L'élimination partielle ou totale des RBA devient donc la question primordiale du traitement des VHU. Si le coût de la mise en décharge dépasse les gains apportés par le recyclage et la disparition du véhicule, c'est l'ensemble de l'industrie des VHU qui est menacée de fermeture, c'est la raison pour laquelle nous nous sommes efforcés de trouver des voies d'élimination des RBA.

STRATEGIE DE LA MARGUERITE

**AUTOMOBILE OBJECTIF AN 2000 :
ZERO DECHARGE, RECYCLAGE 100%**



TRAITEMENT VEHICULES/JOUR

1 pétale : 150 à 200

1 marguerite : 1000 à 1500

RECYCLAGE AUTOMOBILE

USINOR SACILOR

II.4 - DESCRIPTION DE L'USINE DE LA SOCIETE LORMET

L'usine de LORMET S.A. à Pagny sur Meuse (anciennement NEWELL INTERNATIONAL) a été prise comme exemple type d'une usine moderne de traitement des RBA. En son temps (1986), l'innovation a résidé dans la création d'une usine basée sur le tri densimétrique. La technique de séparation par procédé de tri densimétrique permet en effet de réduire la quantité de déchets finalement mis en décharge.

La réglementation, a favorisé la mise en oeuvre de cette méthode de valorisation, car elle reste économiquement intéressante en regard du coût d'élimination directe par mise en décharge. Elle nécessite un investissement relativement important, mais les coûts opératoires sont modérés: En 1989 l'investissement (T/H) était de 2.000 à 4.000 \$US, pour un coût opératoire de 0,2 à 0,4 \$US.

A présent, la chute des cours des métaux issus du recyclage a changé les données économiques du problème, et les entreprises pratiquant la valorisation des RBA ont dû reconsidérer leurs investissements.

Depuis le début des années '90, le broyage automobile ne génère plus dans ses résidus que des produits de plus en plus pauvres en éléments dits "recyclables" au sens de la technologie d'aujourd'hui. Cette dégradation de la qualité des RBA était aussi importante sur les produits français que sur les produits du marché international. Elle est donc très générale. De plus les matériaux traités ne sont pas constants en composition.

La variabilité des matières et le pourcentage des constituants des voitures, jointe à la variabilité due à la provenance des approvisionnements, imposent des circuits de traitement complexes caractérisés :

- ✚ par des alternances d'opération de criblage et de séparation;
- ✚ par des retraitements de fractions où se retrouvent des égarés qui seraient préjudiciables à la valeur des produits séparés en fraction marchande. La souplesse des circuits est donc une obligation.

La matière première provient de différents fournisseurs. L'avenir va vers un regroupement des "broyeurs", ce qui facilite la collecte. Cette centralisation s'effectue afin de réduire les frais de transport.

L'usine est diversifiée en deux lignes de séparation : la première ligne (figure II.8) comprend les opérations ci-dessous notées 1 jusqu'à 4; la deuxième (figure II.9) comprend les opérations 5 jusqu'à 14.

1/ Premier criblage à 15 mm

Le RBA passe tout d'abord dans un trommel pourvu d'ouvertures rondes de 15 mm de diamètre et d'une longueur d'environ 20 m. La partie inférieure à 15 mm, est actuellement mise en décharge. Cette fraction, qui est nommée "fines" est naturellement enrichie en fractions magnétiques et contient moins de métaux non ferreux. On trouve aussi des matériaux composites à base de polystyrène, bois, mousse, caoutchouc et plastiques. Les fines représentent environ 50% en poids de tout-venants.

2/ Séparation pneumatique

La partie supérieure à 15 mm subit une séparation pneumatique, où grâce à un fort courant de l'air, toutes les fractions légères (mousse, polystyrène, matière plastique ou synthétique) sont séparées de la partie métallique et sont récupérées dans un grand cyclone (6 à 7 m de hauteur et de 2,5 m de diamètre). La fraction légère du cyclone tombe sur une bande transporteuse pour être mise ultérieurement en décharge. Elle représente environ 15 % en poids du >15 mm.

3/ Premier criblage à 130 mm

La fraction lourde de la séparation pneumatique passe dans un trommel 130 mm, où les gros morceaux (les "monstres") qui encombrant et gênent les étapes suivantes sont séparés. Cette partie supérieure à 130 mm, qui représente environ 4 % en poids, subit un tri manuel pour séparer les différents composants.

Des échantillonnages ont été effectués en usine dans le cadre de ce travail pour déterminer la composition métallique de cette fraction.

La répartition de ses composants s'établit en moyenne à :

Aluminium	12 %	(en poids)
Acier inox	5 %	"
Métaux "ferrés"	6,5 %	"
Cuivre, Bronze, etc	1,5 %	"

4/ Premier lavage en colonne d'eau

Cette fraction lourde enrichie en métaux, passe à l'aide d'un alimentateur, dans une colonne d'eau pulsée, pour le traitement en voie humide. Grâce aux pulsations de l'eau, une séparation s'effectue entre les parties légères qui flottent et les parties lourdes, qui plongent.

La partie légère (qui représente environ 10 % en poids) est composée de caoutchoucs, mousses, polystyrènes, bois, matières plastiques et synthétiques. La partie lourde représente environ 28 % et contient les métaux, caoutchoucs et plastiques.

5/ Deuxième criblage à 130 mm

Après une stockage temporaire, la matière enrichie passe encore une fois dans un trommel 130 mm. Ici on peut récupérer environ 1 % en poids des éléments supérieurs à 130 mm, qui constitue des égarés et qui est évacué vers le triage manuel. Cette opération a été motivée par le fait qu'auparavant, la matière première, riche en métaux, ne nécessitait pas de pré-lavage, mais on commençait directement par le criblage à 130 mm.

6/ Première séparation magnétique

La plupart des métaux "ferrés" (environ 7 % en poids) est séparée à l'aide d'un overband magnétique. Les parties magnétiques se présentent sous forme de gros morceaux. Quelquefois des éléments de pneumatiques sont entraînés à cause de leur armature en acier.

7/ Deuxième criblage à 15 mm

Le produit déjà libéré des parties magnétiques, passe dans un autre trommel d'ouvertures rondes de 15 mm de diamètre, où est encore récupéré environ 1 % en poids des "fines" inférieures à 15 mm, qui sont traitées ultérieurement dans une autre partie de l'usine.

8/ Deuxième lavage en colonne d'eau

Dans une deuxième colonne d'eau est ensuite séparé le restant des fractions légères des matières plastiques et synthétiques, qui représente environ 5 % en poids. L'eau sert ici de milieu dense. Pour l'épuration de l'eau, cinq "piscines" (bacs de sédimentation) rendent possible le recyclage de l'eau qui est utilisée en circuit fermé.

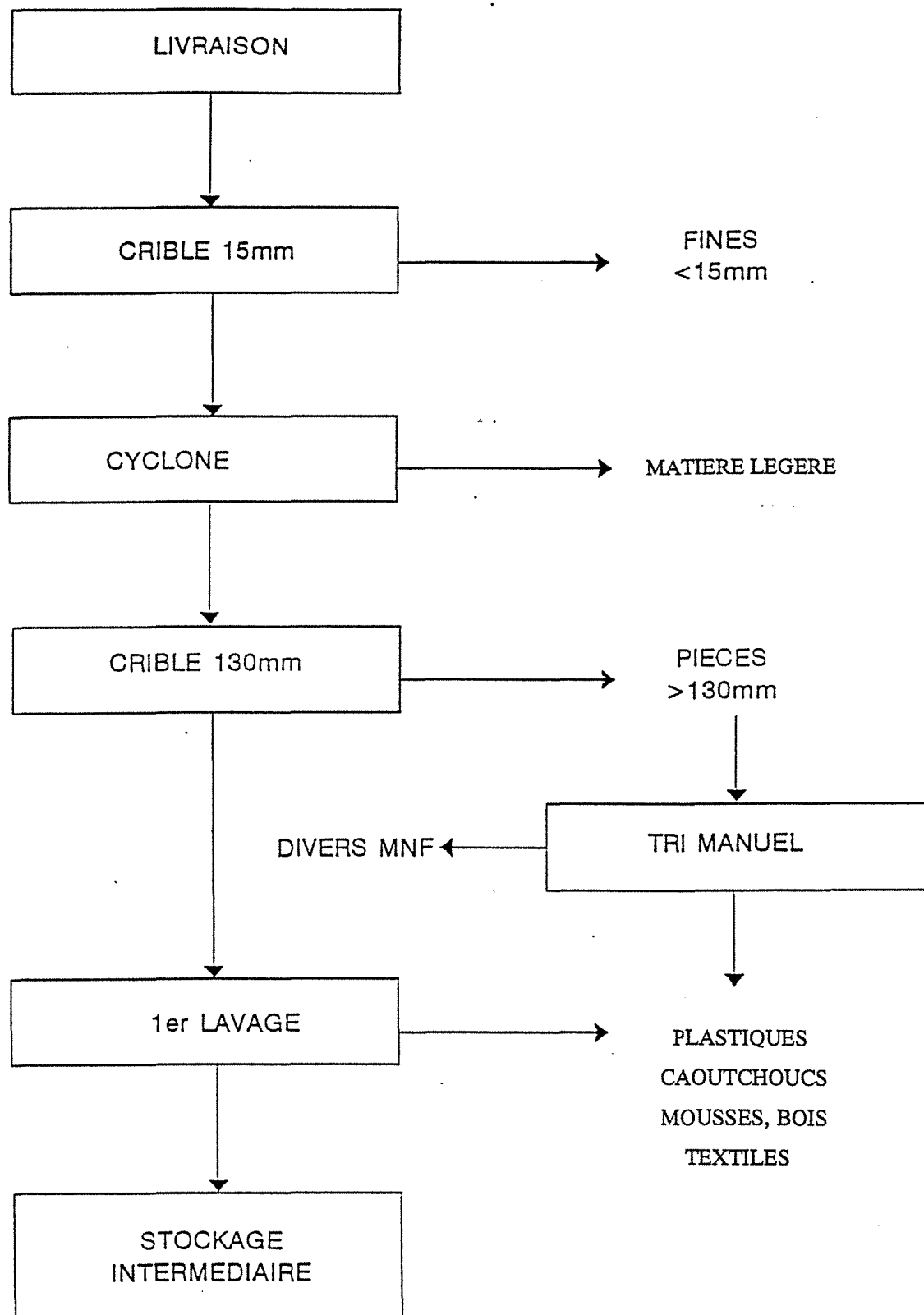


Figure II.8

1. LIGNE DE SEPARATION

9/ Séparation en milieu dense n°1

Les séparations en milieu dense comportent deux étages : le premier ayant pour but la séparation des caoutchoucs et du magnésium des autres parties métalliques. La deuxième consiste à récupérer l'aluminium et à créer un "bulk" de métaux lourds.

Dans un milieu dense, à densité 2,4 g/cm³, le magnésium et les matières plastiques sont séparés de l'aluminium et des autres métaux lourds. Le milieu dense est créé à base d'un mélange d'eau et de ferrosilicium. Les caractéristiques du ferrosilicium pour le traitement en milieu dense sont présentées dans l'Annexe 4.

Le magnésium et les alliages se trouvent après la séparation dans la fraction légère et représentent environ 3 % en poids. L'aluminium et les autres métaux font partie de la fraction lourde.

10/ Deuxième séparation magnétique

A l'aide d'un deuxième overband magnétique, les métaux ferrés restants, constitués par des petits morceaux sont extraits. Cette partie représente environ 1 % en poids.

11/ Séparation en milieu dense n°2

Dans un deuxième séparateur en milieu dense à densité 3,4 g/cm³, où le ferrosilicium sert de médium, s'effectue la séparation entre la fraction légère (Aluminium, câbles et fils de cuivre, cailloux) et la fraction lourde (cuivre, zinc, zamac, laiton, bronze, etc...). La fraction lourde représente environ 4 % en poids.

La récupération du ferrosilicium est une partie importante du process. Grâce à une simple récupération magnétique, il est recyclé dans le process. Cependant, la plupart du ferrosilicium est récupéré directement dans une trémie sous un crible, au-dessous de chaque séparateur, par simple égouttage et de façon que le médium soit directement recyclable à la densité voulue.

12/ Séparation par courants de Foucault

La partie légère du deuxième séparateur en milieu dense, passe ensuite dans un séparateur à courants de Foucault (STEINERT), où grâce à un champ électrique et magnétique, l'aluminium est séparé des cailloux et fils de cuivre. (La théorie et la construction des séparateurs à courants de Foucault est expliqué dans l'Annexe 3)

Les fils de cuivre et les cailloux représentent environ 1 % en poids.

L'aluminium, qui représente 5 % en poids, passe dans un grand trommel donnant trois tranches granulométriques : 0 - 40 mm; 40 - 80 mm et > 80 mm. Ces catégories sont des catégories marchandes justifiées par les demandes des clients.

	Brut %	Concentrat		Stérile	
		%	rendement	%	rendement
Aluminium	62	98	90	12	10
Cailloux, verre	35	1,3	3	84	97
câbles, fils cuivre	3	0,7	15	4	85

Tableau II.3 : Répartition des composants du produit léger, sortant de la deuxième séparation en milieu dense

13/ Le traitement des fines < 15 mm

Les fines inférieures à 15 mm, qui sont récupérées au deuxième trommel de 15 mm, subissent ensuite les opérations suivantes :

- Criblage à 4 mm (la partie inférieure à 4 mm va directement en décharge) ;
- Lavage dans une colonne d'eau où la fraction légère (caoutchouc, plastiques et bois) est séparée de la fraction lourde (métaux, verres et cailloux) ;
- Séparation magnétique à l'aide d'un overband magnétique (pour récupérer les particules magnétiques) ;
- Séparation par courants de Foucault, où sont récupérés les petits morceaux d'aluminium et des autres métaux non ferreux.

Normalement 25 à 30 tonnes par jour sont traitées et environ 2 à 4 tonnes de métaux sont récupérées journallement.

14/ Le traitement des caoutchoucs et du magnésium

La partie légère, composée de caoutchoucs et de magnésium, qui sort du premier séparateur en milieu dense et qui représente environ 3 % en poids de tonnage entrant, est séparée en deux produits grâce à deux séparateurs à courants de Foucault (type LINDEMANN).

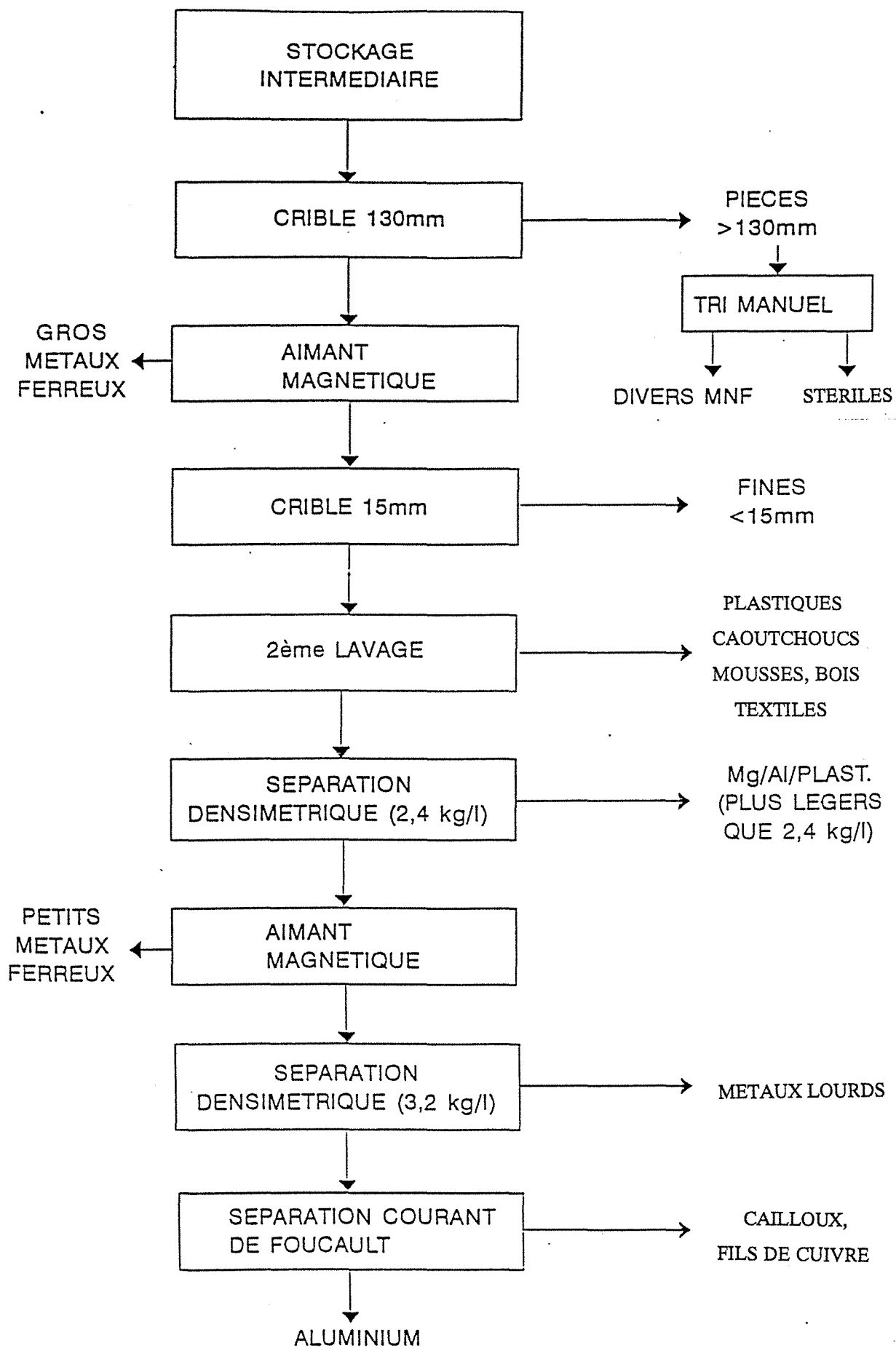


Figure II.9

2. LIGNE DE SEPARATION

On récupère normalement 5 à 6 tonnes par jour de magnésium. Souvent il y a encore des morceaux d'aluminium et d'inox qui accompagnent le magnésium. Pour cette raison, il est nécessaire de trier ensuite manuellement.

Les caoutchoucs et le magnésium sont déchargés dans une trémie et ils passent ensuite sur un vibreur, qui les achemine de manière étalée et en une couche uniforme, de granulométrie constante, sur le tapis à grande vitesse du séparateur non ferreux. Un champ magnétique alternatif dévie alors les métaux non ferreux hors de la parabole de chute du flux des matières transportées. La géométrie du champ magnétique et de l'appareil lui-même rendent le séparateur *LINDEMANN* peu sensible à l'interaction que les différents composants du matériaux auraient sur la séparation.

	Brut %	Concentrat		Stérile	
		%	rendement	%	rendement
Magnesium	53	93,4	91,7	9,5	8,3
Caoutchouc	47	6,6	7,6	90,5	92,4

Tableau II.4 : Répartition du produit léger de la première séparation en milieu dense (selon WIJNARD L.;DALMIJN W.L. et VOSKUYL W.P.H.1982)

Les étapes précédemment décrites et leurs différents "produits finis", sont résumées respectivement dans : figure II.8, figure II.9, figure II.10 et figure II.11.

☞ La fraction magnétique (8 %) est séparée à travers les overbands.

☞ Les pierres, fils de cuivre (1 %), métaux lourds (4 %) et l'aluminium (5%) sont produits lors de la deuxième séparation en milieu dense.

☞ Les alliages Mg/Al (3 %), récupérés en tant que fraction flottante lors de la séparation densimétrique à 2,2-2,4 g/cm³, se composent de 60 % de Al/Mg et d'une part non valorisable de 40 % (matières plastiques secondaires) - figure II.12.

Dans les deux trommels à 130 mm, on retrouve 5 % de matières légères, dont 75 % de plastiques et 25 % de métaux ferreux et non ferreux (6,5 % de ferreux; 5 % d'acier inox; 12 % d'aluminium; 1,5 % de métaux lourds). La séparation est effectuée manuellement (figure II.13).

Les deux fractions les plus importantes au sein des légers sont les plastiques, en tant que fraction légère sortant de l'aspiration et des deux lavages (31 %), et les fines (43 %). Les fines sont extraites du trommel de 15 mm. Actuellement, ces deux fractions sont mises en décharge (74.%).

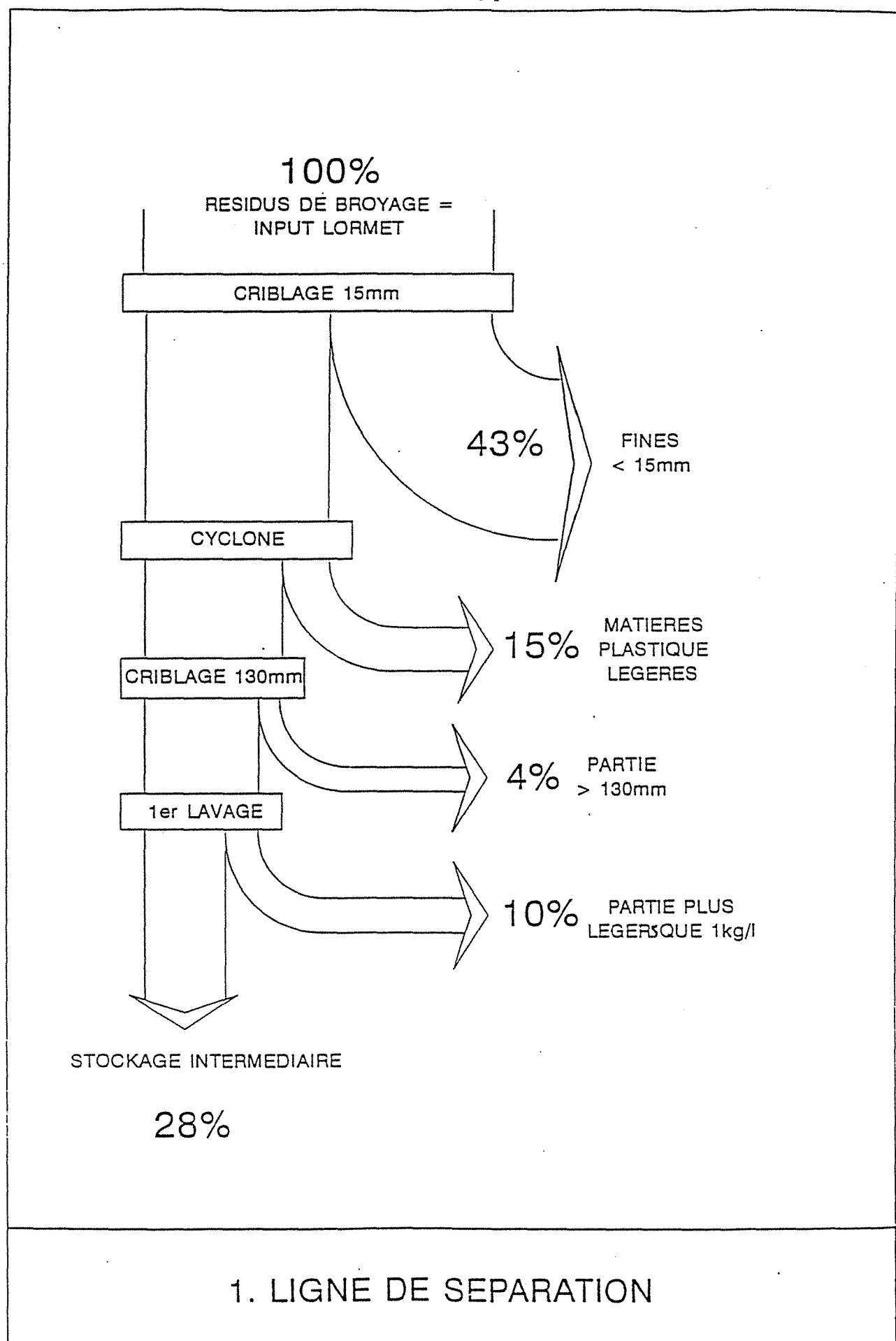
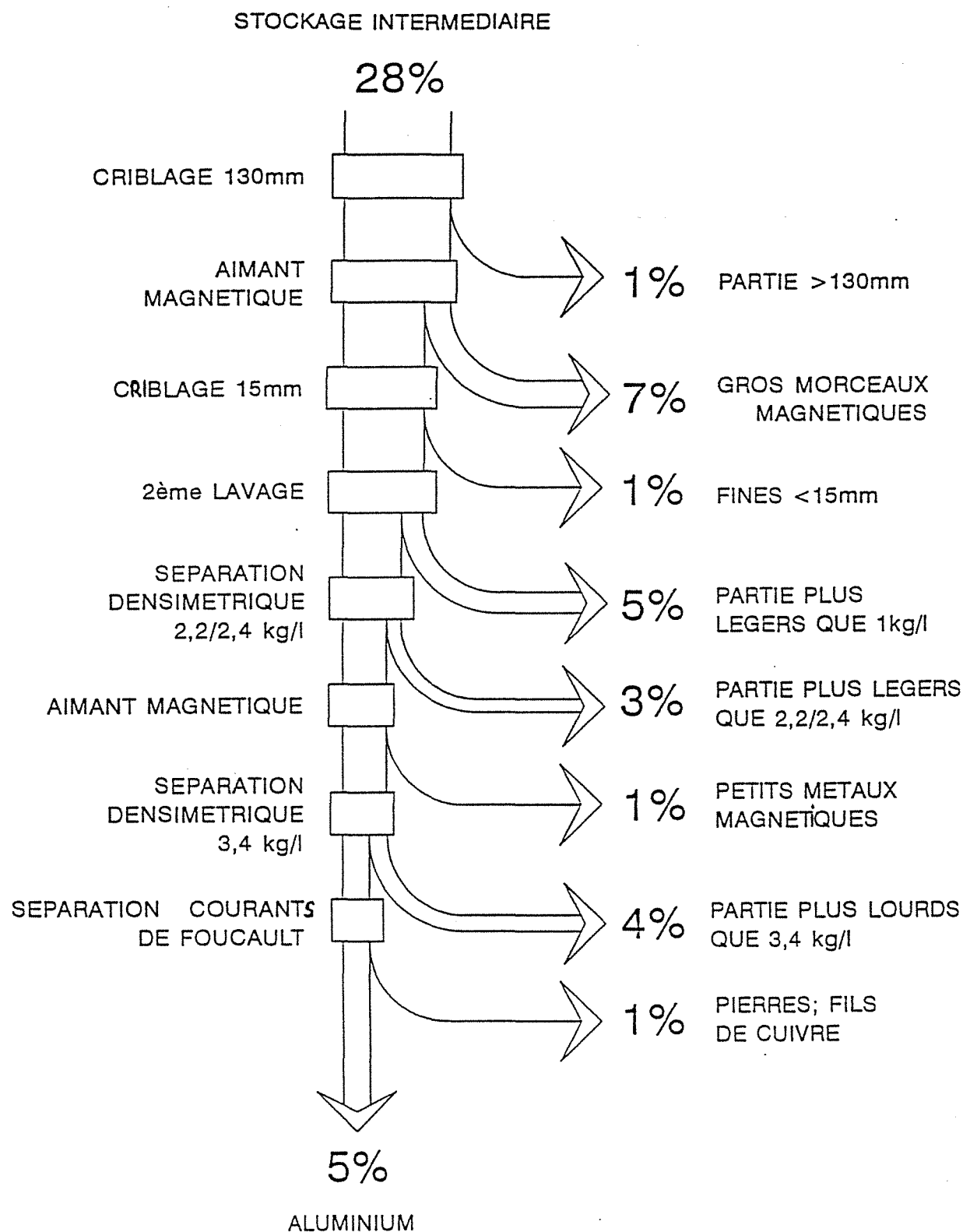


Figure II.10 : Bilan matière de l'usine de LORMET



2. LIGNE DE SEPARATION

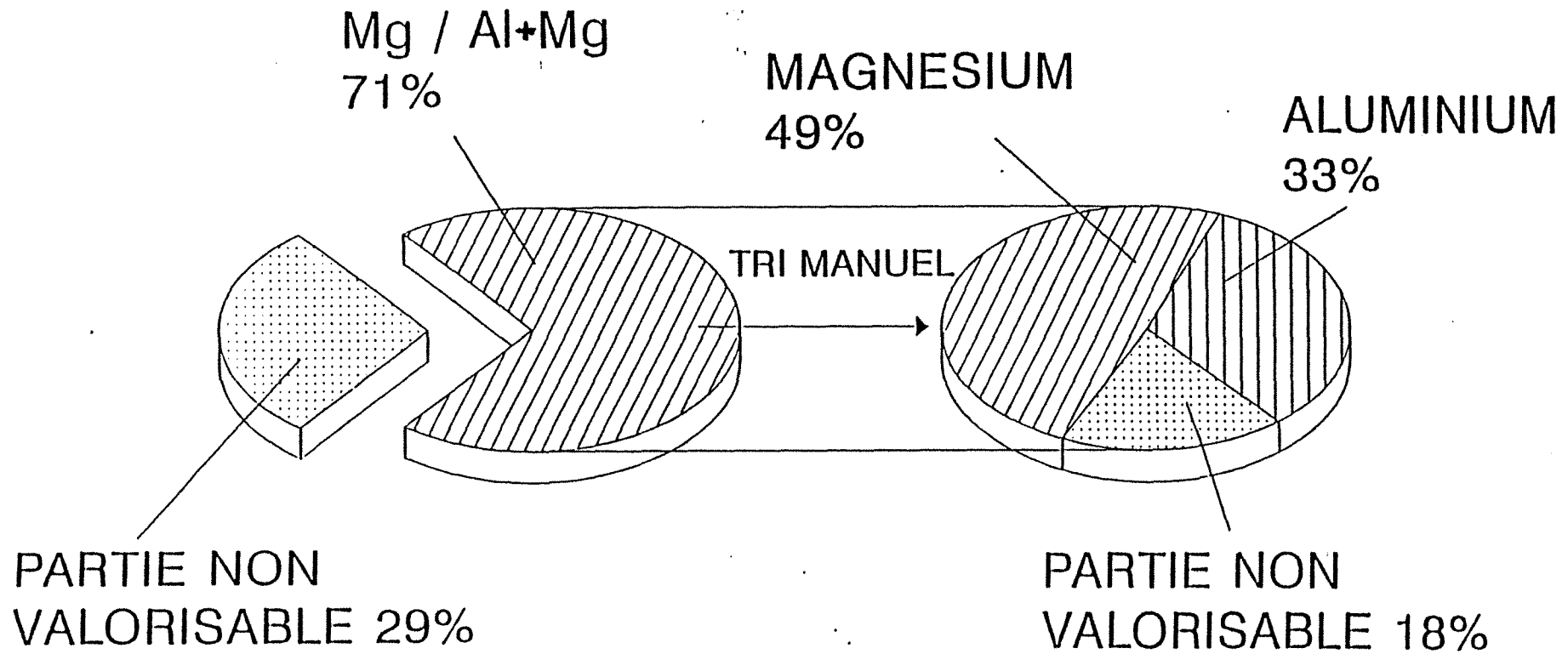


Figure II.12 : COMPOSITION DES LEGERES (EN % POIDS), APRES LA PREMIERE SEPARATION DENSIMETRIQUE (2,4 kg/l) ET SEPARATION PAR COURANTS DE FOUCAULT

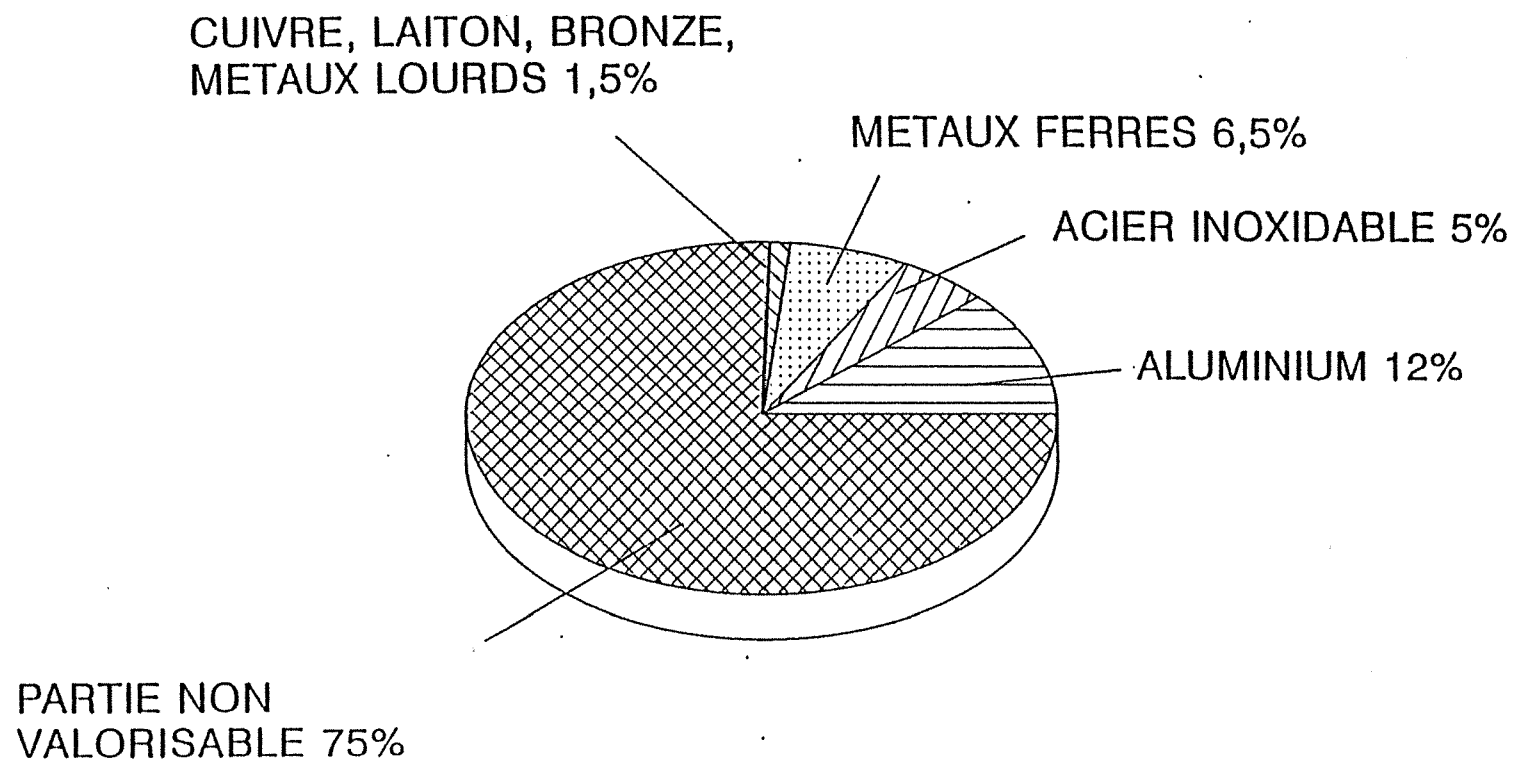


Figure II.13 : COMPOSITION DE LA FRACTION > 130 mm (EN % POIDS)

II.5 - GESTION DES PRODUITS ENTRANTS DANS L'USINE

Le concept voiture-minerai nous oblige à abandonner la logique du traitement de la voiture-déchet, quand elle est hors d'usage, pour celui de la voiture-matière qui s'intègre dans une logique générale d'approvisionnement en matière première et de protection de l'environnement. De plus elle intègre la notion générale de matières premières secondaires provenant du recyclage des objets hors d'usage ou de déchets.

Le traitement de la voiture hors d'usage est par certains côtés semblable à celui du traitement des minerais, au niveau du principe de la récupération des valeurs contenues; après la libération physique des constituants, on extrait des phases uniquement solide, dans notre cas par des techniques similaires de séparation par voie physique, employées en minéralurgie. La situation est cependant différente non seulement par la nature des produits, mais encore plus par la complexité de l'objet à traiter. Enfin, l'élimination du stérile du traitement des V.H.U. a, en général et pour le moment, un coût supérieur à celui d'épandage ou d'enfouissement du stérile minier. Il croît fortement depuis quelques temps, ayant passé du simple au double en moins de cinq ans.

L'installation française de traitement des R.B.A, de la société LORMET, reçoit son autorisation en conformité avec la législation en vigueur, chaque fois qu'un changement de provenance a lieu. Les matériaux qui ne peuvent pas être récupérés sont ensuite régulièrement éliminés sur des décharges françaises agréées.

LORMET a conclu des contrats de mise en décharge avec plusieurs décharges françaises.

Le transport régulier des RBA est assuré par le respect des dispositions légales. Le traitement des résidus, lui peut, constituer une valorisation sans nuisance pour l'environnement, la mise en décharge des déchets produits lors du traitement étant garantie de manière non polluante.

A cet effet des contrôles très rigoureux sont effectués inopinément par la DRIRE, afin d'éviter que des éléments autres que les VHU (monstres électroménagers, par exemple) viennent contaminer les décharges françaises.

II.6 - COMPOSITION QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DES RBA TRAITES A LUSINE DE LORMET. VARIABILITE DANS LE TEMPS

Tous les produits RBA, entrant chez LORMET, sont de différentes provenances et sont soumis à une procédure d'auto-contrôle qui impose aux fournisseurs la communication préalable des éléments de contrôle. La fréquence des contrôles était de 4 mois par chantier de provenance ; maintenant le contrôle s'effectue pour chaque lot entrant à l'usine.

Les matières traitées sont exclusivement des broyats provenant :

- ⇒ en majeure partie (50 à 65 %) de **voitures hors d'usage**,
- ⇒ et de ce que l'on appelle communément "**les monstres**" (à savoir des appareils électro-ménagers hors d'usage débarrassés de leurs fluides et autres éléments moteurs).

Il est à noter que les éléments broyés sont exempts de plomb, nickel, cadmium, car les batteries ont été retirées avant le broyage.

Le fer est en majeure partie récupéré par les fournisseurs avant livraison des broyats chez LORMET, par des procédés magnétiques dans un but de recyclage en Sidérurgie.

Les broyats se présentent sous forme de particules hétéroclites d'une granulométrie allant de 0 à 200 mm et se composent :

- ⇒ de stériles non valorisables : **terre, cailloux, verre.**
- ⇒ de stériles actuellement non valorisés : **bois, caoutchouc, plastiques, mousses.**
- ⇒ métaux non ferreux : **cuivre, zinc, bronze, aluminium, zamac, acier inoxydable.**

La répartition des produits est variable en fonction des fournisseurs et des lots provenant d'un même fournisseur.

Il est ainsi impossible de chiffrer avec précision la répartition des constituants. Cependant, à titre indicatif, les teneurs moyennes des différents métaux entre Janvier 1992 et Septembre 1992, sont les suivantes :

- Aluminium	4,77 %
- Zamac	4,63 %
- Fines métalliques	0,55 %
- Inox	0,13 %
- Laiton	0,19 %
- Cuivre	0,17 %
- Al au Magnésium	0,24 %
- Ferrés	1,02 %
- Ferrailles	3,27 %

L'ensemble de tous les éléments représentent :

- 15 % de métaux recyclés et vendus;
- 55 % plastiques, bois, caoutchouc;
- 30 % cailloux, verre et terre.

Cette évaluation a été obtenue en recomposant par site et par grandes classes de produits les renseignements donnés par les fournisseurs. Le tableau II.5 présente les résultats des analyses (entre avril 1992 et mars 1993) sur les produits bruts entrant dans l'usine de Pagny (photos 9 à 12). Les figures II.14 et II.15 présentent les histogrammes concernant les livraisons des différents chantiers "D", "E", "F" et "M", à LORMET, pendant l'année 1992.

On constate que les chantiers "D" et "F" ont été les fournisseurs principaux de l'usine de Pagny en 1992, mais que les compositions et les granulométries fines < 20 mm, sont extrêmement variables. Cette variabilité a été un souci permanent tout au long de ce travail. Cependant il est apparu intéressant de donner une évaluation des compositions moyennes.

Provenance	"E"	"M"	"F"	"D"
Mois	Avril 92	Mai 92	Juin 92	Juillet 92
< 4 mm	30,50	28,70	44,00	63,30
4 - 20 mm	28,00	30,90	32,20	20,70
> 20 mm	41,50	40,40	23,80	16,00
Humidité en %				
< 4 mm	3,18	0,93	6,22	1,63
4 - 20 mm	4,90	0,98	7,71	2,69
> 20 mm	1,21	2,02	5,38	2,62
Composition				
Métaux	30,30	7,70	31,10	9,60
Caoutchouc	18,50	19,10	4,70	4,30
Mousse, polystyr.	4,90	7,90	1,90	6,70
Plastiques	17,40	25,50	28,30	28,10
Bois	2,40	0,40	7,20	4,80
Cailloux	0,40	0,00	0,05	0,00
Autres	26,10	39,40	26,70	46,50

Provenance	"E"	"M"	"F"	"D"
Mois	Août 92	Septembre 92	Octobre 92	Novembre 92
< 4 mm	21,90	40,70	38,92	
4 - 20 mm	19,88	29,65	24,64	
> 20 mm	58,22	29,65	36,44	
Humidité en %				
< 4 mm	2,39	2,29	5,92	
4 - 20 mm	2,47	1,60	8,84	
> 20 mm				
Composition				
Métaux	41,56	11,09	11,40	
Caoutchouc	12,48	13,04	5,92	
Mousse, polystyr.	4,88	9,42	6,44	
Plastiques	15,53	15,25	29,63	
Bois	0,96	0,34	0,08	
Cailloux	2,59	0,00	0,00	
Autres	21,99	50,81	46,63	

Provenance	"E"	"M"	"F"	"D"
Mois	Décembre 92	Janvier 93	Février 93	Mars 93
< 4 mm	3,90	35,38	38,46	48,94
4 - 20 mm	32,00	27,36	26,50	29,12
> 20 mm	64,10	37,26	35,04	21,94
Humidité en %				
< 4 mm	8,00	5,92	2,71	4,09
4 - 20 mm	27,00	8,84	3,43	6,52
> 20 mm	18,00	-	-	-
Composition				
Métaux	24,40	3,89	11,44	0,37
Caoutchouc	8,00	3,65	7,65	6,32
Mousse, polystyr.	9,30	10,41	6,59	11,12
Plastiques	14,70	21,19	22,29	27,42
Bois	4,50	0,39	0,53	-
Cailloux	0,00	0,00	0,00	-
Autres	39,10	60,47	51,50	54,77

Tableau II.5 : Relevés mensuels des approvisionnements de l'usine de LORMET.



Photo 9 : RBA provenant de "F"



Photo 10 : RBA provenant de "D"



Photo 11 : RBA provenant de "M"



Photo 12 : RBA provenant de "E"

TONNAGE TOTAL : 76.069 T

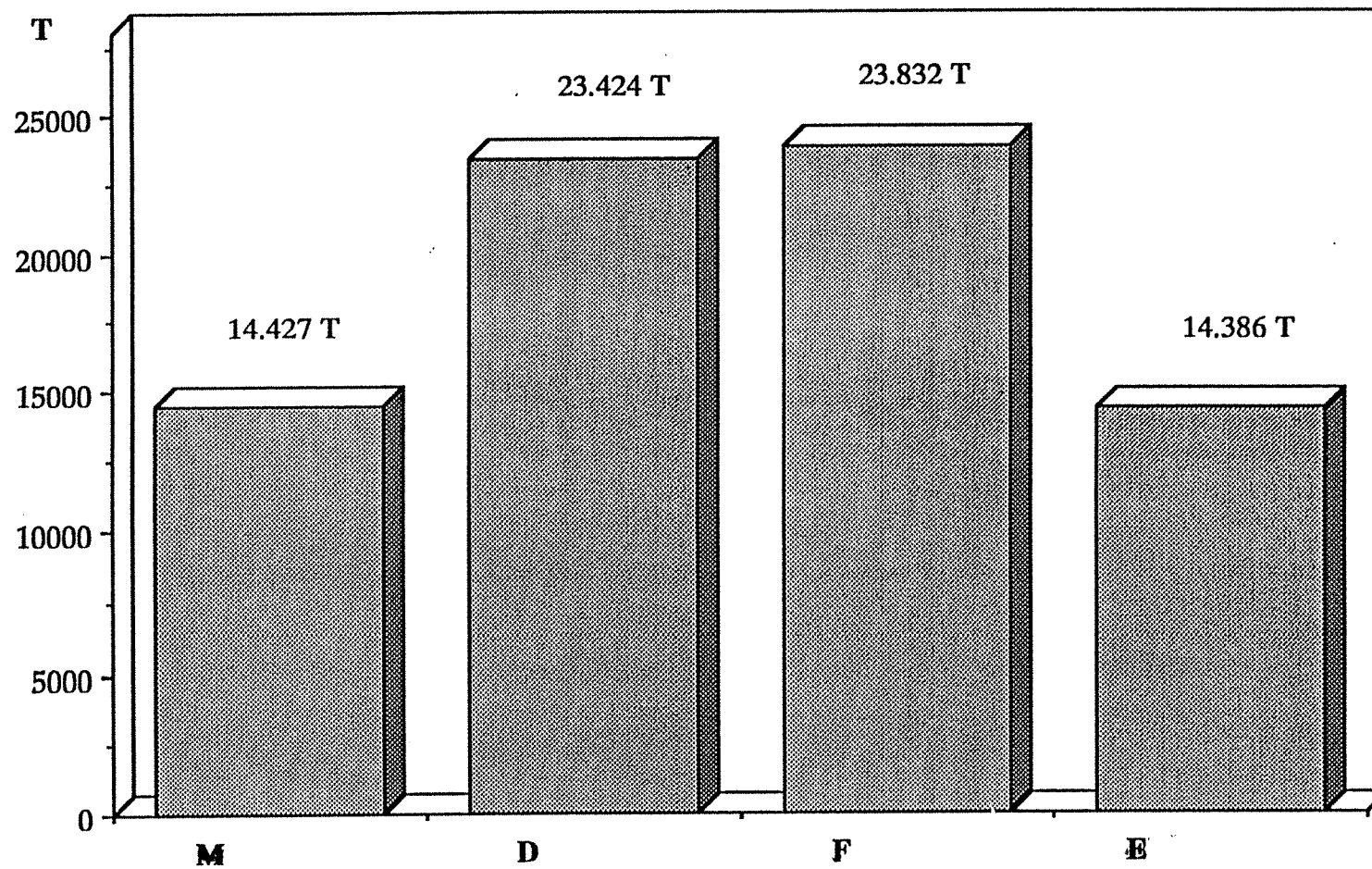
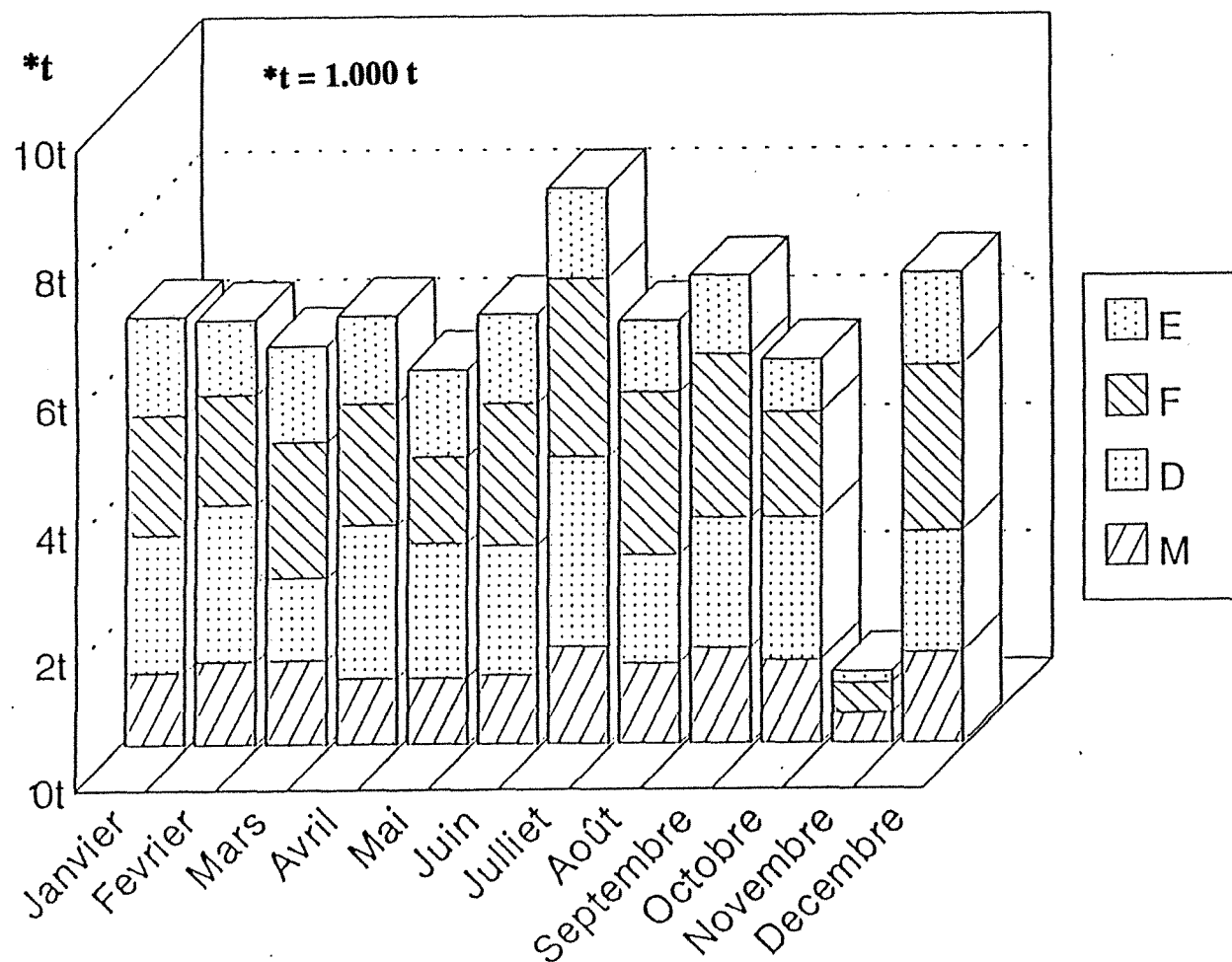


Figure II.14 : TOTAL DES LIVRAISONS — A LORMET EN 1992



Mois	Tonnage en t
Janvier	6715
Fevrier	6665
Mars	6258
Avril	6715
Mai	5878
Juin	6732
Julliet	8686
Août	6623
Septembre	7316
Octobre	6013
Novembre	1119
Decembre	7349
TOTAL	76069

Figure II.15 : LIVRAISONS DES CHANTIERS — EN 1992

La composition moyenne des produits entrants est donnée sur les figures II.16- II.17. On peut dire que les "fines" (la partie <15 mm) occupent environ 43 % en poids; les métaux ferrés environ 7 %; métaux lourds 4 %; aluminium 5 %; cailloux et fils de cuivre environ 1 %.

Le restant est constitué par les caoutchoucs, plastiques, mousses, polystyrène, textiles et fibres, d'une structure compliquée, parfois enchevêtrés avec des fils de cuivre et d'autres parties métalliques.

II.7 - GESTION DES PRODUITS (DECHETS) SORTANTS DE L'USINE DE LORMET ET IMPLICATIONS AVEC L'ENVIRONNEMENT

Les déchets sortant de l'usine de Pagny sont classables dans deux catégories principales :

A - Les déchets non valorisés actuellement :

- les déchets non valorisés pour une cause technologique,
- les déchets non valorisés pour une cause technique,
- les déchets non valorisés par absence de débouchés.

A cette catégorie de déchets participent :

- les caoutchoucs,
- les plastiques,
- les fibres de bois,
- les fibres textiles,
- les mousses de polyuréthane,
- les mousses de polystyrène,
- les métaux de très fines taille (inférieure à 4 mm).

B - Les déchets non valorisables actuellement :

- les stériles inertes non valorisables par définition,
- les autres déchets non valorisés sans effet nuisible.

A cette catégorie de déchets participent :

- les cailloux,
- les verres,
- la terre.

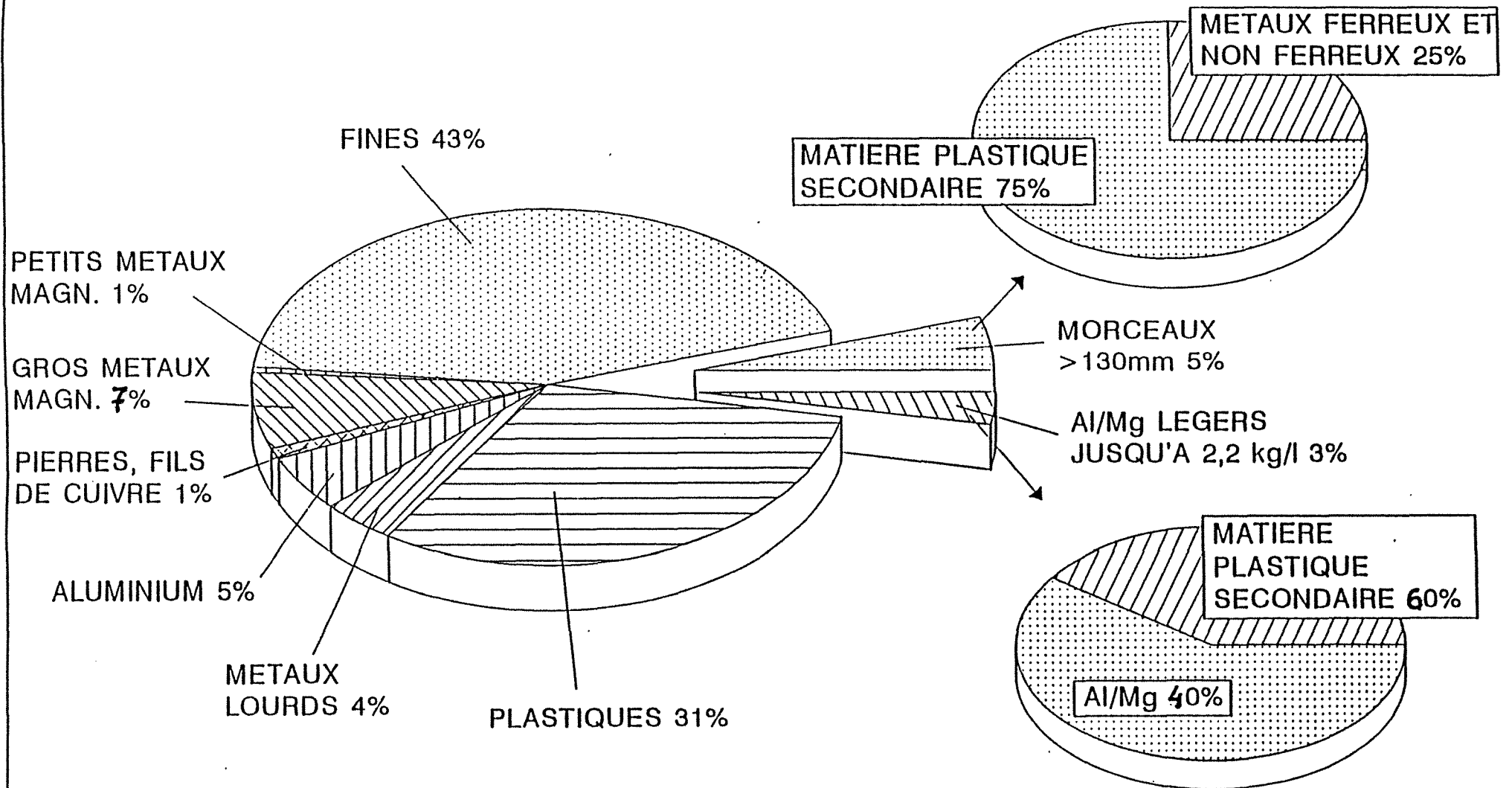


Figure II.16 : COMPOSITION DES PRODUITS ENTRANTS

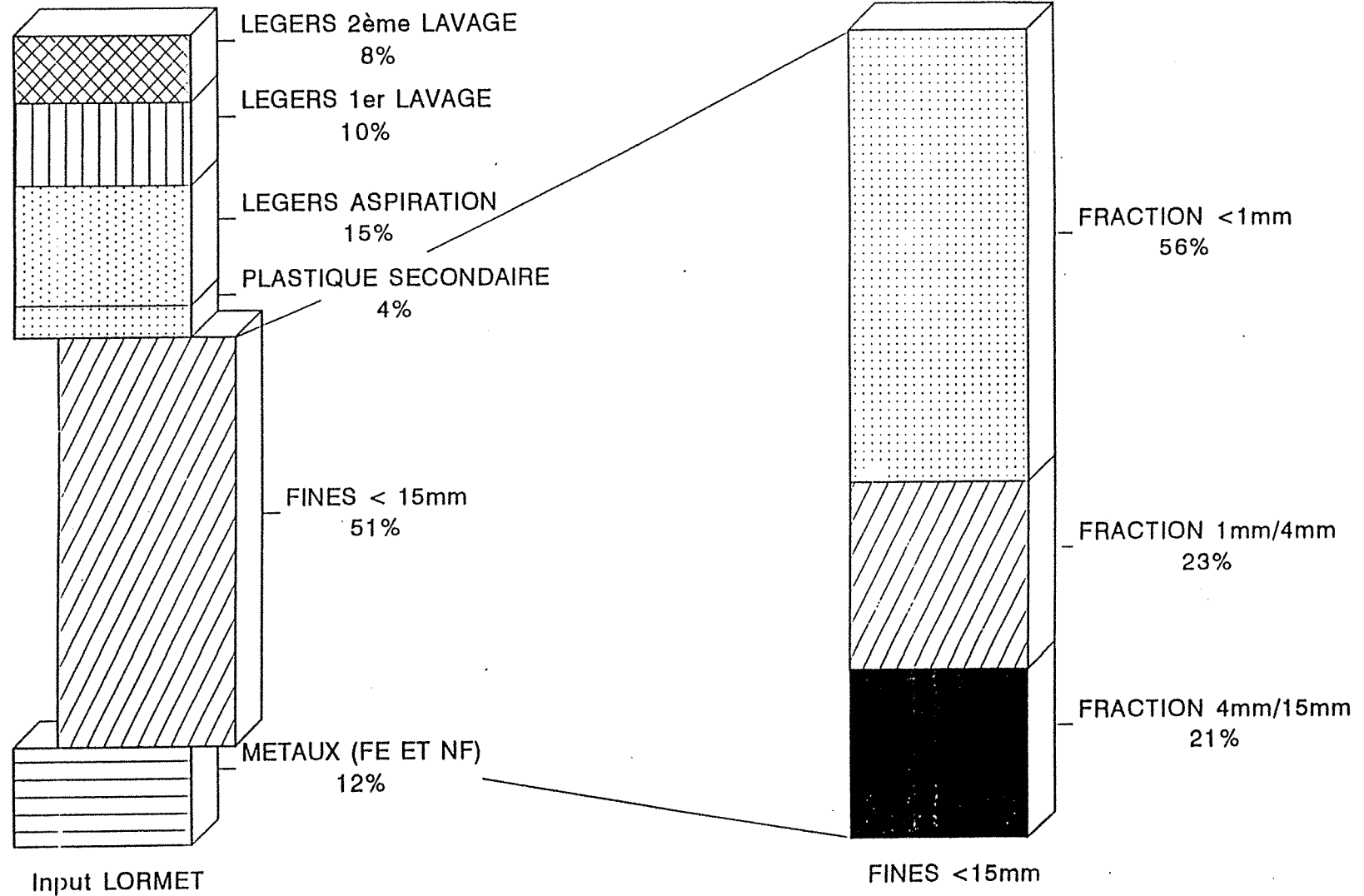


Figure II.17 : COMPOSITION DES PRODUITS ENTRANTS

Ces déchets proviennent de différents postes de travail liés aux techniques de pré-concentration et récupération des métaux comme le montre la figure II.18. Ils sont générés dans le pré-traitement des lots pauvres et dans les différentes phases du traitement des lots riches et des lots pauvres enrichis.

Ils sont répartis en deux familles de produits :

- * les fines (ou matériaux < 15 mm)
- * les fluffs (ou matériaux > 15 mm)

Ces deux catégories regroupent plusieurs sous catégories :

*** Les fines :**

- les simples fines 4 à 15 mm;
- les super fines 0,5 à 4 mm;
- les ultra fines < 0,5 mm;
- les boues de décantation

*** Les fluffs :**

- les stériles du traitement > 130 mm;
- les stériles de l'aspiration - 15 à 130 mm;
- les stériles issus du traitement par courants de Foucault (15 à 130 mm);
- les légers de lavage 15 à 130 mm;

Selon la filière de traitement, dont ils sont issus (figure II.18), les déchets de l'usine ont des granulométries et des compositions très différentes, comme le montre le tableau II.6, où figurent les valeurs moyennes annuelles.

Classe	Métaux en %	Plastiques Caoutchouc	Cailloux en %	Terre en %	Total en %
Fines (0-15 mm)	5,00	25,00	20,00	50,00	100
Stériles pré-traitement	0,00	90,00	5,00	5,00	100
Stériles > 130 mm	20,00	75,00	5,00	0,00	100
Légers 1ère flottation	20,00	68,00	12,00	0,00	100
Stériles courants de Foucault	25,00	15,00	60,00	0,00	100
Boues de décantation	2,00	5,00	25,00	68,00	100

Tableau II.6 : Relation entre les déchets de l'usine et leur composition moyenne

LES SOURCES DE DECHETS

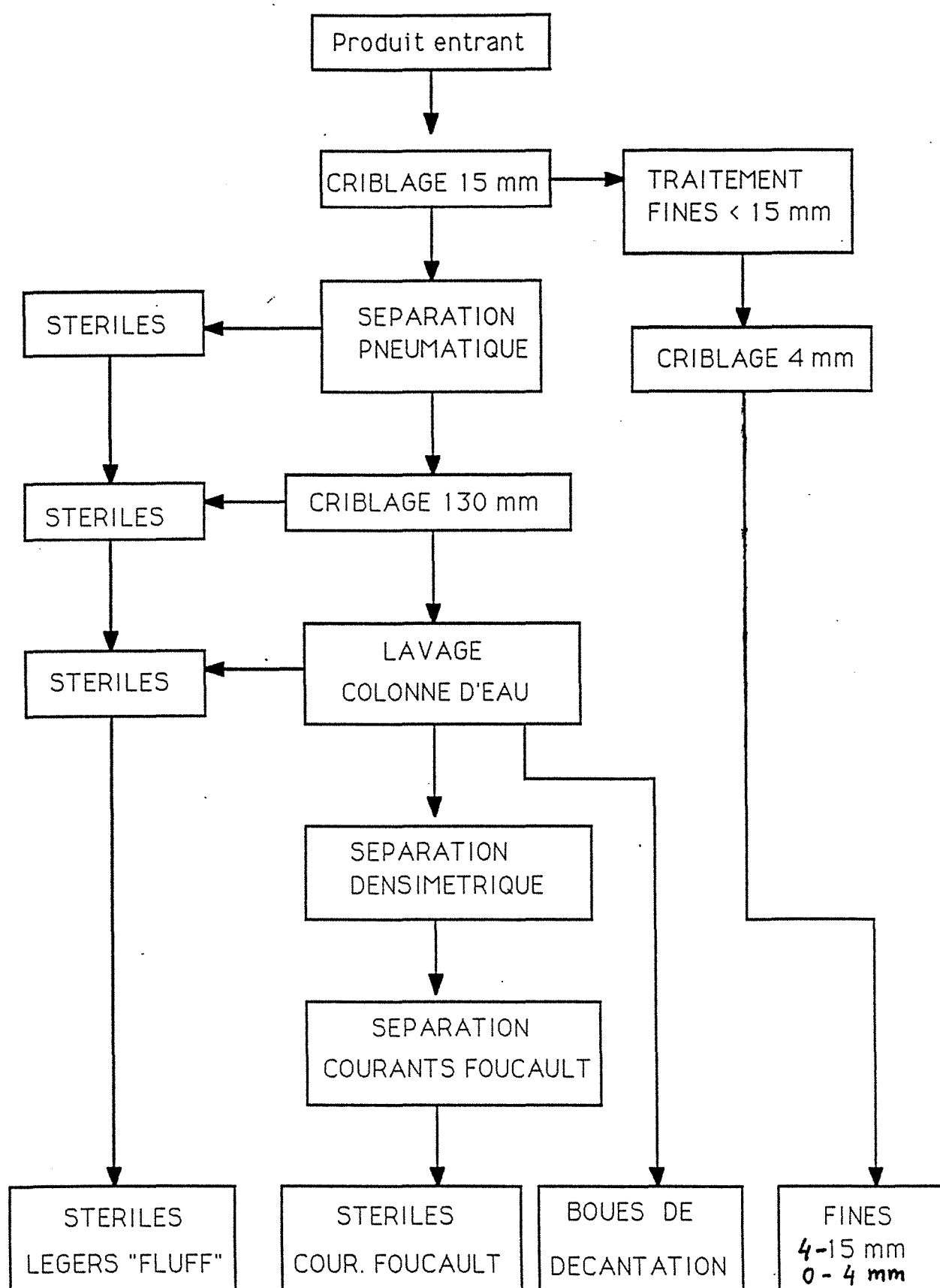


Figure II.18 : Origine des déchets générés de l'usine LORMET

Les déchets de traitement représentent actuellement 85 % du total tout-venant, soit une production annuelle d'environ 80 000 tonnes.

Cette production se divise, selon les dernières données de production, de façon globale suivante :

Ces déchets sont assimilés aux déchets ménagers et sont actuellement éliminés en décharges de classe II. La quantité mise en décharge comprenne :

- stériles de pré-traitement,
- une partie des légers de la 1ère séparation en milieu dense,
- boues de décantation,
- une partie des stériles des courants de Foucault,
- une partie des stériles du tri manuel (> 130 mm).

Vis-à-vis des contraintes dues à la protection de l'environnement, des essais de lixiviation, suivant la norme NF X 31.210, ont été effectués régulièrement sur les déchets.

Les résultats figurent dans l'Annexe 8. On déduit de cette annexe que le zinc lixiviable pose un problème et que le "fluff" est responsable de la situation.

Les stériles de flottation ont plus de caoutchouc que les stériles de lavage qui eux ont plus de déchets légers. Ce produits sont fortement hétérogènes, avec une forte proportion d'éléments mixtes :

- fibres et mousse enchevêtrées,
- gaines de cuivre,
- morceaux de pneus ayant une armature métallique.

II.8 - BILAN DE LA SITUATION ACTUELLE

Il paraîtrait avantageux de pouvoir modifier la destination finale des produits en vue de limiter la mise en décharge de la façon suivante :

- ➡ tous les métaux peuvent être récupérés en vue du recyclage;
- ➡ les caoutchoucs peut être en partie recyclés et/ou utilisés comme combustible;
- ➡ les polystyrènes, mousses, bois, etc. peuvent être récupérés et utilisés comme combustible;
- ➡ les inertes, soit environ 16 à 17 % en poids peuvent être mis à une décharge de classe III, si nécessaire;

Pour régler la question des combustibles, qui représentent plus de 20 % en poids, il conviendrait de s'assurer des débouchés tels que four à chaux, cimenterie, etc.

CHAPITRE III

*Caractérisation des fines
contenues dans les R.B.A.*

CHAPITRE III

III.1 - INTRODUCTION

Les particules déchiquetées posent des problèmes pratiquement insolubles d'échantillonnage : Comment en effet obtenir à partir d'un produit extrêmement composite⁽¹⁾ un échantillon représentatif. Il est toutefois certain que l'échantillonnage est facilité par la finesse du produit. A l'inverse des minerais, l'échantillon de déchets n'est pas pour le moment soumis à une méthode de prélèvement comme dans le cas des minerais.

III.2 - ECHANTILLONNAGE

Les méthodologies utilisées dans ce travail de recherche, tiennent d'avantage d'un savoir faire que de déductions scientifiques, à partir de lois approchées qui n'existent pas, ou qui ne sont pas utilisées par les praticiens de façon courante.

III.2.1 - Méthodologie des prélèvements :

On ne considère ici que des prélèvements sur tas et non en continu au cours d'un procédé de traitement. La méthode utilisée à priori a été la suivante :

☛ Constitution d'un lot de 500 kg de produit, à partir d'une suite de 10 prélèvements minimum dans le tas. Ces prélèvements peuvent être systématiques ou aléatoires.

☛ Echantillonnage du lot :

- a) Homogénéisation du lot de 500 kg constitué ;
- b) Elaboration d'un échantillon de 50 kg par quartage du lot primitif.

(1) - On connaît les difficultés de l'échantillonnage des minerais, qui représentent des matériaux plus simples que les matériaux artificiels constitués de composites. Pour les minerais, la prise d'un échantillon s'exprime vis-à-vis d'un nombre restreint de paramètres, et non pas vis-à-vis d'un très large ensemble, comme c'est le cas des RBA.

III.2.2 - Méthodologie de la caractérisation :

Sur l'échantillon de 50 kg on effectue les opérations suivantes :

- a)- Criblage de l'échantillon à 4 mm et 20 mm;
- b)- Extraction des fractions des classes >20 mm et 4 - 20 mm :

Sur ces deux classes les composants tels que : **métal, caoutchouc, plastiques, polystyrène, mousses (polyuréthane), bois et fibres, cailloux et divers**, sont séparés manuellement.

- c)- Pesée des classes granulométriques et des différentes fractions;
- d)- Division des classes et des fractions en deux moitiés sur quarteur à riffles :
 - Mesure de l'humidité sur une moitié (105 °C, 24 h);
 - Réduction à 4 mm des classes supérieures à 4 mm pour l'autre moitié.
- e)- Recomposition de l'échantillon en mélangeant les moitiés non séchées des deux classes criblées et les moitiés des fractions réduites à 4 mm selon les proportions obtenues lors des opérations **a** et **b**. Cette opération est nécessaire car certaines analyses sont faites obligatoirement sur produits humides
- f)- Extraction de 2 échantillons secondaires à partir de l'échantillon "e" :
 - 1 pour l'analyse chimique;
 - 1 pour le test de lixiviation (100 g).
- g)- Analyse chimique : Dosage PCB (polychloro-biphényle) et PCT.(polychloroterphényle)
- h)- Essai de lixiviation et dosage des hydrocarbures :
 - 3 lixiviations successives de l'échantillon de 100 g selon la norme NF X 31.210 (décembre 1992);
 - Dosage des hydrocarbures (HC) selon la norme NF T 90.203.

III.2.3 - Données résultantes :

- ☛ Description pondérale des classes, définition de leur taux d'humidité.
- ☛ Teneur en PCB et PCT du tout-venant.
- ☛ Teneur en HC ramenée au poids de l'échantillon sec et humide.

III.3 - CARACTERISATION DE LA VARIABILITE POUR CHAQUE PROVENANCE

La matière à traiter en usine varie selon les outils de production et dans le temps. Il est bon de pouvoir caractériser les entrées pour pouvoir établir des bilans cohérents ou pour effectuer des mélanges de brut afin de réduire les variations dans la composition : une usine marche d'autant mieux, qu'elle est alimentée avec un produit le plus constant possible.

III.3.1 - Analyse descriptive des fines < 15 mm :

Les analyses descriptives des fines ont été faites sur différents échantillons provenant des différents sites d'exploitation d'une part, et sur des prélèvements pris au hasard d'autre part.

- ➡ La première, dite "**par site**", doit permettre surtout de comparer les sites d'origine,
- ➡ La deuxième, dite "**globale**", d'orienter le traitement, voire d'optimiser des méthodes ou des circuits existants.

Date	"M"	"D"	"F"	"E"
24 / 03 / 92	52,50			
25 / 03 / 92	43,50			
09 / 06 / 92		69,27		
10 / 06 / 92	43,30			
10 / 06 / 92	38,53			
11 / 06 / 92	69,47			
22 / 06 / 92			61,90	
25 / 06 / 92				47,80
04 / 08 / 92		59,00		
07 / 08 / 92			51,54	
10 / 08 / 92				53,12
18 / 08 / 92		57,68		
02 / 09 / 92		56,58		
03 / 09 / 92		62,14		
08 / 09 / 92			64,47	
09 / 09 / 92			41,44	
16 / 09 / 92				52,18
16 / 09 / 92				33,66
24 / 09 / 92	69,00			
Moyenne	57,00	61,00	54,75	46,69

Tableau III.1 : Proportion des fines (en % poids) par sites d'exploitation selon des contrôles inopinés

III.3.1.1 - Analyse pondérale des fines selon la provenance

La proportion de fines issues du "tout-venant", en provenance de "D", "M", "F" et "E", a été estimée sur une période de 9 mois consécutifs en 1991 et 1992 (tableau III.1).

En usine, cette estimation, à défaut des moyens de pesage en continu inexistant, a été effectuée à partir du rapport entre :

- le nombre de godets de tout-venant alimentant le crible à 15 mm;
- le nombre de godets de produit criblé inférieur à 15 mm.

Par contre, elle a le mérite de couvrir plusieurs postes (.entre 150 et 200 tonnes /poste).

Les résultats des observations montrent que la proportion des fines inférieures à 15 mm est variable sur 24 heures et aucune loi statistique ne permet de prévoir les écarts ponctuels. La moyenne peut, à la rigueur, donner une évaluation dont il faut bien se contenter.

Bien que l'histogramme des proportions en relation avec les broyeurs, donné par le tableau III.2, laisse apparaître une différence entre les sites, celle-ci n'est pas significative statistiquement, étant donné le nombre limité de contrôles qui ont pu être effectués, compte tenu des difficultés que représente la saisie des données en vraie grandeur et le dérangement que le prélèvement occasionne sur le site de production.

Provenance	Proportions des fines < 15 mm dans le tout-venant (en %)								
	30 / 35	35 / 40	40 / 45	45 / 50	50 / 55	55 / 60	60 / 65	65 / 70	> 70
"D"						***	*	*	
"E"	*			*	**				
"F"			*		*		**		
"M"		*	**		*			**	

Tableau III.2 : Histogramme des proportions des fines en relation avec les provenances

De même pour un site donné, les prélèvements à un jour d'intervalle, montrent que la proportion de fines varie très fortement. On peut tirer les conclusions suivantes :

- ❶ La proportion de fines est en première approximation indépendante du site.
- ❷ Elle varie de 30 % à 70 % du tout-venant avec une moyenne de 54 %.
- ❸ Sachant qu'il y a en général 15 % de métaux récupérés, on peut évaluer la proportion des composants non métalliques des fines à 63 % environ du tonnage total des rebuts. Ce chiffre montre bien la contribution très importante des fines au tonnage mis en décharge.

mm	Composants	D 1	D 2	E 1	E 2	F 1	F 2	M 1	M 2	Moy
+ 8	Peluches	0,95	0,00	0,58	0,33	0,84	0,63	0,74	0,57	0,58
	Polystyrène, mousse	1,30	0,86	0,29	0,16	5,17	2,25	0,54	3,09	1,70
	Bois	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
	Caoutchouc	0,25	0,35	0,23	0,00	3,18	0,00	0,09	0,00	0,51
	Plastiques	0,45	0,58	0,35	0,00	4,97	1,38	0,15	0,77	1,08
	Cailloux	0,13	0,64	0,00	0,00	0,83	0,61	0,26	0,83	0,41
	Verre	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,03
	Fraction magnétique	1,60	0,43	0,37	0,12	2,90	0,43	0,07	0,54	0,80
	Métaux non ferreux	1,10	0,57	0,18	0,00	3,61	0,94	0,34	1,76	1,06
	TOTAL	6,00	3,53	2,00	0,61	21,30	6,24	2,25	7,56	6,18
+ 4	Peluches	0,00	0,00	0,22	0,00	0,50	0,51	0,33	0,55	0,26
	Polystyrène, mousse	2,08	2,61	0,77	0,60	5,12	2,37	2,84	5,20	2,69
	Bois	0,00	0,00	0,47	0,06	0,00	1,01	0,00	0,27	0,22
	Caoutchouc	0,80	2,76	0,95	0,85	4,47	3,05	1,07	4,65	2,32
	Plastiques	1,36	4,37	1,90	1,50	8,95	4,21	2,68	8,05	4,12
	Cailloux	0,00	1,06	0,00	0,00	2,24	3,30	0,55	2,68	1,22
	Verre	0,00	0,00	0,38	0,84	3,36	0,65	1,07	2,15	1,05
	Fraction magnétique	0,92	3,01	0,75	0,64	4,10	2,80	0,94	2,90	2,00
	Métaux non ferreux	0,36	1,30	0,56	0,16	3,36	1,97	0,84	2,15	1,33
	TOTAL	5,52	15,11	6,00	4,66	32,10	19,87	10,32	28,60	15,27
+ 2	Peluches	1,32	0,77	1,39	1,28	0,81	1,17	0,88	0,78	1,05
	Polystyrène, mousse	0,98	0,45	1,23	0,75	1,95	1,18	2,86	1,80	1,40
	Bois	0,00	0,24	0,59	0,19	0,00	0,97	0,00	0,45	0,30
	Caoutchouc	0,47	1,32	1,73	2,00	2,44	2,25	1,02	2,30	1,69
	Plastiques	0,63	2,65	3,46	4,00	4,90	3,45	2,04	3,10	3,02
	Cailloux	0,00	0,67	0,00	0,80	1,22	1,13	0,50	0,90	0,65
	Verre	0,16	0,99	1,04	1,41	2,44	3,40	0,76	1,34	1,44
	Fraction magnétique	1,45	3,97	1,95	2,35	3,11	2,82	1,90	2,55	2,51
	Métaux non ferreux	0,32	0,99	0,70	1,18	1,22	1,13	0,76	1,34	0,95
	TOTAL	5,33	12,05	12,10	13,96	18,10	17,50	10,72	14,55	13,03
+ 1	Peluches	1,23	0,69	1,41	1,32	0,62	0,93	0,86	0,78	0,98
	Polystyrène, mousse	0,65	0,23	1,14	0,49	0,38	0,25	1,07	0,93	0,64
	Bois	0,28	0,04	0,50	0,49	0,28	1,00	0,51	0,40	0,43
	Caoutchouc	0,42	0,76	2,08	1,40	0,95	1,70	0,82	0,72	1,10
	Plastiques	1,05	1,88	2,78	2,80	2,40	2,42	1,66	1,75	2,09
	Cailloux	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41	0,41	0,10
	Verre	0,31	0,76	1,40	7,02	0,95	1,60	0,82	0,41	1,65
	Fraction magnétique	1,78	4,57	2,68	2,58	2,33	2,50	2,22	1,66	2,54
	Métaux non ferreux	0,31	0,38	0,70	0,49	0,48	0,72	0,41	0,82	0,53
	TOTAL	6,04	9,31	12,70	16,61	8,40	11,12	8,78	7,88	10,10
+ 0,5	Peluches	1,55	1,00	1,15	0,98	0,53	1,03	0,98	1,15	1,04
	Polystyrène, mousse	0,53	0,11	1,69	0,57	0,52	0,23	0,98	0,98	0,70
	Bois	0,30	0,04	0,82	0,37	0,30	1,25	0,79	0,42	0,53
	Caoutchouc	0,80	1,26	2,80	2,57	0,62	1,47	1,16	1,15	1,47
	Plastiques	2,00	1,68	3,72	4,05	1,55	2,94	3,90	2,05	2,73
	Cailloux	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	0,68	0,18
	Verre	0,80	0,83	1,86	7,36	0,77	3,25	1,56	0,22	2,08
	Fraction magnétique	5,56	6,15	5,03	4,49	1,93	2,77	3,10	2,24	3,90
	Métaux non ferreux	0,38	0,43	0,93	0,74	0,15	0,49	0,38	0,45	0,49
	TOTAL	11,92	11,50	18,00	21,14	6,38	13,43	13,63	9,34	13,16
	Fraction 0,5-15 mm	34,81	51,50	50,80	56,98	86,28	68,16	45,70	67,93	57,77
	Fraction < 0,5 mm	65,19	48,50	49,20	43,02	13,72	31,84	54,30	32,07	42,23
	Total fines < 15 mm	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tableau III.3 : Composition des fines par tranche granulométrique
(Prélèvement - 2 échantillons par site d'exploitation)

III.3.1.2 - Analyse de la composition des fines

Dans le tableau III.3 sont présentées les différentes fractions granulométriques observées sur les échantillons provenant des sites en observation et sur lesquelles a été fait un triage manuel des composants qui ont été ensuite pesés. On a ainsi deux échantillons par site d'exploitation (1 et 2), divisés selon les classes granulométriques et selon les composants entre chaque classe. Les classes granulométriques considérées sont :

(+ 8 mm); (- 8 + 4 mm); (- 4 + 2 mm); (- 2 + 1 mm); (- 1 + 0,5 mm); et (- 0,5 mm).

Les composants sont constitués par : peluches, polystyrène et mousse, bois, caoutchouc, plastiques, cailloux, verres, métaux non ferreux et fraction magnétique (qui est séparée manuellement à l'aide d'un aimant faible).

Les résultats du tableau III.4 nous donnent les compositions moyennes des différentes fractions de fines en ne tenant plus compte de la provenance, mais en considérant un produit moyen issu des différents sites.

Moyenne des composants en %	8-15 mm	4-15 mm	2-15 mm	1-15 mm	0,5-15 mm
Peluches	0,58	0,84	1,89	2,87	3,91
Polystyrène et mousse	1,70	4,39	5,79	6,43	7,13
Bois	0,01	0,23	0,53	0,96	1,49
Caoutchouc	0,51	2,83	4,52	5,62	7,09
Plastiques	1,08	5,20	8,22	10,31	13,04
Cailloux	0,41	1,63	2,28	2,38	2,56
Verre	0,03	1,08	2,52	4,17	6,25
Fraction magnétique	0,80	2,80	5,31	7,85	11,75
Métaux non ferreux	1,06	2,39	3,34	3,87	4,36
TOTAL	6,17	21,39	34,40	44,46	57,58

Tableau III.4 : Composition moyenne des différentes fractions de fines

Une autre façon d'aborder le problème consiste à étudier les fluctuations pondérales des fractions granulométriques et les fluctuations de compositions à l'intérieur des tranches et cela site par site (tableau III.5 et tableau III.6). Cette méthode permet de juger de l'ampleur des fluctuations quand on raisonne catégoriellement (tableau III.6).

Tranche mm	"F"	"M"	"D"	"E"
+ 8	6,24 - 21,30	2,25 - 7,56	3,53 - 6,00	0,61 - 2,00
+ 4	19,87 - 32,10	10,32 - 28,60	5,52 - 15,11	4,66 - 6,00
+ 2	17,50 - 18,10	10,72 - 14,55	5,33 - 12,05	12,10 - 13,96
+ 1	8,40 - 11,12	7,88 - 8,78	6,04 - 9,31	12,70 - 16,61
+ 0,5	6,38 - 13,43	9,34 - 13,63	11,50 - 11,92	18,00 - 21,14
- 0,5	13,72 - 31,84	32,07 - 54,30	48,50 - 65,19	43,02 - 49,20

Tableau III.5 : Fluctuations des différentes provenances par tranches granulométriques

Composants	"F"	"M"	"D"	"E"
peluches	3,30 - 4,27	3,79 - 3,83	3,34 - 5,05	3,91 - 4,75
F.magnétique	11,32 - 14,37	8,23 - 9,89	11,31 - 16,89	10,18 - 10,78
polys,mousse	10,51 - 13,72	9,59 - 13,54	4,35 - 6,12	3,67 - 7,50
métaux	5,25 - 8,82	2,73 - 6,52	2,47 - 3,41	2,57 - 3,07
caoutchouc	9,65 - 11,66	4,16 - 11,88	3,12 - 6,42	7,15 - 7,79
plastiques	13,21 - 22,77	10,43 - 12,65	5,11 - 9,10	12,02 - 12,20
verres	7,52 - 8,90	4,12 - 4,27	1,45 - 2,40	4,68 - 16,63
cailloux	4,06 - 5,04	2,50 - 5,50	0,17 - 2,22	-

Tableau III.6 : Fluctuations en pourcentage par rapport au total de différents composants pour toutes les tranches granulométriques et pour différentes provenances

Enfin dans un but de simplification, on peut raisonner sur des moyennes (Tableau III.7) et sur des catégories regroupées (Tableau III.8 jusqu'au Tableau III.12) exprimées tranches granulométriques par tranches granulométriques, sous forme de moyennes pondérales. Les moyennes, figurant dans la colonne de droite des tableaux, expriment la composition d'un produit constitué par une alimentation issue de chaque site d'exploitation, à condition que chaque site délivre un tonnage identique à celui des autres.

Fraction < 15 mm

Tranche mm	"D"	"M"	"F"	"E"	Moyenne
< 15	60,0	50,0	50,0	45,0	51,0
+ 8 - 15	5,0	4,9	12,8	1,3	6,0
+ 4 - 8	10,0	19,5	26,0	5,3	15,2
+ 2 - 4	9,0	12,6	17,8	13,0	13,1
+ 1 - 2	7,4	8,3	9,8	14,6	10,0
+0,5 - 1	11,3	11,5	9,9	19,6	13,0
< 0,5	57,0	43,0	22,8	46,1	42,2

Tableau III.7: Moyenne pondérale (en %) des tranches granulométriques (< 15 mm)

Fraction 8-15 mm

Groupes de composants	"D"	"M"	"F"	"E"	Moyenne
Fraction magnétique	33,65	5,26	10,35	18,45	13,40
Matière plastique léger, tissu laineux, bois	30,95	52,42	37,15	62,50	49,30
Métaux, verres, cailloux,plastiques	35,40	42,32	52,50	19,05	37,30

Tableau III.8 : Répartition (en %) des groupes de composants pour la tranche 8 -15 mm

Fraction 4 - 8 mm

Groupes de composants	"D"	"M"	"F"	"E"	Moyenne
Fraction magnétique	18,33	9,60	11,47	13,06	13,10
Matière plastique légère tissu laineux, bois	27,46	25,90	46,22	19,33	29,75
Métaux, verres, cailloux, plastiques	54,21	64,50	42,31	67,61	57,15

Tableau III.9 : Répartition (en %) des groupes de composants pour la tranche 4 - 8 mm*Fraction 2 - 4 mm*

Groupes de composants	"D"	"M"	"F"	"E"	Moyenne
Fraction magnétique	30,1	17,64	16,7	16,42	20,23
Matière plastique légère tissu laineux, bois	27,6	27,84	17,1	21,23	23,43
Métaux, verres, cailloux, plastiques	42,3	54,52	66,2	62,35	56,34

Tableau III.10: Répartition (en %) des groupes de composants pour la tranche 4 - 2 mm*Fraction 1 - 2 mm*

Groupes de composants	"D"	"M"	"F"	"E"	Moyenne
Fraction magnétique	39,27	23,1	25,2	18,3	26,40
Matière plastique légère tissu laineux, bois	23,17	26,3	17,5	19,0	21,70
Métaux, verres, cailloux, plastiques	37,56	50,6	57,3	62,7	52,14

Tableau III.11: Répartition (en %) des groupes de composants pour la tranche 1 - 2 mm*Fraction 0,5 - 1 mm*

Groupes de composants	"D"	"M"	"F"	"E"	Moyenne
Fraction magnétique	50,0	23,3	25,4	24,6	30,8
Matière plastique légère tissu laineux, bois	15,0	23,8	20,0	14,7	18,3
Métaux, verres, cailloux, plastiques	35,0	52,9	54,6	60,7	50,8

Tableau III.12: Répartition(en %) des groupes de composants pour la tranche 0,5 - 1mm

Total fines < 15 mm

Groupes de composants	"D"	"M"	"F"	"E"	Moyenne
Fraction magnétique	26	18	18	20	21
Matière plastique légère tissu laineux, bois	11	16	24	10	15
Métaux, verres, cailloux, plastiques	63	66	58	70	64

Tableau III.13 : Synthèse (en %) des groupes de composants pour les fines < 15 mm

Tableaux III.8, III.9, III.10, III.11, III.12 et III.13 : Synthèse des résultats exprimés (en %), selon la provenance, par tranche granulométrique et par groupes de composants (légers et lourds).

L'analyse qui vient d'être faite montre que dans l'état des connaissances et avec des moyens "rustiques" de saisie des données, seul le bon sens doit présider à la prise et à la caractérisation des échantillons. On en conclut qu'il est quasiment impossible d'obtenir dans une usine de traitement de RBA des bilans exacts, pouvant renseigner sur les performances techniques précises et qu'une large part est laissée à l'appréciation toujours floue, bien que pertinente des opérateurs. On trouvera donc une part d'incertitude évidente dans tout le travail de recherche.

Les figures III.1 et III.2 montrent la répartition granulométrique des fines inférieures à 15 mm, ainsi que la répartition des différents composants de cette fraction sous la forme des histogrammes et graphiques.

Les figures III.3 jusqu'à III.9 montrent à titre d'exemple, dans le cas d'un seul site "E", la répartition des différents composants dans chaque tranche granulométrique (en totalité - fig.III.3 et III.4), (8-15 mm -fig.III.5), (4-8 mm -fig.III.6), (2-4 mm -fig.III.7), (1-2 mm - fig.III.8) et (0,5 - 1 mm -fig.III.9).

III.3.2 - Caractérisation des fines par tranche et par constituant

On a tenté par l'application de l'analyse en composantes principales de mieux connaître les caractéristiques primordiales de chacun des sites. Mais, en définitive, il ne s'agit d'obtenir qu'une appréciation qualitative utile et le poids représenté par chaque site dans la qualité des produits.

L'analyse en composantes principales a été réalisée à partir des Tableaux III.4 et III.8 jusqu'à III.13. On a pris ainsi en compte à la fois les relations pondérales des composants et des sites.

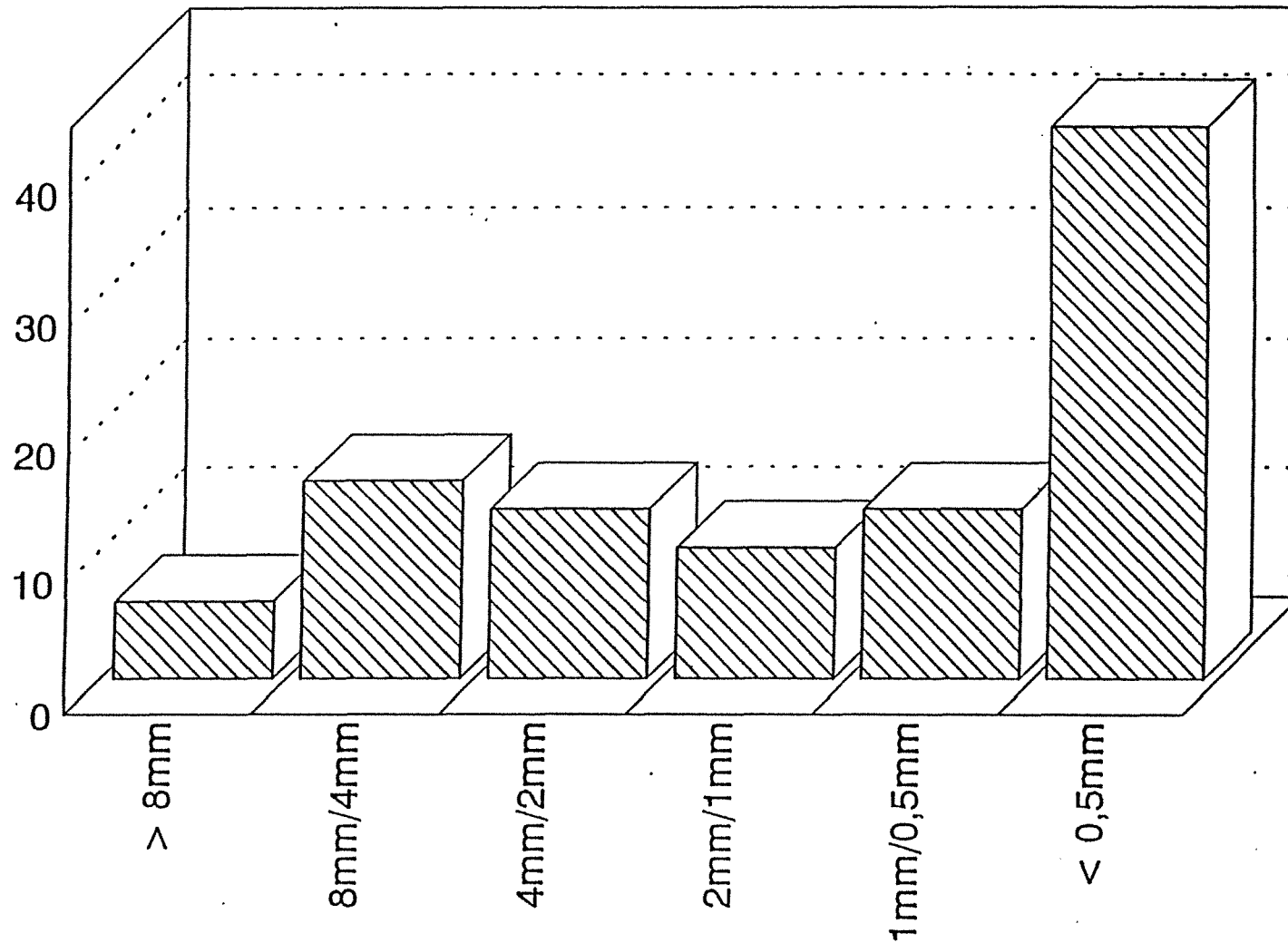


**Figure III.1 : REPARTITION GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION < 15 mm
(VALEURS MOYENNES)**

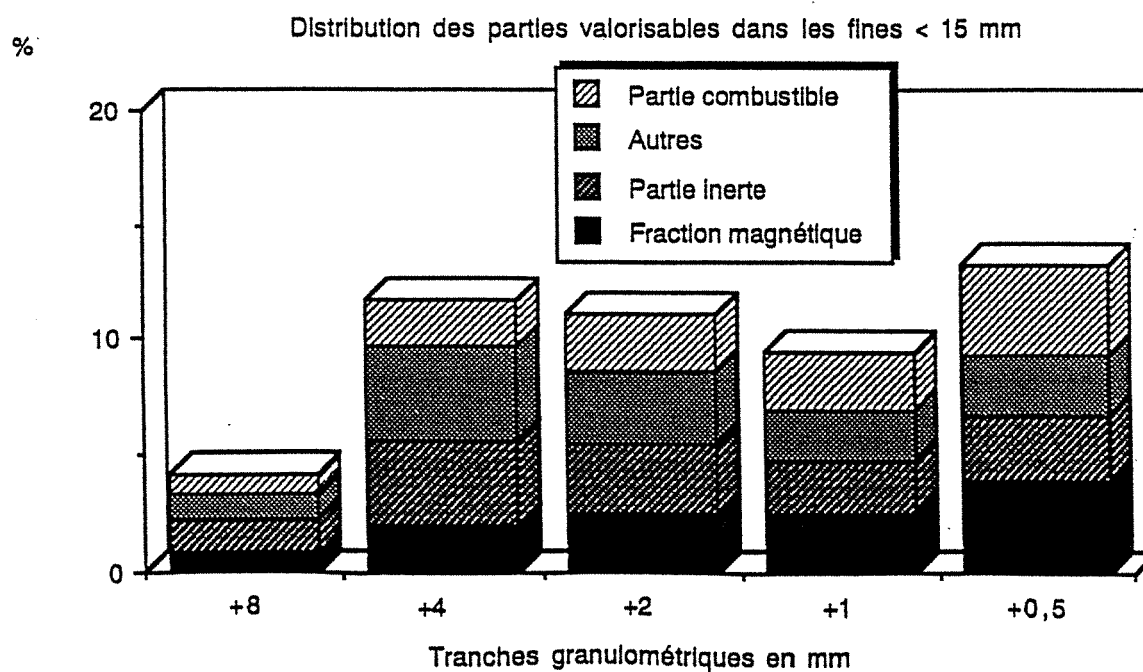
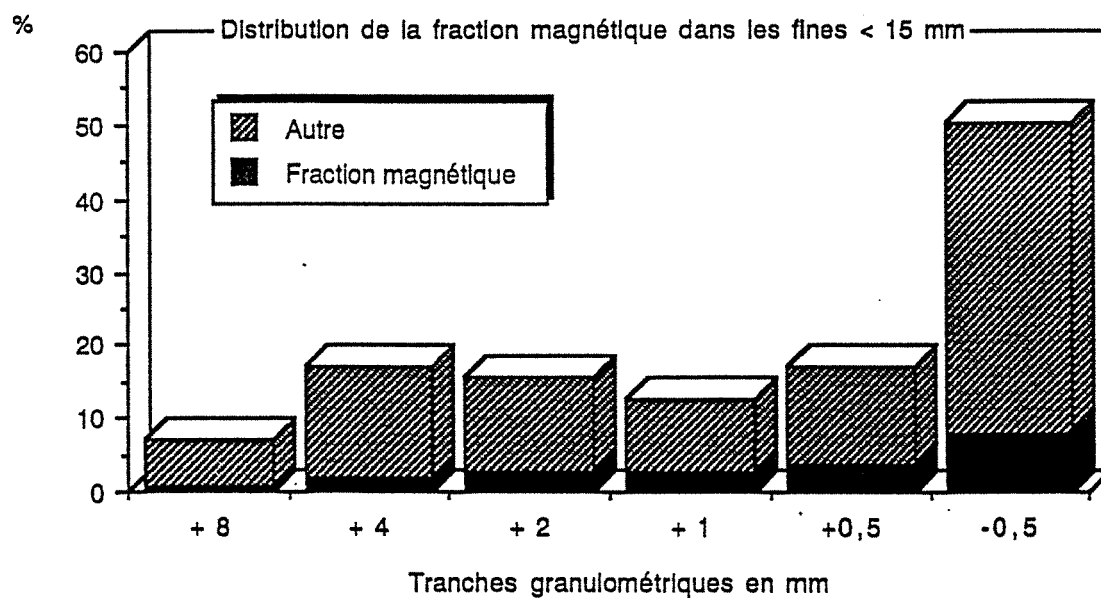
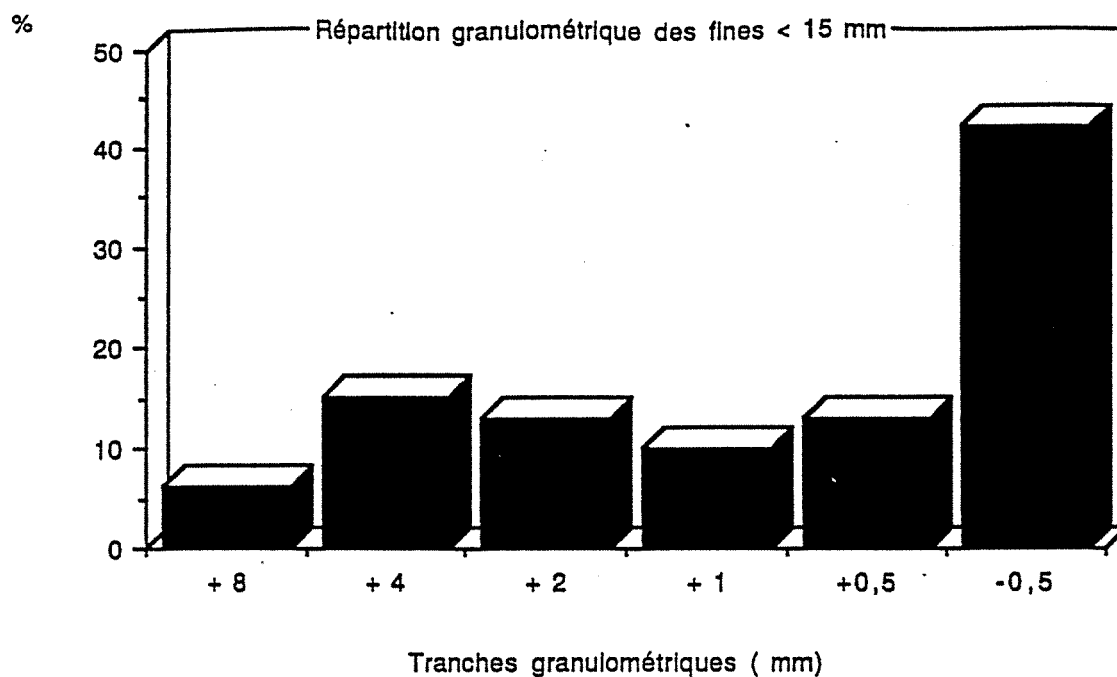


Figure III.2

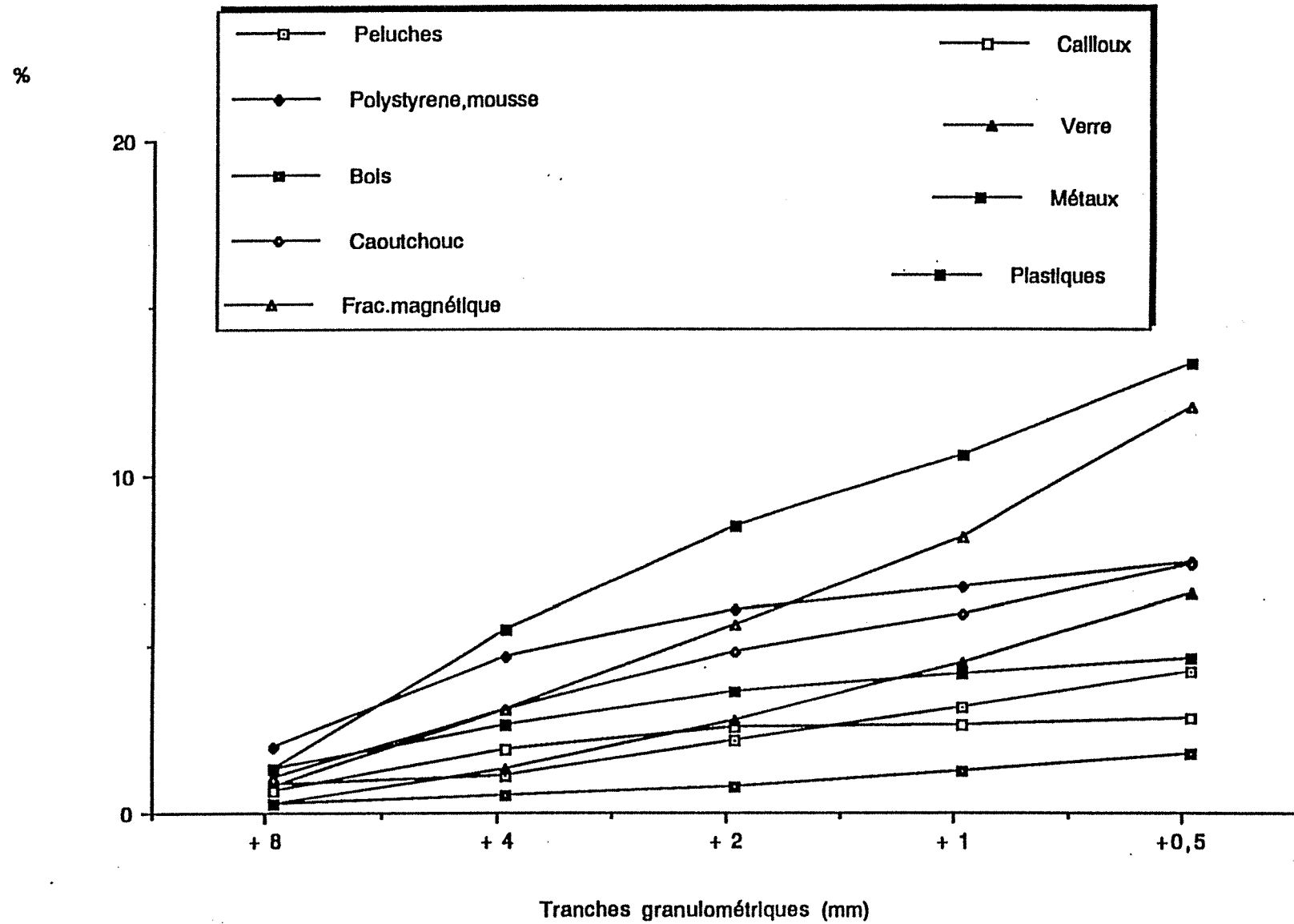


Figure III.3 : Répartition des différents composants dans les fines < 15 mm

COMPOSITION DE LA FRACTION < 15 mm (provenance "E")

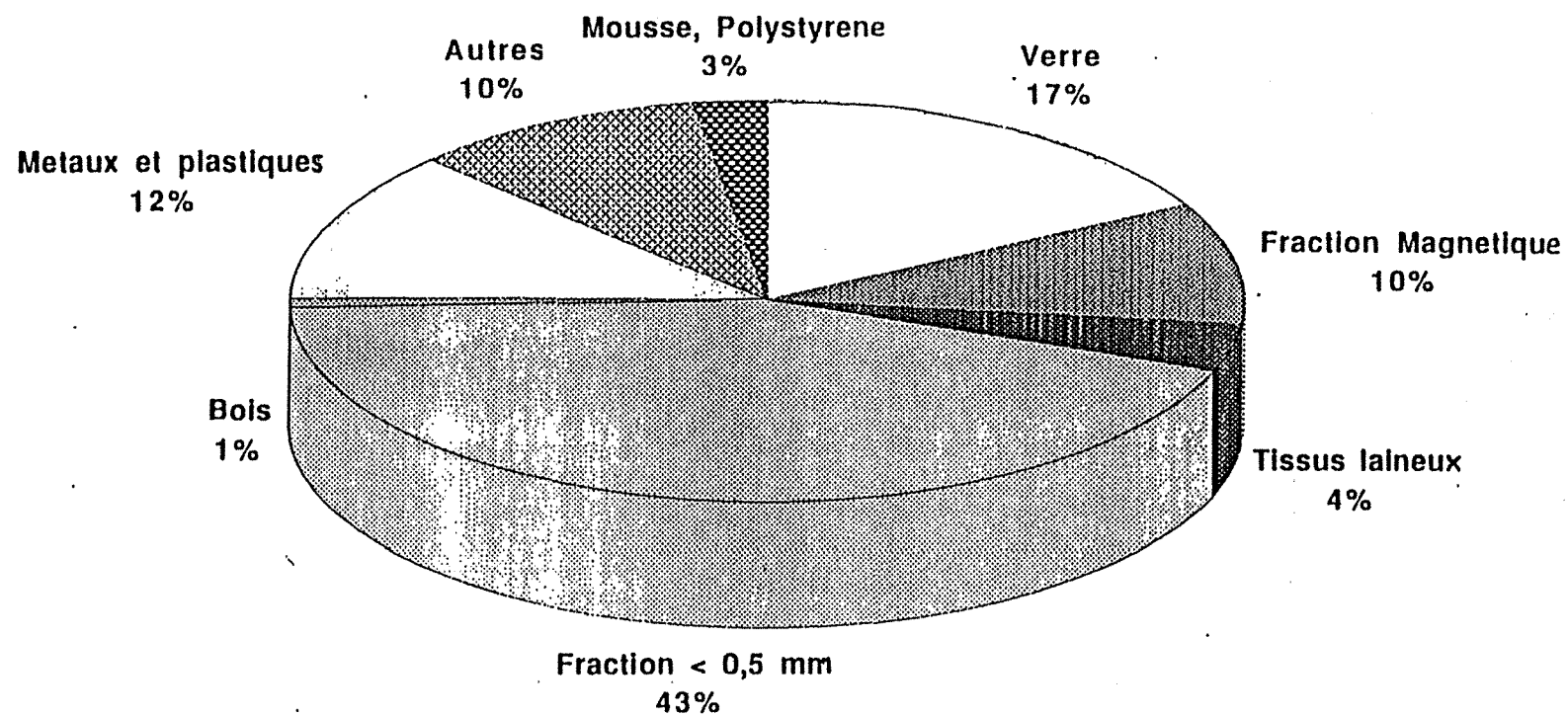


Figure III.4

FRACTION 8 - 15 mm - provenance "E"
(Septembre 1992)

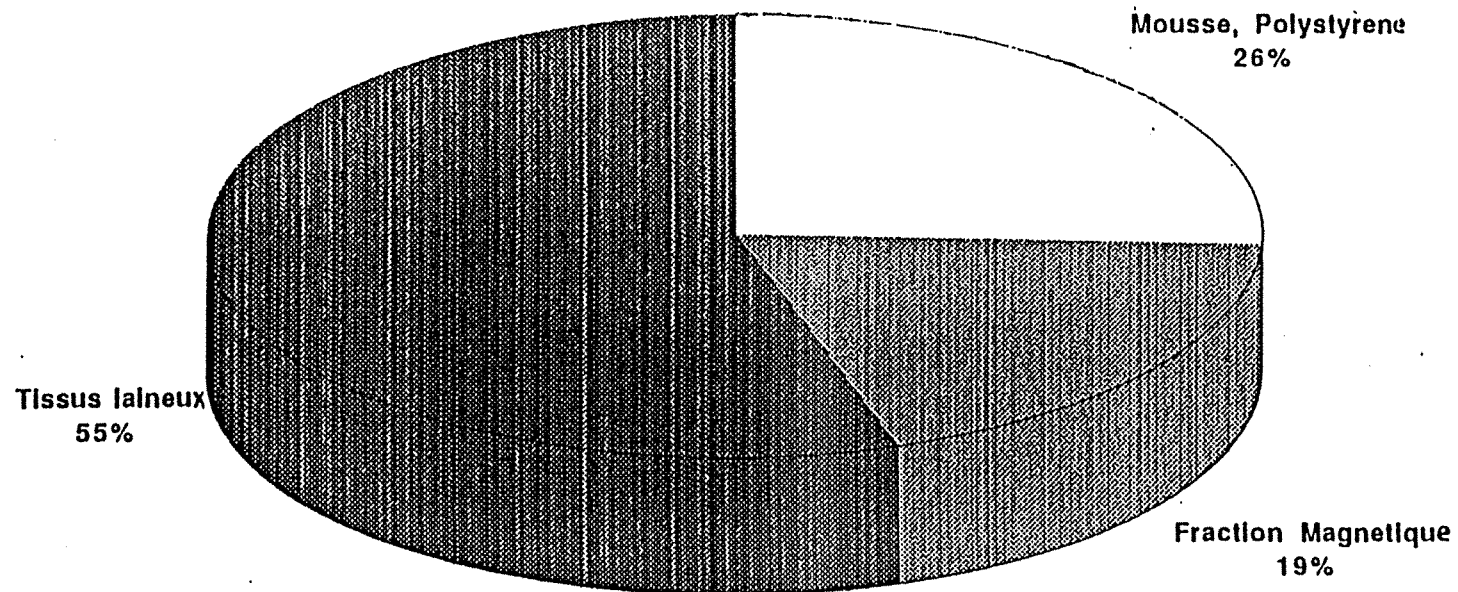


Figure III.5

FRACTION 4 - 8 mm - provenance "E" (Septembre 1992)

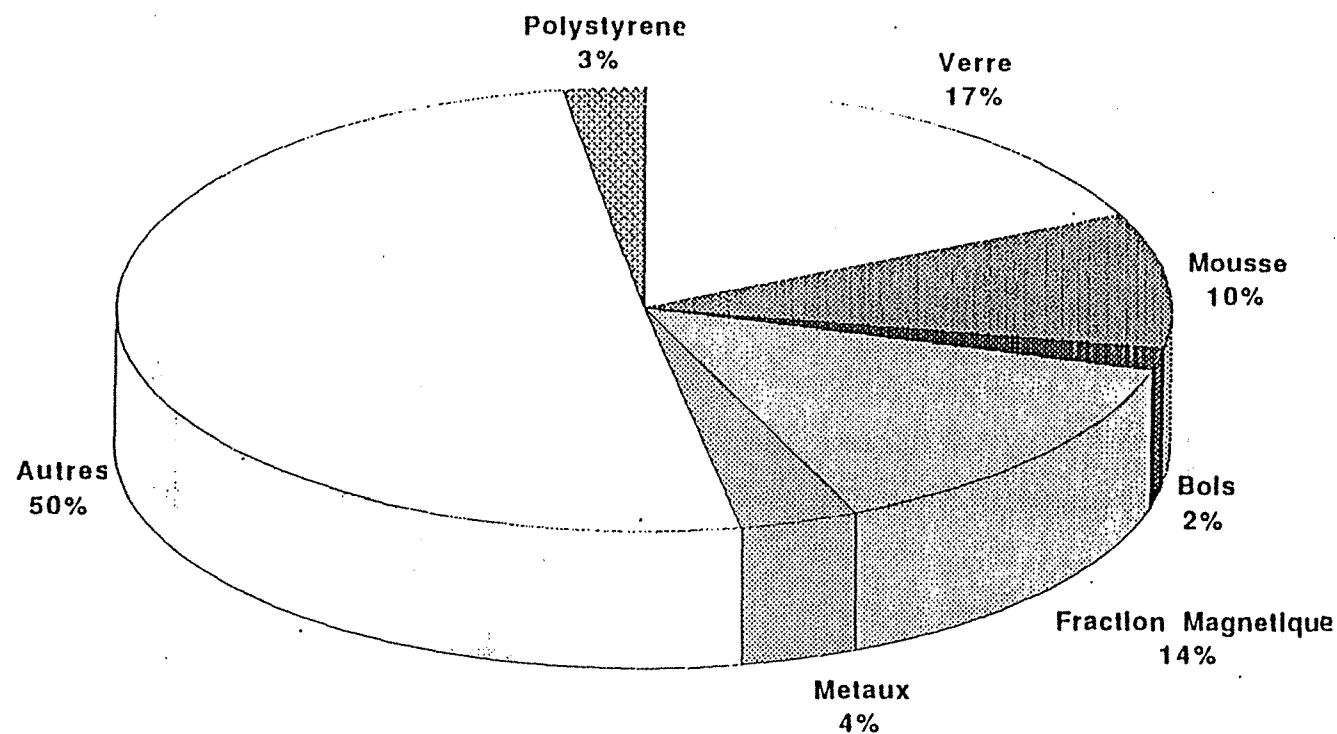


Figure III.6

FRACTION 2 - 4 mm - provenance "E" (Septembre 1992)

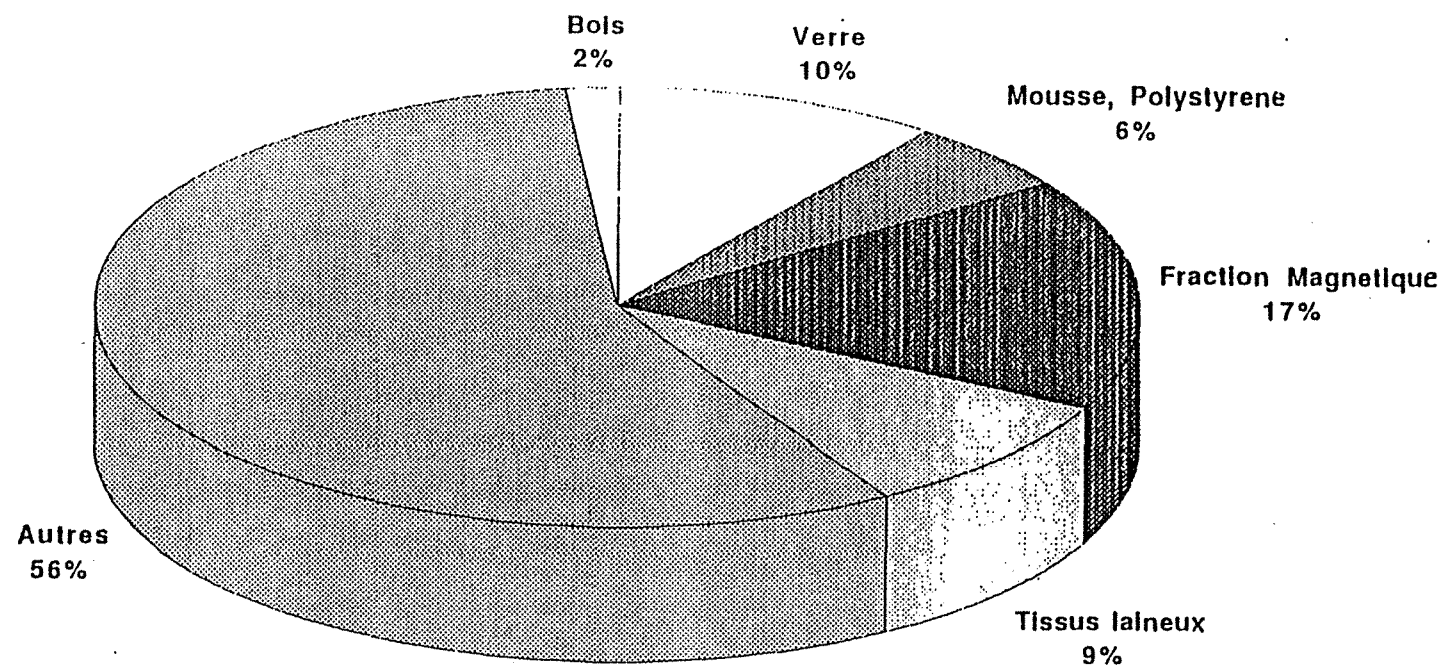


Figure III.7

FRACTION 1 - 2 mm - provenance "E" (Septembre 1992)

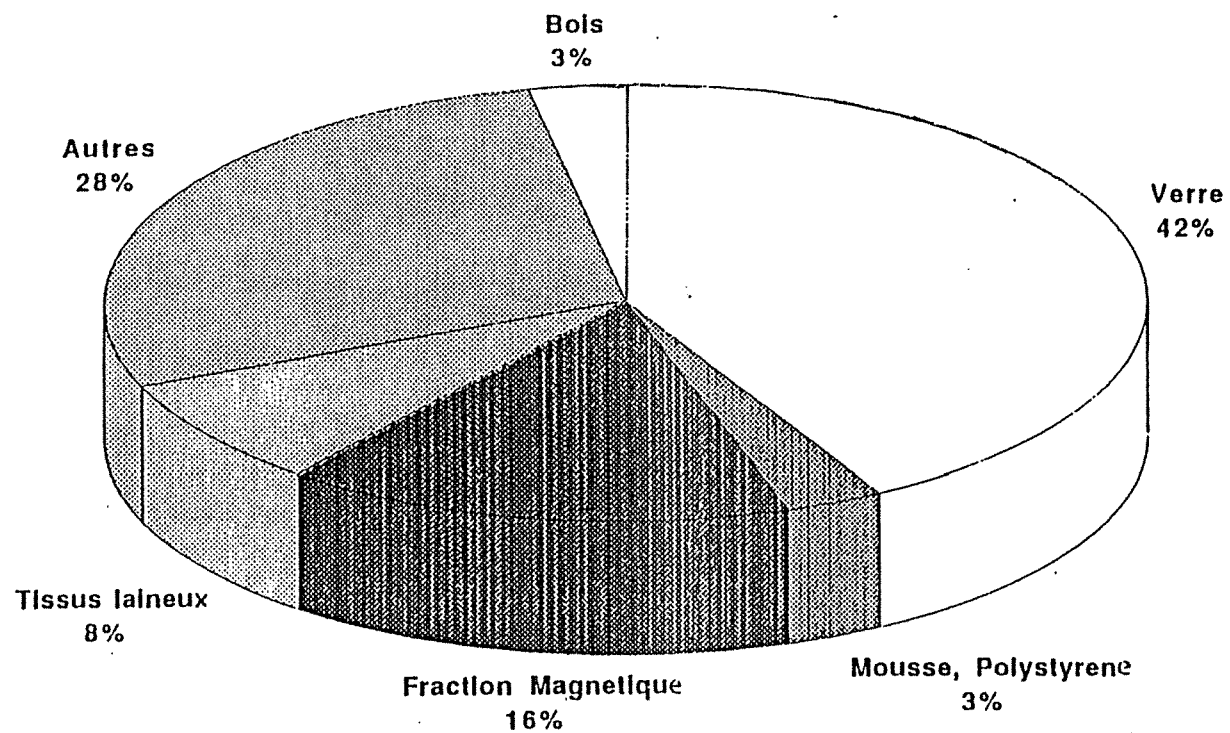


Figure III.8

FRACTION 0,5 - 1 mm - provenance "E"
(Septembre 1992)

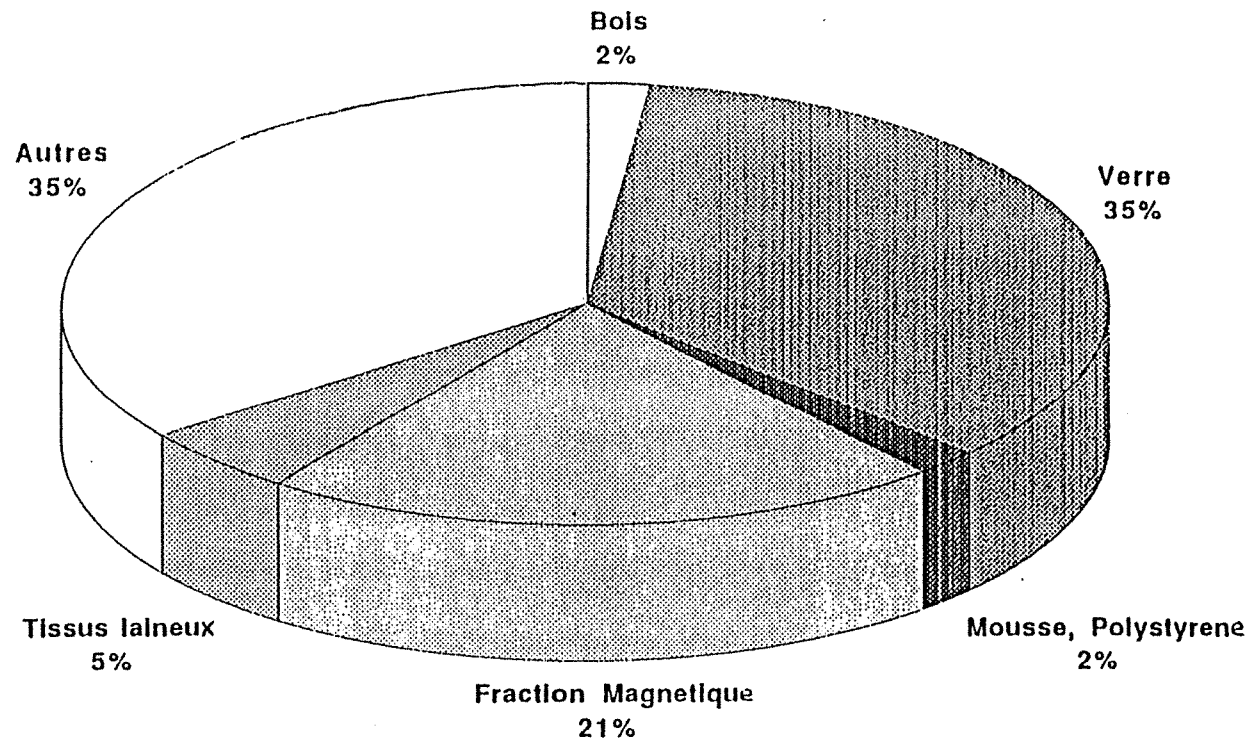


Figure III.9

A partir des analyses des tranches granulométriques (tableau III.8 à III.13), on a obtenu la matrice de corrélation donnée au tableau III.14.

	+ 8 mm	4 / 8 mm	2 / 4 mm	1 / 2 mm	0,5 / 1 mm	- 0,5 mm
+ 8	1					
+ 4	+0,80	1				
+ 2	+0,50	+0,70	1			
+ 1	-0,43	-0,40	+0,34	1		
+ 0,5	-0,77	-0,80	-0,17	+0,84	1	
- 0,5	-0,75	-0,85	-0,93	-0,10	+0,42	1

Tableau III.14 : Matrice de corrélation à partir des analyses des tranches granulométriques

On met en évidence deux familles granulométriques: une supérieure à 2 mm et l'autre inférieure à 2 mm :

- ☐ avec un fort % poids de la fraction < 0,5 mm
- ☐ avec une relation particulièrement étroite entre le - 0,5 mm et la tranche + 2 mm, soit avec la tranche (- 4+2.mm). Le diagramme 2 (figure III.10) résume ces résultats.

En se rapportant aux sites d'exploitation et en gardant en mémoire les coupures 0,5 et 2 mm, on en déduit que :

- ❶ La granulométrie dépend de la provenance :
 - "D" donne plus de fines < 0,5 mm;
 - "F" donne plus de fines > 2 mm.
- ❷ La coupure granulométrique en dehors de la dépendance vis-à-vis du site est globalement de 2 mm.
- ❸ Le rapport relatif des deux familles granulométriques par rapport à 2 mm est donné dans le tableau III.15 :

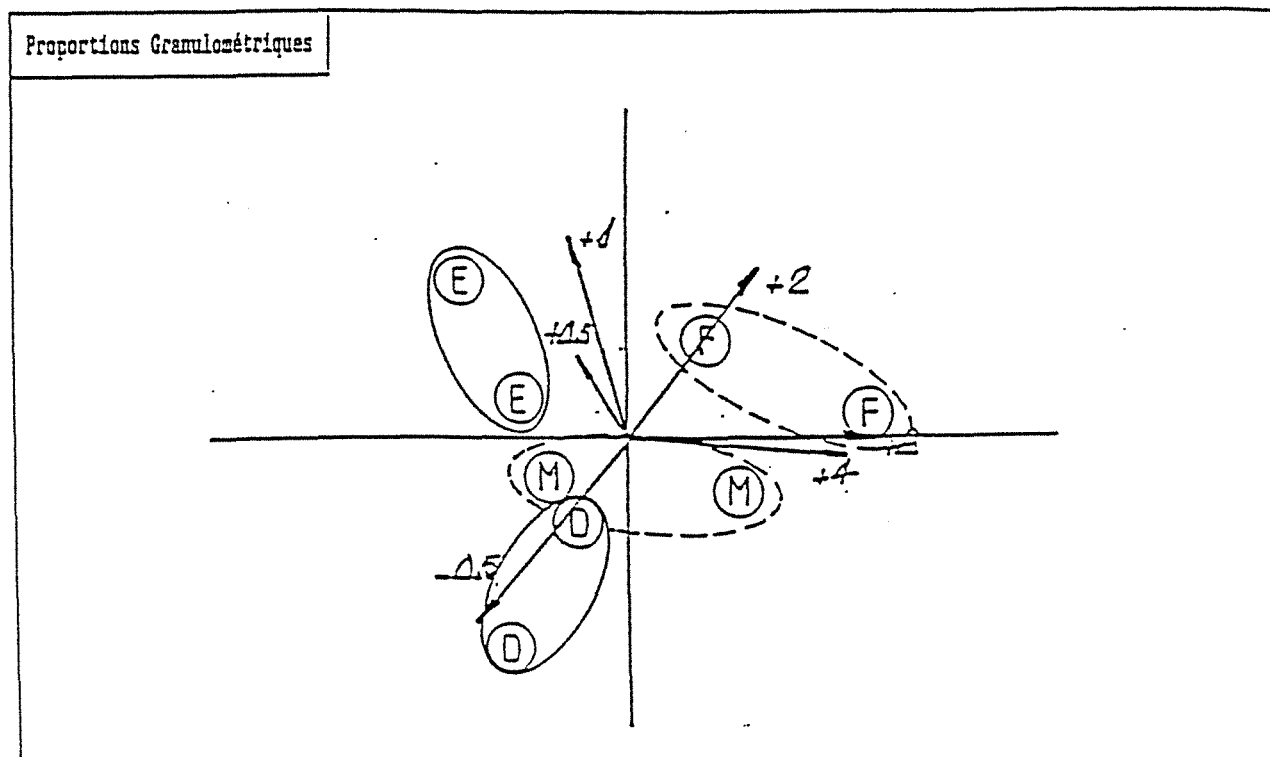
	"D"		"E"		"M"		"F"	
> 2 mm	17	29	18	19	23	51	72	44
< 2 mm	83	71	82	81	77	49	28	56

Tableau III.15 : Rapport pondéraux (en %) des fractions > 2 et < 2 mm

En conclusion, on peut donner les tendances suivantes :

- * "D" présente une plus grande quantité de produits de granulométrie < 0,5mm.
- * "F" présente des produits de granulométrie plus grossière.
- * "E" présente une qualité de produits homogène.

Diagramme 1 : Analyse en composantes principales par site



Les tendances sont indiquées par des flèches numérotées, suivant les granulométries : exemple - les produits "F" ont tendance à avoir un maximum de > 2 mm.

Diagramme 2 : Relation entre les familles granulométriques par site

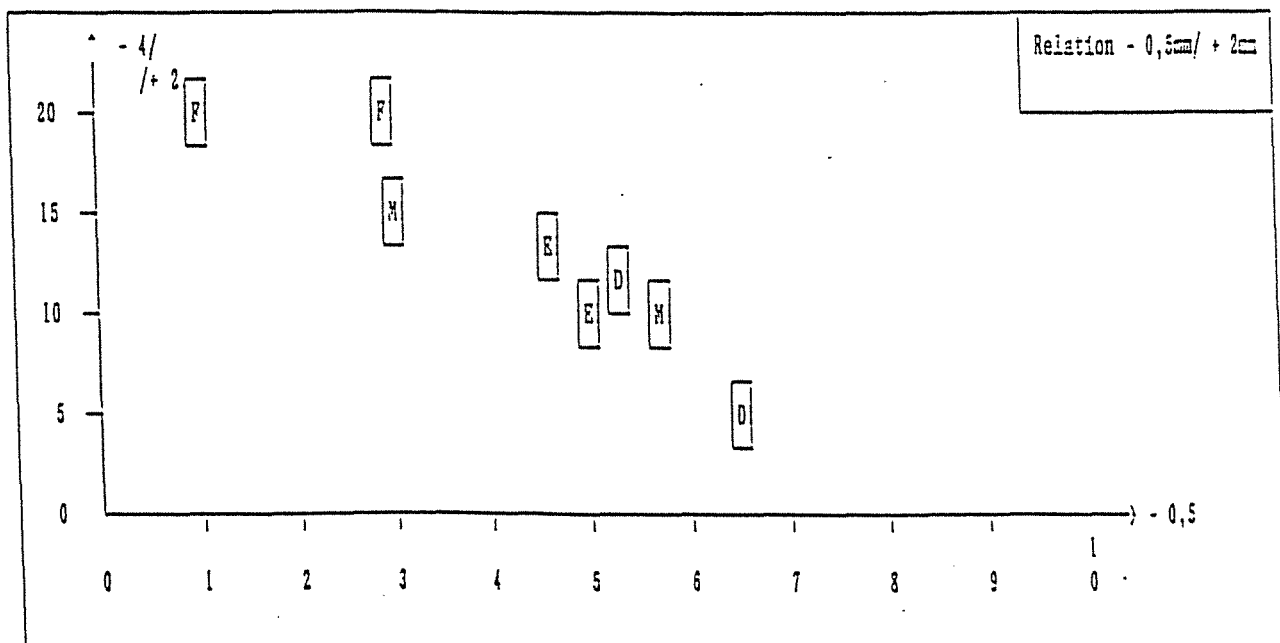


Figure III.10 : Analyse des tranches granulométriques

Il a été tenté ensuite de comprendre la variabilité en composition de produits délivrés par chaque site. Il a été pris en considération les tableaux III.3, III.4, III.5 et III.6, se rapportant au 0,5 - 15 mm, à partir desquels ont été établis, par analyse en composantes principales, les diagrammes 3, 4, 5, 6, 7 et 8 (figures III.11, III.12 et III.13)

L'analyse a été effectuée sur 6 catégories de composants :

- les métaux non ferreux,
- le fer,
- les cailloux,
- la peluche,
- les légers (mousse et polystyrène),
- l'ensemble plastiques-caoutchouc.

Les résultats montrent une certaine constance pour les produits légers et partiellement pour les cailloux et la fraction magnétique. On peut aussi dire que "E" fournit des produits assez constants, alors que "D" donne des produits très différents.

Pour les produits inférieurs à 0,5 mm, il est impossible de trier manuellement les catégories de constituant. Cependant on a fait appel à des analyses semi-quantitatives (Tableau III.16).

	"D"	"E"	"M"	"F"
Ti	1000+*/3000	3000	3000/1%	3000
Mn	300/1000+	1000	1000	300/1000+
Cr	300	300/1000	300/1000	300/1000+
Ni	300	300	300	300
Co	30/100+	30/100+	30/100+	30/100+
V	<=30	<=30	<=30	<=30
B	1000	1000	1000	1000
Cu	300	300	300	300
Pb	3000	3000	3000	3000
Zn	>>1%	>>1%	>>1%	>>1%
Ba	1000	3000	3000	3000
Sn	100/300	100/300	100/300	100/300
Sr	100	100	100	100

Limite de détection							
As	< 300	Au	< 30	Be	< 10	Ga	< 30
Pt	< 100	Ag	< 10	Bi	< 100	Ge	< 30
Pd	< 30	Ti	< 100	Cd	< 100		

Tableau III.16 : Analyses semi-quantitatives (en ppm) de la fraction inférieure à 0,5 mm

* Le signe "+" est un signe de proximité.

Diagramme 3 : Analyse en composantes principales par site

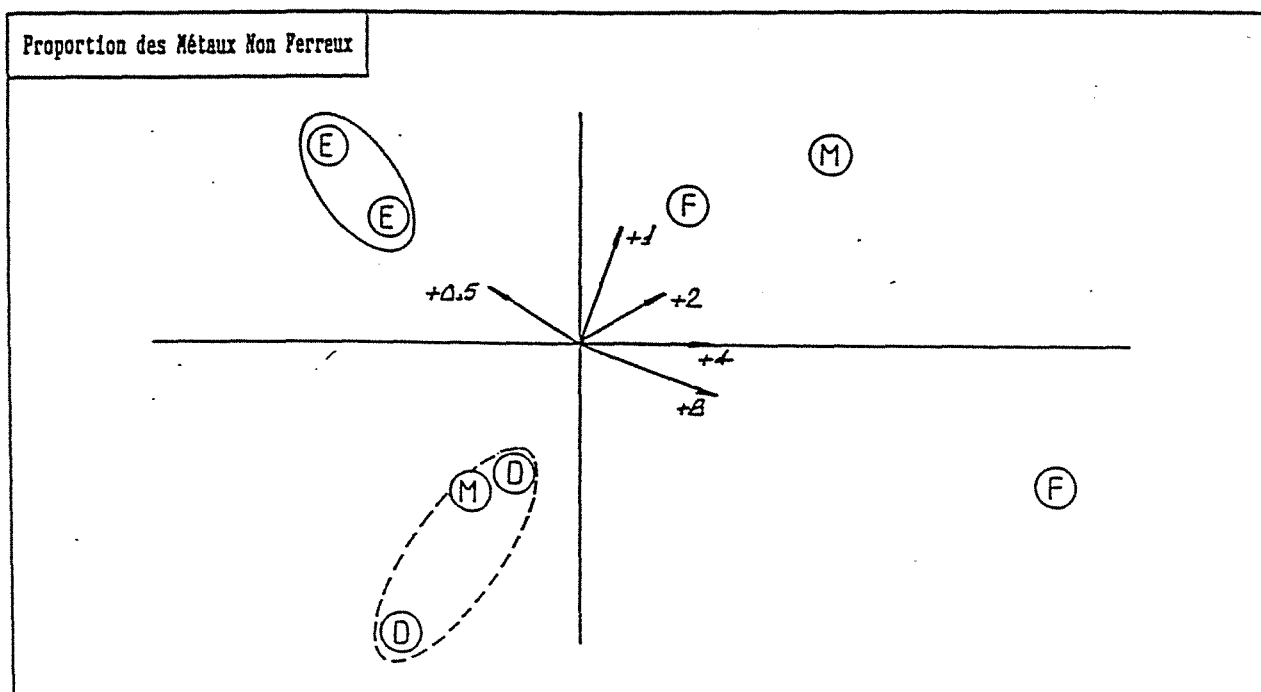


Diagramme 4 : Analyse en composantes principales par site

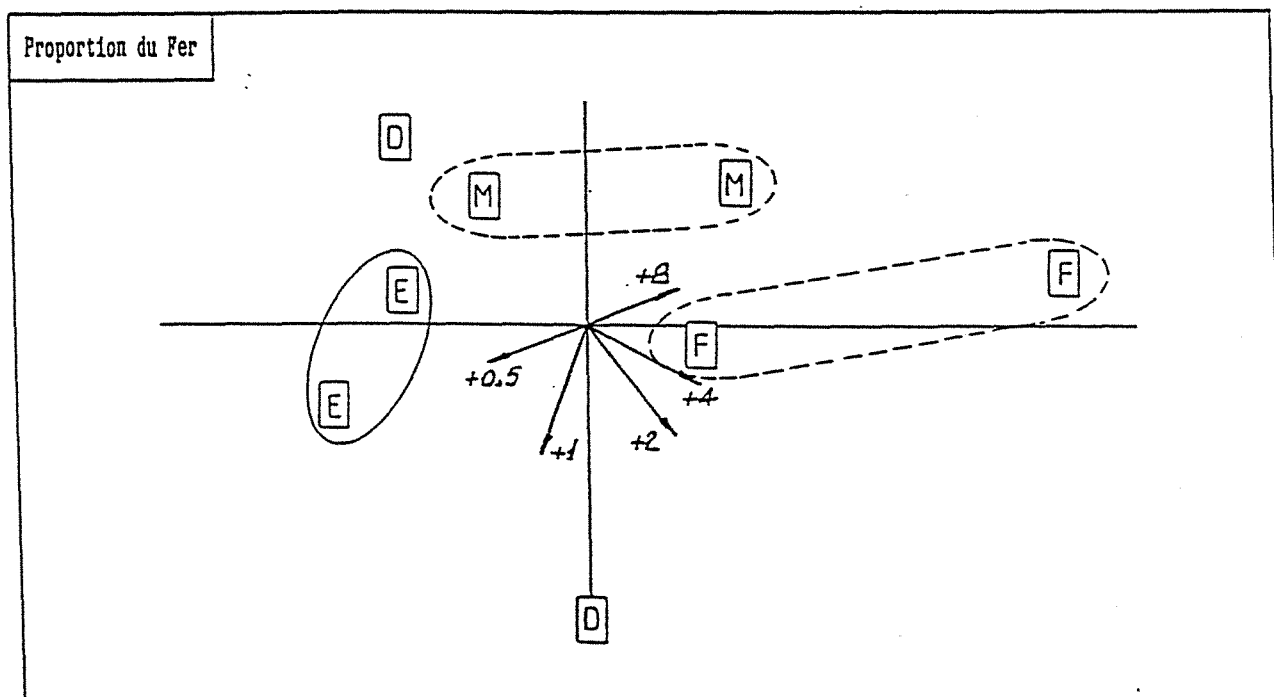


Figure III.11 : Essais de regroupement par site (métaux)

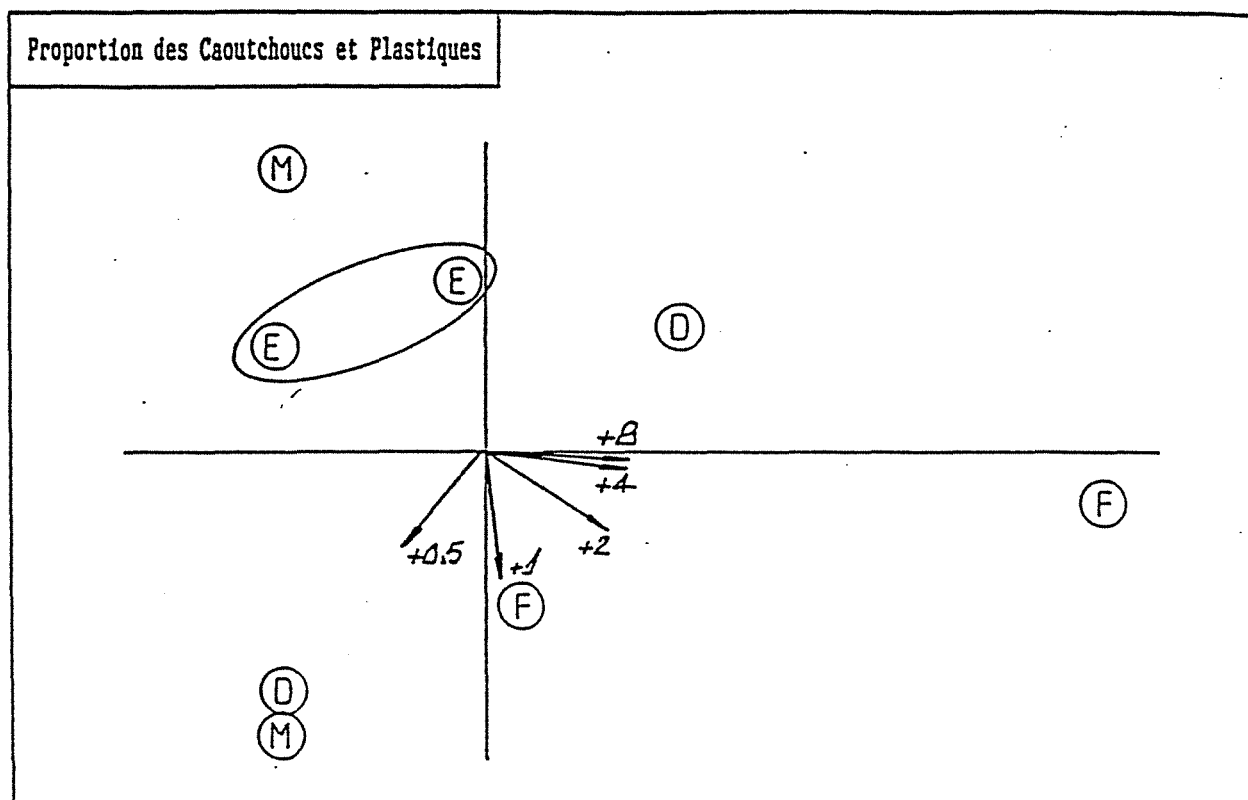
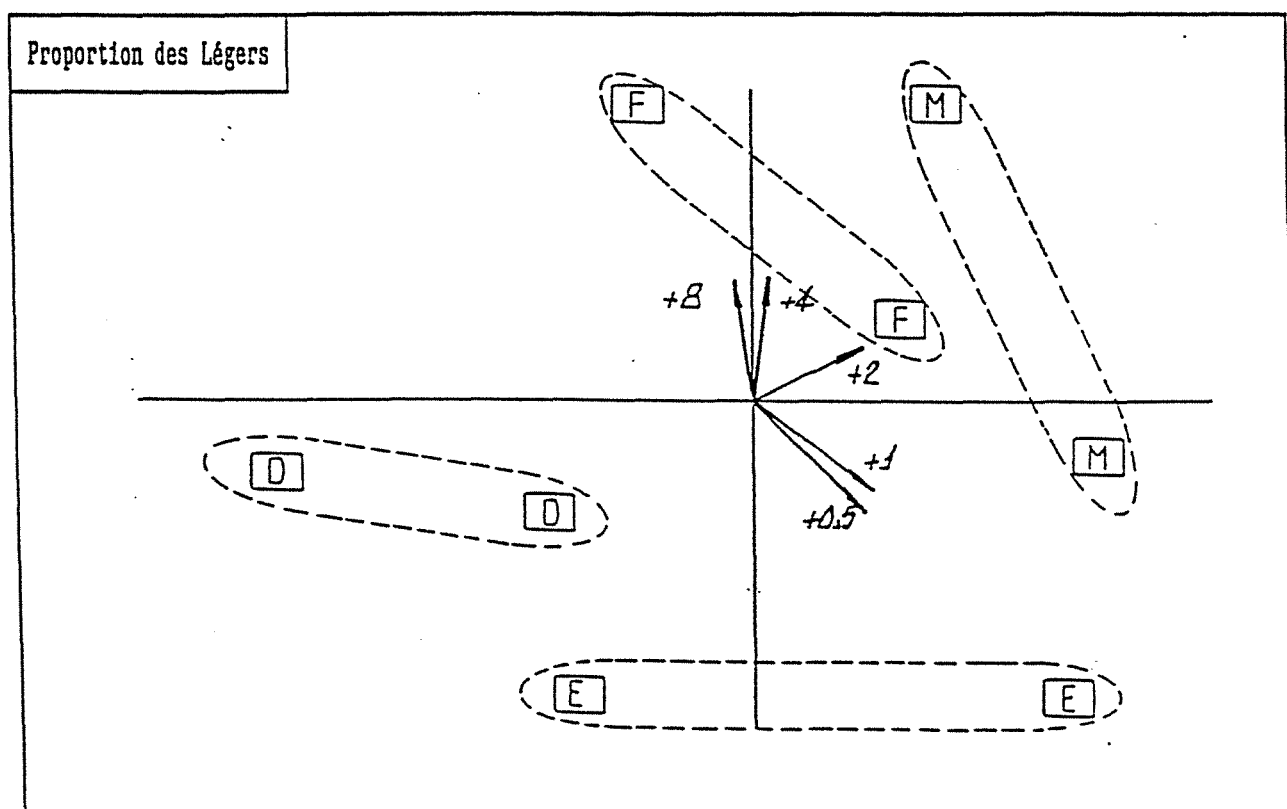
Diagramme 5 : Analyse en composantes principales par site**Diagramme 6 : Analyse en composantes principales par site****Figure III.12 : Essais de regroupement par site (caoutchouc - plastiques et légers)**

Diagramme 7 : Analyse en composantes principales par site

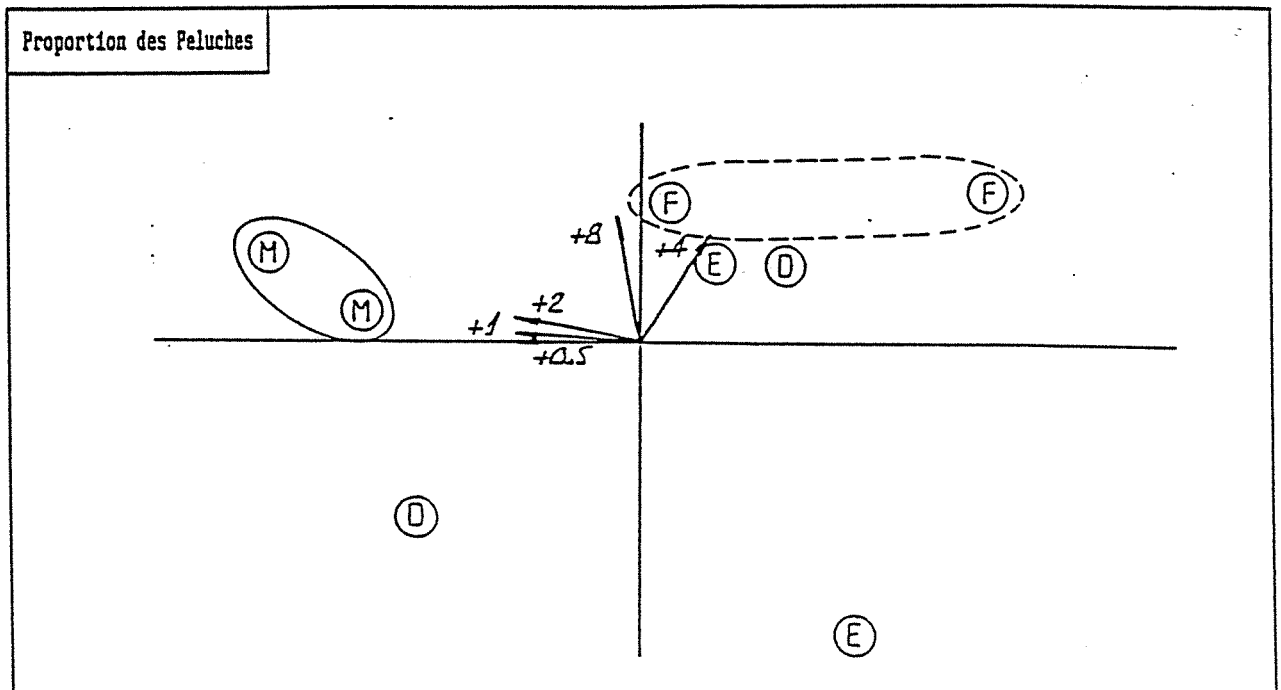


Diagramme 8 : Analyse en composantes principales par site

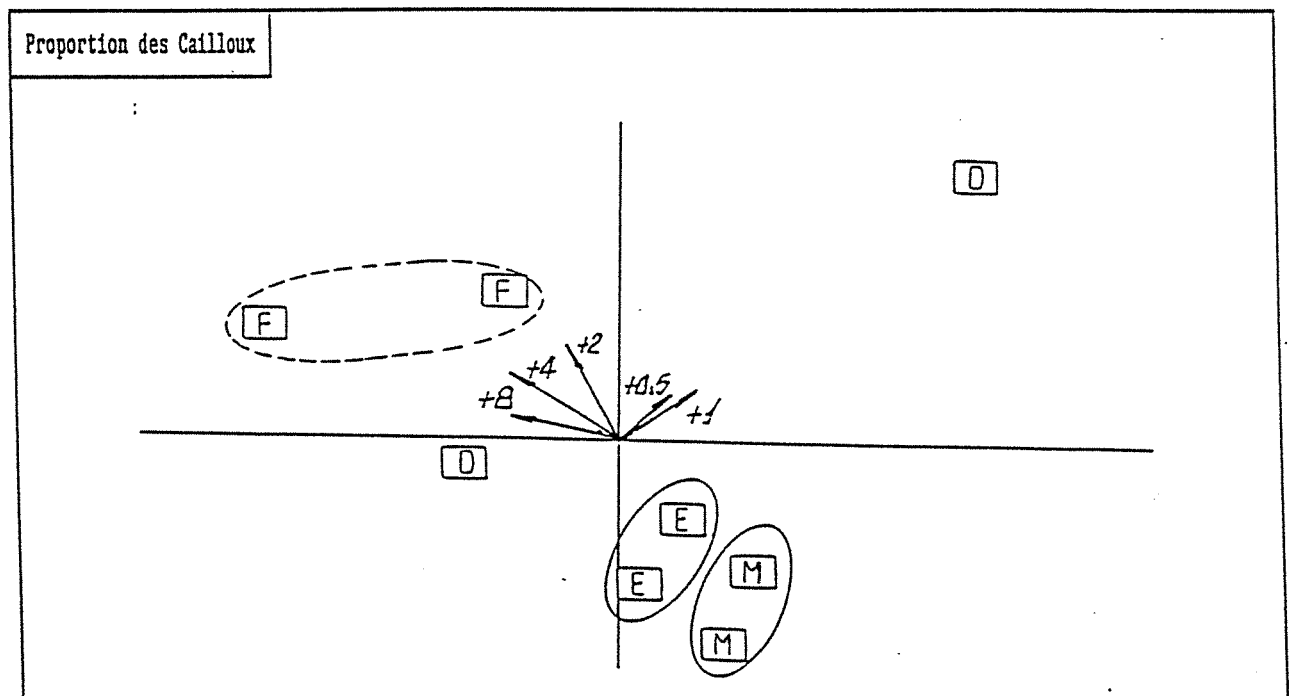


Figure III.13 : Essais de regroupement par site (peluches et cailloux)

Il n'apparaît pas de différence notable, ni au niveau de l'analyse semi-quantitative des métaux (si ce n'est une teneur en titane, chrome et baryum légèrement plus faible pour "D"), ni au niveau de l'analyse aux Rayons X comme le montre les diagrammes dans les figures III.14 et III.15.

Trois catégories de minéraux ressortent du bruit de fond :

- le quartz,
- les oxydes de fer (magnétite et goethite),
- les calcaires (calcite et dolomite).

Enfin les teneurs importantes en zinc dans la fraction inférieure à 0,5 mm, ont attiré notre attention. C'est la raison pour laquelle ont été réalisés des tests de lixiviation selon la norme AFNOR NF X 30.210 et directement sur la fraction 0 à 15 mm.

Entre le mois de novembre 1991 et octobre 1992, la quantité de zinc lixiviée a cru de façon constante et particulièrement à partir de juin 1992, alors que les quantités des autres métaux sont restées constantes (Annexe 8).

Comme l'augmentation du zinc lixiviable est significative, des essais ont été effectués sur des fines provenant des 4 sites (tableau III.17).

Zn (mg/l)	"D"	"E"	"F"	"M"
LIXI 1	7,30	10,90	13,50	17,30
LIXI 2	4,80	6,50	8,40	9,90
LIXI 3	4,70	6,60	8,40	8,60

Tableau III.17 : Teneurs en zinc dans les fines < 15 mm pour différents sites et après trois lixiviations successives

La quantité de zinc lixiviée est forte quelques soient les sites avec cependant une plus faible quantité pour "D" comparé à "M".

III.3.3 - Caractérisation des fines vis-à-vis d'un traitement ultérieur

Nous avons pris au hasard un lot de fines provenant d'un mélange de tous les sites, sur lesquels ont été opérés des tests de gravité en liqueurs denses.

La description des fines donnée ci-dessous est liée à des opérations proches de celles du traitement (séparation gravimétrique voie humide, du magnétisme et de la fragmentation sélective).

Diagramme 9 : Analyse Rayons-X (Produit "D")

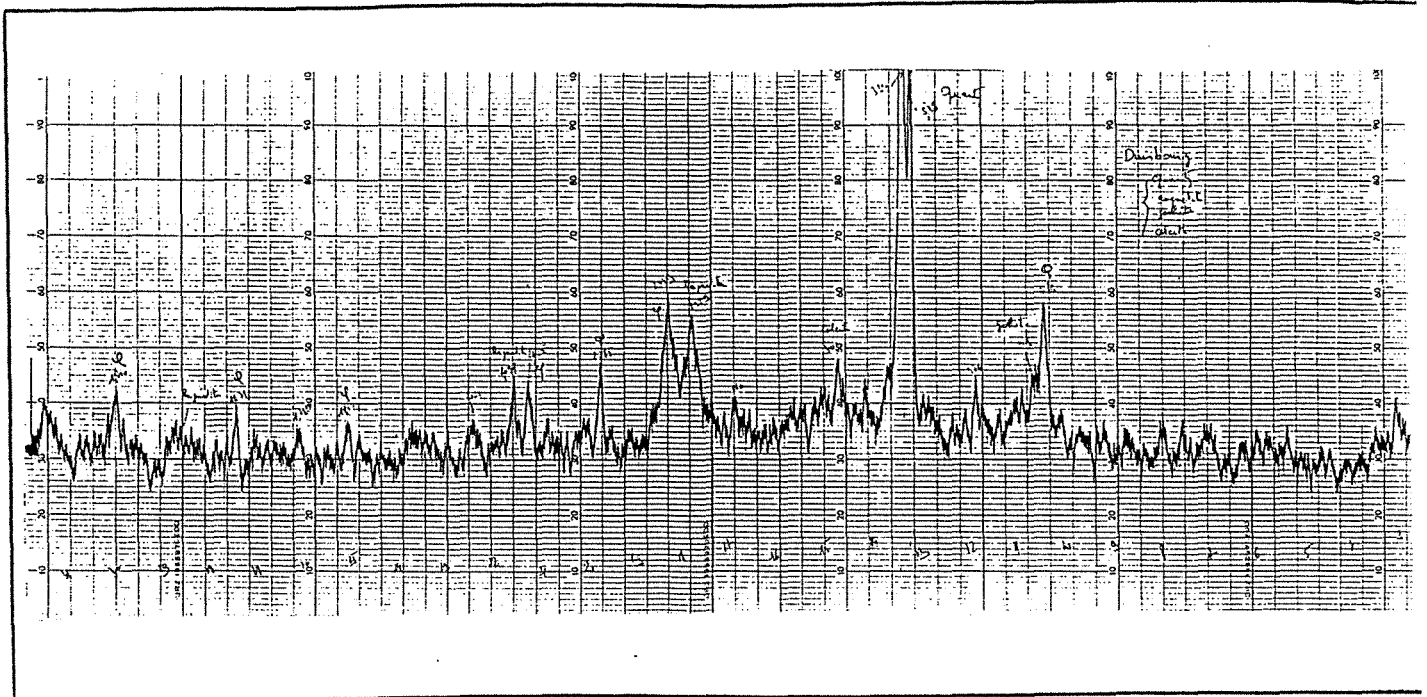


Diagramme 10 : Analyse Rayons-X (Produit "E")

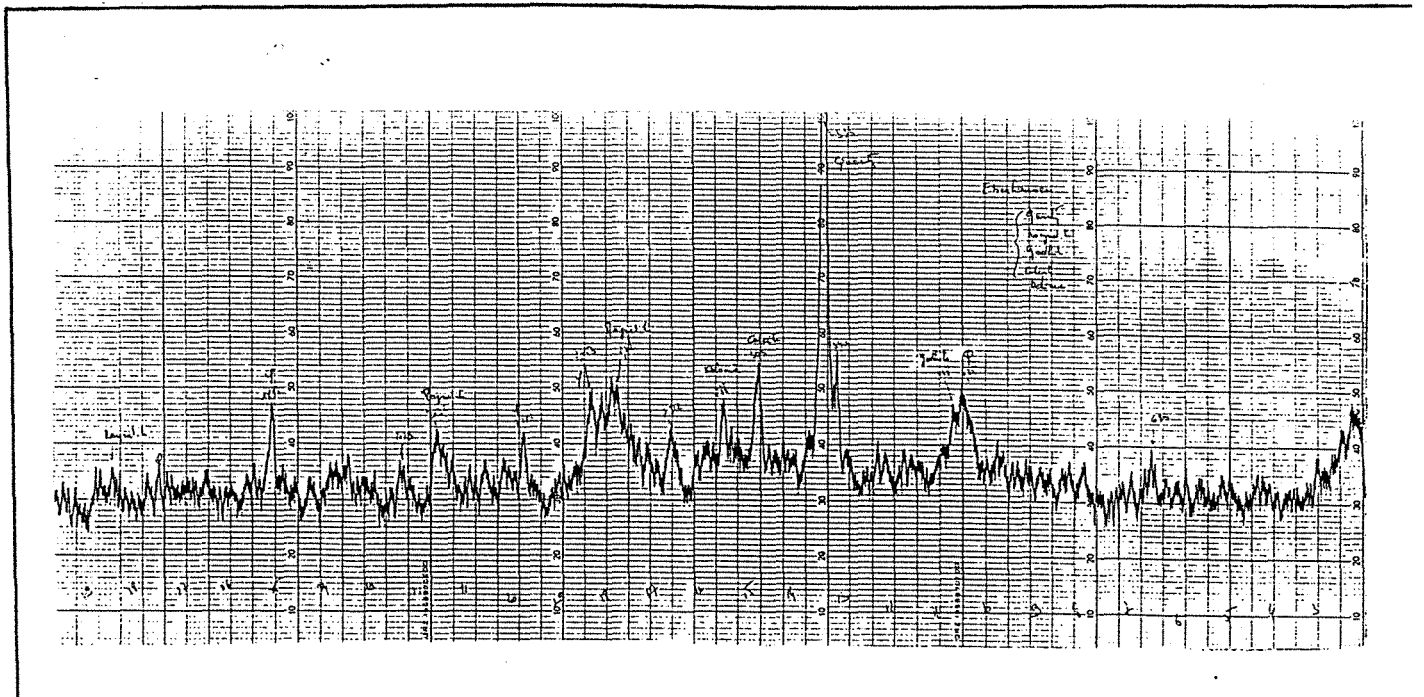


Figure III.14 : Analyse aux Rayons-X

Diagramme 11 : Analyse Rayons-X (Produit "F")

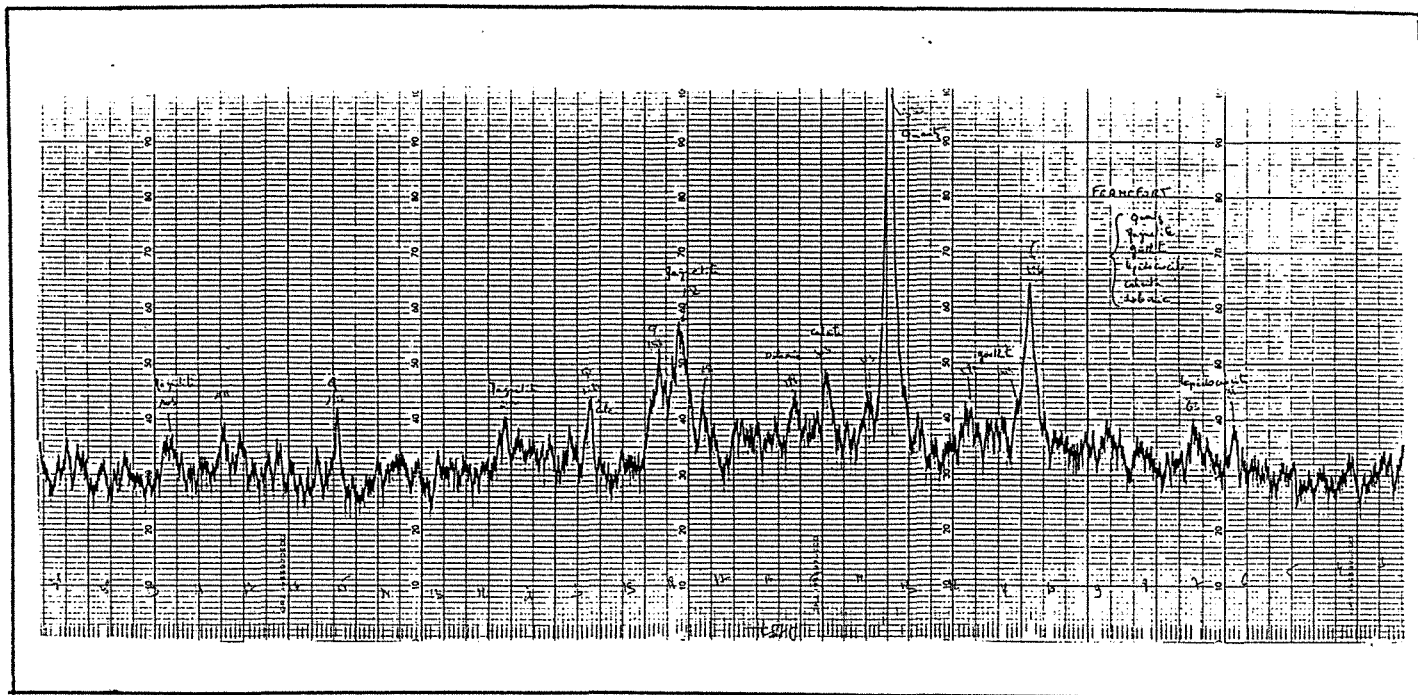


Diagramme 12 : Analyse Rayons-X (Produit "M")

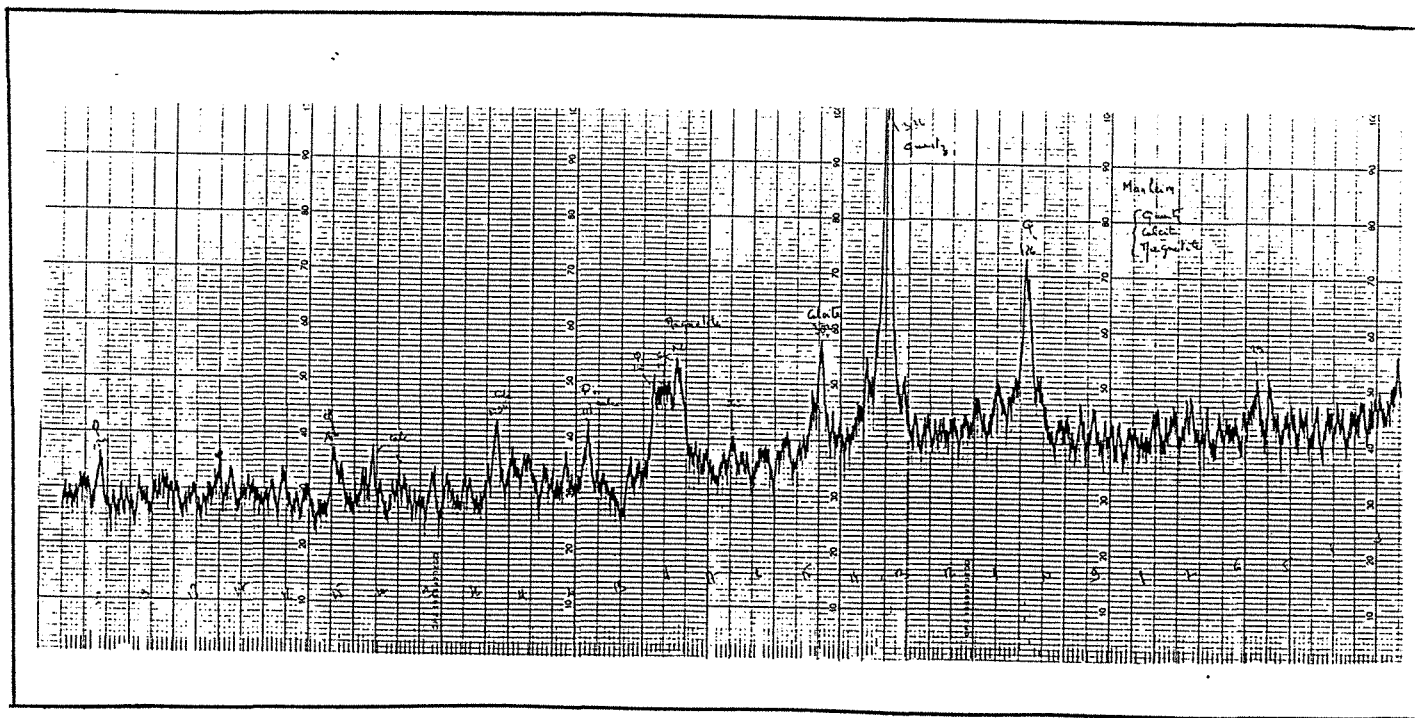


Figure III.15 : Analyse aux Rayons-X

Tranches granulométriques en mm		+ 8	+ 4	+ 2	+ 1	+ 0,5	+ 0,25	+ 0,125	< 0,125
Teneur cendre	Flottant	29	30	30	41	68	76	83	81
	Plongeant	17	25	38	58	79	74	79	82

Tableau III.18 : Teneurs en cendre des différentes tranches granulométriques

Tranche en mm	moy	% pondéraux des éléments plongeants				
		p / c	verre	aluminium	magnétique	m.n.f.
+ 8	3,94	0,46	1,01	0,75	0,49	0,97
+ 4	4,00	1,68	1,37	0,53	1,62	1,10
+ 2	2,37	1,69	2,13	0,06	1,61	0,85
+ 1	2,30	0,30	2,34	0,01	2,40	0,52
+ 0,5	5,68	0,00	0,46	0,00	1,21	0,25
+ 0,25	7,30	0,00	2,59	0,00	1,50	0,32
+ 0,125	6,49	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00
- 0,125	4,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tableau III.19 : Analyse de la composition des plongeants dans l'eau suivant les tranches granulométriques

p/c = plastique / caoutchouc
m.n.f. = métaux non ferreux hors aluminium
moy = flottant à une densité équivalente à 2

Tranches granulométriques en mm	+ 8	+ 4	+ 2	+ 1	+ 0,5	+ 0,25	+ 0,125	< 0,125
d < 1	3,23	5,09	3,19	2,22	3,84	5,16	7,46	4,28

Tableau III.20 : Analyse de la composition des flottants dans l'eau suivant les tranches

On en déduit que :

* Une grande partie de légers se trouve dans les tranches < 1 mm. Bien que contenant de la matière organique, ils correspondent plus à des inertes puisque leur teneur en cendre est supérieure à 70. %.

Selon le tableau III.18, donnant les résultats pour les plongeants dans l'eau :

- * Les fractions carbonnées légères sont plus dans les tranches > 2 mm.
- * Le **plastique** et le **caoutchouc** sont eux aussi dans la tranche > 1 mm.
- * L'**aluminium** se trouve essentiellement dans la tranche > 4 mm.
- * Les autres **métaux ferreux et non ferreux** ont une granulométrie comprise entre + 0,5mm et - 15 mm.
- * Le **verre** a une taille > 0,25 mm
- * Les teneurs en cendre (T.C.) croissent très rapidement au dessous de 1 mm, donc la fraction, présentant un intérêt pour l'incinération, est la fraction supérieure à 1mm.

CHAPITRE IV

Valorisation des fines

CHAPITRE IV

IV.1 - INTRODUCTION

La dénomination "fines riches" a été donnée à des lots dont la fraction 0 à 15 mm est riche en métaux. Les "fines pauvres" présentent une fraction 0 à 15 mm plus importante, pouvant atteindre 40 à 50 % du tout-venant, mais sont relativement pauvres en métaux.

La recherche a été effectuée uniquement sur les fines pauvres en s'inspirant des opérations en usine, qui avaient été réalisées sur les fines riches et qui avaient conduit à une valorisation industrielle comme cela est exposée ci-après.

IV.2 - TRAITEMENT ACTUEL DES "FINES RICHES" (< 15 mm) A L'USINE

Toutes les tentatives sont basées sur des techniques issues du traitement de minerai ; seule la technique de séparation par courants de Foucault est une technique spécifique, qui a été développée pour le traitement de déchets métalliques (Annexe 3).

Initialement, toutes les fines étaient éliminées par mise en décharge, ensuite et encore actuellement après criblage et lavage en colonne d'eau. La combinaison de séparateurs magnétiques et de séparateurs à courants de Foucault, appliquée sur la fraction lourde, permet la récupération de métaux ferreux et non ferreux.

La valorisation des "fines riches" < 15 mm, (présentée dans la figure IV.1) a été effectuée selon les étapes décrites ci-après :

Criblage à 4 mm

Les fines sont criblées sur une toile synthétique élastique, dont les mailles de 4 mm subissent des extensions de grande amplitude. Les particules sont soumises ainsi à des accélérations importantes en étant projetées; elles ne peuvent colmater la toile. La partie inférieure à 4 mm ("super-fines"), récupérée sous l'installation, est actuellement évacuée vers une décharge de classe II.

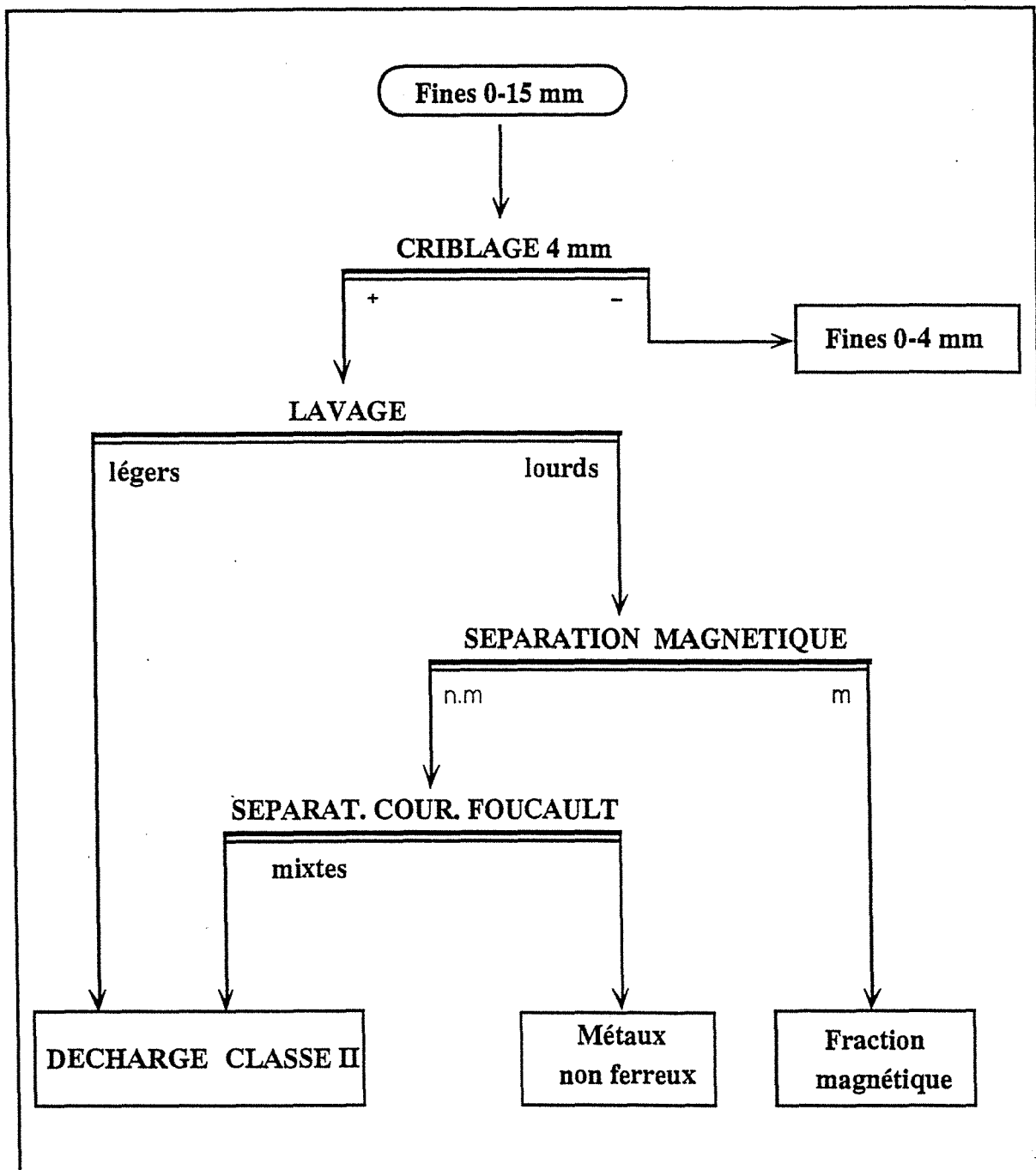


Figure IV.1 : Schéma de l'installation existante pour le traitement des fines "riches"

Lavage par colonne d'eau

Les matériaux calibrés entre 4 et 15 mm sont admis dans une colonne d'eau, où une arrivée d'eau par le fond entraîne les légers en surface, créant une fraction flottante, extraite par débordement, puis égouttée avant d'être évacuée en décharge. Cette fraction, composée essentiellement par : **les mousses, le polystyrène, le bois, les tissus**, fait l'objet de recherche de débouchés industriels pour les combustibles.

La fraction lourde, ou plongeant, est ensuite rincée sur crible, muni de rampes d'eau sous pression, et égouttée.

Il est probable qu'un "jig" à diaphragme, pourrait remplacer avantageusement la colonne d'eau pour des raisons de précision de coupures densimétriques et de moindre encombrement.

Séparation magnétique

La séparation magnétique s'exerce sur la fraction lourde, précédemment recueillie. Grâce à un séparateur magnétique, représenté par un overband, on sépare les morceaux de matériaux ferrés résiduels. Ces particules magnétiques sont vendues comme ferraille à la sidérurgie.

Séparation par courants de Foucault

Après la séparation magnétique, les fines passent dans un séparateur à courants de Foucault où, selon le principe exposé dans l'Annexe 3, les métaux non ferreux sont séparés des déchets.

Les métaux récupérés ici sont vendus "tel quels" et contiennent environ 50% d'aluminium et 50 % de métaux lourds. Par contre les déchets de cette séparation constitués par des caoutchoucs, plastiques, verres, cailloux, etc..., sont évacués vers la décharge.

IV.3 - ESSAIS EXPERIMENTAUX DE LABORATOIRE SUR LES FINES PAUVRES

S'inspirant de ce qui a été déjà réalisé sur les fines riches provenant du traitement à l'usine de Pagny, on a examiné comment pourraient être traitées les fines pauvres telles qu'elles ont été caractérisées au chapitre III.

Avant de passer à des essais de type semi-industriel, des essais préalables en laboratoire (figure IV.2) ont permis d'avoir une estimation des pourcentages et des teneurs des produits obtenus, pour un débit de l'ordre de quelques dizaines de kilogrammes à l'heure, selon la capacité des appareils de laboratoire.

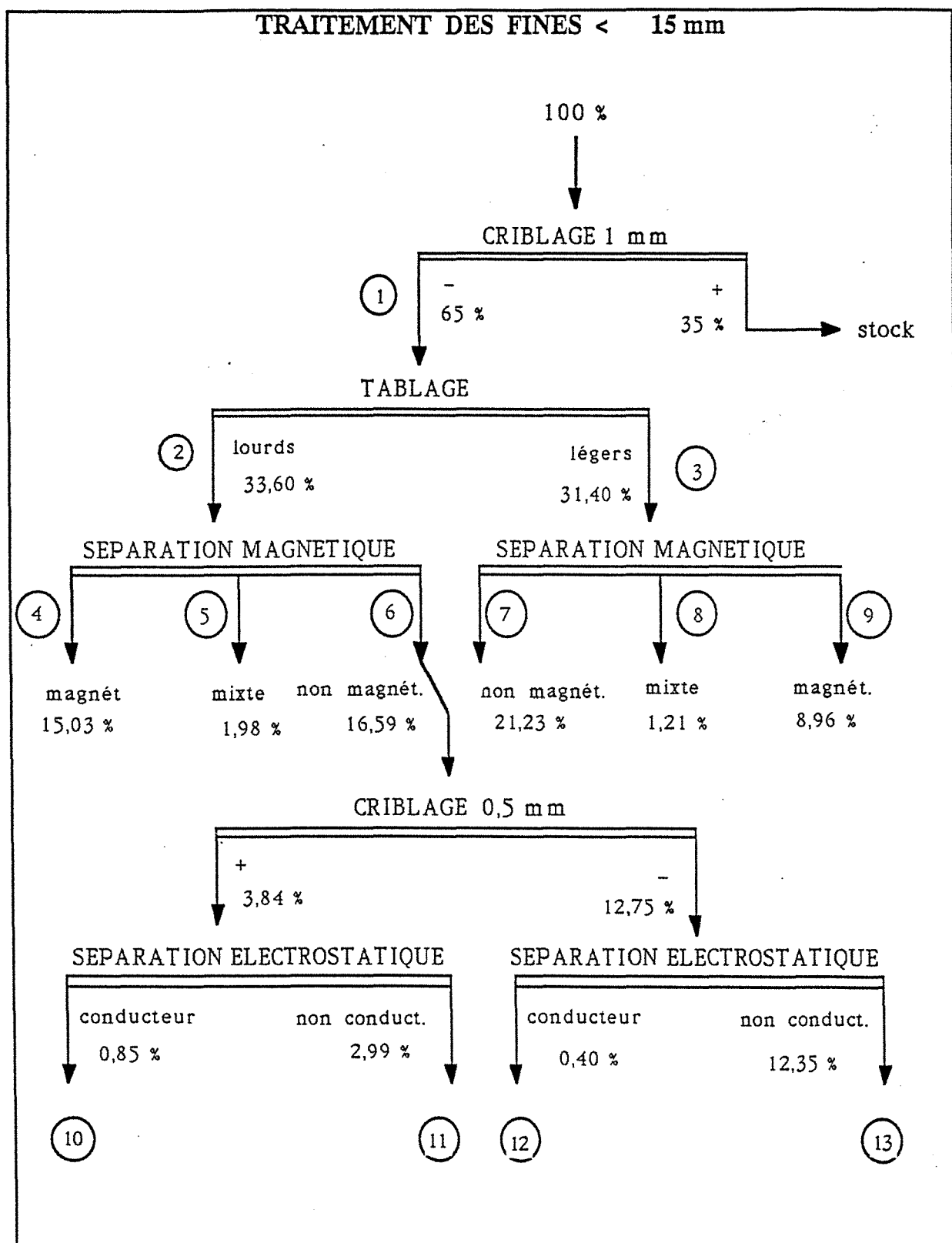


Figure IV.2 : Essai de valorisation en laboratoire sur les fines pauvres

Les fines < 15 mm sont criblées d'abord à 1 mm. La partie inférieure à 1 mm, qui représente environ 65 % en poids, est traitée ensuite sur une table à secousses (voie humide). Grâce au tablage par voie humide, on arrive à éliminer toutes les poussières et parties ultra légères (comme les peluches, polystyrènes, bois et mousses), en les récupérant comme stériles de tablage. Cette partie légère représente environ 31 % en poids de la masse initiale.

Après séchage, la fraction lourde de tablage, qui représente environ 34 % en poids, passe ensuite dans un séparateur magnétique à basse intensité réglé de la façon suivante :

- rotation de la roue polaire : 100 t/mn
- rotation du tambour : 70 t/mn
- alimentateur vibrant : 140 t/mn

La séparation magnétique permet de récupérer environ 15 % en poids sous forme de fraction magnétique; 2 % en poids sous forme de fraction mixte et environ 17 % en poids de stérile non magnétique.

Une vérification a été effectuée sur la fraction légère du tablage par séparation magnétique (avec les mêmes paramètres mécaniques que la fraction lourde). On récupère environ 9 % en poids sous forme de fraction magnétique; 1 % en poids de mixte et 21 % en poids stérile non magnétique. La fraction magnétique récupérée à partir de la fraction légère de tablage est d'une qualité qui ne répond pas aux exigences des acheteurs.

Il est évident que les résultats de tablage montre que les légers restent encore trop riches en métaux et qu'une épuration magnétique reste hypothéquée par suite de la mauvaise qualité des produits.

Il a été aussi tenté de valoriser la fraction non magnétique du tablage, en la criblant à 0,5 mm. Les deux tranches granulométriques ont été traitées séparément dans un séparateur électrostatique.

Les essais effectués ont montré que l'efficacité de la séparation électrostatique était améliorée par un criblage à 0,5 mm. Les analyses chimiques effectuées confirment aussi cette tendance. En effet, pour la tranche 0,5 à 1 mm on récupère environ 0,85 % en poids sous forme de fraction conductrice et environ 3 % en poids sous forme de fraction non conductrice. Pour la tranche inférieure à 0,5 mm la partie conductrice représente 0,4 % en poids et la partie non conductrice environ 12,35 % en poids.

Le tableau IV.1 donne les résultats des analyses chimiques multiélémentaires pour chaque produit.

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES

Produit	Elements analysés							
	Fe total	Al ₂ O ₃	Cu	SiO ₂	MgO	Ca	Zn	Cr
1	27,08	1,73	0,62	23,55	-	3,01	-	-
2	31,20	1,61	0,95	25,91	-	3,21	-	-
3	21,78	1,97	0,22	17,92	-	3,31	-	-
4	51,67	0,63	0,09	8,76	0,62	1,29	1,13	0,16
5	33,42	1,43	0,50	17,80	-	2,89	-	-
6	11,37	2,52	2,02	43,62	-	4,44	-	-
7	14,75	2,33	0,14	19,73	-	3,65	-	-
8	19,18	2,01	0,12	18,37	-	3,36	-	-
9	39,28	1,22	0,11	10,90	0,94	2,13	1,77	0,11
10	11,95	5,11	18,64	24,11	-	3,92	-	-
11	5,80	2,70	0,49	45,69	-	5,72	-	-
12	19,10	2,30	8,97	26,44	-	2,98	-	-
13	11,76	2,50	0,42	44,15	-	4,17	-	-

Tableau IV.1 : Analyses chimiques des produits obtenus par séparation en laboratoire selon la figure IV.2

LEGENDE :

- 1 - Fraction inférieure à 1 mm;
- 2 - Fraction lourde du tablage;
- 3 - Fraction légère du tablage;
- 4 - Fraction magnétique (lourdes tablage);
- 5 - Fraction mixte (lourdes tablage);
- 6 - Fraction non-magnétique (lourdes tablage);
- 7 - Fraction non-magnétique (légers tablage);
- 8 - Fraction mixte (légers tablage);
- 9 - Fraction magnétique (légers tablage);
- 10 - Fraction conductrice (supérieure à 0,5 mm);
- 11 - Fraction non-conductrice (supérieure à 0,5 mm);
- 12 - Fraction conductrice (inférieure à 0,5 mm);
- 13 - Fraction non-conductrice (inférieure à 0,5 mm).

En conclusion des essais de laboratoire :

- a) - On constate que la fraction magnétique récupérée contient jusqu'à 51,5% de fer avec une teneur en cuivre assez faible (0,09 %) et une teneur en zinc relativement élevée (1,13 %), donc on peut obtenir des concentrés magnétiques assez médiocres avec des teneurs en cuivre et zinc, proches des limites admissibles des sidérurgistes.
- b) - L'enrichissement ne s'exprime que vis-à-vis des cailloux.
- c) - L'enrichissement par tablage est peu efficace.
- d) - L'enrichissement par électrostatique peut à la rigueur avoir un intérêt pour concentrer le cuivre. La fraction conductrice de la séparation électrostatique (pour la tranche 0,5 à 1 mm) contient jusqu'à 18,64 % de Cu. Ce concentré n'a cependant aucune valeur marchande.

IV.4 - ESSAIS SEMI-INDUSTRIELS SUR LES FINES PAUVRES

L'importance pondérale de la fraction inférieure à 4 mm, d'une part, et la médiocre qualité de métaux récoltés sur la fraction supérieure à 4 mm, a conduit à examiner les possibilités de traitement des fractions inférieures à 4mm.

Des essais semi-industriels ont été effectués dans l'usine pilote de l'Ecole de Géologie de Nancy pour le traitement des ultra-fines (inférieures à 4 mm). Deux types d'essais ont été envisagés : l'essai **type 1** résume les résultats obtenus en faisant précéder le traitement magnétique d'un traitement pneumatique; et l'essai **type 2** en faisant l'inverse, c'est à dire, en faisant précéder le traitement pneumatique par une séparation magnétique.

IV.4.1 - Essai type 1

L'objectif de ce type d'essai de traitement est de récupérer les métaux, hors aluminium, par tablage pneumatique et séparation magnétique, après criblage à 1 mm, de les broyer à 0,5 mm, pour tenter d'éliminer les verres et les cailloux et augmenter l'efficacité des séparations.

L'essai a été effectué sur un échantillon d'environ 600 kg (figure IV.3). Le criblage du produit brut n'a pas été possible avec les cribles classiques à cause du fort colmatage dû à l'humidité et à la présence des peluches et fils de cuivre. L'ensemble a donc été séché avant criblage.

La fraction de 1 à 4 mm a été traitée sur une table pneumatique à secousses, où on a récupéré :

- ▶ 17,6 % en poids de stériles (peluche, mousse, polystyrène, bois, caoutchouc, plastiques etc)
- ▶ 30,8 % en poids de fraction mixte composée par des verres, métaux et cailloux;
- ▶ 6,6 % en poids de concentré composé de métaux, cailloux et verres.

Une séparation magnétique à basse intensité, effectuée sur le concentré du tablage, permet de récupérer environ 2,1 % en poids sous forme de fraction magnétique. Le résidu non magnétique subit un broyage suivi par un criblage à 0,5 mm en circuit fermé.

Les verres et les cailloux, plus faciles à broyer, sont récupérés dans la tranche inférieure à 0,5 mm, représentant environ 2,25 % en poids. Les métaux plus résistants au broyage restent dans la partie supérieure à 0,5mm qui représente aussi 2,25 % en poids.

L'ensemble des opérations est résumé sur la figure IV.3.

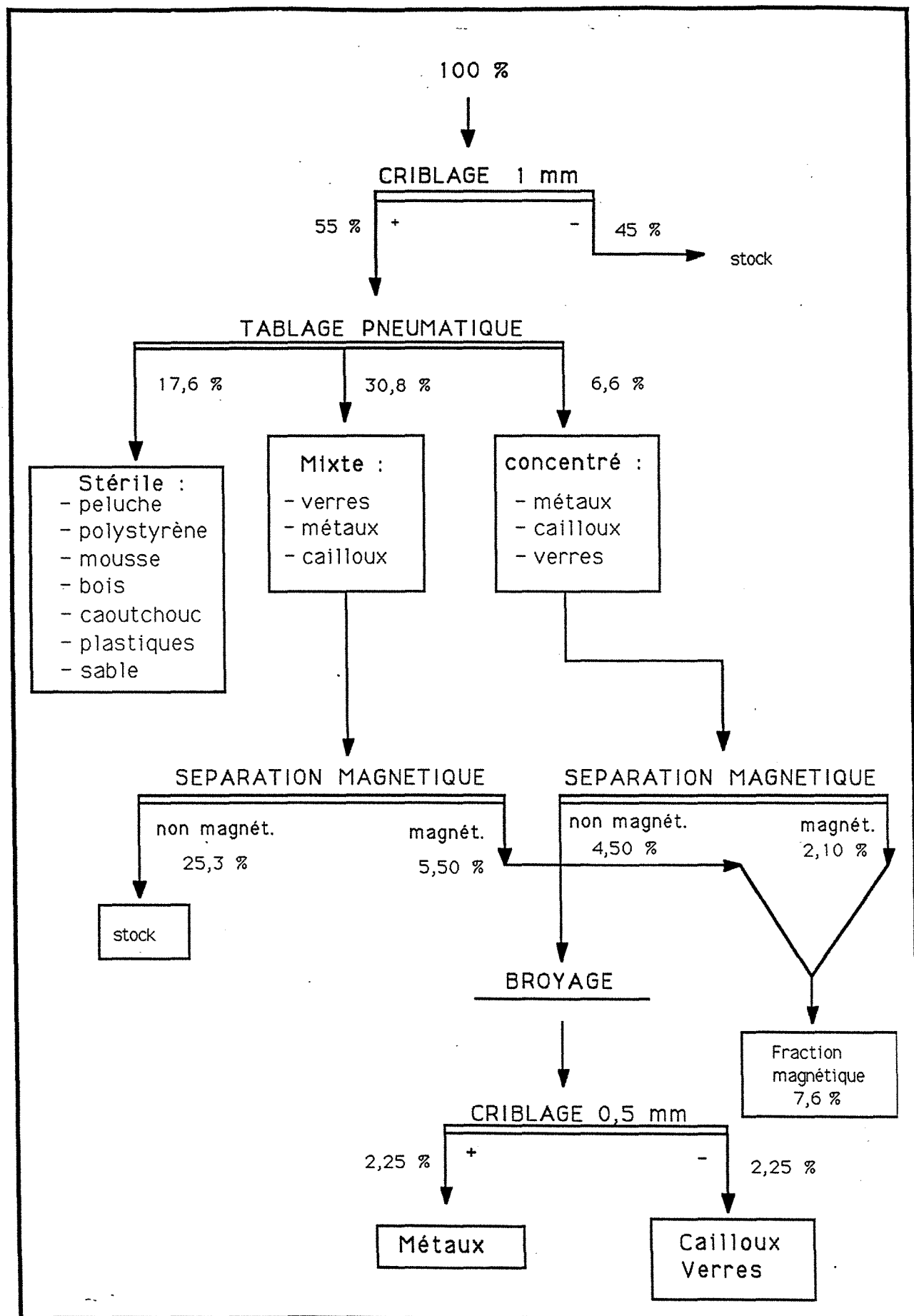


Figure IV.3: Essai type 1 de valorisation des fines 0 - 4 mm

IV.4.2 - Essai de type 2

500 kg d'ultra-fines ont été calibrés à 4 mm. Cette fois-ci, l'ensemble n'a pas été séché avant le traitement. L'humidité était de l'ordre de 3%.

Le schéma a été simplifié et a comporté deux seules étapes (figure IV.4), afin de privilégier la constitution d'une fraction légère abondante, extraite au niveau de la séparation pneumatique et, dont la qualité non polluante restait à démontrer. La séparation magnétique a été effectuée sur un séparateur à basse intensité avec les paramètres suivants :

- vitesse de roue polaire environ 100 t/mn;
- vitesse de tambour magnétique 70 à 72 t/mn;
- vitesse de l'alimentateur vibrante 140 à 160 t/mn;
- capacité horaire 25 kg/h

Après la séparation magnétique on récupère environ 20,5 % en poids de fraction magnétique ; 1,5 % en poids de mixte et 78 % en poids de fraction non magnétique. Les non-magnétiques passent dans le tablage pneumatique d'où on récupère 5,39 % en poids de "concentrat" représenté par métaux, verres et cailloux, ainsi qu'environ 42,6 % de légers constitués de mousse, bois, polystyrène, caoutchouc, plastiques et sable. La quantité des lourds de tablage (concentré), contenant encore des métaux, peut être récupérée en les passant dans la séparation à courants de Foucault.

Les résultats des analyses chimiques, présentés dans le tableau IV.2 et dans la figure IV.5, montrent que concernant le produit léger de tablage (stérile) :

- a) - la teneur en chlore 0,46 % est inférieure à la norme établie ($< 0,5 \%$);
- b) - la somme des métaux V+Cu+Pb+Zn+Ni+Cr+Ti+Mn+As est aussi inférieure à la norme : 920 mg/kg (norme < 2000 mg/kg).

En conclusion des essais semi-industriels :

- ☐ La filière, dite type 1, ne traite que 55 % des fines. Le tablage pneumatique, opéré en tête du traitement des refus à 1 mm, favorise la production d'un stérile important, composé d'éléments légers.
- ☐ La filière, dite type 2, présente l'intérêt de donner une abondante fraction magnétique. Etant donnée l'utilisation du zinc comme protection du fer, il est logique que la fraction magnétique permette de concentrer le zinc (tableau IV.2). Il en est de même pour les éléments cuivrés superficiellement.
- ☐ La différence majeure entre les deux filières, reside dans le fait que la fraction magnétique est beaucoup plus abondante dans le cas de la filière 2, que de la filière 1. Ce résultat reçoit une explication dans le fait que la fraction brute 0-1 mm est enrichie en fer. Par contre, la filière 1 privilégie la production d'un concentré de métaux non ferreux.

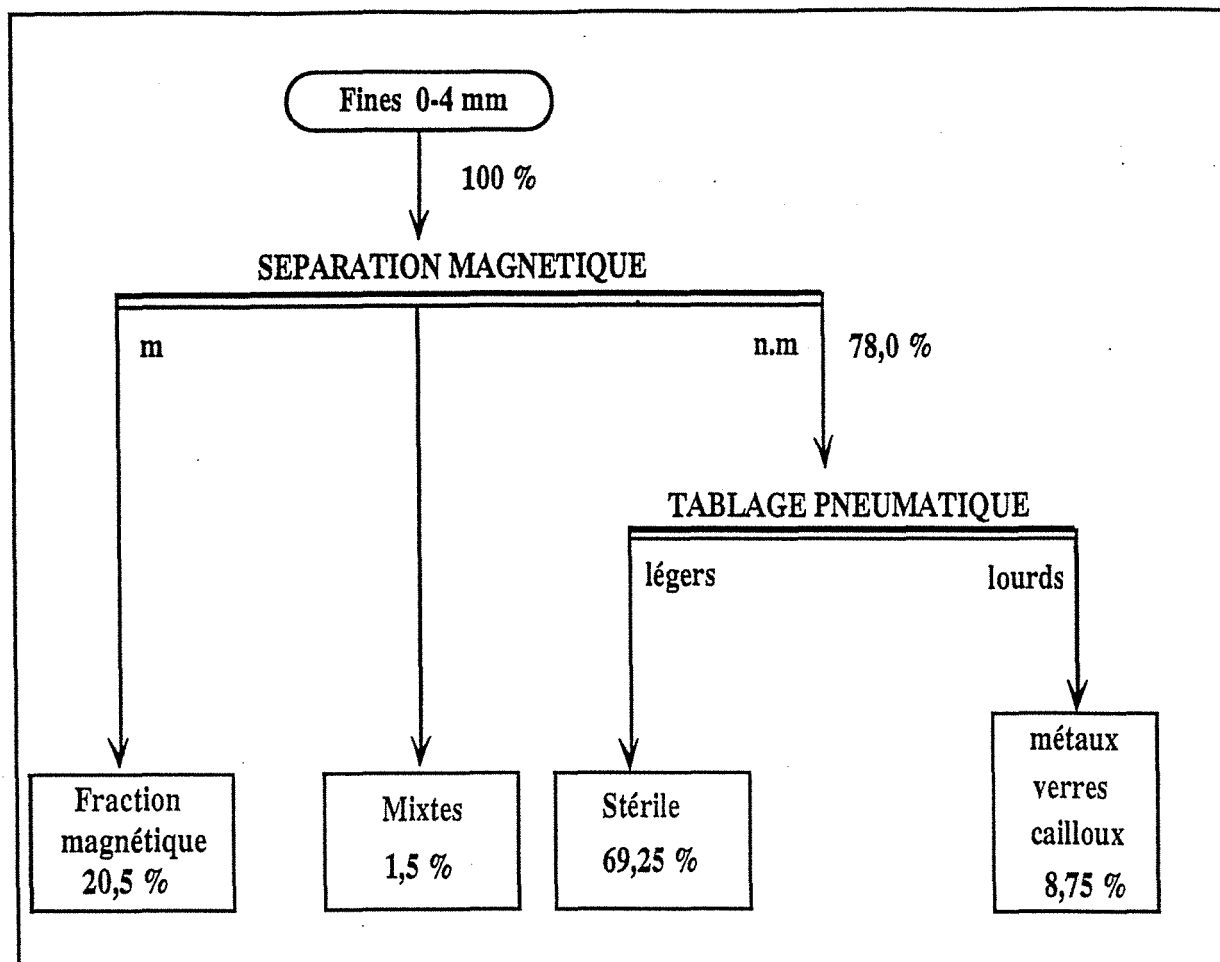


Figure IV.4 : Essai type 2 de valorisation des fines 0 - 4 mm

Eléments	Brut	Fraction magnétique	Fraction mixte	Fraction non magnétique	Fraction lourde tablage	Fraction stérile tablage
Cl %	0,43	0,41	0,63	0,44	0,31	0,46
Fe ppm	10,27	18	4	8,36	35	5
Cu ppm	16,22	46	8	8,56	13	8
Al ppm	10,56	3	5	12,66	10	13
Zn ppm	58,7	240	27	37,41	17	40
Pb ppm	6,16	7	2	6,02	30	3
Ni ppm	1,82	5	< 1	< 1	< 1	< 1
Mn ppm	15,10	70	1	0,95	0,5	1
Mg ppm	7,23	750	780	716	50	800
Cr ppm	34,20	< 1	46	42,7	< 1	48
Ti ppm	0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
As ppm	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
V ppm	< 0,5	< 0,5	0,8	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Si %	6,41	1,91	5,56	7,61	7,72	7,60

Tableau IV.2 : Résultats des analyses chimiques concernant l'essai type 2 sur la valorisation semi-industrielle des fines 0-4 mm

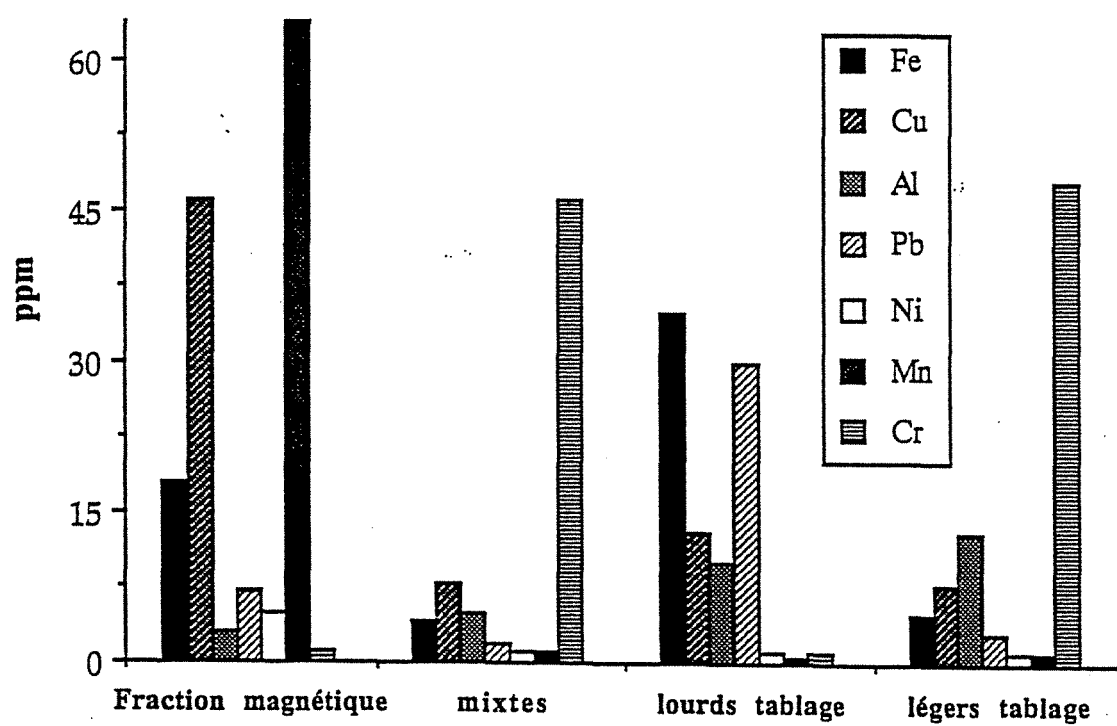
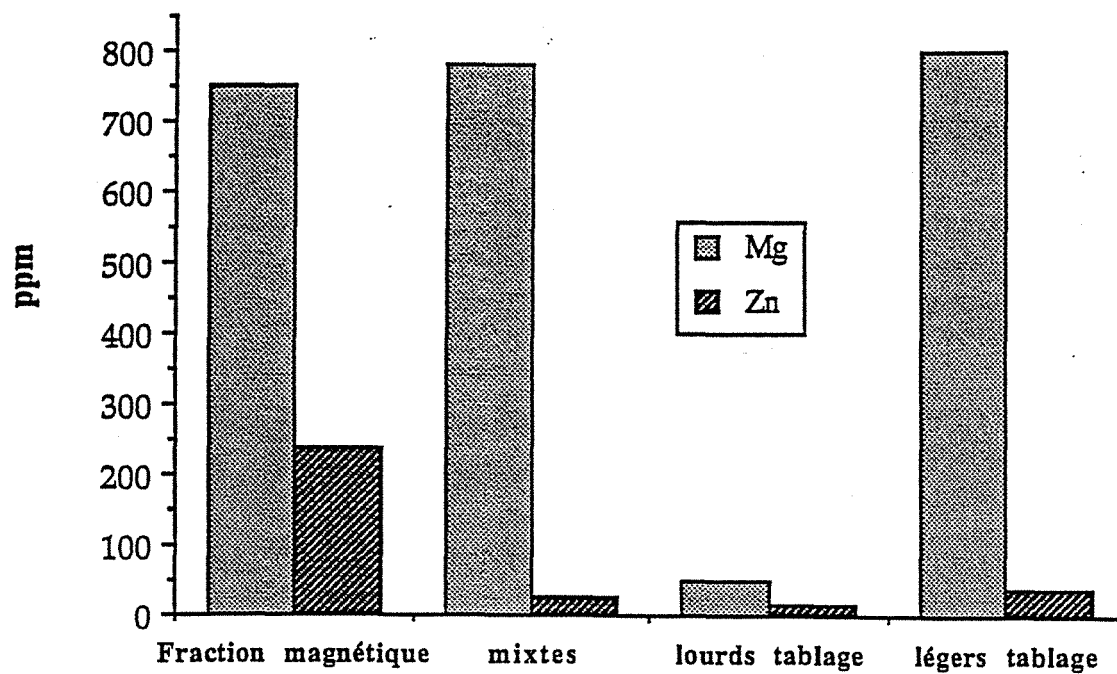


Figure IV.5 : Graphiques représentant les éléments mineurs des différents produits, obtenus par la filière type 2

IV.5 - ESSAIS INDUSTRIELS SUR LES FINES PAUVRES

Deux types d'essais ont été effectués:

- ❶ avec les techniques classiques, utilisés dans l'usine de Pagny-sur-Meuse ;
- ❷ avec des techniques nouvelles chez des fabricants de matériel - Les sociétés :
 - "ERIEZ MAGNETICS", pour la séparation magnétique et les courants de Foucault ;
 - "BIRTLEY", pour le tablage pneumatique.

Compte tenu des essais en laboratoire et des résultats sur les fines riches, les fines "pauvres" inférieures à 15 mm (sortants du premier criblage) et destinées pour le moment à la décharge, ont fait l'objet d'essais à l'échelle industrielle dans l'installation actuelle de l'usine, qui sert à traiter les fines "riches", afin de récupérer les métaux ferrés, l'aluminium et les métaux lourds (figure IV.6).

Le criblage à 4 mm donne 45 % en poids de 4 à 15 mm et 55 % en poids de 0 à 4 mm et est générateur d'une quantité de poussière qui pouvant être éliminée par une bonne aspiration. La fraction 0 à 4 mm n'a pas fait l'objet d'essais industriels dans l'installation existante de l'usine.

IV.5.1 - Essais sur la fraction 4 à 15 mm avec les techniques classiques de l'usine

La partie supérieure à 4 mm a subi un lavage dans une colonne d'eau. Après lavage, on récupère un produit léger qui représente environ 21 % en poids et qui est constitué de: **mousse, polystyrène, bois et caoutchouc**. Cette partie contient peu de métaux, comme le montrent les analyses effectuées sur ce produit (Tableau IV.3).

La fraction lourde de la colonne d'eau passe en séparation magnétique effectuée par un overband. On récupère environ 2,82 % en poids sous forme de fraction magnétique. Le restant, soit environ 22 % en poids, est non magnétique et passe dans le séparateur à courants de Foucault, d'où on récupère 2,13 % en poids de métaux mélangés (aluminium et métaux lourds) qui peuvent être vendus "tel quel".

Les "stériles" de la séparation à courants de Foucault contiennent encore des métaux. C'est pour cela qu'un deuxième passage (après un stockage intermédiaire) dans le séparateur magnétique et dans le séparateur à courants de Foucault s'avère nécessaire et serait avantageux.

			Fraction mixte	Fraction légère
Méthode	Unité	Valeur		
Halogènes organiques extractibles (Chlore)		%	0,064	0,43
Paramètres indésirables				
Soufre		%	0,566	0,46
Eléments métalliques				
Chrome	NFT 90-112	mg/kg de MS	1 225,0	441
Cadmium	NFT 90-112	mg/kg de MS	22,1	26
Nickel	NFT 90-112	mg/kg de MS	624,7	215
Plomb	NFT 90-112	mg/kg de MS	11 140,0	126
Zinc	NFT 90-112	mg/kg de MS	1 650	7 808
Cuivre	NFT 90-112	mg/kg de MS	15 030,0	9 915
Manganèse	NFT 90-112	mg/kg de MS	1 292,0	766
Mercure	NFT 90-113	mg/kg de MS	0,8	-
Titane	NFT 90-112	mg/kg de MS	371,9	3 043
Arsenic	SAA HYDRURE	mg/kg de MS	11,6	12
Vanadium	NFT 90-112	mg/kg de MS	39,1	24
Total métaux		mg/kg de MS	31 407,2	24 287
Autres composés organiques				
PCB		ppm	< 16	< 10
PCI		J/g	6 588	11 421
Teneur en cendres		%	55,4	32,0

Tableau IV.3 : Résultats des analyses chimiques sur la fraction légère et la fraction mixte, obtenus après la valorisation industrielle selon le schéma présenté dans la figure IV.6

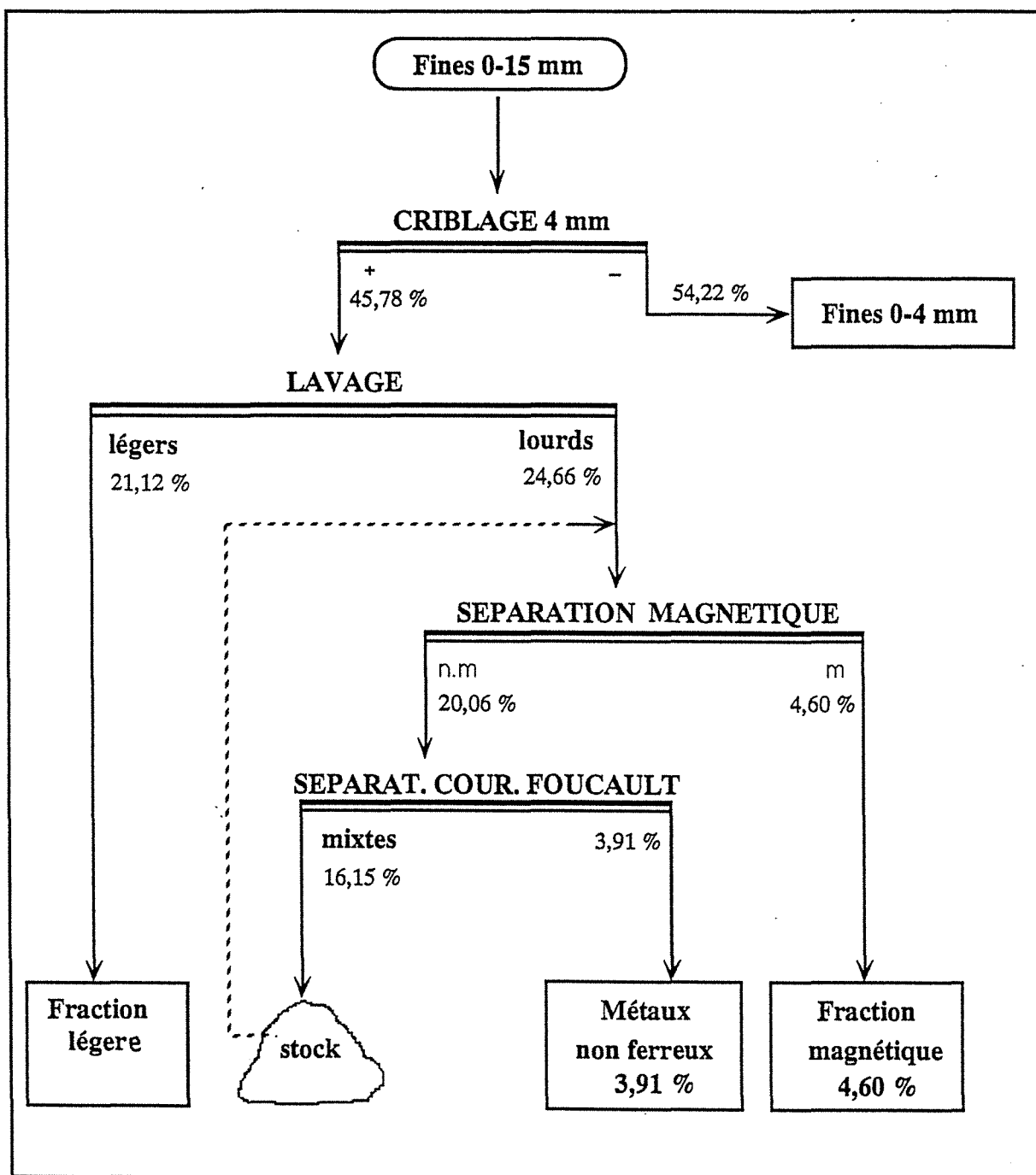


Figure IV.6 : Valorisation industrielle de la fraction 4-15 mm des fines pauvres dans l'installation existante de LORMET

Comme résultat du deuxième passage on peut récupérer encore environ 1,78 % en poids sous forme de fer et oxydes de fer et environ 1,78 % en poids sous forme de métaux.

En conclusion, en utilisant l'installation actuelle de traitement des fines, on peut traiter les fines "pauvres" inférieures à 15 mm avec les résultats suivants (figure IV.6):

- 55,00 % ultra-fines (inférieures à 4 mm)
- 4,60 % fraction magnétique (fer et oxydes de fer)
- 3,90 % métaux (aluminium et métaux lourds)
- 16,50 % stériles du traitement par courants de Foucault;
- 21,00 % stériles légers de lavage en colonne d'eau.

L'apport le plus attractif de cette méthode est de délivrer un produit léger, qui pour l'instant répond bien aux conditions de mise en décharge, étant donné son faible contenu de polluant.

IV.5.2 - Essais avec des techniques nouvelles

IV.5.2.1 : Magnétisme et courants de Foucault

Des essais sur la valorisation des fines 0 à 15 mm ont été effectués en collaboration avec la société ERIEZ MAGNETICS Ltd (Grande Bretagne). Une première variante est basée sur le traitement intégral de la partie 0 à 15 mm (figure IV.7), en cinq stades de séparation magnétique (pour arriver à récupérer 40,40 % en poids sous forme de fraction magnétique) et deux stades de séparation par courants de Foucault (pour arriver à récupérer 2,93 % en poids sous forme de métaux non ferreux et 56,67 % sous forme de stériles).

La deuxième variante selon le procédé ERIEZ MAGNETICS Ltd, présentée dans les figures IV.8.a et IV.8.b, consiste à traiter selon deux filières le < 4 mm et le > 4 mm. Chaque tranche granulométrique est traitée par trois ou quatre stades de séparation magnétique, suivis par deux stades de séparation par courants de Foucault.

On arrive à récupérer environ 41,15 % en poids sous forme des fractions magnétiques; 1,66 % en poids de métaux non ferreux et environ 57,19 % en poids de stériles, avec un coût de traitement beaucoup plus élevé pour des résultats quasiment semblables.

Une troisième variante (figure IV.9), excluant la séparation à 4 mm et s'inspirant de la première variante, réduit le nombre de séparations magnétiques au profit des séparations par courants de Foucault. Il faut cependant noter que les deux dernières variantes (figures IV.8.a,b et IV.9) donnent des récupérations de non ferreux inférieures à celle de la première variante, en favorisant la récupération des produits magnétiques.

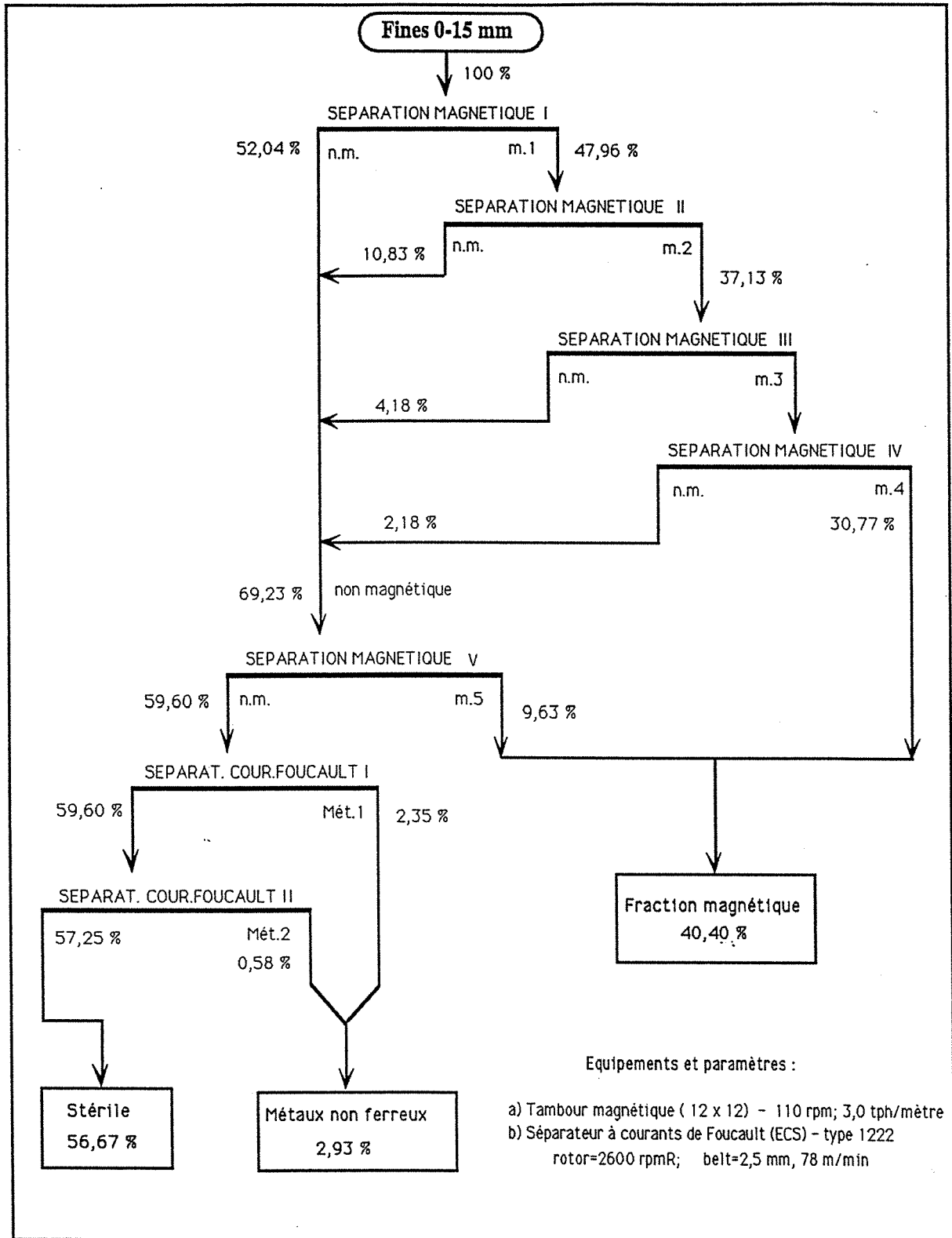


Figure IV.7 : Première variante selon procédé ERIEZ MAGNETICS avec un traitement intégral de la fraction 0-15 mm

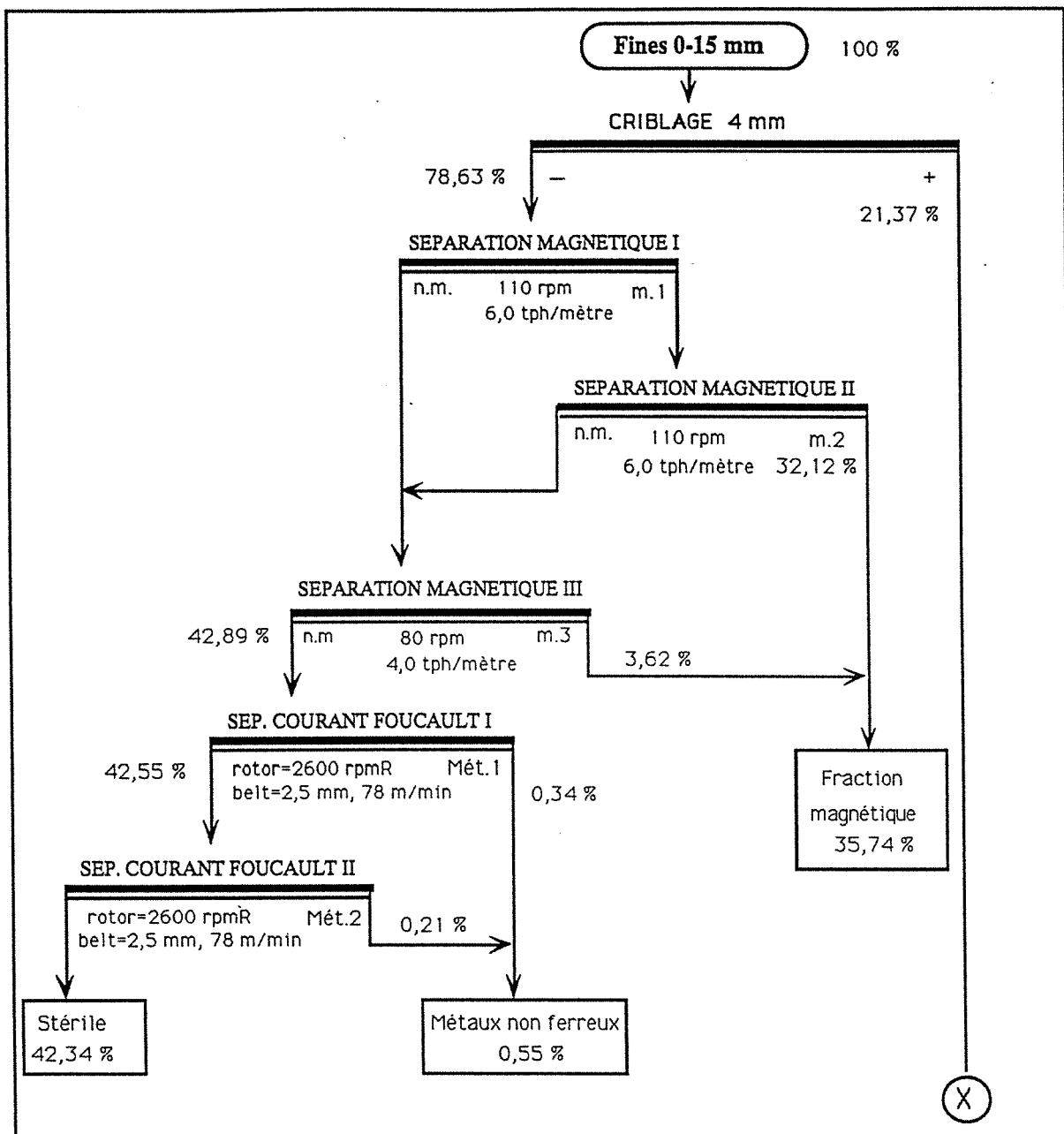


Figure IV.8.a : Deuxième variante selon procédé ERIEZ MAGNETICS, concernant la fraction 0-4 mm

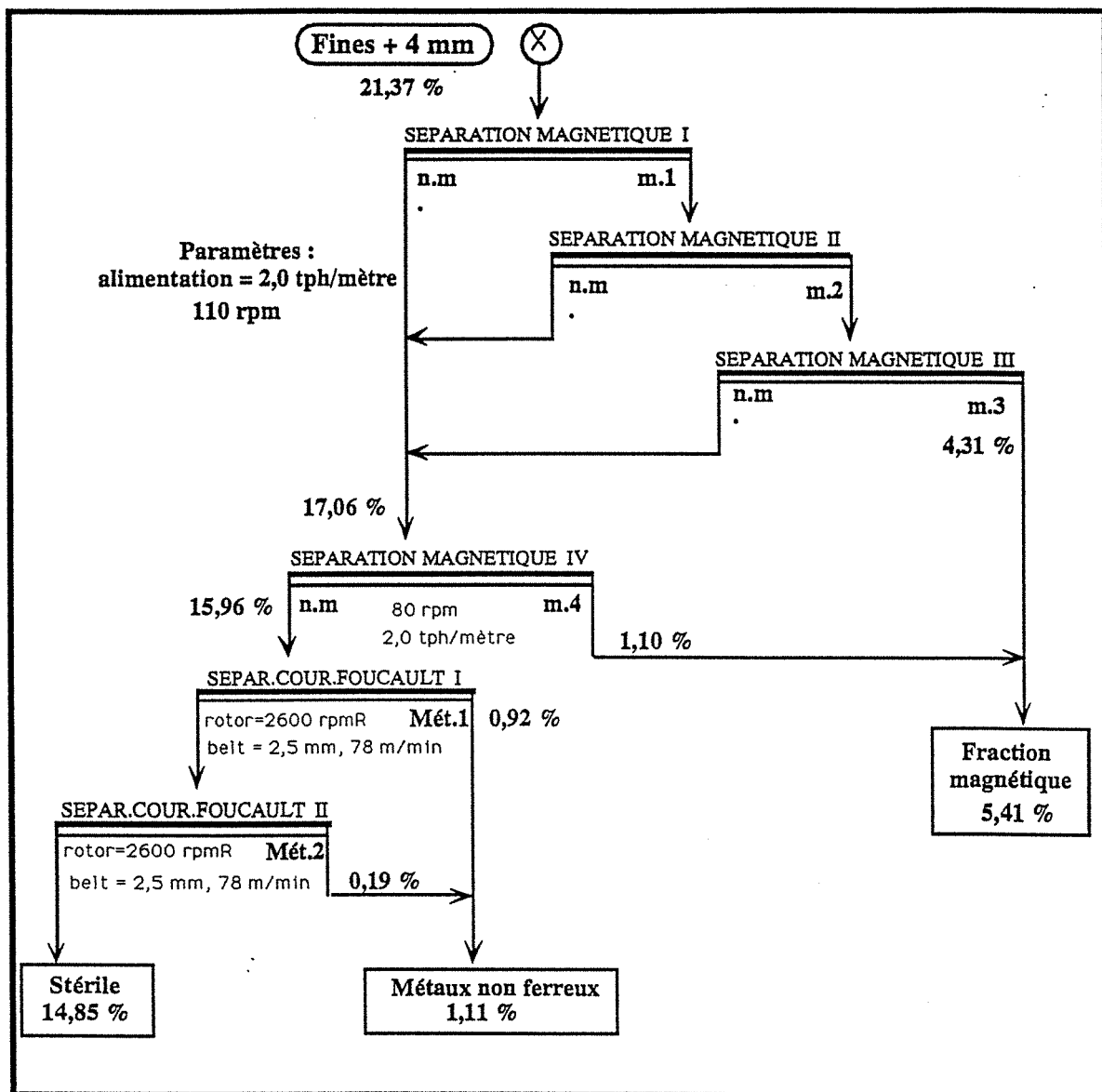


Figure IV.8.b : Deuxième variante selon procédé ERIEZ MAGNETICS, concernant la fraction 4-15 mm

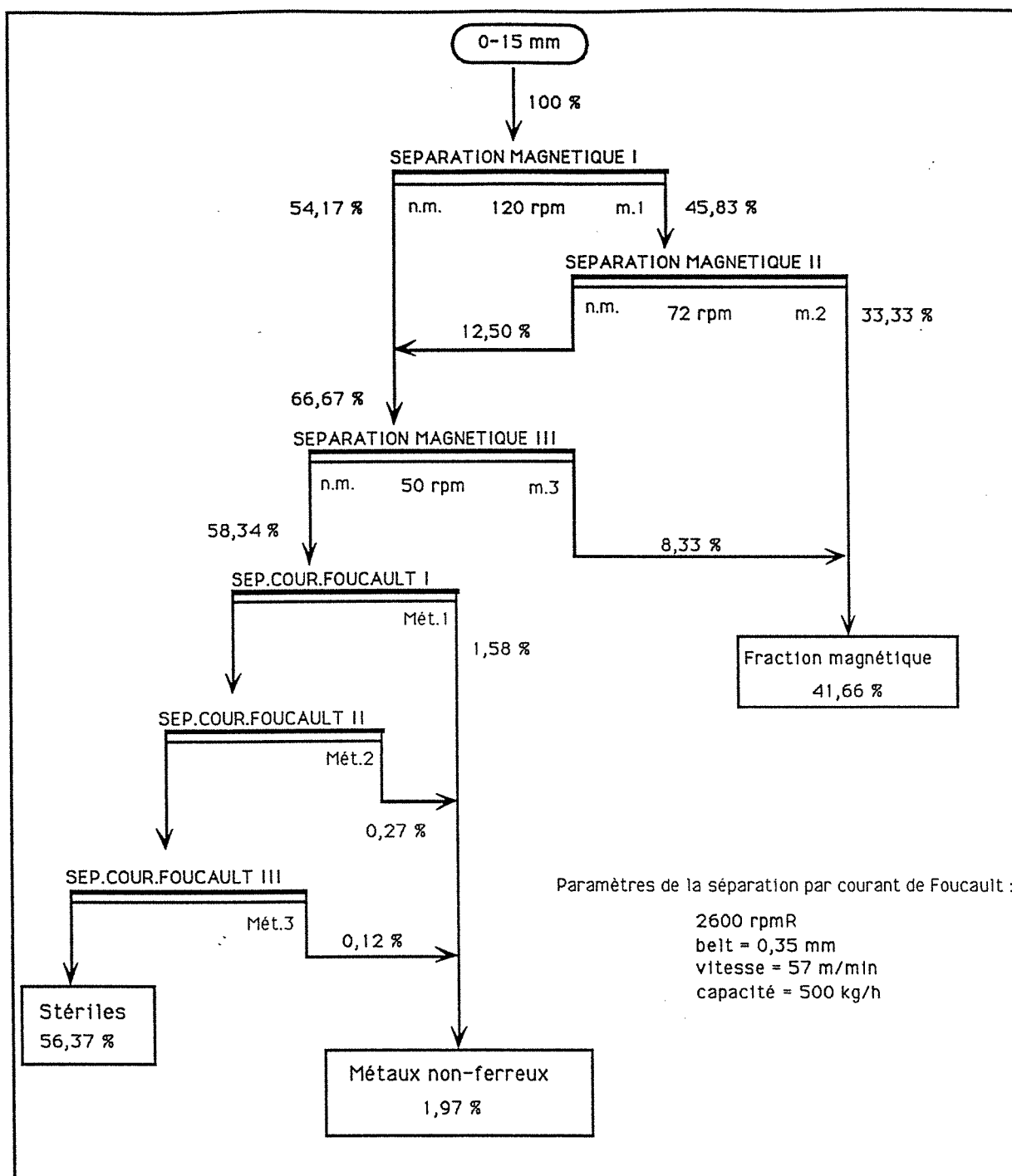


Figure IV.9 : Troisième variante selon technique ERIEZ, avec remplacements d'une partie des séparations magnétiques par des séparateurs à courants de Foucault

IV.5.2.2 - Séparation pneumatique :

En collaboration avec la société "BIRTLEY" (Belgique), on a effectué des essais sur la partie 0 - 4 mm des fines, selon un schéma simple (figure.IV.10) : un premier tablage pneumatique est suivi par un deuxième tablage de la fraction lourde.

On arrive à récupérer environ 36 % en poids des légers carbonés, sous forme de bois, mousse, polystyrène, et 42 % en poids des lourds qui sont traités par le deuxième stade de tablage.

A la fin des deux tablages successifs, toutes les fractions récupérées sont séparées par magnétisme à basse intensité, afin d'enlever les parties magnétiques.

En résumé l'opération globale produit :

- **un 1er produit léger**, qui représente environ 13 % en poids, et comprenant les poussières d'aspiration des deux tablages, récupérées dans des filtres à manches.
- **un 2ème produit léger**, représentant environ 71,04 % en poids, et comprenant les légers **l.1** (36 %) et **l.2** (32,68 %) ainsi que les mixtes-légers **m.l.2** (2,36 %) des deux tablages, composés de bois, polystyrène, mousse et autres produits carbonés.
- **un produit mixte, m.1**, environ 12 % en poids, composé de cailloux et de verres, et pouvant faire si nécessaire l'objet d'un retraitement en circuit fermé.
- **un produit lourd** environ 3,96 % en poids, qui comprend les lourds **L.2** (2,97 %) et les mixtes lourds **m.L.2** (0,99 %), composé principalement de métaux non ferreux.
- **un produit magnétique** environ 15,64 % en poids, qui comprend les parties magnétiques de toutes les fractions récupérées (sauf les poussières).

Les caractéristiques techniques, domaines d'application ainsi que les principes de fonctionnement de la table pneumatique BIRTLEY sont présentées dans l'Annexe 9.

La qualité des produits, donnée dans le tableau IV.3, conduit à faire les regroupements de produits suivants (après les deux tablages pneumatiques successifs) - voir figure IV.11 :

- ❶ Les poussières d'aspiration du premier et deuxième tablage **p.a** - (13 % en poids).;
- ❷ Les légers (**l.1**) et mixtes (**m.1**) du premier tablage (**l.1 + m.1**) - 48 % en poids;
- ❸ Les légers (**l.2**) et mixtes-légers (**m.l.2**) du deuxième tablage (**l.2 + m.l.2**) - 35,04 %;
- ❹ Les mixtes lourds (**m.L.2**) et les lourds (**L.2**) du deuxième tablage (**m.L.2+L.2**) 3,96 %;

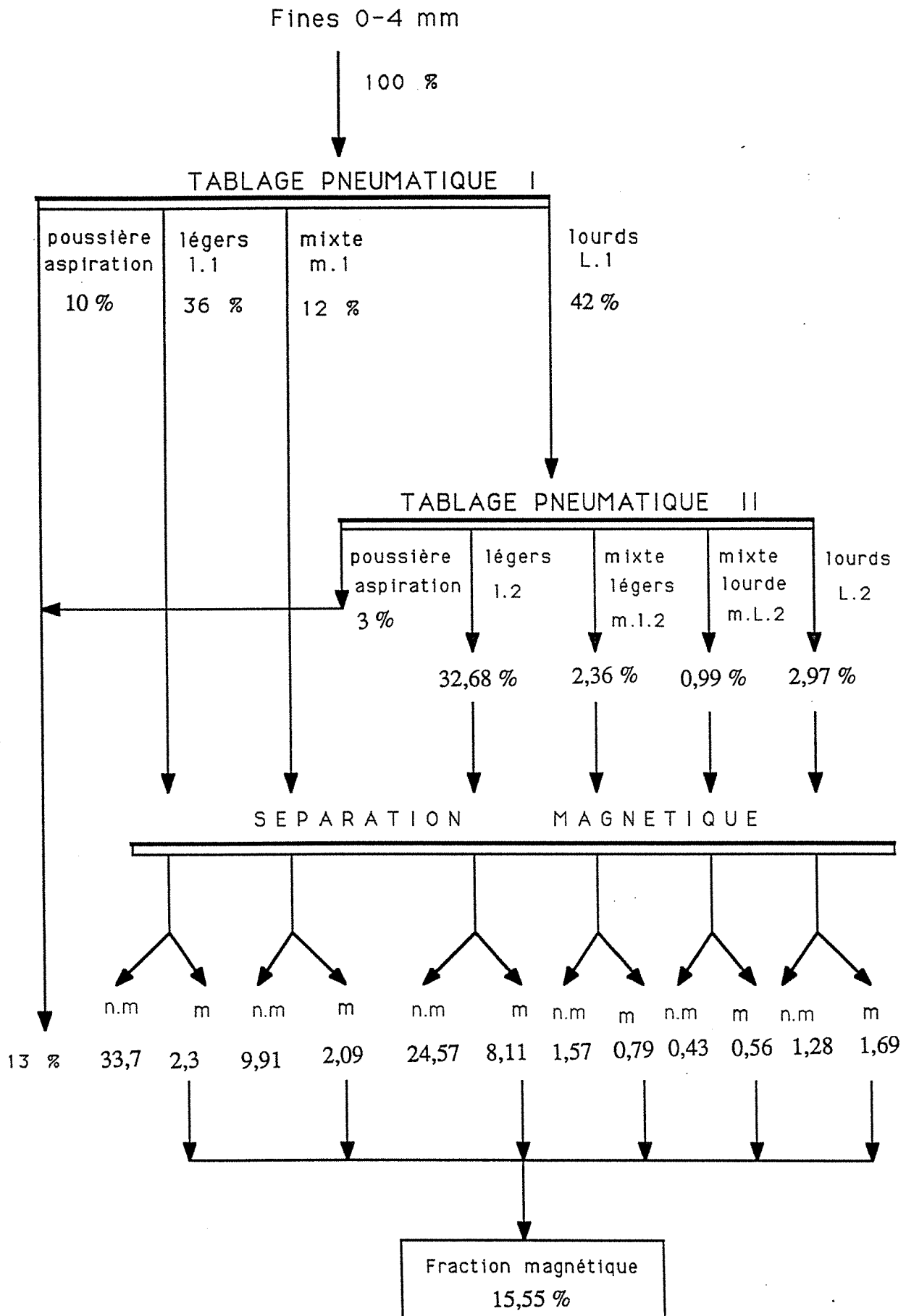


Figure IV.10 : Valorisation de la fraction 0 - 4 mm selon technique "BIRTLEY"

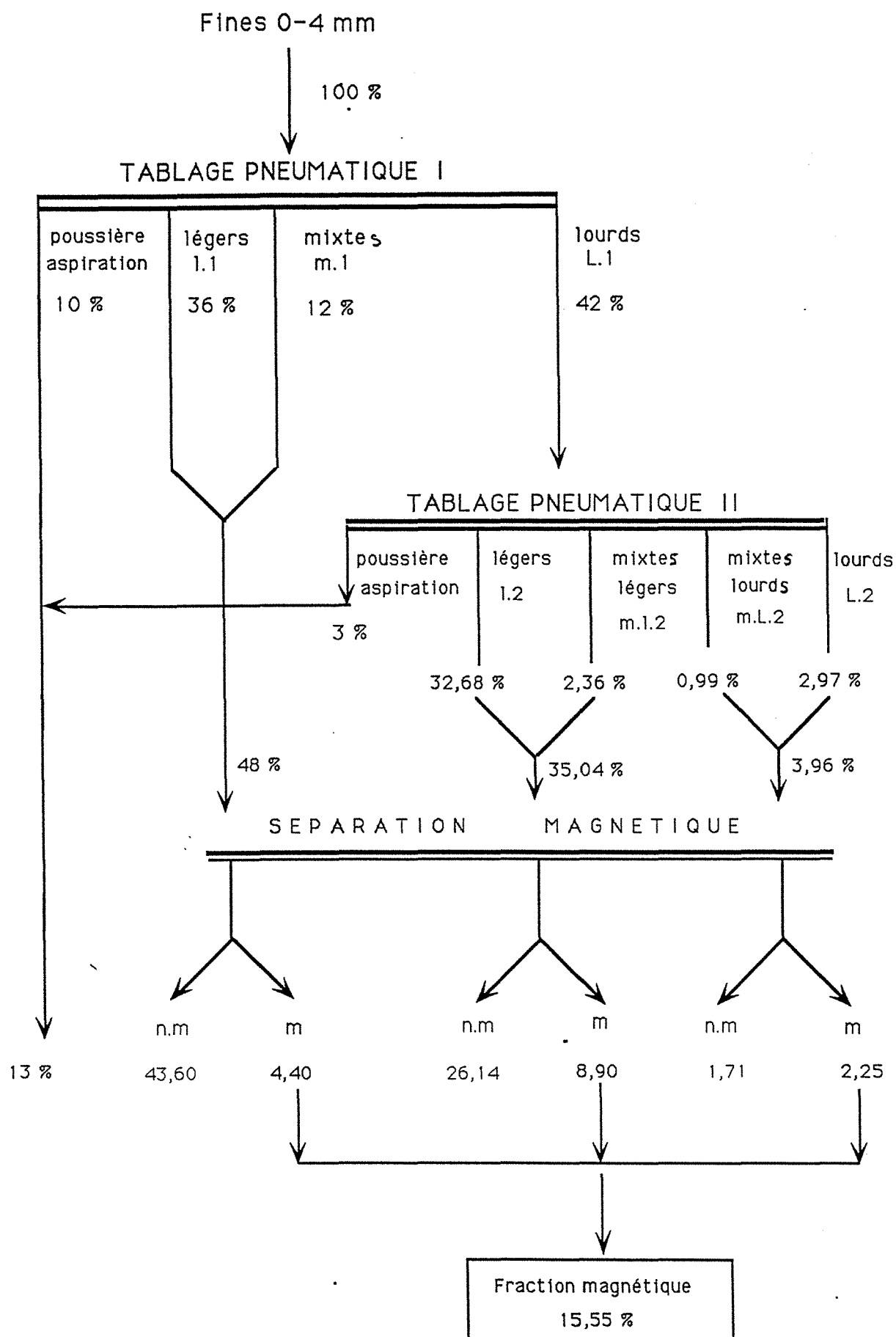


Figure IV.11: Regroupement des produits obtenus après les essais par technique "BIRTLEY"

Eléments	Brut	P.a	l.1	m.1	l.1+m1	L.1	l.2	m.l.2	l.2+m1.2	m.L.2	L.2	L.2+mL.2	Taux de conc.(%)	Taux de recup.(%)
S (ppm)	0,45 %	0,71 %	0,5 %	0,54 %	0,51 %	330	< 300	< 300	300	< 300	< 300	300	0,34	
Cl (ppm)	1,14 %	4,47 %	0,56 %	0,65 %	0,58 %	667	0,45 %	<300	440	<300	< 300	300	0,32	
As (ppm)	29,36	130	16	2	12,5	24	15	18	15,2	12	19	17,25	0,58	2,32
Hg (ppm)	6,30	13	5	1,5	4,125	3,6	2,6	1,6	2,53	10	5	6,25	0,99	3,92
V (ppm)	124	93	144	136	142	108	105	97	104,46	100	170	152,5	1,23	4,87
Cd (ppm)	58	73	74	50	68	44	37	32	36,66	50	93	82,25	1,42	5,61
Ni (ppm)	349	550	370	270	345	306	220	324	227	380	975	826	2,36	9,37
Zn (%)	2,04	1,78	1,97	1,77	1,92	2,25	1,93	2,71	1,98	5,30	4,83	4,95	2,42	9,60
Cr (ppm)	284	250	350	320	342,5	226	230	180	226	230	195	204	0,72	2,84
Pb (%)	1,18	0,87	0,68	0,5	0,635	1,88	0,55	2,80	0,7	10,32	13,91	13	11,02	43,62
Cu (%)	1,06	0,18	0,18	0,32	0,215	0,18	0,5	2,06	0,6	6,00	22,53	18,4	17,36	68,74
Mn (%)	0,14	0,14	0,15	0,11	0,14	0,15	0,13	0,26	0,14	0,25	0,15	0,175	1,25	4,95
Fe (%)	7,78	10,80	10,36	6,70	9,445	5,16	4,85	3,38	4,75	3,91	4,7	4,50	0,60	2,29
Tl (ppm)	279	275	336	210	304,5	252	237	260	238	270	380	352,5	1,26	5,0
Σmétal.(ppm)	123 129	139 084	134 695	94 990	124 457	97 163	80 476	113 012	82 550	258 852	463 037	411 890		
PCB (ppm)	-	35,30	37,00	36,00	36,75	-	23,50	0,00	21,91	-	-	-		
PCI (J/g)	1955	3290	2814	3664	3027	411	0	3151	212	-	-	-		

P.a. = poussière d'aspiration
 l.1 = légers du premier tablage pneumatique
 m.1 = mixtes du premier tablage pneumatique
 L.1 = produit lourd du premier tablage pneumatique

l.2 = produit léger du deuxième tablage pneumatique
 m.l.2 = produit mixte-léger du deuxième tablage pneumatique
 m.L.2 = produit mixte-lourd du deuxième tablage pneumatique
 L.2 = produit lourd du deuxième tablage pneumatique

Tableau IV.4 : Résultats des analyses chimiques effectuées sur les produits obtenus après séparation (figure IV.10)

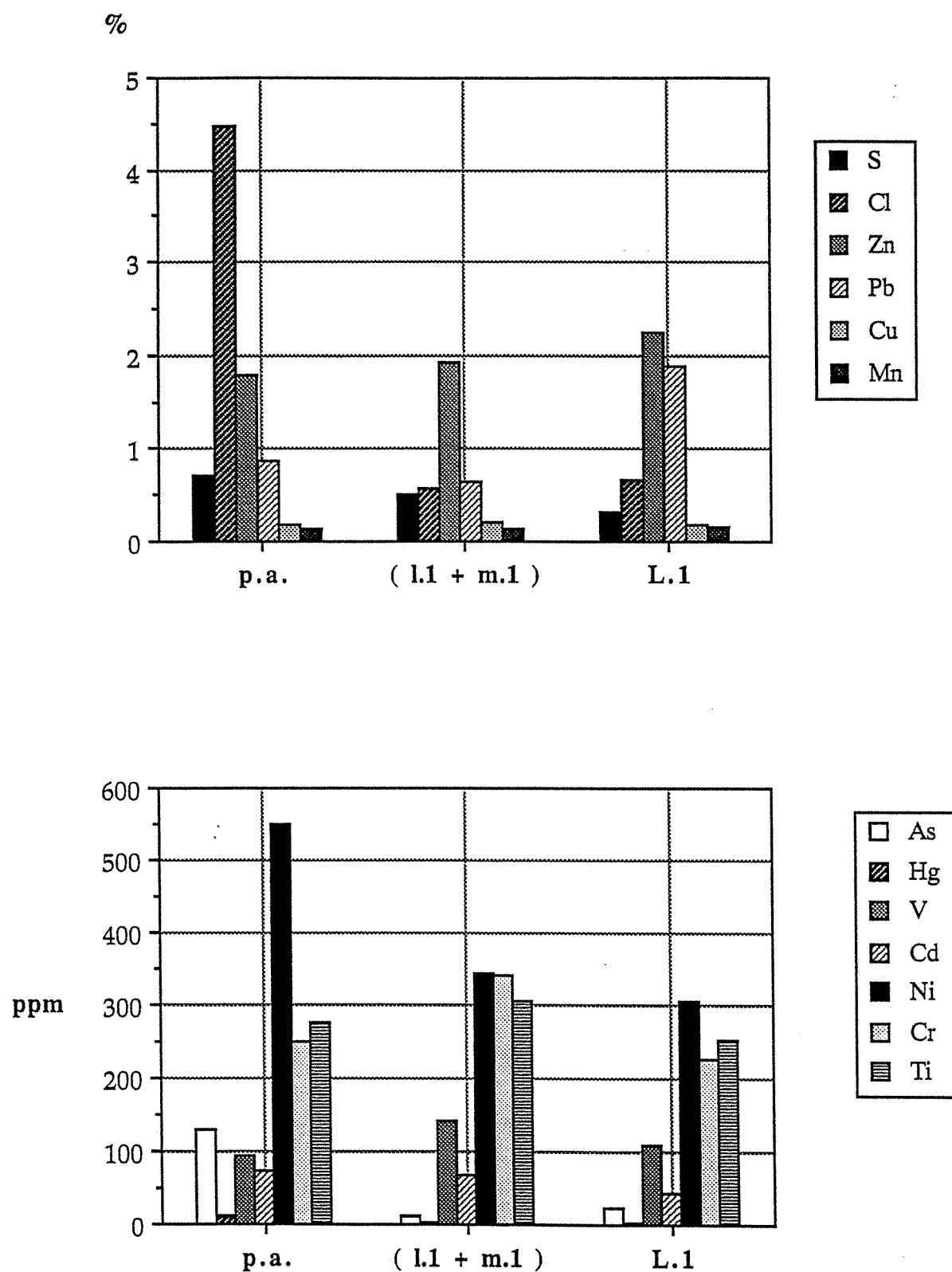


Figure IV.12 : Répartition des différents éléments chimiques en % et en ppm pour les trois produits regroupés, obtenus de la première séparation pneumatique

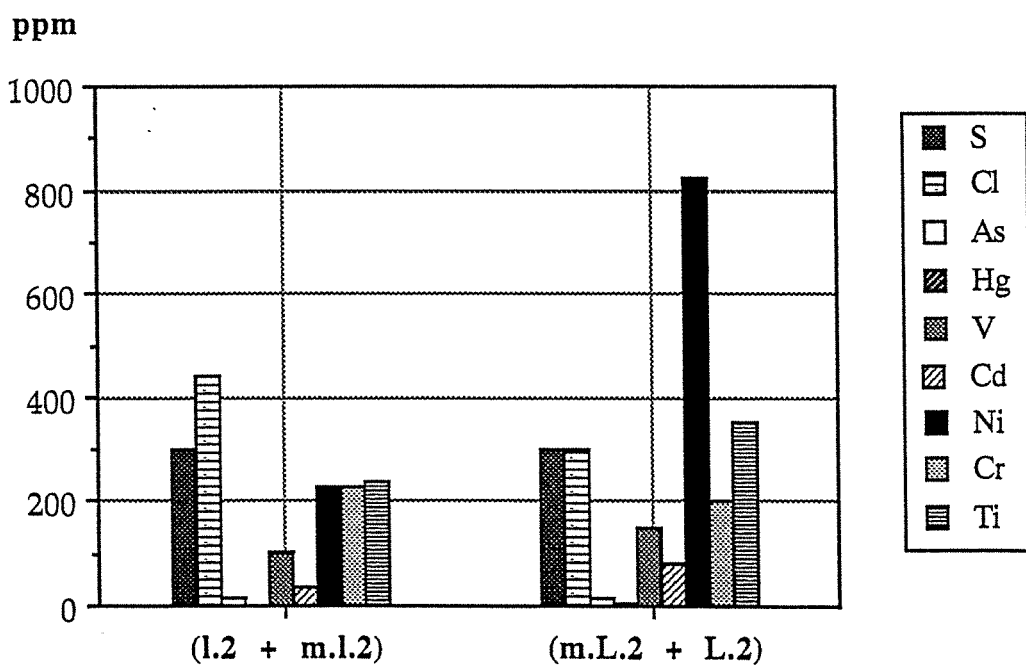
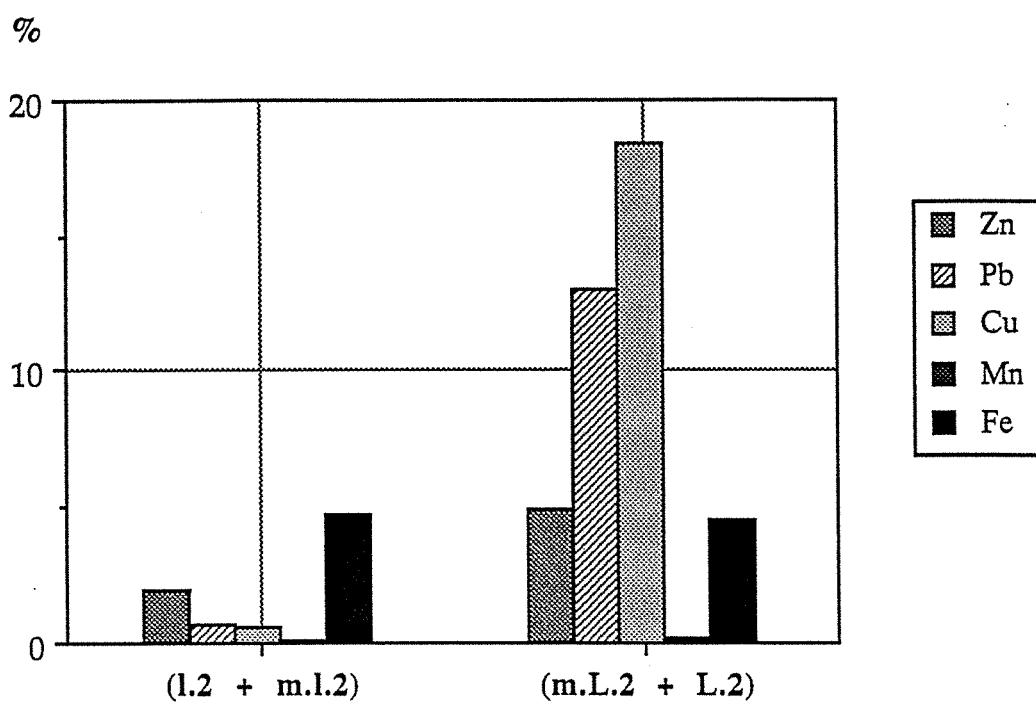


Figure IV.13 : Répartition des différents éléments chimiques en % et en ppm pour les deux produits regroupés de la deuxième séparation pneumatique

a) - Possibilités de recyclage des métaux

Les résultats du tableau IV.3 et des figures IV.12 et IV.13, permettent de conclure que :

Sur le plan des taux de concentration, le système est très efficace pour récupérer du cuivre et du plomb à des teneurs relativement élevées et très faiblement pollués par S, Cl, As et Hg.

Sur le plan des taux de récupération, la récupération des métaux comme Zinc, Cadmium, Nickel est médiocre, par contre dans le cas du plomb et du cuivre, les taux de récupérations sont nettement plus élevés.

Toutefois, la catégorie métaux lourds obtenue, ne correspond pas à une catégorie directement marchande.

b) - Destinations possibles des catégories de tablage

selon les éléments polluants, pour lesquels, les valeurs limites sont les suivantes :

Chlore < 0,50 %

Soufre < 0,50 %

PCB < 50 mg/kg

V+Cu+Pb+Zn+Ni+Cr+Ti+Mn+Cd+Hg+As < 2000 mg/kg.

➡ La fraction (L.2 + m.L.2), dite lourde, peut faire l'objet d'un recyclage par méthode de fusion.

➡ La teneur des métaux dans la fraction (l.2 + m.l.2) est inférieure à 2000 mg/kg, qui est la teneur limite. La teneur en PCB est inférieure à 50 ppm et les teneurs en S et Cl sont inférieures à 0,5 %. Donc ce produit peut être mis en décharge.

➡ Pour la fraction (l.1 + m.l.1) les teneurs en métaux ainsi qu'en PCB sont inférieures aux limites données. Par contre, les teneurs de S et Cl sont légèrement supérieures à la limite. Il est possible en la mélangeant avec la fraction (l.2 + m.l.2) de la mettre en décharge.

➡ Les poussières d'aspiration (p.a.) ne peuvent être ni valorisées, ni mises en décharge parce que leurs teneurs en métaux, PCB, S et Cl sont supérieures aux limites, mais ce produit ne représente que 13 % en poids.

c) - Evolution des teneurs des produits obtenus par la séparation pneumatique.

Afin de raisonner la répartition différentielle de chaque élément selon les types de produits reconstitués et correspondant aux poussières, aux légers et aux lourds, on considérera sur l'ensemble des variations la progression de chaque élément suivant l'ordre:

❖ **Fer - Manganèse** : Les teneurs en Fer décroissantes, allant des poussières et des légers vers les lourds (voir figure IV.14), plaident pour la présence des oxydes de fer, notamment dans les poussières et les légers. Le manganèse est réparti à peu près également dans tous les produits.

❖ **Plomb, Zinc, Cuivre** : Ces éléments sont fortement concentrés dans les produits lourds (m.L.2 + L.2), le décrochage des teneurs étant très net entre cette catégorie et la catégorie (l.2 + m.l.2).

- Les éléments en traces :

❖ **Nickel** : on observe une pointe dans les poussières et dans les produits lourds. Cette répartition est difficilement explicable.

❖ **Mercure** : on observe sa légère tendance à partir dans les poussières.

❖ **Arsenic** : on observe sa tendance nette à partir dans les poussières.

❖ **Cadmium, Vanadium, Chrome** : leur comportement est ubiquiste à la suite de leur utilisation sous forme de composites.

❖ **Titane** : son comportement ubiquiste est compréhensible par le fait que le titane rentre comme pigment.

Les tests de séparation magnétique, réalisés sur les produits regroupés, ont permis de récupérer une fraction magnétique, représentant 15,55 % en poids et titrant 40,85 % de Fer; 0,9 % de Cuivre ; 1,1 % de Zinc et 8,7 % de SiO₂.

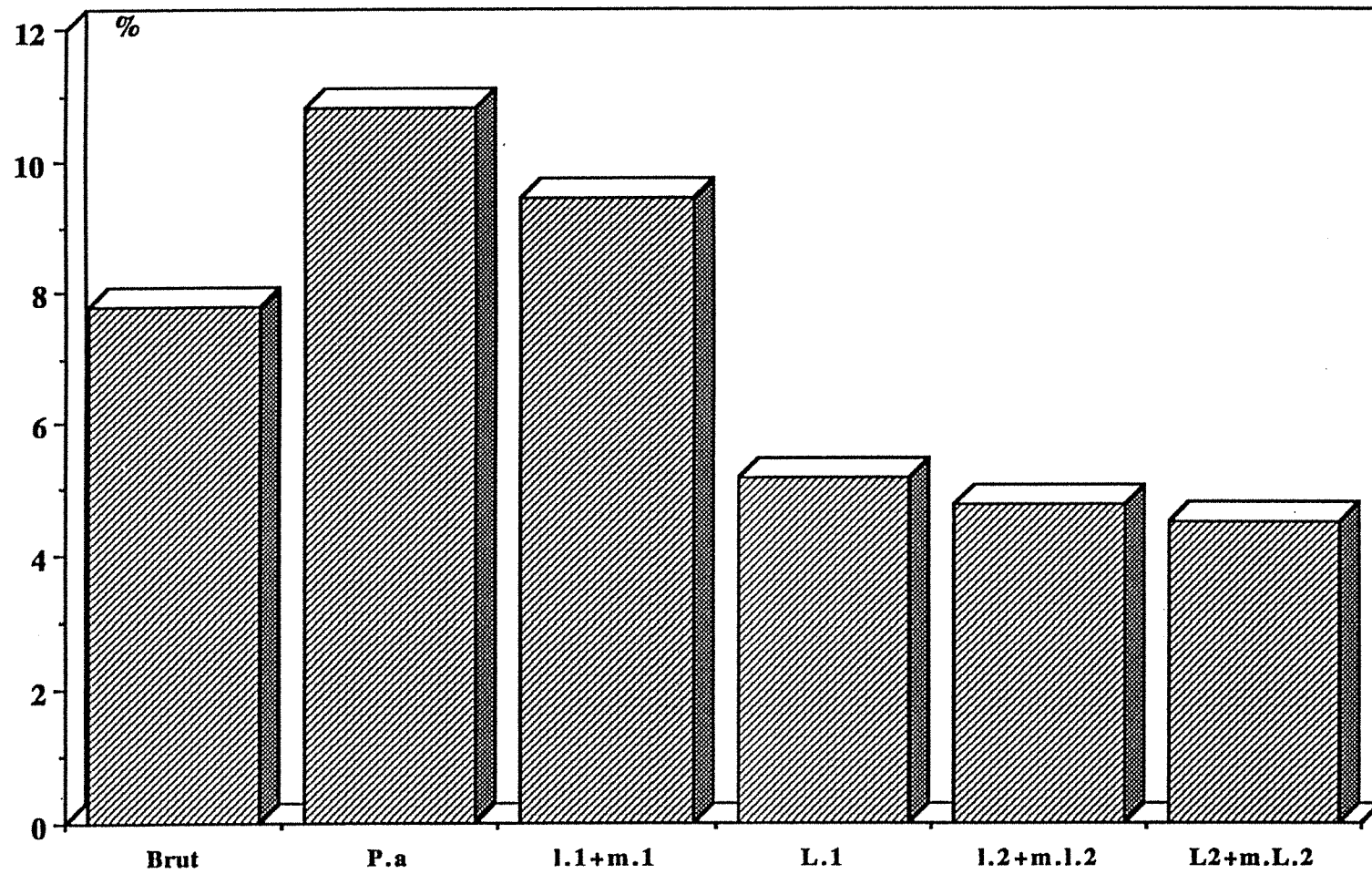


Figure IV.14 : Variations de la teneur en Fe (%) pour les produits regroupés de la séparation pneumatique

IV.6 - SCHEMA FINAL DE VALORISATION DES FINES 0-15 mm

IV.6.1 - Schéma proposé

Le schéma final proposé pour le traitement intégral des fines 0 à 15 mm est résumé sur la figure IV.15.

Il est basé sur les essais semi-industriels et industriels en continu, effectués précédemment sur la partie 0 à 4 mm, ainsi que sur la partie 4 à 15 mm des fines pauvres.

A la vue des résultats obtenus en échelle industrielle concernant la partie 4 à 15 mm des fines, on peut valoriser cette partie dans l'installation existante de l'usine de LORMET à Pagny-sur-Meuse.

Par contre, pour la partie 0 à 4 mm, les meilleurs résultats, obtenus pour le moment à l'échelle semi-industrielle, utilisent prioritairement la valorisation sur une table pneumatique, qui a pour avantage d'être adaptée aux quantités de type de matériaux à traiter et de fournir un produit léger non polluant. Il serait évidemment nécessaire de compléter par des opérations de métallurgie extractive la séparation des métaux obtenus sous forme de concentrés globaux.

Les étapes nécessaires sont :

- pour la fraction 4 à 15 mm :

- a) criblage à 4 mm;
- b) lavage dans une colonne d'eau ;
- c) séparation magnétique voie sèche;
- d) séparation par courants de Foucault.

- pour la fraction 0 à 4 mm :

- a) criblage à 4 mm;
- b) séparation magnétique voie sèche à basse intensité;
- c) tablage pneumatique;
- d) séparation par courants de Foucault (facultative)

On peut remarquer pour la fraction 0 - 4 mm, que les produits lourds de la séparation pneumatique contiennent encore des autres produits tels que cailloux et verre, qui peuvent être bien séparés par les courants de Foucault.

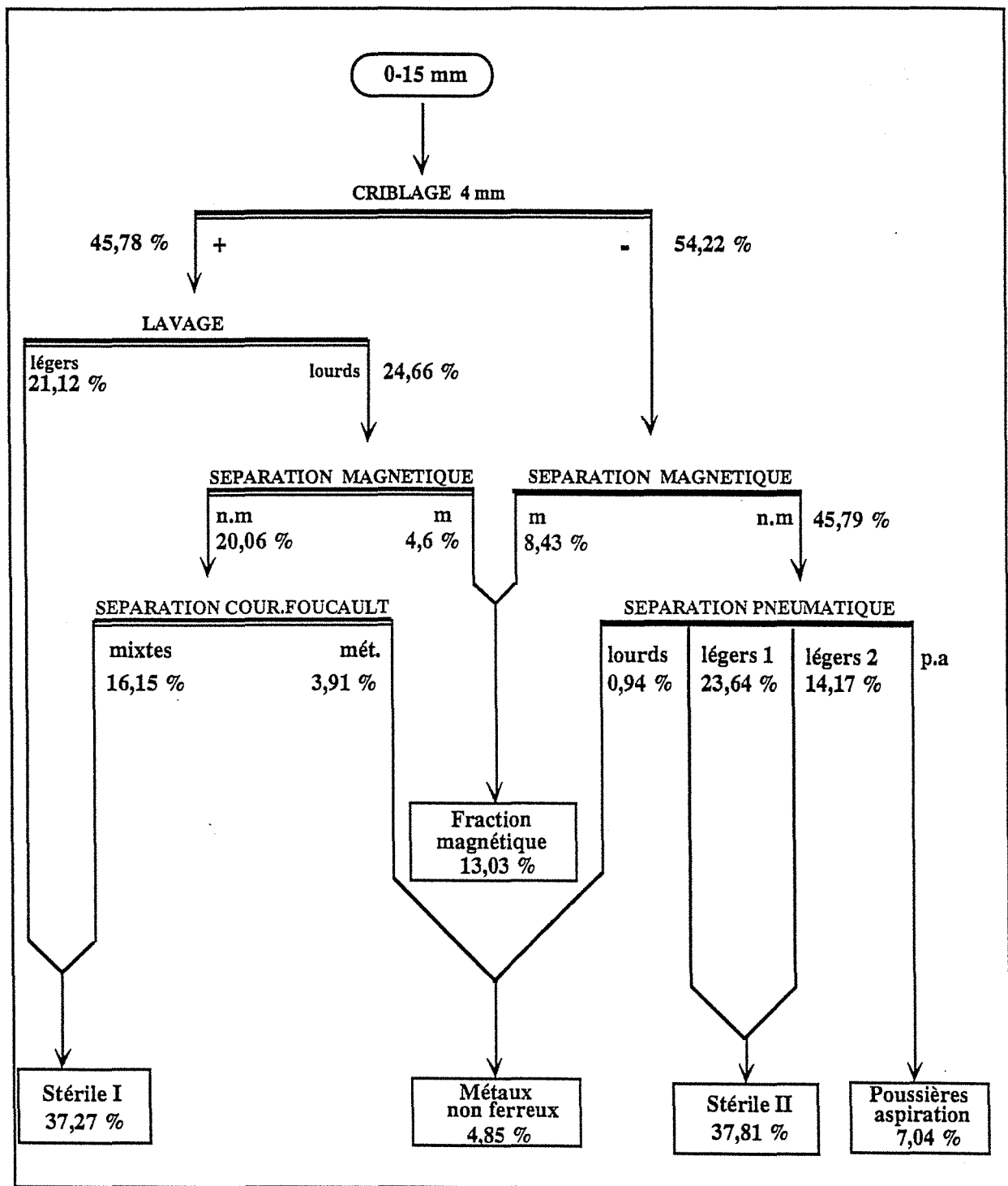


Figure IV.15 : Schéma final proposé pour le traitement de l'ensemble de la fraction 0-15 mm

Globalement on obtiendra environ :

- 4,85 % en poids sous forme d'un produit lourd très riche en métaux non ferreux;
- 13,03 % en poids sous forme de fraction magnétique;
- 16,15 % en poids sous forme d'un produit mixte, composé de plastiques, caoutchouc;
- 21,12 % en poids sous forme d'un produit léger, qui ajouté au précédent constitue le Stérile I
- 37,81 % en poids sous forme d'un produit stérile II (composé des légers 1 et des légers 2) ;.
- 7,04 % en poids sous forme des poussières d'aspiration.

IV.6.2 - Choix des appareils

Pour mettre en oeuvre un tel schéma il faut savoir qu'il est logique d'utiliser l'installation existante de traitement des fines riches de l'usine de Pagny-sur-Meuse. Les appareils de cette installation serviront à la valorisation de la fraction 4 à 15 mm des fines pauvres. On rappellera que ces appareils sont les suivants :

- crible type "LINDMANN" avec perforation à 4 mm;
- colonne d'eau;
- overband magnétique (type ANDRIN);
- séparateur à courants de Foucault - type PVB

Cependant, des modifications doivent être apportées :

Le passé au travers du crible de 4 mm existant, sera traité dans un séparateur magnétique à basse intensité, suivi d'un tablage pneumatique - type BIRTLEY. La table devra être équipée aussi d'un système d'aspiration et de captation des poussières. Le produit lourd de la table pneumatique peut être retraité sur le séparateur à courants de Foucault - type PVB, situé dans l'installation existante, cela en fonction des débouchés commerciaux et de façon discontinue selon les besoins.

Le schéma proposé ne nécessite pas beaucoup d'investissements. Ceux-ci consistent essentiellement en un séparateur magnétique à basse intensité (qui peut être un overband ou un tambour magnétique) et en une table pneumatique à étalement, afin d'adapter avec un maximum de souplesse la qualité des produits aux contraintes commerciales.

On recommande une table dont les caractéristiques sont les suivantes :

dimensions : 3,25 x 1,70 x 1,50 m ;
puissance 2 kW/t ;
capacité environ 5 t/h.

IV.6.3 - Valorisation des fractions stériles légères

La valorisation qui est suggérée par la présence de matières plastiques, de caoutchoucs, de bois, de mousse et de textiles, dans les stériles légers (I) et (II), ainsi que dans les stériles mixtes consiste à faire appel à l'incinération.

a) *Stérile I (légers > 4 mm + mixtes) :*

Il représente 37,27 % en poids de l'ensemble des produits 0-15 mm. Le tableau IV.3 donne leur PCI et leur teneur en cendres. Dans l'optique d'une valorisation sous forme de combustible, on obtient un PCI d'environ 9 300 J/g, pour une teneur moyenne en cendres de 42 %. Il s'agit donc, d'un mauvais combustible, mais l'incinération peut permettre de diminuer la quantité de matière à mettre en décharge.

b) *Stérile II :*

Ce stérile, constitué par les légers 1 et 2 (rassemblant respectivement les catégories l.1 + m.1 et l.2 + m.l.2, signalés sur la figure IV.11), représente 37,81 % en poids de l'ensemble 0-15 mm. Une étude a été faite sur la qualité des produits de la figure IV.11, afin de juger de leur valeur en temps que combustible (Tableau IV.4) et de la valeur des produits incinérés (Tableau IV.5).

On constate que la somme des métaux contenus dans les cendres est inférieure ou égale à celle du brut. Donc, la valorisation du stérile II par incinération, pour obtenir des métaux est inintéressante. Sa valeur, en temps que combustible, est pratiquement nulle. En effet, le PCI du stérile II, après la reconstitution est 1 900 J/g et la teneur en cendre est de 77,6 %.

c) *Poussière d'aspiration :*

Celle-ci représente 7,04 % en poids du brut 0-15 mm, ont une teneur en cendre de 69,60 % et un PCI de 3 290 J/g.

d) *Solution proposée :*

Elle consiste :

- ❶ à incinérer les stériles légers et les mixtes de la fraction 4-15 mm, en mettant en décharge leurs cendres. La teneur en métaux des cendres est faible (1,19 %), en comparaison de celle du brut (10,33 %).
- ❷ à mettre directement en décharge le stérile II, pour lequel, l'incinération ne représente au plus qu'une faible diminution de tonnage. Il faut noter cependant que la teneur en métaux des cendres sera importante (8,32 %).

Produit	Teneur en cendres %	Teneur en métaux (dans les cendres) %	S total % (sur les cendres)	Rendement poids avant incinération (ensemble 0-4 mm)	Rendement poids % après incinérat. 0-4 mm	Rendement poids % après incinérat. 0-15 mm
Brut	83,97	10,33	-	100	100	100
légers (4-15)	32,00	0,77	-			6,75
mixtes (4-15)	55,40	1,74	1,19			8,94
Stérile I (4-15)	42,14	1,19	-			15,69
Aspiration(P.a.)	69,60	9,68	0,94	13	9,04	4,89
l.1	72,80	9,80	0,34	36	26,20	-
m.1	73,40	6,97	0,21	12	8,80	-
l.1 + m.1 (légers 1) < 4 mm	72,95	9,08	0,30	48	35,00	17,24
l.2	84,80	6,82	0,27	32,68	27,71	-
m.l.2	94,30	10,65	0,27	2,36	2,22	-
l.2 + m.l.2 (légers 2) < 4 mm	85,43	7,05	0,27	35,04	29,93	12,10
Stérile II < 4 mm	77,62	8,32	0,28	83,04	64,93	29,34

Tableau IV.5 : Qualité des produits incinérés

En conséquence on récupère de l'ensemble 0-15 mm :

- 13,03 % en poids de produits ferrés magnétiques ;
- 4,85 % en poids de métaux non ferreux ;
- 15,65 % en poids des cendres d'incinération (Stérile I + Mixtes) ;
- 44,85 % en poids de produit mis directement en décharge (Stérile II + Poussières d'aspiration)

Autrement dit, pour 1 T de fines 0-15 mm :

- 178,80 kg peuvent être valorisés sous forme de métaux ;
- 605,00 kg vont en décharge si l'on incinère les stériles et mixtes de la fraction 4-15 mm.

CHAPITRE V

*Le manque d'aptitude à la
valorisation des matières
plastiques et les conséquences
sur le bilan général*

CHAPITRE V

Un point essentiel pour concevoir une amélioration des opérations de valorisation passe par le devenir des matières plastiques. En effet, les stériles légers représentent plus de 50 % en poids des fines et la quantité des matières plastiques est de l'ordre de 30 % de la masse totale.

V.1 - LA VALORISATION DES MATIERES PLASTIQUES

En principe, il existe trois possibilités de valorisation des matières plastiques :

- La récupération de matières premières pour la chimie ;
- La valorisation matière ;
- La production d'énergie.

Il faut dire aussi qu'il est impossible avec les techniques connues de séparer les matières plastiques des autres constituents carbonés

V.1.1 - RECUPERATION DE MATIERES PREMIERES POUR LA CHIMIE

Les procédés à prendre en compte pour la récupération de matières premières pour la chimie sont la pyrolyse, l'hydrolyse et l'hydrogénation.

- Lors de la **pyrolyse**, les molécules sont décomposées sous atmosphère pauvre en oxygène à des températures supérieures à 300 °C. Il en résulte un gaz, une huile de pyrolyse et un résidu solide, mais le chlore, transformé en HCl pose des problèmes de corrosion. La séparation de la phase huileuse pose aussi de sérieuses difficultés par suite de la création d'émulsions stables huile/eau, difficilement "cassables".

- Lors de l'**hydrolyse**, les matières plastiques créées par polycondensation et polyaddition (polyuréthane, polyamide, polyester, polycarbonate) sont décomposées sous des pressions d'environ 5 bars, à des températures allant jusqu'à 270 °C et en présence d'eau. Les matières ainsi récupérées peuvent être incorporées aux matières de base "fraîches" lors de la fabrication des polymères. La qualité des matières récupérées est donc essentielle et doit répondre à des exigences de haute pureté. Il est pour le moment difficile de satisfaire techniquement ce dernier critère.

- Lors de l'**hydrogénisation**, les matières plastiques sont craquées sous une pression de 300 bars et à 500 °C en présence d'eau. Les blocs moléculaires ainsi créés représentent une matière première théoriquement réutilisable. Dans ce procédé, le chlore est séparé au cours d'une phase préliminaire sous forme de gaz hydrochlorique.

Des installations pour la récupération de matières premières pour la chimie n'existent pas encore de façon significative. En conséquence, cet objectif de valorisation ne peut pas être retenu comme solution immédiate.

V.1.2 - REEMPLOI DES MATIERES PLASTIQUES

Il est possible théoriquement d'envisager le réemploi des matières plastiques pour fabriquer des mélanges impurs, ayant pour débouché des caisses à fleurs, des murs anti-bruit, des bancs, etc. Cependant, tous ces objets, à la fin de leur vie utile, deviennent également des déchets et doivent être définitivement éliminés. Pour le cas qui nous intéresse, vu l'accumulation en matières nuisibles, cette ligne de valorisation doit être exclue (mixité des constituants et incompatibilité des polymères).

V.1.3 - PRODUCTION D'ENERGIE A PARTIR DES MATIERES PLASTIQUES

Cette voie a été déjà signalée au chapitre IV, où on a vu la faible valeur des combustibles que l'on peut obtenir dans le schéma final de séparation (Figure IV.15). Traditionnellement, une voie thermique prend en considération des utilisations dans des fours et chaudières, ou simplement en mélange avec d'autres déchets en vue d'augmenter leur pouvoir calorifique :

** En tant que combustible complémentaire dans des chaufferies conçues pour l'emploi de charbon, de coke, de briquettes, de tourbe, de mazout ou de bois.* Il faut cependant tenir compte des réglementations portant sur la protection à l'égard des émissions dues à l'incinération de déchets.

** En tant que combustible secondaire dans des cimenteries.* Cependant la teneur en chlore dans le clinker pose un problème important. Elle ne doit pas dépasser 0,1 % du poids selon la norme allemande et 0,05% du poids selon la norme française.

* *Dans des installations d'incinération pour la valorisation de déchets.* Toutefois le chlore, donnant des composés métalliques volatiles avec pratiquement tous les métaux, provoque une pollution dangereuse autour de l'appareil d'incinération, nécessitant en cela des mesures de protection coûteuses.

Il n'a pas été possible de trouver dans la littérature une étude précise sur la valeur, en temps que combustible, des matières plastiques issus de la récupération des déchets automobile. Les seuls chiffres que nous pouvons avancer, sont donc ceux qui sont issus de nos mesures où l'on s'aperçoit que le combustible est toujours très médiocre et nécessite un apport d'énergie pour être incinéré.

Faut-il en conclure qu'une voiture où tout serait recyclable est encore du domaine de l'utopie ? On sait, en effet, que la quantité des matières plastiques dans le poids d'une voiture va en augmentant (Chapitre I) et que le poids des charges inertes dans les matières plastiques, constitue suivant leur nature des valeurs supérieures à 50 % en poids. De plus ces charges, lorsqu'elles sont composées, par exemple, de carbonates, sont consommatrices d'énergie lors de l'incinération et diminuent d'autant plus la valeur des produits à incinérer.

Les teneurs en métaux des cendres, sont inférieures à celle du brut et même en supposant leur récupération, elle ne pourront pas compenser le coût de l'incinération.

V.2 - BILAN GENERAL DE L'OPERATION DE VALORISATION

La situation de la récupération matière à l'usine de LORMET, jusqu'au début de l'année 1993, se présentait comme le montre la figure V.1. Seulement 19 % de la matière était valorisée sous forme de métaux ferreux et non ferreux supérieurs à 15 mm. Or les fines < 15 mm représentent en moyenne 43 % des RBA.

La récupération des métaux contenues dans les fines, reste la base de leur valorisation, étant donné le manque d'intérêt que présentent les produits carbonés.

Il faut dire cependant, que ces produits contiennent seulement de faibles quantités de chlore, généralement au dessous de la limite établis dans le domaine de la combustion, qui est de 0,5 %. La présente étude montre donc, que la teneur en chlore que l'on croyait être le principal écueil à surmonter, est un faux problème. Par contre, la qualité des matières plastiques, dans la composition desquelles rentrent des charges inertes, s'oppose à une des méthodes examinées au paragraphe précédent.

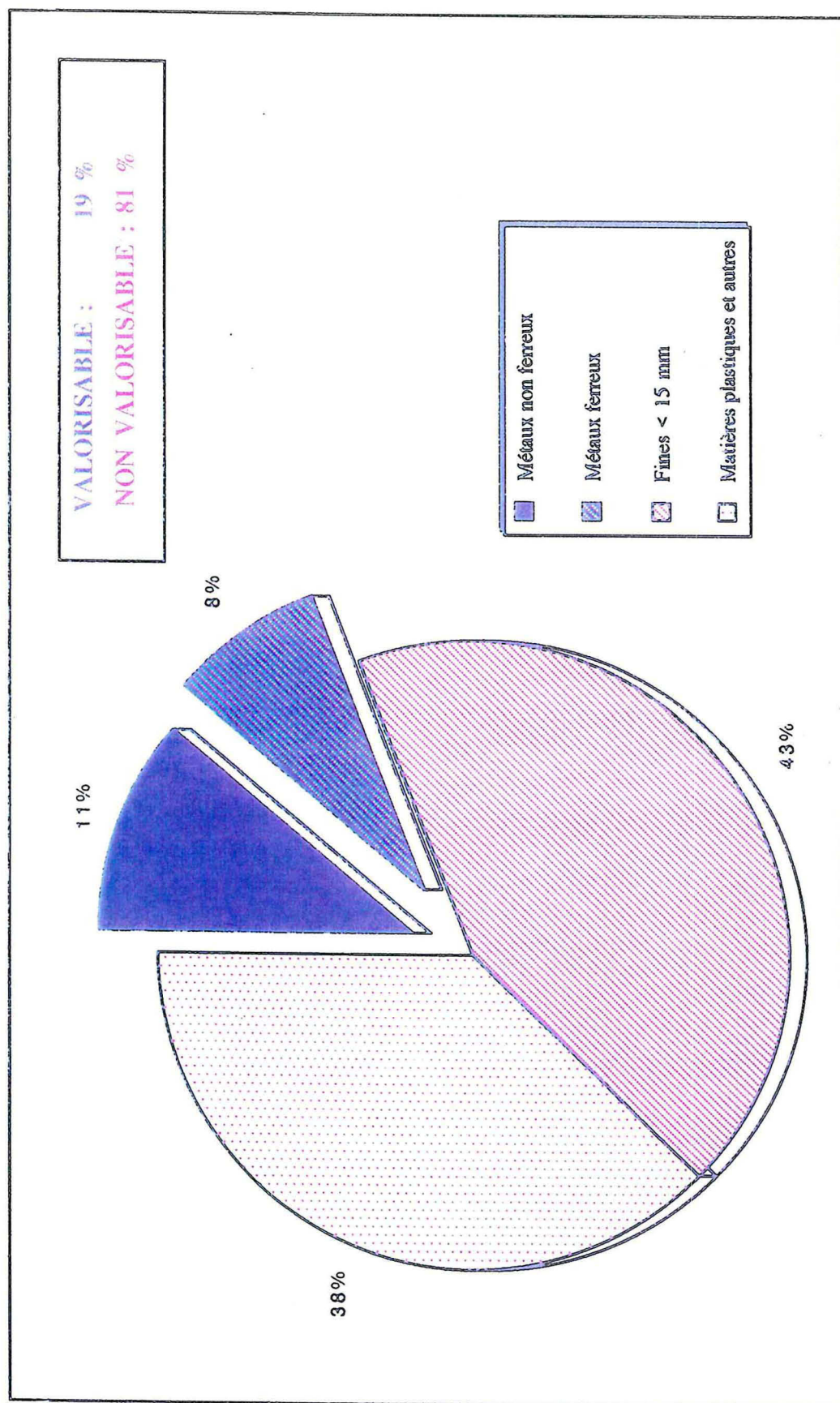


Figure V.1 : BILAN ACTUEL DE VALORISATION

On voit bien que, seuls les produits où abondent caoutchouc et polyuréthane, c'est à dire les produits légers de la fraction 4-15 mm, ont un PCI plus ou moins acceptable (chapitre IV).

Enfin les analyses sur le PCB montrent que une mise éventuelle en décharge ne poserait pas de problèmes graves, les concentrations étant toujours inférieures à la limite de 50 ppm (Tableau IV.3 et IV.4).

Compte tenu de ces arguments, il est possible de donner deux bilans possibles pour l'ensemble des RBA :

- un bilan où l'incinération n'intervient pas (Figure V.2).
- un bilan tenant compte de l'incinération partielle des légers (Figure V.3), en ne considérant comme combustible que le Stérile I.

En conséquence, si les fractions légères (Stérile I et Stérile II), ne présentent pas de graves problèmes de pollution, ils constituent cependant une masse importante à mettre en décharge (Stérile I incinéré et Stérile II non incinéré). Le fait d'avoir séparé les poussières, riches en éléments polluants, est bénéfique car il rend moins coûteuse la mise en décharge des stériles mentionnées précédemment.

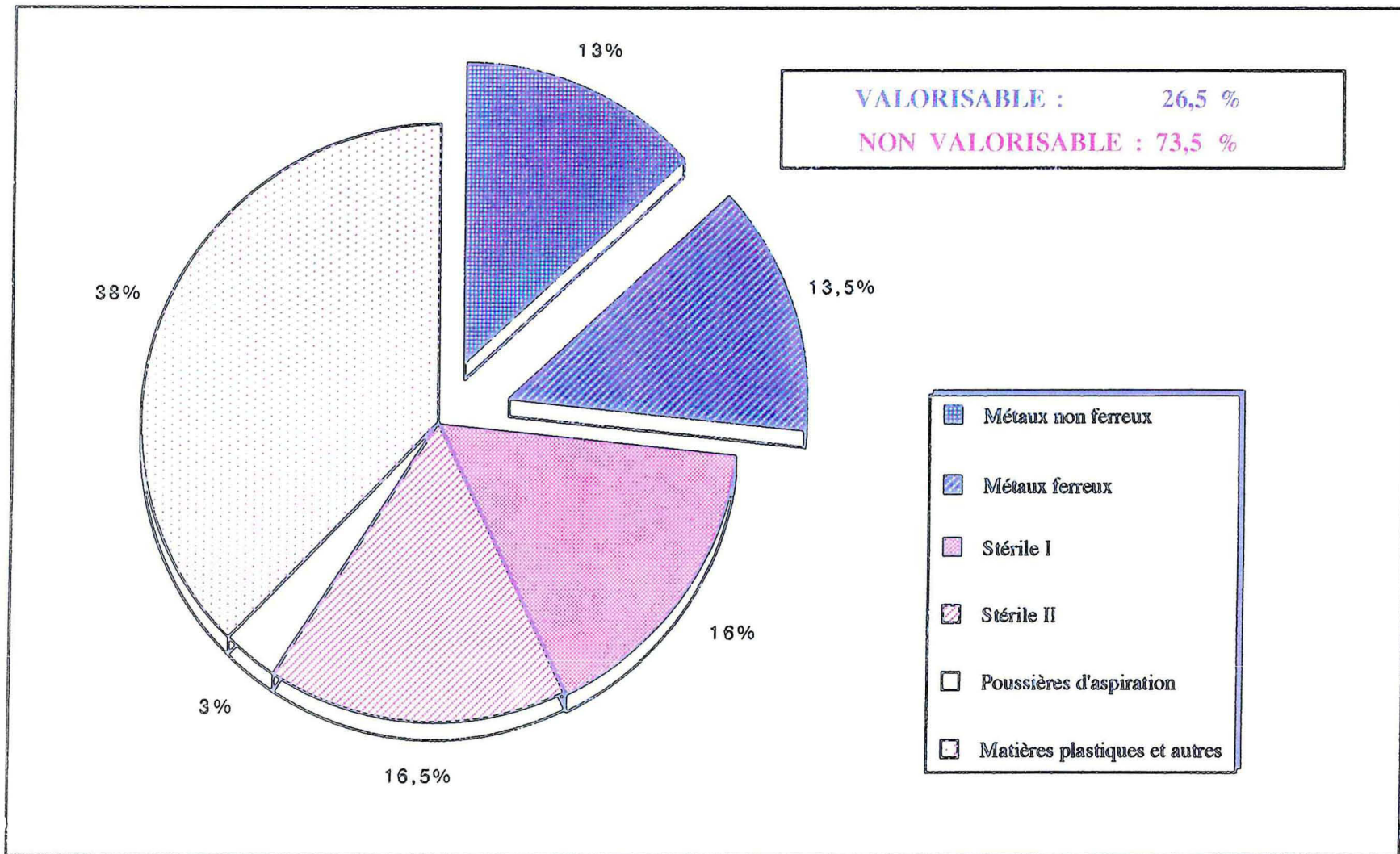


Figure V.2 : BILAN APRES LA VALORISATION DES FINES (SANS L'INCINERATION)

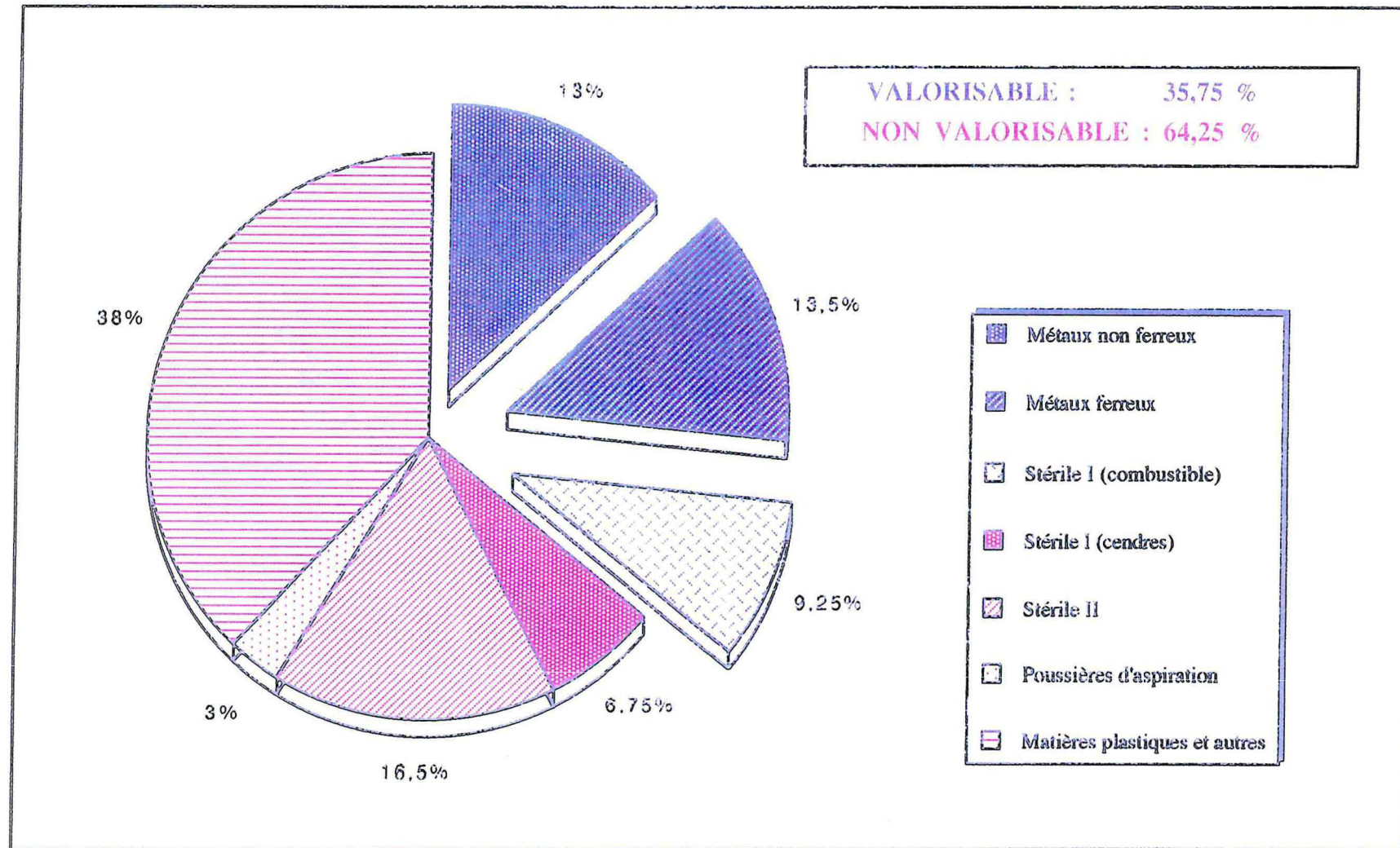


Figure V.3 : BILAN APRES LA VALORISATION DES FINES (AVEC L'INCINERATION)

CHAPITRE VI

Données économiques concernant le traitement des RBA

CHAPITRE VI

Nous prendrons l'exemple de l'usine de LORMET et nous ne ferons appel qu'aux données publiables avec l'accord de l'entreprise. Les données qui suivent, permettent cependant d'avoir une appréciation des coûts opératoires et des investissements.

VI.1 - TONNAGES ET LES COUTS RAPPORTES A LA TONNE A L'USINE DE LORMET

L'évolution des tonnages mensuels moyens, traités de 1986 à 1992 a été le suivant :

1986	2.000 T
1987	3.300 T
1989	5.500 T
1991	8.000 T
1992	8.610 T

Sur les 103.324 tonnes traitées en 1992, 80.000 tonnes ont été mise en décharge de classe II et 23.000 tonnes ont été récupérées et commercialisées.

Le prix d'achat des produits à l'entrée sont très variables, selon leur provenance et selon qu'ils ont subi ou non un pre-triage. Ils peuvent varier de 0 à 3.000 F/T.

Le prix de mise en décharge des rebuts d'usine est évolué de 80 F/T en 1986 à 200 F/T en 1992, pour un prix de traitement usine de 450 F/T en 1992.

VI.2 - BILAN DES COUTS OPERATOIRES

Le tableau VI.1 présente par poste de dépense les coûts opératoires de l'usine de LORMET en 1993.

Nr	Poste de dépense	Rémarques	en Francs	en %
1	Energie	électricité, chauffage	800.312 75.618	1,73 0,02
2	Salaires		6.743.161	14,65
3	Amortissements		5.133.881	11,15
4	Matériaux consommables	ferrosilicium, eau	559.249	1,25
5	Transports		10.478.825	22,80
6	Mise en décharge		14.056.793	30,60
7	Frais généraux administratifs		8.171.131	17,80
	TOTAL		46.018.970	100,00

Tableau VI.1 : Coûts opératoires du traitement des RBA

L'examen de ce tableau amène plusieurs commentaires :

En regard du coût de traitement il faut mettre le prix de vente des produits récupérés par tonne traité :

Ferrailles	80 kg par tonne, soit pour une valeur moyenne de 300 F/T : 24 F
Aluminium	50 kg par tonne, soit pour une valeur moyenne de 6 800 F/T : 340 F
Métaux lourds	40 kg par tonne, soit pour une valeur moyenne de 3 300 F/T : 132 F
Magnésium	15 kg par tonne, soit pour une valeur moyenne de 3 400 F/T : 51 F

La rentabilité instantanée est au moins en partie liée avec le contenu métallique des RBA et le cours des métaux à un moment donné. Le profit venant de la vente des métaux est, avant tout, soumis aux fluctuations des prix (c.f Paragraphe I.1.1 - Chapitre I).

La rentabilité repose aussi sur le prix de mise en décharge, qui représente le tiers environ du coût opératoire. Ce prix est en constante évolution comme cela a été signalé précédemment. On comprend donc l'importance économique des travaux qui ont fait l'objet de ce travail de thèse puisque d'une part, on augmente la quantité de produits valorisés et que, d'autre part on arrive à une diminution de 15 % de la mise en décharge avec une meilleure élimination des sources métalliques de pollution.

Le transport représente aussi un poste important. Ces valeurs seront certainement modifiées dans l'avenir de la profession par un regroupement géographique des gros broyeurs et des usines de traitement. C'est du moins la doctrine de la Compagnie Française de Ferrailles, le groupement étant déjà réalisé dans la Région Parisienne.

Le poste amortissement est particulièrement réduit. Il a été calculé sur une période 6 à 10 ans.

Enfin il faut considérer les postes salaires et énergie. Ces postes représentent ensemble 16 % des coûts opératoires. Cette modicité est explicable :

- ❶ par le choix des technologies mises en oeuvre, susceptibles de traiter des gros tonnages avec un maximum d'opérations mécaniques;
- ❷ par le choix d'appareils robustes et fiables nécessitant un coût d'entretien très modéré, compte-tenu de leur conception et de leur accessibilité.

VI.3 - INVESTISSEMENT, LEUR EVOLUTION DANS LE TEMPS ET DUREE D'AMORTISSEMENT

Si l'on considère le passé, une durée de 1 an a séparé le moment de la décision de construire l'usine et le démarrage. Ce délai très court constitue pour le type d'industrie considérée une véritable prouesse. A l'inverse, il a été nécessaire de fournir 35 à 40 % de l'investissement matériel global. Il a été au départ (1986) de 2.492.230 F, et concernait une production de 2.500 T/mois. Cet investissement a favorisé l'achat du matériel de base tels que : séparateur magnétique, séparateur en milieu dense, séparateur par élutriation, bandes transporteuses, pompes et bacs de décantation, sans lesquels, l'usine n'aurait pas pu démarrer. Il faut noter que l'investissement moyen annuel a été ensuite maintenu à une hauteur de 8 à 12 % par an de l'investissement global.

Les investissements sont amortis en 5 - 6 et 10 ans, suivant les types de matériel. D'une façon générale, l'amortissement à 6 ans est explicable par l'usure assez rapide de certains matériels de base, étant donné la corrosion entraînée par frottement de métal contre métal et la corrosion due aux eaux de traitement. L'amortissement à 10 ans concerne surtout les appareils de technologie plus avancée qui traitent des produits secs.

C'est ainsi que l'on peut relever à titre d'exemple :

a) Type de matériel unitaire amorti en 6 ans :

- Exemple du trommel de fines (coupure à 15 mm) - date 31/08/1992

Appareil brut	1.657.759
Coût installation	220.980

- Exemple de overband magnétique - type ANDRIN - date 10/11/1991

Appareil brut	184.000
Coût installation	76.962

- Exemple de bac de décantation - date 15/03/1992

Appareil brut	224.311
Coût installation	203.200

b) Type de matériel unitaire amorti en 10 ans :

- Exemple de séparateur à courants de Foucault "Steinert" - date 15/12/1988

Appareil brut	724.181
Coût installation	458.713

c) **Ensemble d'une section :**

On prendra comme exemple la section de traitement correspondant aux fines "riches", construite en juin 1990. Le coût global (montage compris) s'est élevé à 2.112.078 F. Le matériel brut correspondant a coûté 1.472.326 F.

La durée d'amortissement moyenne a été définie à 6 ans.

d) **Prix de revient de l'installation du matériel**

Ce prix est très variable, car selon les matériels considérés dans les exemples précédents, on doit multiplier le prix du matériel brut par :

- 1,13 pour le trommel des fines
- 1,41 pour l'overband magnétique
- 1,90 pour le bac de décantation
- 1,60 pour le séparateur STEINERT (séparateur à cour. de Foucault)

C'est la raison pour laquelle, il est plus valable de prendre une section entière pour avoir une idée de la moyenne des coûts du matériel installé par rapport au matériel brut. La section de traitement des fines "riches" donne un coefficient de 1,43.

Remarque :

A titre purement indicatif, le traitement que nous proposons au chapitre IV, nécessiterait les investissements suivants :

Matériels nécessaires	Quantité	Coût approximatif (en francs)
Table pneumatique	1	400 000
Bande transporteuse	1	11 000
Overband magnétique	1	230 000
TOTAL		641 000

Tableau VI.2 : Investissements nécessaires pour le traitement des fines

Le coût de l'installation serait de l'ordre de 650 000 FF

La durée d'amortissement pourrait être de 6 ans.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Les conclusions sont de deux sortes :

☐ Le travail a permis d'apporter des connaissances nouvelles sur les mélanges de métaux, de verres, de cailloux et de matière organique, contenus dans les fractions fines des RBA.

☐ Le travail a permis de tester différentes techniques classiques et nouvelles, adaptables au traitement des fines de RBA, dans l'esprit, à la fois d'obtenir des combustibles et des métaux et de réduire au maximum la quantité de la mise en décharge.

1 - Résultats de la caractérisation des fines de RBA :

Les principaux résultats des études qualitatives et quantitatives ont permis de mieux encadrer le champ d'action des opérations de triage mécanique et de mieux connaître les limites imposées a priori par la nature de la matière composite à trier.

1.1 - Etude qualitative :

La caractérisation des fines 0 à 15 mm, a amené à considérer une fraction légère et une fraction lourde.

La **fraction légère**, flottant dans l'eau se décompose en :

■ fraction carbonée légère, constituée par le bois, la peluche, la mousse et le polystyrène, et qui se trouve dans les tranches supérieures à 2 mm;

■ fraction carbonée lourde, constituée par des plastiques et des caoutchoucs, et qui se trouve dans les tranches supérieures à 1 mm;

La **fraction lourde** "sensu stricto", constituée par les métaux, les cailloux et les verres. L'aluminium est groupé dans la tranche 4 à 15 mm; les autres métaux ferreux et non ferreux se rassemblent dans la tranche 0,5 à 15 mm.

Bien que la tranche < 1mm soit constituée par des légers, on remarque un fait essentiel pour l'aptitude à l'incinération :

☛ les teneurs en cendre augmentent avec la finesse du produit, donc dans les tranches inférieures à 1 mm. En conséquence la fraction des légers, présentant la meilleure aptitude à l'incinération, est la fraction granulométrique 1 à 15 mm et surtout 4 à 15 mm.

1.2 - Etude quantitative :

La méthode d'analyse en composantes principales, effectuée sur les données recoltées sur les sites de production, montre que les fines 0 - 15 mm se chargent de plus en plus en zinc lixiviable (selon les tests AFNOR NF X 31-210) avec le temps (Annexe 8).

La proportion des fines, indépendante du site, oscille autour d'une moyenne de $52 \pm 17\%$ en poids du tout venant. Elle est donc très variable.

Il n'en demeure pas moins que chaque site possède des caractéristiques propres :

○ "D", avec des quantités de produits d'une dimension inférieure à 0,5 mm, plus abondantes qu'ailleurs;

○ "F", avec des quantités plus importantes de produits de dimension supérieure à 0,5mm;

○ "E", avec des quantités plus constantes dans le temps, en composition et en poids, pour les tranches inférieures à 0,5 mm et 0,5 - 15 mm.

2 - Résultats des opérations de triage

Ces opérations ont été menées en partie en laboratoire et en partie à l'échelle semi-industrielle, voire industrielle.

Les techniques qui ont été retenues sont la séparation pneumatique, la séparation magnétique et la séparation par courants de Foucault. Deux voies de traitement : dans l'eau et à sec ont été considérées.

2.1 - La voie humide

La voie humide, appliquée en laboratoire ne présente qu'un intérêt restreint, même si elle est suivie d'un séchage et de traitement par voie magnétique et électrostatique:

☞ D'une part, parce que les tables à secousses ne sont efficaces que sur des tranches granulométriques limitées, au dessous de dimensions millimétriques. Par exemple, les travaux qui ont porté sur des fractions inférieures à 1 mm, montrent que l'extraction des cailloux est valable, mais les produits métalliques restent très mixteux.

☞ D'autre part, parce que les opérations de concentration par voie électrostatique ne peuvent satisfaire ni au critère récupération, ni au critère enrichissement. C'est ainsi que le concentré cuivre de la tranche 0,5 à 1 mm, titrant de 18,64 % Cu, ne représente qu'une très faible fraction en poids, soit 0,85 % en poids du brut 0 - 15 mm.

2.2 - La voie sèche

La voie sèche, appliquée à la fois à l'échelle semi-industrielle et industrielle, fait intervenir :

- ➡ des techniques électromagnétiques et/ou basées sur les courants de Foucault;
- ➡ des techniques faisant appel à la gravité avec les tables pneumatiques.

Les séparateurs existants sont déjà connus en valorisation des minerais comme des appareils fiables et "rustiques". Il peuvent être manipulés par du personnel peu qualifié et formé sur "le tas".

L'étude comparée des différents filières qui ont été analysées propose la solution suivante :

La fraction 4 - 15 mm peut être traité directement dans l'usine existante de LORMET, sur le circuit déjà établi. Les produits légers, très peu polluants, peuvent être mis en décharge ou utilisés comme matière médiocrement combustible dans des fours à cuve, type four à chaux. Ces produits représentent environ 21 % en poids du brut (0 à 15 mm). On récupère aussi des produits métalliques de faible valeur, constitués par un concentré de métaux non ferreux, soit 3,9 % en poids (du 0 - 15 mm), et un concentré magnétique qui représente 4,6 % en poids. Les non magnétiques des produits lourds, après extraction des métaux qu'ils contiennent, sont extractible par séparation à courants de Foucault. Le stérile obtenu est appelé stérile mixte. Il représente environ 16 % en poids et peut être mis en décharge ou reuni au stérile léger précédent, pour être incinéré. Dans ce cas, on obtient un produit Stérile I, représentant 37,27 % en poids, qui, après l'incinération, ne représente plus que 15,7 % à mettre en décharge.

La fraction 0 - 4 mm, après un traitement par table pneumatique, délivre trois types de produits :

⇒ Poussières d'aspiration, représentant environ 7 % en poids du 0 - 15 mm. Il s'agit d'un produit présentant des risques de mise en décharge avec des teneurs en métaux, S et Cl supérieures aux limites légales.

⇒ Produits légers (Stérile II), représentant environ 37,8 % en poids du 0 - 15 mm. Ces produits doivent être mis en décharge, malgré leur contenu en S et Cl inférieur ou égal à la limite légale.

⇒ Produits lourds, représentant environ 1 % en poids du 0 - 15 mm. Il s'agit d'un produit mixteux, peu pollué en éléments gênants comme As, Hg, S et Cl, mais de valeur marchande faible.

⇒ Produit magnétique, représentant environ 8,5 % en poids du 0 - 15 mm.

3 - Bilan matière de l'opérations de triage sur les RBA

Pour la fraction 4 - 15 mm, qui représente 45,78 % en poids du 0 - 15 mm, après les opérations du lavage, séparation magnétique et séparation par courants de Foucault, on récupère les produits suivants (en % poids par rapport au brut 0-15 mm) :

- Produit lourd :	3,91 %
- Produit magnétique :	4,60 %
- Stérile I :	37,27 % :
	- produit léger : 21,12 %
	- produit mixte-lourd 16,15 %

Pour la **fraction 0 - 4 mm**, qui représente 54,22 % en poids du 0 - 15 mm, après les opérations du tablage pneumatique et séparation magnétique, on récupère les produits suivants (en % poids par rapport au brut 0-15 mm) :

- produit lourd : 0,94 %
- produit magnétique : 8,43 %
- poussières d'aspiration : 7,04 %
- Stérile II : 37,81 % :
 - produit léger 1 : 23,64 %
 - produit léger 2 : 14,17 %

L'ensemble des opérations sur la fraction 0 - 15 mm donne les résultats résumés dans le tableau B et sur la figure IV.15 :

Produits récupérés	% en poids par rapport au brut 0 - 15 mm	Destination
concentré magnétique	13,03	métallurgie
concentré des métaux non ferreux	4,85	métallurgie
Stérile I	37,27	combustible ou décharge classe II
Stérile II	37,81	décharge classe II
poussières d'aspiration	7,04	décharge contrôlée

Tableau B : Répartition en % poids et destination des produits récoltés selon la figure IV.15

Le bilan peut donc se résumer ainsi :

- A partir d'une masse de matière polluante, tant sur le plan du PCB, de S, de Cl et des métaux, il est possible de reléguer la pollution dans une masse représentant seulement 7 % environ en poids.
- Les métaux sont différenciables en deux catégories : magnétiques et non magnétiques.
- Les légers, rendus non polluants, peuvent être mis en décharge.

Annexes

ANNEXE 1

SITUATION DU RECYCLAGE DES METAUX NON FERREUX EN FRANCE

La récupération des déchets industriels est une activité ancienne qui s'est largement développée au cours des dernières décennies, en raison des deux guerres mondiales, des périodes de reconstruction et de reprise économique. La quantité de déchets industriels traités est non négligeable puisqu'elle atteint 15 millions de tonnes par an, avec un chiffre d'affaires annuel de 22 milliards de francs. Au sein de cette activité, une part prépondérante est tenue par les matières premières métalliques.

Le recyclage des ferreux est proche de 10 millions de tonnes par an, et celui des non-ferreux de 900 000 tonnes par an avec des taux de couverture des besoins, respectivement de 38 % et de 30 % (rapport du tonnage recyclé par rapport à la consommation).

Une évaluation précise du recyclage concernant différents métaux tels l'aluminium, le cuivre, le plomb, le zinc, le nickel et l'étain est donnée dans le tableau A.1:

ANNEE 1990	Matière recyclée T/an	Pourcentage par rapport à la consommation totale	Economie d'énergie / tonne recyclée en TEP	Economie d'énergie annuelle en TEP	Economie en devises en équivalent métal en MF
ALUMINIUM	276 000	29 %	2,9	800 400	3 400
CUIVRE	149 400	31 %	2,1	313 700	2 200
NICKEL	15 700	35 %	2,9	45 500	900
ZINC	73 900	26 %	1,2	88 700	700
PLOMB	165 700	65 %	0,3	49 700	740
ETAIN	1 600	19 %	-	-	60
TOTAL	682 300	-	-	1298000	8 000

Tableau A.1 : Situation française en 1990 dans le domaine du recyclage des métaux (selon MARCE A., 1992)

En moyenne, le rapport du tonnage recyclé à la consommation est de l'ordre de 30 %, excepté pour le plomb (65 %) où l'activité de seconde fusion est fortement développée sur le secteur batteries et l'étain (19 %) où les domaines d'utilisation de ce métal rendent non économique sa récupération. Ces six métaux représentent près de 80 % du tonnage recyclé avec des taux de recyclage compris entre 70 et 90 %, selon le métal considéré.

ANNEXE 2

ACTIVITE DE LA SOCIETE "LORMET"

L'activité principale de LORMET (ex NEWELL INTERNATIONAL) est la séparation et l'extraction de métaux non ferreux contenus dans les déchets broyés d'automobiles et d'autres biens de consommation, comme par exemple les appareils électroménagers.

a) Procédés : plusieurs méthodes de séparation sont mises en oeuvre :

- séparation par criblage;
- séparation magnétique;
- séparation densimétrique en milieu dense (dite flottation);
- séparation par utilisation des courants de Foucault.

b) Approvisionnement :

L'approvisionnement en déchets se fait par contrats mensuels avec les différentes Sociétés de broyage européennes. Le rayon d'action jusqu'au début de 1993 a été le suivant :

- au Nord : Hanovre (RFA);
- au Sud : Barcelone (Espagne);
- à l'Est : Munich (UK);
- à l'Ouest : Liverpool (UK)

c) Production :

Les différentes étapes de la séparation permettent de vendre sur les marchés mondiaux, chaque mois, les métaux suivants :

Magnésium	1 %
Aluminium	54 %
Cuivre	2 %
Laiton	8 %
Acier inoxydable	9 %
Zinc, Zamac	26 %

d) Méthodes d'achat des déchets :

Les déchets sont achetés "au rendement", c'est à dire suivant le contenu métallique trouvé au cours du traitement.

LORMET fixe un prix pour l'Aluminium contenu et un prix pour les autres métaux (métaux lourds : cuivre, zinc, laiton, etc..)

Après elle déduit le coût de traitement et, le cas échéant, le coût de transport.

e) LORMET et la concurrence

LORMET, avec une capacité de 10 à 12 000 T/mois est une unité européenne adaptée à faire face aux opportunités du marché. Elle a été confrontée à une période difficile pour résoudre les problèmes de déchets d'automobile (RBA), entraînés par les nouvelles exigences de l'environnement.

LORMET a décidé de créer une chaîne complète et performante de façon à pouvoir traiter toutes les qualités et toutes les granulométries de déchets RBA.

Etant donné les difficultés d'approvisionnement, LORMET s'efforce d'offrir à ses fournisseurs une technicité spécifique et un savoir-faire reconnus et continuellement mis à jour selon leurs besoins, afin de s'assurer leur fidélité.

Entre autre, si aujourd'hui, un tonnage considérable de déchets dits "déchets banals", sont mis en décharge de classe II, LORMET a la ferme intention de réduire dans l'avenir, au maximum, la quantité mise en décharge.

f) Situation actuelle de LORMET :

Depuis 1988, NEWELL INTERNATIONAL, avait prévu l'évolution du marché et avait considéré comme prioritaire la recherche et la mise au point de procédés de valorisation, leur mise en oeuvre précoce, permettant d'être aujourd'hui, une usine Européenne en mesure de traiter les déchets pauvres de broyeurs (RBA). Des groupes tels que THYSEN ont été intéressés par cette situation.

Aujourd'hui, le capital de l'usine est détenu 100 % par **Thyssen Handelsunion AG**.

g) Engagement de qualité de LORMET

- Approvisionnement :

L'engagement de qualité de LORMET correspond aux garanties suivantes :

- assurance que les produits livrés d'origine automobile ou électroménager sont délivrés de leurs agents polluants ;
- assurance d'une analyse physique et chimique respectant les normes d'environnement requises par l'installation classée et par les décharges de classe II, dans lesquelles sont admis les résidus de traitement non recyclables en l'état à ce jour.
- contenu métallique garanti ;
- régularité quantitative de l'approvisionnement.

L'investissement initial, multiplié par 5 en quatre ans, pour répondre aux critères quantitatifs, qualitatifs et d'environnement, permet à LORMET d'être aujourd'hui parmi les unités européennes bien spécialisées dans le traitement des RBA.

h)- Classification des produits finis sortants d'usine :

1/ Aluminium broyé flotté qualité "A "

Pièces d'aluminium contenant principalement du "carter"

Granulométrie de 15 à 40 mm;

Qualité d'un rendement fusion optimum en four rotatif : minimum 90 %

fer < 1 % et zinc < 1 %

2/ Aluminium broyé flotté qualité "B"

Pièces d'aluminium contenant diverses sortes d'aluminiums dont une grande proportion de carter ;

Granulométrie : de 40 à 80 mm ;

Qualité d'un rendement fusion optimum en four à bassin environ 90 %

fer < 1 % et zinc < 1 %

3/ Aluminium broyé flotté qualité "A/B"

Mélange des deux catégories ci-dessus en proportions à peu près égales, demandées par certains affineurs, en fonction de leur savoir-faire;

Qualité d'un rendement fusion environ 90 %;

fer < 1 % et zinc < 1 %

4/ Aluminium broyé flotté qualité "C"

Grosses pièces d'aluminium diverses :

laminé, casserole, carter, carter légèrement ferré, radiateur, etc...;

Granulométrie : de 80 à 130 mm;

Qualité d'un rendement fusion optimum en four à bassin environ 89 %;

fer < 1 % et zinc < 1 %;

La présence de laminés génère parfois une légère montée en magnésium.

5/ Métaux lourds (en % poids):

Zinc	46
Cuivre, Bronze, Laiton	20
Aluminium	5
Plomb	9
Acier inoxydable	18
Autres	2

ANNEXE 3

Séparateurs à courant de Foucault

Séparation des métaux non ferreux

Principe et Pratique

L'utilisation des courants de Foucault n'est pas nouvelle ; ces derniers sont connus et utilisés depuis plus de 100 ans dans la conception des moteurs électriques, des dynamos et des transformateurs. Le principe de base est le suivant : "Une charge électrique est induite dans un conducteur par des variations du flux magnétique qui le traverse". Ces variations du flux magnétique peuvent être obtenues par le déplacement d'aimants permanents devant un conducteur.

L'effet de ces courants est d'induire un champ magnétique secondaire autour de la particule ; ce champ réagit avec le champ magnétique du rotor et se traduit par la combinaison d'une force motrice et d'une force de répulsion qui éjecte la particule conductrice du circuit des produits.

Dans les séparateurs à courant de Foucault, un rotor magnétique à grande vitesse est installé à l'intérieur d'un tambour non métallique qui tourne beaucoup plus lentement que le rotor afin de produire des variations du flux à la surface du tambour ; le tambour sert également de poulie à la bande qui transporte les produits à séparer (voir figure A.1/2).

Lorsque les particules conductrices (tout objet métallique) transportées par la bande passent au dessus du tambour, le champ magnétique passant au travers des particules y induit des courants, étant donné que ces particules sont de formes aléatoires, le courant induit a des difficultés à les traverser et les courants ont tendance à tourbillonner autour des particules - créant ainsi des courants de Foucault.

Les variables suivantes peuvent avoir une influence sur la séparation :

- forme des particules ;
- granulométrie des particules ;
- conductivité des particules ;
- densité ;
- teneur en eau ;
- collage ;
- teneur en fibres ;
- teneur en métaux.

En outre, les paramètres suivants peuvent être modulés de façon à optimiser les performances du séparateur :

- vitesse de la bande ;
- vitesse du rotor ;
- débit ;
- méthode de distribution ;
- réglages de la séparation du couloir de descente.

Le rotor

Les essais réalisés ont montré qu'il existe une fréquence magnétique optimum à laquelle on obtient une séparation de grande efficacité. Il est nécessaire de disposer d'un rotor à grande vitesse.

La conception du circuit magnétique du rotor - au moyen d'aimants en terres rares de grande qualité - assure un flux magnétique de forte densité et un brusque changement de polarité combiné avec un champ en profondeur.

Le rotor est concentrique au tambour de tête afin de maximiser l'effet magnétique sur la totalité de la surface du tambour ; on produit alors un arc magnétique le plus grand possible.

Le rotor peut tourner dans les deux sens (voir la figure A.1/1):

- vers l'avant : dans le même sens que le tambour ;
- vers l'arrière : dans le sens contraire du tambour ;

Pour les matériaux normaux de granulométrie moyenne à grosse (plus de 10 mm), il est préférable de faire tourner le rotor vers l'avant.

Les petites particules ont tendance à tourner sur elles-mêmes lorsqu'elles sont exposées à un champ magnétique mobile ; cette rotation est contraire à celle du rotor et est beaucoup plus puissante que les forces d'entraînement vers l'avant ; les particules "sautent" donc vers l'arrière, hors de la zone de séparation. En inversant le rotor, les particules sautent vers l'avant (voir la figure A.1/3).

A) Granulométrie 50-100 mm

Pour cette granulométrie assez grosse, comme les morceaux de ferraille, un couloir de séparation comparativement large et bas doit être prévu de façon que les éléments se séparent bien en suivant leur trajectoire (voir la figure A.1/4). Si des forces motrices plus puissantes sont imposées aux particules métalliques non ferreuses, le couloir de séparation peut être placé plus haut et assurer ainsi une séparation plus nette.

B) Granulométrie 10-50 mm

Pour cette granulométrie intermédiaire, on peut resserrer graduellement le réglage des couloirs de séparation (voir la figure A.1/5).

C) Granulométrie inférieure à 10 mm

Pour cette granulométrie, on se sert d'une rotation inverse et on modifie le réglage des couloirs de séparation. La fréquence optimum de rotation inverse peut grandement différer de celle de la rotation vers l'avant.

On fixe un bec non métallique spécial et on place le couloir de séparation aussi près que possible du tambour afin de pouvoir capter les particules sur leur premier rebond (voir la figure A.1/6). Pour les petits matériaux plus difficiles, un deuxième couloir de séparation est fixé juste après le premier et au dessus de la trajectoire des matériaux non métalliques (voir la figure A.1/3), afin de capter les métaux non ferreux ayant manqué le premier couloir et retournant sur le tambour pour y recevoir un deuxième choc.

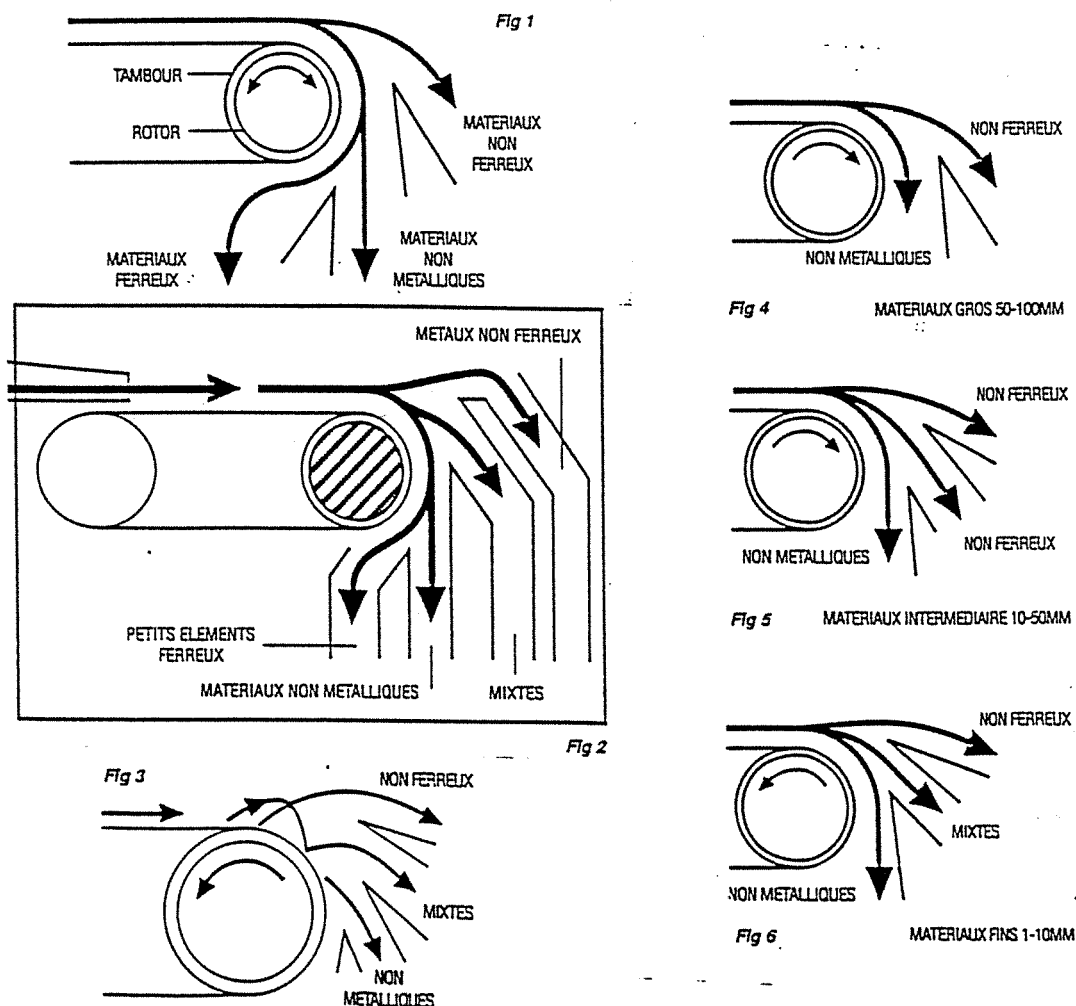


Figure A.1 (A.1/1 - A.1/6): Séparation par courants de Foucault (selon ERIEZ MAGNETICS)

ANNEXE 4

Séparation en milieu dense

Le traitement en liqueur dense permet de séparer entre eux les différents constituants d'un minerai en utilisant leurs différences de poids spécifique.

La liqueur de séparation, suspension de magnétite ou de ferrosilicium dans l'eau, doit avoir une densité comprise entre celles des constituants légers et lourds du minerai à traiter. Plongés dans ce bain de liqueur, les éléments de plus faible poids spécifique se tiennent en surface (flottants) et ceux de plus fort poids spécifique plongent (plongeants).

Un dispositif mécanique permet d'évacuer ces derniers, alors que les flottants sont entraînés par débordement de la liqueur dense de l'appareil.

Le schéma ci-contre illustre une installation type de séparation en milieu dense.

I.-SEPARATION

La séparation s'effectue, suivant le processus décrit ci-dessus, dans un cône ou un tambour.

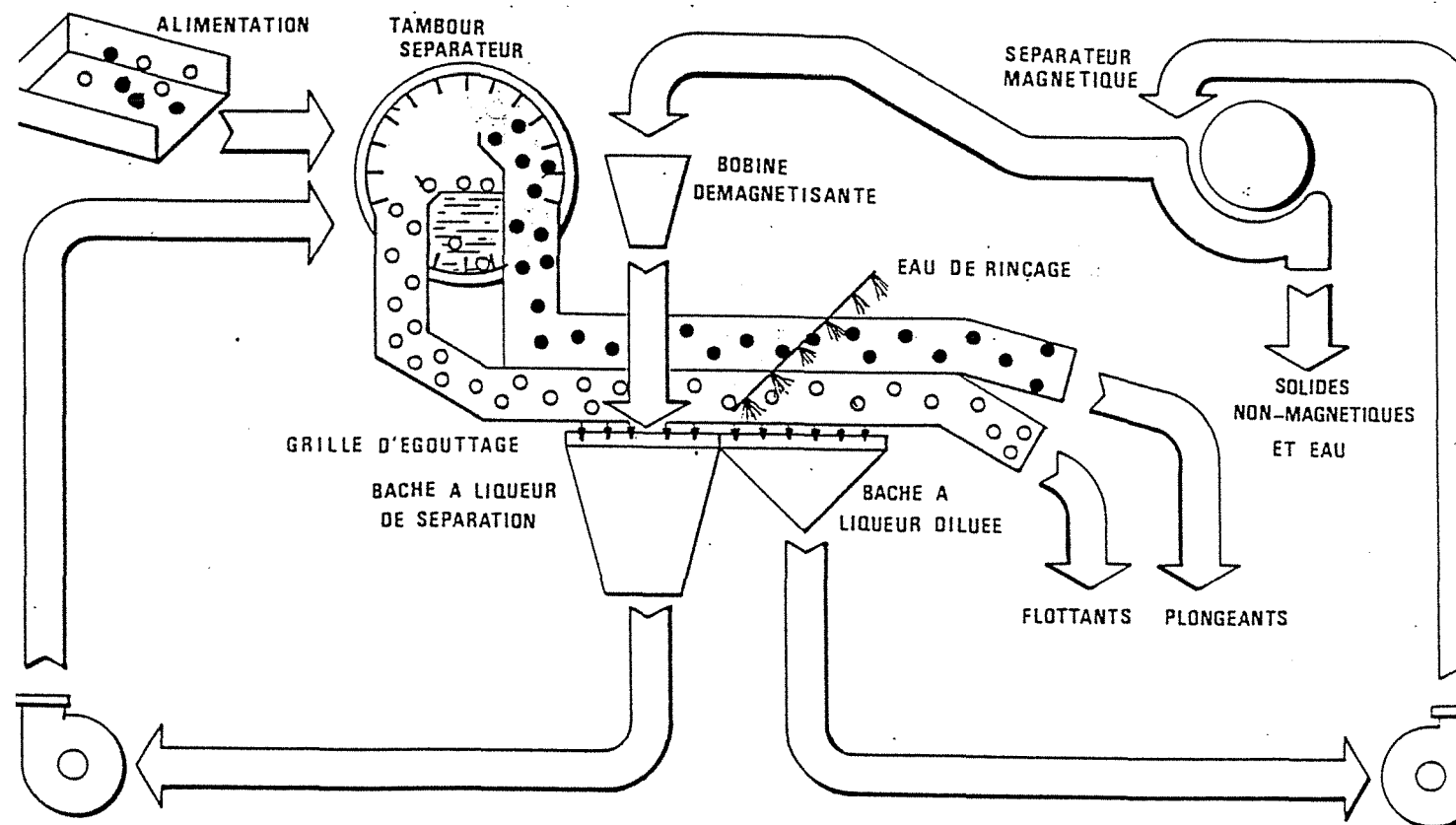


Figure A.2 : Schéma de liqueur dense (selon WEMCO)

II.-EGOUTTAGE-RINCAGE :

Les flottants et les plongeants sont dirigés sur un crible divisé longitudinalement en deux parties, avec un certain débit de liqueur dense qui doit être immédiatement restitué à l'appareil afin de maintenir le niveau nécessaire à l'évacuation des flottants, qui s'effectue par débordement.

On récupère la liqueur :

- a) au travers d'une grille placée dans les couloirs d'évacuation ;
- b) sur la première partie du crible d'égouttage ;
- c) sur la deuxième partie du crible d'égouttage où, mélangée à l'eau de rinçage, elle est dirigée vers le récupérateur magnétique afin d'y être régénérée.

La liqueur récupérée aux postes a et b est restituée directement à l'appareil de lavage par une pompe.

Les constituants séparés sont dirigés par des transporteurs vers les postes de stockage.

III.- RECUPERATION MAGNETIQUE ET RECYCLAGE DE LA LIQUEUR

Le rinçage des produits sur le crible donne une liqueur diluée qu'il est nécessaire de concentrer pour la recycler. Les concentrés magnétiques épaissis et débarrassés des schlamms par le récupérateur magnétique sont dirigés dans la bêche à liqueur dense après passage dans la bobine démagnétisante.

IV.- REGULATION DE LA DENSITE DE LA LIQUEUR :

Il est nécessaire, pour permettre l'évacuation des flottants par débordement dans l'appareil de séparation, d'assurer dans cet appareil la constance du niveau de la liqueur. La récupération de la liqueur ne peut être intégrale à cause du déschlammage du circuit et un appoint périodique de liqueur neuve est indispensable.

Par ailleurs, il est évident que la densité de la liqueur doit être maintenue à la valeur déterminée.

La séparation en milieu dense peut intervenir chaque fois que le minerai à traiter présente une différence de poids spécifique entre ses constituants de valeur et ses stériles.

En général, trois types de minerais peuvent être traités par le procédé de séparation en milieu dense:

- les minerais qui présentent une gangue enveloppante qui peut être séparée par concassage;
- les minerais dans lesquels les constituants de valeur apparaissent sous forme de lentilles ou de veines.
- les minerais dans lesquels les constituants de valeur sont libérés par concassage ou broyage au tamis 1,6 mm (10 mesh) ou à une maille plus élevée.

Avantages de la séparation par milieu dense:

Une séparation précise peut être obtenue dans une gamme de densité comprise entre 1,25 et 3,40 g/cm³. Les flottants et les plongeants sont évacués continuellement. Les frais d'investissement, d'exploitation et d'entretien, l'énergie absorbée sont faibles.

MINERAUX TRAITES :

Barytine, charbons, sable diamantifère, spath fluor, galène, grenat, aluminium de récupération, blende, spodumène, hématite, magnésite, étain, déchets d'aluminium, déchets de batteries, déchets de véhicules.

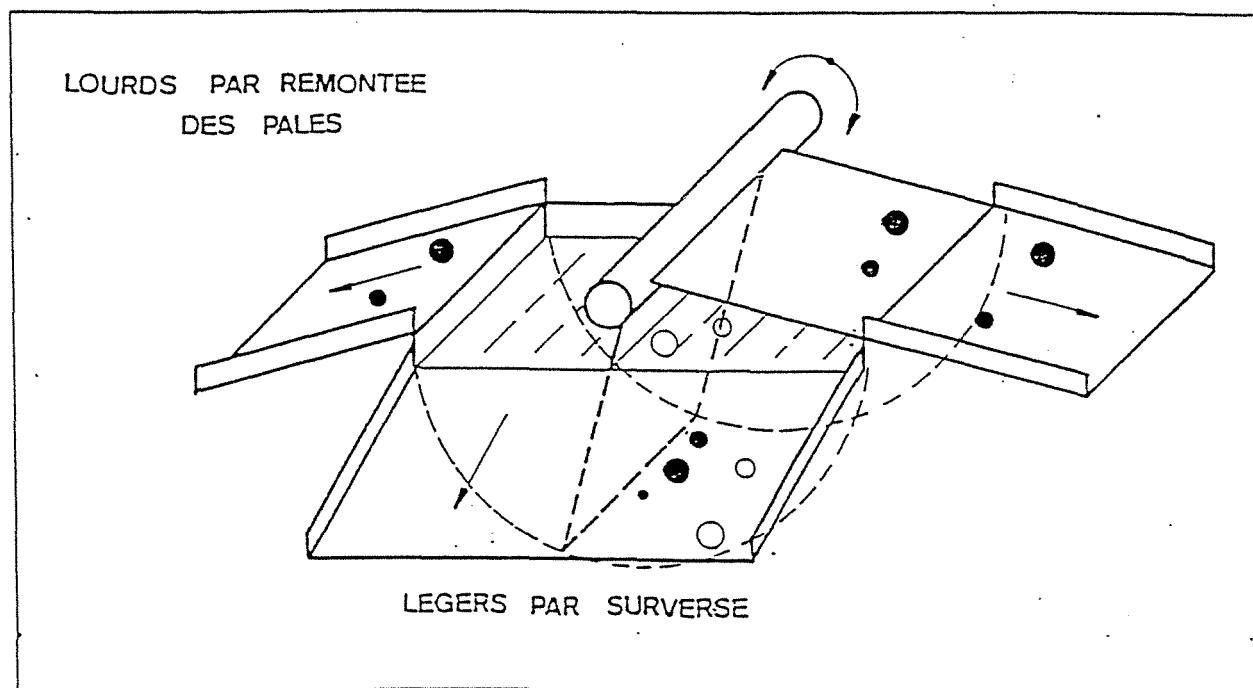


Figure A.3 : Schéma de principe de la séparation densimétrique

Description du produit ferrosilicium 15 atomisé

Le ferrosilicium 15 atomisé est une poudre gris métallique à particules arrondies ou sphériques, qui est obtenue directement à partir du produit en fusion, par atomisation et refroidissement brusque dans des conditions spéciales. La surface des grains est trempée et passivée par une couche protectrice.

Il en résulte :

- une faible viscosité de la pulpe ;
- une haute résistance à la corrosion ;
- une faible usure mécanique de la poudre ;
- une faible usure mécanique des pièces des machines entrant en contact avec la pulpe ;
- de faibles forces d'adhérence à la surface des produits traités.

Caractéristiques :

- Densité au picnomètre	6,4-7,0 g/cm ³
- Masse volumique apparente	3,5-4,2 g/cm ³
- Teneur en silicium	12-17 %
- Remplissage volumique	60-70 %
- Fraction magnétique	min 99,5 %

Applications

Le ferrosilicium 15 atomisé est utilisé pour le traitement des minerais en milieu dense d'environ 2,0 à 3,8 kg/l. Il est utilisé par exemple pour les minerais de fer, manganèse, chrome, plomb, zinc et étain, pour le spathfluor, le barytine, le gypse, la dolomite, la magnésite, les roches diamantifères, le gravier et les ferrailles.

Pour démagnétiser le ferrosilicium, il faut une bobine d'au moins 60 kA/m (700 Oe), au centre de la bobine, et d'environ 95 kA/m lorsque les installations sont équipées de vannes électromagnétiques.

Distribution granulométrique

Ouverture de maille en mm	Super-gros	Spécial-gros	Spécial-fin	Ultra-fin	Cyclon 60	Cyclon 40	Cyclon 40 S	Cyclon 20
+ 0,315	10 - 0	5 - 0						
+ 0,200	25 - 10	9 - 3	5 - 0	5 - 0				
+ 0,100	55 - 40	35 - 20	25 - 10	15 - 5	10 - 0	1 - 0		
+ 0,063	75 - 55	55 - 40	40 - 25	30 - 20	25 - 10	10 - 0	5 - 0	3 - 0
- 0,063	25 - 45	45 - 60	60 - 75	70 - 80	75 - 90	90 - 100	95 - 100	97 - 100
- 0,045					40 - 60	80 - 90	90 - 95	90 - 100

Tableau A.2 : Distribution granulométrique du ferrosilicium 15 atomisé

Avantages

1- Granulométries échelonnées

Dans les installations de séparation à liqueur dense, qu'elles soient de type statique ou dynamique, l'ajustement du milieu dense peut être optimisé par le choix de la granulométrie approprié. Alors que dans les séparateurs statiques (tambours ou cônes), les granulométries plus fortes donnent des pulpes de très faible viscosité, dans les cyclones (séparation dynamique), on utilisera de préférence les qualités Cyclon comportant une fraction élevée de particules extrêmement fines et de structure régulière. La granulométrie la plus fine garantit la stabilité de la pulpe. Dans le cyclone, une étroite distribution granulométrique empêche une décantation et par conséquent une différence excessive de densité entre le lit supérieur et le lit inférieur.

2- Augmentation de densité de la pulpe

Le Ferrosilicium 15 atomisé permet d'obtenir une densité de la pulpe supérieure de 0,8.kg/l à celle obtenue avec le ferrosilicium broyé de même granulométrie. En effet, pour obtenir une viscosité de 50 mPa s, il faut une concentration de 48 %(v/v) conduisant à un poids spécifique de la pulpe de 3,9kg/l, tandis qu'avec le ferrosilicium broyé, il faut, pour obtenir la même viscosité, une concentration de 36 %(v/v) conduisant à un poids spécifique de seulement 3,1 kg/l, avec, dans les deux cas, une granulométrie de 48 mesh. Il en résulte que les impuretés influent beaucoup moins sur la viscosité de la pulpe au Ferrosilicium 15 atomisé que sur la viscosité de la pulpe au ferrosilicium broyé.

3- Viscosité de la pulpe

Les courbes de viscosité des pulpes de densité croissante sont peu influencées par la granulométrie du milieu dense et dépendent beaucoup, par contre, de la forme des grains.

4- Réduction des pertes en milieu dense

Les pertes de milieu dense sont provoquées par :

- l'adhérence du milieu dense au produit traité ;
- les phénomènes de corrosion sur le milieu dense ;
- l'usure mécanique des particules du milieu dense.

En général, les pertes en Ferrosilicium 15 atomisé sont inférieures d'environ 20 à 60 % à celles enregistrées avec le ferrosilicium broyé.

Le Ferrosilicium 15 atomisé est nettement plus résistant à la corrosion que le ferrosilicium broyé. Avec une pulpe neutre et exempte de sel, on n'observe pratiquement pas de pertes par corrosion. Ces avantages s'expliquent par la combinaison de :

- la forme arrondie des grains ;
- la surface passivée ;
- la composition spéciale, brevetée, de l'alliage.

ANNEXE N° 5

Différentes techniques pour la séparation de métaux et non-métaux

Critère de la séparation	Métaux		Non - métaux		Remarques
	Processus	Granulométrie	Processus	Granulométrie	
voie sèche	criblage	+ 1 mm	-	-	-
	classification pneumatique	+ 0,1 mm	-	-	-
	lit fluide	+ 0,3 mm	-	-	-
	"jig" pneumatique	+ 1 mm	-	-	-
	cyclone	+ 0,1 mm	-	-	-
	-	-	séparation en courants	+ 1,0 mm	grande différence en densité
voie humide	séparation en courants	+ 0,1 mm	séparation en courants	+ 1,0 mm	grande différence en densité
	table à secousses	0,1 - 5,0 mm	-	-	-
	"jigging"	5 - 50 mm	-	-	-
	milieu dense	3 - 75 mm	milieu dense	+ 1,0 mm	densité différentiel 0,02
	cyclone	+ 0,1 mm	cyclone	+ 0,1 mm	-
propriétés optique	tri automatique	1 - 15 mm	-	+ 10 mm	-
propriétés électriques	séparation en haut voltage	+ 0,1 mm	séparation en haute voltage	10 mm	granulométrie non-dispersé et pureté de la surface
propriétés magnétiques	bas champ magnétique	+ 0,2 mm	-	-	-
	haut champ magnétique	+ 0,2 mm	-	-	-
	techniques de répulsion eddy-courant	10 - 150 mm	-	-	-
propriétés hydrophob.	-	-	flottation	+ 0,1 mm	-
propriétés thermiques	-	-	système mécanique	+ 10 mm	séparation de thermo et duro-plastique

Tableau A.3 : Différentes techniques pour la séparation de métaux et non métaux
(selon ROUSSEAU M. et MELIN A., 1989)

ANNEXE N° 6

Séparation par l'air (pneumatique)

Principe de la séparation par l'air :

- * Briser les amalgames en projetant les matériaux sur une plaque métallique inclinée.
- * Créer un fort courant d'air à l'aide d'une turbine, afin d'aspirer les "légers" (terre, mousse, polystyrène...).
- * Récupérer les "légers" à l'aide d'un cyclone.

Méthode :

- * Les produits convoyés par une bande transporteuse sont projetés sur une plaque inclinée, ce qui provoque l'éclatement des amalgames.
- * Les produits lourds et denses perdent leur vitesse au contact de la plaque et chutent à sa base.
- * Les matériaux légers sont entraînés par le courant d'air ascendant, provoqué par un cyclone dont la base est équipée d'une vanne-écluse.

Il sont séparés de l'air d'entraînement par dépression dans le cyclone et récupérés par la vanne-écluse. L'air évacué au sommet du cyclone est canalisé vers l'entrée de la turbine. L'air utilisé pour cette séparation circule en circuit fermé.

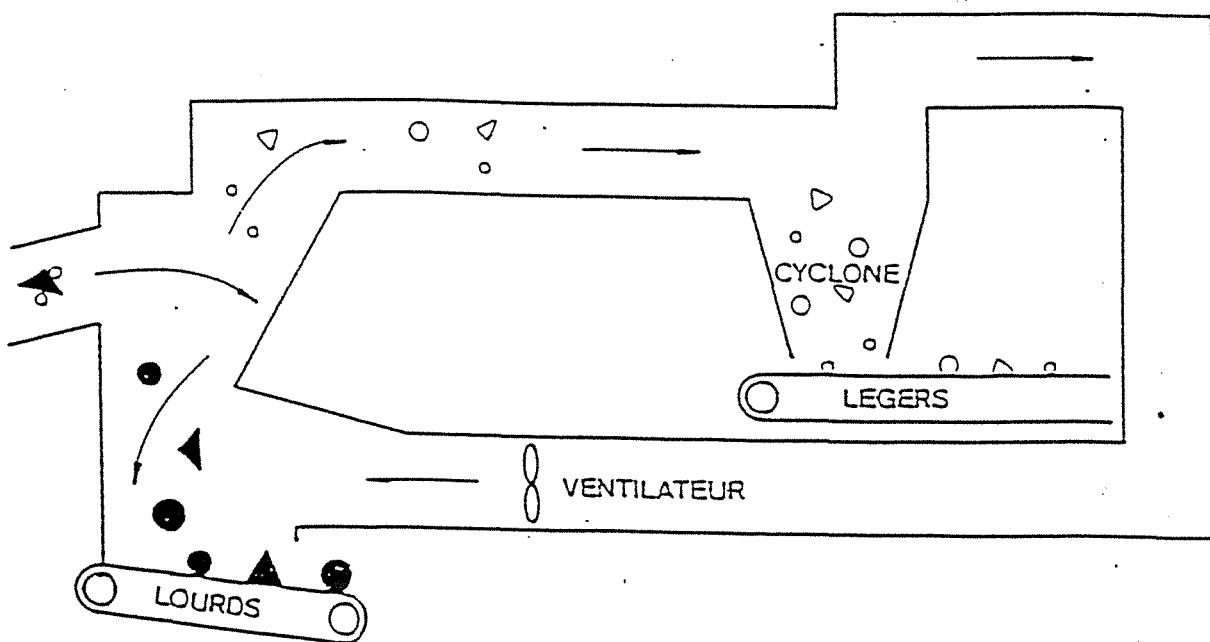


Figure A.4 : Schéma de principe de la séparation par l'air

ANNEXE N° 7

Principe de la séparation en colonne d'eau

- * Laver les matériaux;
- * Séparer par surverse les produits de densité inférieure à 1 g/cm^3 .

Méthode :

- * Les produits sont admis dans une cuve de 4 m^3 alimentée par le fond en eau sous pression.
- * Les matériaux légers, flottants, sont isolés par surverse.
- * Les lourds plongent au fond de la cuve et sont remontés à l'aide d'un convoyeur à bande incliné.
- * La cuve est vidangée par gravité dans les piscines de décantation à la fin de chaque poste.

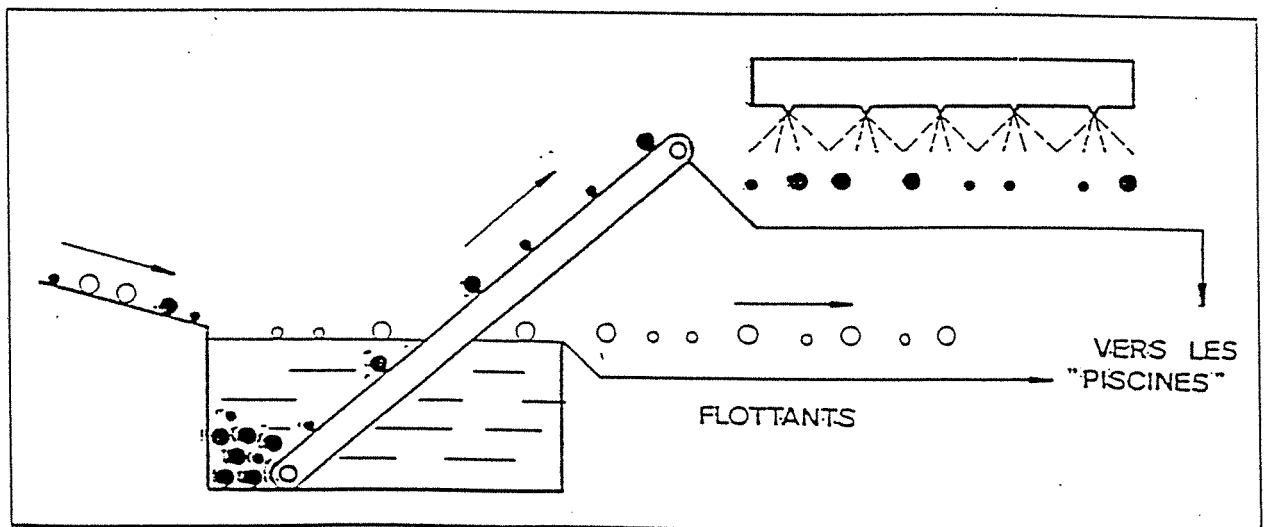


Figure A.5 : Schéma de principe de la séparation en colonne d'eau

ANNEXE 8

Analyses des lixiviations des produits mis en décharge

La lixiviation des quatre produits qui sont destinés à être mis en décharge, fait partie du contrôle des déchets sortants de l'usine.

Les méthodes de lixiviation sont régies par la norme AFNOR NF X 31-210 de décembre 92.

Cette norme de méthodologie des tests impose :

- de déterminer l'humidité du produit et la quantité de métaux lixiviés ;
- de procéder à trois lixiviations successives sur des échantillons de 100 g pour les quatre produits, dans un litre d'eau chargée en CO₂.
- les résultats sont déterminants pour la contenance des 4 métaux :

Plomb (PB), Zinc (Zn), Cuivre (Cu) et Nickel (Ni)

Dans les tableaux suivants sont présentés les résultats des lixiviations effectuées entre novembre 91 et février 93, concernant les quatre produits sortants de l'usine, destinés à être mis en décharge :

- 1)- fines 0-15 mm ;
- 2)- légers de prélavage ("fluff") ;
- 3)- stériles de séparation par courants de Foucault ;
- 4)- boues de décantation.

ETUDE des FLUFFs de Pré-lavage

Dates :		11/91	04/92	05/92	10/92	02/93
Fraction		% /Poids	% /Poids	% /Poids	% /Poids	% /Poids
Caoutchouc		5	9	13	17	16
Bois		2,5	1	4	5	8
Métaux		6,5	6	3	4	4
Plastiques		5	19	18	12	19
Mousses et Fils		43	47	25	10	22
Tapis / Fibres		38	18	37	52	31
Cailloux		0	0	0	0	0
Humidité (%)		43	21	18	19	18
LIXIVIATION		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Désign.	LIXIV.					
Pb	I	0,4	0,1	0,1	0,2	0,1
	II	0,2	0,1	0,0	0,1	0,0
	III	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
Zn	I	0,89	0,13	0,69	14,9	31,4
	II	0,16	0,07	2,35	29,0	3,4
	III	0,04	2,34	0,48	16,1	19,0
Zn (CTR)	I				17,9	
	II				22,6	
	III				14,6	
Cu	I	0,05	< 0,1	0,15	0,07	0,05
	II	0,02	< 0,1	0,08	0,03	0,02
	III	0,01	< 0,1	0,05	0,0	0,00
Ni	I	N.C.	< 0,1	0,04	0,1	0,12
	II	N.C.	< 0,1	0,04	0,1	0,00
	III	N.C.	< 0,1	0,02	< 0,1	0,07
Phénol	I	1,46	0,97	0,08	0,12	0,08
	II	0,1	0,09	0,04	0,03	0,03
	III	< 0,1	0,05	0,04	0,01	0,02
HC	I	4,7	3,02	1,73	2,72	1,79
	II	4,5	2,80	3,45	1,53	2,62
	III	2,9	1,46	1,86	1,27	1,65

Tableau A.4

ETUDE des FINES						
Dates :		11/91	04/92	06/92	10/92	02/93
Fraction		% /Poids	% /Poids	% /Poids	% /Poids	% /Poids
Classe	> 4 mm	34,00	33,00	15,00	27,00	13,25
Classe	< 4 mm	66,00	67,00	85,00	73,00	86,75
Humidité (%)		12 %	8 %	10 %	30 %	6 %
LIXIVIATION		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Désign.	LIXIV.					
Pb	I	0,1	< 0,1	0,0	0,1	0,0
	II	0,1	< 0,1	0,0	0,1	0,0
	III	0,0	< 0,1	0,0	0,1	0,0
Zn	I	1,08	0,55	0,32	15,3	7,7
	II	0,06	0,14	1,28	20,2	3,8
	III	0,03	0,13	0,48	10,3	8,4
Zn (CTR)	I				14,6	
	II				10,3	
	III				7,3	
Cu	I	0,08	< 0,1	0,05	0,15	0,11
	II	0,01	< 0,1	0,05	0,07	0,03
	III	0,01	< 0,1	0,03	0,03	0,01
Ni	I	0,1	< 0,1	0,01	0,11	0,07
	II	< 0,05	< 0,1	0,05	0,11	0,00
	III	< 0,05	< 0,1	0,03	< 0,1	0,02
Phénol	I	0,23	0,4	3,00	0,1	0,04
	II	0,1	0,1	0,11	0,11	0,01
	III	< 0,1	0,0	0,02	0,02	0,02
HC	I	0,2	1,03	0,76	1,55	2,11
	II	0,1	0,86	1,53	1,42	2,27
	III	< 0,1	0,99	1,08	1,33	1,05

Tableau A.5

ETUDE des FLUFFS LEGERS de FLOTTATION (LISA)

Dates :		11/91	04/92	06/92	10/92	02/93
Fraction		% /Poids	% /Poids	% /Poids	% /Poids	% /Poids
Caoutchouc		61	56	45	52	68
Bois		4	3	5	5	3
Métaux		7	4	3	5	7
Plastiques		11	18	29	15	14
Mousses et Fils		5	6	3	11	3
Tapis / Fibres		9	5	10	7	3
Cailloux		3	8	5	5	2
Humidité (%)		11	8	6	N.C.	7
LIXIVIATION		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Désign.	LIXIV.					
Pb	I	0,1	0,5	0,0	0,1	0,1
	II	0,1	< 0,1	0,0	0,1	0,1
	III	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1
Zn	I	0,03	2,53	0,94	2,6	9,8
	II	0,02	0,73	3,39	5,6	0,7
	III	0,01	1,54	0,76	2,2	5,5
Zn (CTR)	I				3,4	
	II				3,7	
	III				3,1	
Cu	I	0,01	0,2	0,05	0,11	0,5
	II	0,01	< 0,1	0,03	0,1	0,02
	III	0,01	< 0,1	0,02	0,07	0,06
Ni	I	< 0,05	< 0,1	0,08	< 0,1	0,05
	II	< 0,05	< 0,1	0,04	< 0,1	0,00
	III	< 0,05	< 0,1	0,02	< 0,1	0,00
Phénoi	I	< 0,1	0,05	1,52	0,52	0,02
	II	< 0,1	0,03	0,02	0,02	0,01
	III	< 0,1	0,03	0,04	0,02	0,02
HC	I	0,3	0,52	0,33	1,15	2,46
	II	0,2	0,54	0,95	0,54	2,49
	III	1,7	0,92	0,74	0,75	1,77

Tableau A.6

ETUDE des BOUES de Décantation

Dates :		11/91	04/92	06/92	10/92	02/93
Fraction		% /Poids	% /Poids	% /Poids	% /Poids	% /Poids
Classe	< 4 mm	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Humidité (%)		20,00	33,00	50,00	30,00	29,00
LIXIVIATION		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Désign.	LIXIV.					
Pb	I	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0
	II	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
	III	0,0	< 0,1	0,0	0,0	0,0
Zn	I	0,06	0,31	0,03	0,8	6,1
	II	0,02	0,16	0,07	4,4	3,0
	III	0,02	0,11	0,13	4,0	4,2
Zn (CTR)	I				1,6	
	II				1,7	
	III				4,9	
Cu	I	0,02	0,39	0,03	0,04	0,01
	II	0,01	< 0,1	0,02	0,01	0,02
	III	0,01	< 0,1	0,01	0,00	0,00
Ni	I	< 0,05	< 0,1	0,02	< 0,1	0,03
	II	< 0,05	< 0,1	0,03	0,1	0,02
	III	< 0,05	< 0,1	0,02	0,1	0,01
Phénol	I	< 0,1	0,3	4,25	0,02	0,02
	II	< 0,1	0,2	0,18	0,00	0,01
	III	< 0,1	0,1	0,10	0,00	0,02
HC	I	< 0,1	0,18	0,84	1,33	1,51
	II	< 0,1	0,56	0,75	1,27	2,89
	III	0,7	0,83	1,09	1,25	0,39

Tableau A.7

ANNEXE 9

TABLE PNEUMATIQUE BIRTLEY

La table pneumatique BIRTLEY est utilisée depuis des années, d'abord dans l'industrie charbonnière pour l'épuration du charbon puis dans les mines, les carrières et la métallurgie, entre autres pour le traitement des minerais, la classification des calcaires et dolomies ou l'enrichissement des scories métalliques.

Aujourd'hui les techniques de récupération et de recyclage intéressent tous les secteurs et requièrent des procédés économiques, fiables et faciles à mettre en oeuvre.

Domaines d'application

- Dégrossissage, épuration des charbons ; retraitement des terrils.
- Préconcentration et enrichissement des minéraux divers et retraitement des résidus.
- Récupération des imbrûlés et des inertes dans les cendres.
- Nettoyage des végétaux par élimination des pierres et des enveloppes des graines et autres matières.
- Classement en grosseurs progressives de produits à densité uniforme.
- Séparation de matériaux de même famille, mais de taille et de densité différents : os, matières plastiques, produits métalliques ou séparation des matériaux composites : conducteur métallique et isolant, métal et plastique ;
- Triage des déchets urbains solides entre matériaux inertes et matériaux combustibles.
- Triage et épuration de matériaux de construction recyclés.

Principes de fonctionnement

Le mélange à traiter est amené sur le deck qui est une surface perméable traversée par un courant d'air et animée d'un mouvement alternatif contrôlé.

Les matières ainsi fluidisées et mises en mouvement vertical se séparent en couches d'éléments de poids décroissant de bas en haut. Un calibrage approprié préalable empêchera les grosses particules de faible densité de rester mélangées avec les fines de forte densité.

Les produits lourds sont seuls en contact avec le deck et le mouvement de secousses associé à la pente longitudinale les fait monter le long des riffles vers la tôle de barrage où ils se tassent avant de se déverser à la partie haute de la décharge. Le barrage permet ainsi la concentration des produits plus légers obligés de se déverser avant les lourds latéralement.

Les produits légers flottent et, aidés par la pente transversale, se déversent à la partie basse de la décharge par dessus la bordure réglable.

Les produits intermédiaires appelés aussi mixtes, après avoir été entraînés sur une certaine distance, se séparent entre les légers et les lourds et sont recueillis séparément ; leur renvoi en tout ou en partie en tête de l'installation permet d'obtenir un effet auto-régulateur à l'alimentation.

Les produits classés sont ainsi recueillis dans l'ordre de densité croissante et cela sur une grande longueur avec un contrôle visuel permanent. Des couteaux réglables dans la décharge permettent de réaliser la ou les coupures désirées.

Caractéristiques techniques

Tous les paramètres de fonctionnement sont réglables soit en marche soit lors d'un court arrêt de l'installation.

Paramètres de fluidisation :

- decks disponibles en matériaux, perforations et pourcentage de vide adaptés au produit à traiter.
- contrôle du débit, de la pression et de la distribution de l'air.
- possibilité de monter un dispositif de pulsation de l'air.
- contrôle de l'épaisseur du lit fluidisé par barrière mobile.

Paramètres de mouvement :

- pentes longitudinale et transversale de la table.
- fréquence et amplitude des secousses.
- composantes horizontale et verticale du mouvement.

Avantages :

- * Suspension de la table par billettes montées sur silent-blocks.
- * Possibilité d'installer une hotte d'aspiration des poussières avec cyclone et/ou filtre en aval et recyclage de l'air.
- * Coupure ajustable par couteaux mobiles dans la décharge.
- * Débit de quelques dizaines de kilos à plus de 10 t/h selon les caractéristiques du produit.
- * Puissance totale nécessaire de 0,5 à 3 kW/t.
- * Dimensions de la table : 3,25 x 1,70 x 1,50 m.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME (1993) "Les déchets en France. Quelques chiffres clés", 1993.
- AFNOR (1993) "Traitement des véhicules hors d'usage (VHU)"
Normalisation française, R 10-401, décembre 1993.
- ANONYME (1990) "Le beau marché des épaves" *DYNASTEURS*, no.12.
- ANONYME (1992) "Newell International : l'avenir est au recyclage"-
L'EST REPUBLICAIN, 3 mars, article.
- ANONYME (1992) "Adoption du projet de loi sur les déchets" *LES ECHOS*, 4 juin.
- ANONYME (1992) "Aluminium can future hinges on recycling rates"
SECONDARY ALUMINIUM, 11/1992, p.9, London.
- ANONYME (1992) "Broyer, laver, séparer les plastiques pour les recycler"
INFO-DECHETS-ENVIRONNEMENT & TECHNIQUE, mars, no.114.
- ANONYME (1992) "Ce qui sera récupéré demain"
RECYCLAGE / RECUPERATION, 17/07/1992, p. 11.
- ANONYME (1992) "Elimination des déchets : projet de loi adopté par le gouvernement"
INFO-DECHETS-ENVIRONNEMENT & TECHNIQUE, mai, no.116.
- ANONYME (1992) "Hohe Versandleistung im 1. Halbjahr 1992"
RECYCLING, 2-3/1992, Düsseldorf, p.38-42.
- ANONYME (1992) "Marché automobile" *RECYCLAGE / RECUPERATION*, 12 juin, p.19.
- ANONYME (1992) "Qualitätsanforderungen und qualitätssicherung beim Rohstoff
Stahlschrott" *RECYCLING*, 2-3/1992, Düsseldorf, p.28-32
- ANONYME (1992) "Ratification de la convention de Bâle sur les déchets dangereux"
INFO-DECHETS-ENVIRONNEMENT & TECHNIQUE, mai, no.116.
- ANONYME (1992) "RENAULT et BMW s'allient dans le recyclage des épaves"
LES ECHOS, 20 octobre 1992, p. 10.
- ANONYME (1993) "Que deviennent en fin de vie les biens de consommation ? "
ENVIRONNEMENT & TECHNIQUES, INFO-DECHETS, n°132,
décembre 1993, p.27-28
- ANONYME (1993) "L'avenir des déchets industriels" *L'EST REPUBLICAIN*, 17/02/1993.
- ANONYME (1993) "NF X 30-200: Coup d'envoi de la normalisation du système de
management environnemental" *ENVIRONNEMENT & TECHNIQUE /*
INFO-DECHETS, juillet-août 1993, n°128, p.29-30.
- ANONYME (1990) "Comment sont fixés les prix du métal"
LES METAUX NON FERREUX, TDC 397, p.26.
- ANTONIOLI S. (1978) "Durabilité et durée de vie" - dossier,
Délégation aux Economies de matières premières, 02/1978.

- BAHR A. (1982)** "Trennung von NE-Metallen enthaltenden Kunststoffabfällen"
FREIBERGER FORSCHUNGS-HEFTE, A 665 (1982), p.11-127.
- BARON S. (1993)** "La réglementation des installations classées"
RECYCLAGE / RECUPERATION, 12/2/1993, p.24-25.
- BARON S. (1993)** "Le rôle de la juridiction administrative dans le contenu des installations classées" *RECYCLAGE/RECUPERATION*, 12 mars 1993, p.51-53
- BASTER A.TH.; DUBOIS L.E.M. (1986)** "Trennung von Nichtmetallen und Metallen unter Einsatz von Wasserzyklonen" *FREIBERGER FORSCHUNGS-HEFTE*, A 745, S (1982), p.105-117.
- BERTOLINI G. (1992)** "Recyclage des plastiques, cycle vertueux ou cercle vicieux ?"
INFO-DECHETS-ENVIRONNEMENT & TECHNIQUE, mai, no.116.
- BERTOLINI G. (1992)** "Valorisation, recyclage des déchets et création d'emplois"
RECYCLAGE / RECUPERATION, 4/12/1992, p.6.
- BOHME S.(1986)** "Aufstromaero - und - hydrosortierung metallischer Sekundärrohstoffe"
FREIBERGER FORSCHUNGS-HEFTE, A 745,S (1982), p.93-104.
- BREDICHIN V.N. (1982)** "Neue Prozesse für die Aufbereitung von NE-Metallschrotten"
FREIBERGER FORSCHUNGS-HEFTE, A 665 (1982), p.85-90.
- BREGEARD O. (1991)** "Automobiles - La mort propre est exigée"
L'EST REPUBLICAIN, 29 août.
- CAIRNCROSS F. (1993)** "L'interdépendance écologie-économie"
TECHNOLOGIES, avril 1993, p. 97-105.
- CENTRE D'ETUDES ET DE RECHERCHES ECONOMIQUES SUR L'ENERGIE-**
(1979) "Bilan matières premières - Energie de produits substituables"-*Etude-*.
- CLIN F.; BOUVIER J.-M. (1985)** "Pyrolysis of rubber and tyres waste"-*dossier-*, mai 1985
- CORNET O. (1992)** "Environnement : la filière française " *LE MOCI* , 5/10/1992, p.28-29.
- COUZON J.-P.; LABAT F. (1993)** "Ces matériaux qui allègent l'automobile"
TECHNOLOGIES, juin 1993, p.48-56.
- DEAN K.C.; STERNER J.W.; SHIRTS M.B.; FROISLAND L.J. (1985)** "Research on Recycling Scrapped Automobiles"-*Bulletin 684*, BUREAU OF MINES
- DEL VECCHIO J.-M. (1992)** "Recyclable. Jusqu'ou ?"
RECYCLAGE / RECUPERATION, 17 juillet, dossier, p. 5-6
- DEL VECCHIO J.-M. (1993)** "Le recyclage des véhicules hors d'usage" *C.F.F - février 1993*
- DOMMANGET PH. (1993)** "Batteries : Recyclage en péril"
RECYCLAGE/RECUPERATION, 12 mars 1993, p.25.
- DOMMANGET PH. (1993)** "Mais que fait-on des pneus usagés ?"
RECYCLAGE/RECUPERATION, 16 avril 1993, p.41-42.
- ESCANDE Ph. (1992)** "Les ferrailleurs broient du noir" *LES ECHOS*, 14 octobre 1992, p.11
- ESCANDE Ph. (1992)** "La France veut interdire les importations de déchets"
LES ECHOS, 7 juillet, p.7.

- ESCANDE Ph. (1993)** "Recyclage des voitures : les professionnels évitent le décret"
LES ECHOS, 15/02/1993, p.10.
- ESPOSITO O. (1993)** "La chute des prix des matières premières fait des hereux"
L'USINE NOUVELLE, 15 avril, no 2406, p. 32.
- EVENO R. (1992)** "L'incinération, un marché en pleine ébullition"
L'USINE NOUVELLE, 30 avril, no.2362, p.23.
- GIFFELS G. (1992)** "Chancen für die Stahl-recycling-wirtschaft"
RECYCLING, 2-3/1992, Düsseldorf, p.24-27.
- GRUBE P. (1982)** "Kabelaufbereitung nach Kältetechnischer Vorbehandlung"
FREIBERGER FORSCHUNGS-HEFTE, A 665 (1982), p.91-102.
- HANENBERGER P.H (1992)** "Plastiques : près de 15 % du poids total du véhicule en l'an 2000"
RECYCLAGE / RECUPERATION, 17/07/1992, p. 7-9
- HAQUIN B. (1993)** "Dépollution, recyclage : le credo de la Compagnie Française des Ferrailles"
L'USINE NOUVELLE, 6/1993, p.65.
- HUROP G.; SCHUBERT G.; HARTWIG F. (1982)** "Aufbereitung der Schrotte aus des Electrotechnik und Electronik"
FREIBERGER FORSCHUNGS-HEFTE, A 746 50 (1982), p.103-114.
- JODY B.J.; DANIELS E.J.; BONSIGNORE P.V.; BROCKMEIER N.F. (1994)**
"Recovery of recyclable materials from shredder residue". E.P.D. Congress 1994 -
The Minerals, Metals & Materials Society, p.1193-1204.
- KLUN H. (1993)** "Conditions et contraintes du recyclage"
RECYCLAGE/RECUPERATION, 16 avril 1993, p.16.
- KUSIK C.L.; KOPF P.; SABATINI J.C.. (1994)** "The automobile and recycling perspectives". E.P.D. Congress 1994 - *The Minerals, Metals & Materials Society*, p.1205-1208.
- L.P. (1993)** " Le chantier vert des démolisseurs "
ENVIRONNEMENT & TECHNIQUES, INFO-DECHETS, n°132, décembre 1993, p.7.
- LAPERROUSAZ P. (1992)** "Départ de la course au traitement des déchets"
L'USINE NOUVELLE, 27 fevrier, no.2353, p.21.
- LAVE L.B. ; HENDRICKSON Ch.; McMICHAEL F.C.. (1994)** " Recycling, decisions and green design " - *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, vol 28, n°1, p.19-24
- LEHOUX J.-P. (1993)** " Le recyclage : ne laissons pas les mythes détruire les réalités"
ENVIRONNEMENT & TECHNIQUES, INFO-DECHETS, n°132, décembre 1993, p.25-26.
- LINQUIER N. (1993)** "L'industrie automobile astique ses usines"
L'USINE NOUVELLE, 6/1993, p.39.
- MARCE A. (1992)** "Matières premières minérales, recyclage-énergie-environnement"
Journée Technique du 19/11/1992 "Traitement des déchets métalliques"
- MARTY M. (1992)** "L'avenir Pagnotin du recyclage" *L'EST REPUBLICAIN*, 1992.

- MEYER J.-M. (1992) "PSA et RENAULT recyclent chacun pour soi"
L'USINE NOUVELLE, 5 mars, no.2354, p.25.
- MEYER J.-M. (1993) "Le recyclage des plastiques n'est plus un casse-tête"
L'USINE NOUVELLE, 23 septembre 1993, p.70-72.
- MEYER J.-M. (1993) "Radioscopie des procédés de recyclage"
L'USINE NOUVELLE, n°2425, 23 septembre 1993, p.73-75.
- MEYER J.-M. (1994) " L'automobile prend de la vitesse "
L'USINE NOUVELLE n°2443, 10 février 1994, p.40-41.
- MILET A. (1993) "Recyclage des voitures - 85 % en 2002"
INDUSTRIES (Magazine Minist. Ind.), n°15, juillet-août 1993, p.15.
- MILLER A. (1994) " Industry invests in reusing plastics"
ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY, vol 28, n°1, p.16.
- MUELLER H. (1982) "Erfahrung beim Einsatz eines Windsichters"
FREIBERGER FORSHUNGS-HEFTE, A 644 (1982), p.145-150.
- NUTINI D.L.; KINMAN R.N. (1991) "Use of screw-pressed paper sludge as a landfill cover" - *Meeting 1991* - Maastricht (EC).
- O'RORKE PH. (1993) "Presqu'autant de marchés que d'intérêts : Les imbrications"
RECYCLAGE/RECUPERATION, 16 avril 1993, p.22-23.
- O'TOOLE J.P. (1991) "Steelmakers consider issues of competitiveness for autos"
JOURNAL OF METALS, 04/1991, p.8-9.
- PALMER G.R.; LYMAN J.W. (1994) "Nickel-Metal hydride battery recycling" - E.P.D.
Congress 1994 - *The Minerals, Metals & Materials Society*, p.1209-1225.
- PERCIE DU SERT. (1992) "La voiture est un nouveau minéral"
RECYCLAGE/RECUPERATION, n°16, 1992.
- PIETRASANTA Y. (1993) "Recyclage des matières plastiques : Mythe ou réalité?"
RECYCLAGE/RECUPERATION, 16 avril 1993, p.14-15.
- PINEAU J.-L.; KALTANI A. (1993) "Les résidus de broyage d'automobiles, ou RBA" -
MINES & CARRIERES, vol.75, 1993.
- ROHATGI P. (1991) "Cast Aluminium - Matrix Composites for Automotive applications"
JOURNAL OF METALS, 04/1991, p.10-15
- ROUSSEAU M.; MELIN A. (1989) "The processing of non-magnetic fractions from
shredded automobile scrap : A review"
RESOURCES, CONSERVATION AND RECYCLING, 2 (1989), p. 139-159.
- SCHEER K.D. (1982) "Rückgewinnung des NE-Metalle aus Schredderschrott und
Reinigung des anfallenden Schmelzwäser"
FREIBERGER FORSCHUNGS-HEFTE, A 664 (1982), p.169-178.
- SCHUBERT G. (1982) "Entwicklungstendenzen bei der Aufbereitung der Stahl - Gusseisen
und NE-Metallschrotte"
FREIBERGER FORSCHUNGS-HEFTE, A 664 (1982), p.23-47.
- SCHUBERT G. (1991) "Aufbereitung der NE-Metallschrotte und NE-metallhaltigen"
AUFBEREITUNGS-TECHNIK, 32 (1991), no.2, p.78-89

- SCHULZ E. (1992) "Die Zukunft des Stahls im Spannungsfeld zwischen Ökonomie und Ökologie" *RECYCLING*, 2-3/1992, Düsseldorf, p.12-22
- SCHÜNKE G. (1992) "Aus der Verbandsarbeit" *RECYCLING*, 2-3/1992, Düsseldorf, p.34.
- SHAMSUDDIN M. (1986) "Metal Recovery from scrap and waste"
JOURNAL OF METALS, no 2, p.24-31.
- STRATTEN B. (1989) "Golden Developments Inc."
SCIENTIFIC & TECHNICAL CONSULTING, 9 juin, p.32.
- TAQUET S. (1992) "La voiture de demain"
RECYCLAGE / RECUPERATION, 17/07/1992, p. 10-11.
- TAQUET S. (1993) "L'automobile à ECOSITE"
RECYCLAGE/RECUPERATION, 12 mars 1993, p.43-44.
- TAQUET S. (1993) "L'incinération des déchets dangereux"
RECYCLAGE/RECUPERATION, 8 octobre 1993, p.47.
- TAQUET S. (1993) "Les maillons d'une chaîne écologique et économique"
RECYCLAGE/RECUPERATION, 16 avril 1993, p.24-25.
- TAQUET S. (1993) "Plusieurs façons de recycler. Types de plastiques et gestion des déchets. Valorisation énergétique ou chimique"
RECYCLAGE/RECUPERATION, 16 avril 1993, p.10 - 13.
- TAQUET S. (1993) "Qui est le recycleur?"
RECYCLAGE/RECUPERATION, 16 avril 1993, p.18-19.
- TAQUET S.; DOMMANGET PH. (1992) "Recyclage : Les constructeurs y pensent aussi"
RECYCLAGE/RECUPERATION, 20 mars 1992, p.25-26.
- TAYLOR P.R. (1986) "International Symposium on Recycle and Secondary Recovery"
JOURNAL OF METALS, 02/1986, p.38-39.
- TRAPP H. (1992) "Recycling zwischen Wirtschaft und Umwelt"
RECYCLING, 2-3/1992, Düsseldorf, p.8-11.
- VACHETTE PH. (1993) "La valorisation : solution d'attente ou d'avenir?"
RECYCLAGE/RECUPERATION, 16 avril 1993, p.20.
- VOY C.; SCHMIDT J. (1992) "Technische und wirtschaftliche Betrachtungen zur zukünftigen Altautoverwertung" *Deutsche Automobilgesellschaft mbH Braunschweig*
- WIJNARD L.; DALMIJN L.; VOSKUYL W.B. (1982) "Entwicklungstendenzen und Einsatzmöglichkeiten des Wirbelstromscheidung"
FREIBERGER FORSHUNGS-HEFTE, A 664 (1982), p.179-200.
- WILLEKE R. (1992) "Aus der arbeit des BDS" *RECYCLING*, 2-3/1992, Düsseldorf, p34-36

RESUME

Aujourd'hui, sur le poids total d'un véhicule, on sait recycler 70 % sous forme de ferrailles et 5 % sous forme de métaux non ferreux. L'enjeu porte donc sur les 25 % restant (RBA), actuellement mis en décharge et principalement représentés par des matières plastiques, caoutchoucs, verres, bois, mousse, etc. La tâche est énorme puisque le parc annuel des voitures à recycler compte plus que 1,8 million d'unités.

Le traitement des RBA et en particulier de la partie "fine" (< 15 mm), généralement non-traitée et qui représente une grande partie de la mise en décharge, est le but primordial de la présente recherche.

Afin de réduire leur volume et de récupérer toutes les fractions métalliques, des nouvelles techniques ont été mises en oeuvre en laboratoire, ainsi qu'aux échelles semi-industrielle et industrielle.

Il est proposé un criblage à sec, à 4 mm, des fines 0-15 mm. Ensuite la fraction 4-15 mm est traitée par lavage, magnétisme et courants de Foucault. La fraction 0-4 mm est traitée à sec par magnétisme et tablage pneumatique.

Sur la fraction 0-15 mm, on récupère environ 13 % en poids sous forme de produit magnétique, 5 % sous forme de métaux non ferreux et 37 % sous forme d'un stérile faiblement combustible.

ABSTRACT

Today 70 wt % ferrous metals and 5 wt % non-ferrous metals are recycled from the total weight of a discarded vehicle. The other 25 %, called A.S.R (automobile shredder residue), is currently landfilled and represented by plastics, rubber, glass, wood, foams, wires, etc... The annually parc of discarded vehicles is estimated about 1,8 million.

The A.S.R's treatment and specially the fines fraction (< 15 mm) treatment, which constitutes about 30 to 50 wt % of the A.S.R and is currently landfilled, is the primordial aim of this work.

Bench-scale, semi-industrial and industrial technics have been developped to reduce their volume and to recover all the metallic fractions.

The recycling process proposes a 4 mm screening for the input 0-15 mm, followed by an elutriation column treatment, magnetic separation, Eddy - Current - Separation (for the 4-15 mm) ; and a magnetic separation followed by a pneumatic shaking table (for the 0-4 mm).

From the input 0-15 mm, we can recover about 13 wt % as a magnetic fraction, about 5 wt % as non-ferrous metals and about 37 wt % as a weakly combustible product.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	2
A - Situation du problème	4
B - But de la recherche	6

CHAPITRE I : Politique économique et les méthodes du traitement des V.H.U.

I. 1. ECONOMIE	11
I. 1. 1. Mécanismes intervenant dans la fixation du prix des métaux	11
I. 1. 2. Politique économique du traitement de véhicules hors d'usage (VHU)..	12
I. 1. 3. Législation.....	15
I. 1. 4. Objectif écologique et contraintes économiques	16
I. 2. PROBLEMATIQUE DU TRAITEMENT DES V.H.U.	17
I. 3. LES METHODES CLASSIQUES DE TRAITEMENT DES V.H.U.....	19
I. 3. 1. Historique	19
I. 3. 2. Composition des voitures	21
I. 3. 3. Récupération actuelle des pièces réutilisables	25
I. 3. 4. Les techniques classiques utilisées pour la valorisation des R.B.A.	30
I. 3. 5. Evolution actuelle de différentes sortes de plastiques	34
I. 3. 6. Evolution des composants métalliques	38

CHAPITRE II : Les installations de traitement des R.B.A.

II. 1. INTRODUCTION	39
II. 2. BROyage - TRIAGE	40
II. 3. DEFINITION DES R.B.A.....	51
II. 4. DESCRIPTION DE L'USINE DE LA SOCIETE "LORMET S.A."	56
II. 5. GESTION DES PRODUITS ENTRANTS DANS L'USINE	68

II. 6. COMPOSITION QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DES R.B.A TRAITES A L'USINE DE LORMET. VARIABILITE DANS LE TEMPS.....	69
II. 7. GESTION DES PRODUITS (DECHETS) SORTANTS DE L'USINE DE LORMET ET IMPLICATIONS AVEC L'ENVIRONNEMENT.....	76
II. 8. BILAN DE LA SITUATION ACTUELLE	82

CHAPITRE III : *Caractérisation des fines contenues dans les R.B.A.*

III. 1. INTRODUCTION	83
III. 2. ECHANTILLONNAGE	83
III. 2. 1. Méthodologie des prélèvements.....	83
III. 2. 2. Méthodologie de la caractérisation.....	84
III. 2. 3. Données résultantes	84
III. 3. CARACTERISATION DE LA VARIABILITE POUR CHAQUE PROVENANCE.....	85
III. 3. 1. Analyse descriptive des fines inférieures à 15 mm	85
III. 3. 1. 1. Analyse pondérale des fines selon la provenance	86
III. 3. 1. 2. Analyse de la composition des fines	88
III. 3. 2. Caractérisation des fines par tranche et par constituant	91
III. 3. 3. Caractérisation des fines vis-à-vis d'un traitement ultérieur.....	107

CHAPITRE IV : *Valorisation des fines*

IV. 1. INTRODUCTION	111
IV. 2. TRAITEMENT ACTUEL DES "FINES RICHES" (< 15 MM) A L'USINE...	111
IV. 3. ESSAIS EXPERIMENTAUX DE LABORATOIRE SUR LES FINES PAUVRES	113
IV. 4. ESSAIS SEMI-INDUSTRIELS SUR LES FINES PAUVRES	117
IV. 4. 1. Essai type-1	117
IV. 4. 2. Essai type-2	119
IV. 5. ESSAIS INDUSTRIELS SUR LES FINES PAUVRES	122
IV. 5. 1. Essais sur la fraction 4 - 15 mm avec les techniques classiques	122
IV. 5. 2. Essais avec les techniques nouvelles	125
IV. 5. 2. 1. Magnétisme et courants de Foucault	125
IV. 5. 2. 2. Séparation pneumatique (tablage).....	130

IV. 6. SCHEMA FINAL DE VALORISATION DES FINES 0 - 15 mm.....	139
IV. 6. 1. Schéma proposé	139
IV. 6. 2. Choix des appareils.....	141
IV. 6. 3. Valorisation des fractions stériles légères.....	142

CHAPITRE V : Le manque d'aptitude à la valorisation des matières plastiques et les conséquences sur le bilan général
--

V. 1. LA VALORISATION DES MATIERES PLASTIQUES.....	144
V. 1. 1. Récupération de matières premières pour la chimie.....	144
V. 1. 2. Réemploi des matières plastiques.....	145
V. 1. 3. Production d'énergie à partir des matières plastiques	145
V. 2. BILAN GENERAL DE L'OPERATION DE VALORISATION.....	146

CHAPITRE VI : Données économiques concernant le traitement des RBA
--

VI. 1. TONNAGES ET COUTS RAPPORTES A LA TONNE A L'USINE	151
VI. 2. BILAN DES COUTS OPERATOIRES	151
VI. 3. INVESTISSEMENTS, LEUR EVOLUTION DANS LE TEMPS ET DUREE D'AMORTISSEMENT	153

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES.....	155
--	-----

ANNEXES.....	160
--------------	-----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	184
-----------------------------------	-----

Liste des tableaux

Tableau A:	Matériaux récupérés et réutilisés à partir des déchets industriels.
Tableau I. 1:	Répartition (en %) des composants d'une voiture entre 1960 et 1982.
Tableau I. 2 :	Densités des différents groupes-composants d'une voiture.
Tableau I. 3 :	Composition des voitures des trois continents.
Tableau I. 4 :	Composition des voitures Européennes (selon Rousseau M. et Melin A.).
Tableau I. 5 :	Densités des différentes parties d'une batterie.
Tableau I. 6 :	Composition des RBA avant traitement dans 3 différentes installations.
Tableau I. 7 :	Répartition (en %) des différents types de plastiques, utilisés dans la construction automobile (selon des auteurs européens et américains).
Tableau II. 1 :	Evolution du nombre de VHU broyés.
Tableau II. 2 :	Degré de la libération du "scrap" en relation avec le type de marteau utilisé (selon Schubert G. - 1991).
Tableau II. 3 :	Répartition des composants du produit léger, sortant de la deuxième séparation en milieu dense.
Tableau II. 4 :	Répartition du produit léger de la première séparation en milieu dense (selon Wijnard L. et Dalmijn W.L. - 1982)
Tableau II. 5 :	Relevés mensuels des approvisionnements de l'usine de LORMET
Tableau II. 6 :	Relation entre les déchets de l'usine et leur composition moyenne.
Tableau III. 1 :	Proportion des fines (en % poids) par sites d'exploitation selon des contrôles inopinés.
Tableau III. 2 :	Histogramme des proportions des fines en relation avec les provenances.

Tableau III. 3 :	Composition des fines par tranche granulométrique (Prélèvement - 2 échantillons par site d'exploitation).
Tableau III. 4 :	Composition moyenne des différentes fractions de fines.
Tableau III. 5 :	Fluctuations des différentes provenances par tranches granulométriques.
Tableau III. 6 :	Fluctuations en pourcentage par rapport au total de différents composants pour toutes les tranches granulométriques et pour différentes provenances.
Tableau III. 7 :	Moyenne pondérale (en %) des tranches granulométriques (< 15 mm).
Tableau III. 8 :	Répartition (en %) des groupes de composants pour la tranche 8-15 mm.
Tableau III. 9 :	Répartition (en %) des groupes de composants pour la tranche 4-8 mm.
Tableau III. 10 :	Répartition (en %) des groupes de composants pour la tranche 4-2 mm.
Tableau III. 11 :	Répartition (en %) des groupes de composants pour la tranche 1-2 mm.
Tableau III. 12 :	Répartition (en %) des groupes de composants pour la tranche 0,5-1 mm.
Tableau III. 13 :	Synthèse (en %) des groupes de composants pour les fines < 15 mm.
Tableau III. 14 :	Matrice de corrélation à partir des analyses des tranches granulométriques.
Tableau III. 15 :	Rapport pondéraux des fractions > 2 et < 2 mm.
Tableau III. 16 :	Analyses semi-quantitatives (en ppm) de la fraction inférieure à 0,5 mm.
Tableau III. 17 :	Teneurs en zinc dans les fines < 15 mm pour différents sites et après trois lixiviations successives.
Tableau III. 18 :	Teneurs en cendre des différentes tranches granulométriques.
Tableau III. 19 :	Analyse de la composition des plongeants dans l'eau, suivant les tranches granulométriques.
Tableau III. 20 :	Analyse de la composition des flottants dans l'eau suivant les tranches.
Tableau IV. 1 :	Analyses chimiques des produits obtenus par séparation en laboratoire selon la figure IV.2

Tableau IV. 2 :	Résultats des analyses chimiques concernant l'essai type 2, sur la valorisation semi-industrielle des fines 0-4 mm.
Tableau IV. 3 :	Résultats des analyses chimiques sur la fraction légère et la fraction mixte, obtenus après la valorisation industrielle, selon la figure IV.6.
Tableau IV. 4 :	Résultats des analyses chimiques effectuées sur les produits obtenus après valorisation selon figure IV.10.
Tableau IV. 5 :	Qualité des produits incinérés
Tableau VI. 1 :	Coûts opératoires du traitement des RBA.
Tableau VI. 2 :	Investissements nécessaires pour le traitement des fines
Tableau B:	Répartition (en % poids) et destination des produits récoltés selon la figure IV.15
Tableau A. 1 :	Situation française en 1990 dans le domaine du recyclage des métaux (selon Marce A.,1992)
Tableau A. 2 :	Distribution granulométrique du ferrosilicium 15 atomisé
Tableau A. 3 :	Différents techniques pour la séparation de métaux et non métaux (selon Rousseau M. et Melin A., 1989)
Tableau A. 4 :	Résultats des lixiviations successives sur les "fluff"-s de pré-lavage
Tableau A. 5 :	Résultats des lixiviations successives sur les fines
Tableau A. 6 :	Résultats des lixiviations successives sur les légers de la première flottation
Tableau A. 7 :	Résultats des lixiviations successives sur les boues de décantation

Liste des figures

- Figure A : Production de déchets industriels (année '90 - source ANRED Ministère de l'Environnement.
- Figure B : Situation des décharges en Allemagne.
- Figure I.1 : Fréquence de démontage des pièces d'un véhicule hors d'usage.
- Figure I. 2 : Récupération de la matière par les opérations de déshabillage d'un véhicule hors d'usage, avant les opérations de broyage-triage (selon Voy C. et Schmidt J.)
- Figure I. 3 : La voiture "zéro déchet".
- Figure I. 4 : Schéma classique de récupération des métaux dans les RBA.
- Figure I. 5 : Evolution des composants des voitures entre les années 1965 et 1995 (selon Voy C. et Schmidt J. - 1992).
- Figure I. 6 : Consommation des plastiques dans l'industrie européenne de l'automobile en 1988 (selon Voy C. et Schmidt J.)
- Figure I. 7 : Proportion de plastiques dans les voitures.
- Figure I. 8 : Répartition nationale des cimenteries.
- Figure II. 1 : Unité de broyage.
- Figure II. 2 : Répartition nationale des broyeurs.
- Figure II. 3 : Répartition nationale des unités de traitement.
- Figure II. 4 : Schéma d'un broyeur.
- Figure II. 5 : Schéma d'une installation de déchiquetage de carrosseries d'automobiles.
- Figure II. 6 : Répartition (en %) des composants d'une voiture de l'année 1988 (selon CFF).
- Figure II. 7 : Stratégie de la "Marguerite". Automobile an 2000.
- Figure II. 8 : 1ère ligne de séparation de l'usine de LORMET

- Figure II. 9 : 2ème ligne de séparation de l'usine de LORMET.
- Figure II. 10 : Bilan matière de l'usine de LORMET (1ère ligne).
- Figure II. 11 : Bilan matière de l'usine de LORMET (2ème ligne).
- Figure II. 12 : Composition des légers (en % poids) après la séparation densimétrique (2,4 kg/l) et autres tris.
- Figure II. 13 : Composition (en % poids) de la fraction > 130 mm - produit FRANCFORT
- Figure II. 14 : Total des livraisons de THYSSEN à LORMET en 1992.
- Figure II. 15 : Livraison de différents chantiers THYSSEN à LORMET en 1992.
- Figure II. 16 : Composition des produits entrants.
- Figure II. 17 : Composition des produits entrants.
- Figure II. 18 : Origine des déchets générés de l'usine de LORMET.
- Figure III. 1 : Répartition granulométrique de la fraction < 15 mm (valeurs moyennes).
- Figure III. 2 : Répartition de la fraction magnétique et des parties valorisables dans les fines < 15 mm.
- Figure III. 3 : Répartition des différents composants dans les fines < 15 mm.
- Figure III. 4 : Composition de la fraction < 15 mm (exemple - EBENHAUSEN, septembre '92)
- Figure III. 5 : Composition de la fraction 8-15 mm (exemple - EBENHAUSEN, septembre '92)
- Figure III. 6 : Composition de la fraction 4-8 mm (exemple - EBENHAUSEN, septembre '92)
- Figure III. 7 : Composition de la fraction 2-4 mm (exemple - EBENHAUSEN, septembre '92)
- Figure III. 8 : Composition de la fraction 1-2 mm (exemple - EBENHAUSEN, septembre '92)
- Figure III. 9 : Composition de la fraction 0,5-1 mm (exemple - EBENHAUSEN, septembre '92)
- Figure III. 10 : Analyse des tranches granulométriques.
- Figure III. 11 : Essais de regroupement par site (métaux).
- Figure III. 12 : Essais de regroupement par site (caoutchouc-plastiques et légers).

- Figure III. 13 : Essais de regroupement par site (peluches et cailloux).
- Figure III. 14 : Analyse aux Rayons-X (produit DUISBURG et EBENHAUSEN).
- Figure III. 15 : Analyse aux Rayons-X (produit FRANCFORT et MANNHEIM).
- Figure IV. 1 : Schéma de l'installation existante pour le traitement des fines "riches".
- Figure IV. 2 : Essai de valorisation en laboratoire sur les fines pauvres.
- Figure IV. 3 : Essai type 1 de valorisation de fines 0-4 mm.
- Figure IV. 4 : Essai type 2 de valorisation de fines 0-4 mm.
- Figure IV. 5 : Graphiques représentant les éléments mineurs des différents produits, obtenus par la filière type 2.
- Figure IV. 6 : Valorisation industrielle de la fraction 4-15 mm des fines pauvres dans l'installation existante de LORMET.
- Figure IV. 7 : Première variante selon procédé ERIEZ MAGNETICS, avec un traitement intégral de la fraction 0-15 mm.
- Figure IV. 8. a : Deuxième variante selon procédé ERIEZ MAGNETICS, concernant la fraction 0-4 mm.
- Figure IV. 8. b : Deuxième variante selon procédé ERIEZ MAGNETICS, concernant la fraction 4-15 mm.
- Figure IV. 9 : Troisième variante selon procédé ERIEZ MAGNETICS, avec remplacements d'une partie des séparations magnétiques par des séparateurs à courants de Foucault.
- Figure IV. 10 : Valorisation de la fraction 0-4 mm selon technique "BIRTLEY".
- Figure IV. 11: Regroupement des produits obtenus après les essais par technique "BIRTLEY".
- Figure IV. 12: Répartition des différents éléments chimiques (en % et en ppm) pour les trois produits regroupés, obtenus de la première séparation pneumatique.
- Figure IV. 13 : Répartition des différents éléments chimiques (en % et en ppm) pour les deux produits regroupés, obtenus de la deuxième séparation pneumatique.

- Figure IV. 14 : Variations de la teneur en Fe (%) pour les produits regroupés de la séparation pneumatique.
- Figure IV. 15 : Schéma final proposé pour le traitement de l'ensemble de la fraction 0-15 mm.
- Figure V. 1 : Bilan actuel de valorisation.
- Figure V. 2 : Bilan après la valorisation des fines (sans l'incinération).
- Figure V. 3 : Bilan après la valorisation des fines (avec l'incinération).
- Figure A.1 : Séparation par courants de Foucault (selon ERIEZ MAGNETICS).
- Figure A.2 : Schéma de liqueur dense (selon WEMCO).
- Figure A.3 : Schéma de principe de la séparation densimétrique.
- Figure A.4 : Schéma de principe de la séparation par l'air.
- Figure A.5 : Schéma de principe de la séparation en colonne d'eau.

**AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE
DE LORRAINE**

ooo

Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Braboïs

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

**Monsieur ESPIELL Feran, Professeur, Université de Barcelone
(Espagne),**

Monsieur EVRARD Omer, Professeur, Université de Nancy I.

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur KALTANI Arian

à soutenir devant l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

**"Traitement de la fraction fine des résidus du broyage d'automobiles
(R.B.A.)".**

en vue de l'obtention du titre de :

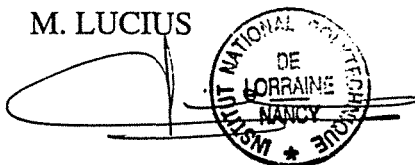
**DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE
LORRAINE**

Spécialité : **"GEOSCIENCES & MATIERES PREMIERES"**

Fait à Vandoeuvre le, **21 Juin 1994**

Le Président de l'I.N.P.L.,

M. LUCIUS



NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 5 4 5 0 1
VANDŒUVRE CEDEX

RESUME

Aujourd'hui, sur le poids total d'un véhicule, on sait recycler 70 % sous forme de ferrailles et 5 % sous forme de métaux non ferreux. L'enjeu porte donc sur les 25 % restant (RBA), actuellement mis en décharge et principalement représentés par des matières plastiques, caoutchoucs, verres, bois, mousse, etc. La tâche est énorme puisque le parc annuel des voitures à recycler compte plus que 1,8 million d'unités.

Le traitement des RBA et en particulier de la partie "fine" (< 15 mm), généralement non-traitée et qui représente une grande partie de la mise en décharge, est le but primordial de la présente recherche.

Afin de réduire leur volume et de récupérer toutes les fractions métalliques, des nouvelles techniques ont été mises en oeuvre en laboratoire, ainsi qu'aux échelles semi-industrielle et industrielle.

Il est proposé un criblage à sec, à 4 mm, des fines 0-15 mm. Ensuite la fraction 4-15 mm est traitée par lavage, magnétisme et courants de Foucault. La fraction 0-4 mm est traitée à sec par magnétisme et tablage pneumatique.

Sur la fraction 0-15 mm, on récupère environ 13 % en poids sous forme de produit magnétique, 5 % sous forme de métaux non ferreux et 37 % sous forme d'un stérile faiblement combustible.

ABSTRACT

Today 70 wt % ferrous metals and 5 wt % non-ferrous metals are recycled from the total weight of a discarded vehicle. The other 25 %, called A.S.R (automobile shredder residue), is currently landfilled and represented by plastics, rubber, glass, wood, foams, wires, etc... The annually parc of discarded vehicles is estimated about 1,8 million.

The A.S.R's treatment and specially the fines fraction (< 15 mm) treatment, which constitutes about 30 to 50 wt % of the A.S.R and is currently landfilled, is the primordial aim of this work.

Bench-scale, semi-industrial and industrial technics have been developped to reduce their volume and to recover all the metallic fractions.

The recycling process proposes a 4 mm screening for the input 0-15 mm, followed by an elutriation column treatment, magnetic separation, Eddy - Current - Separation (for the 4-15 mm) ; and a magnetic separation followed by a pneumatic shaking table (for the 0-4 mm).

From the input 0-15 mm, we can recover about 13 wt % as a magnetic fraction, about 5 wt % as non-ferrous metals and about 37 wt % as a weakly combustible product.

Mots-clés :

Véhicules hors d'usage (VHU); Résidus - Broyage - Automobile (RBA); Tablage pneumatique; Magnétisme ; Courants de Foucault ; Déchets.