



UNIL | Université de Lausanne

Faculté des géosciences
et de l'environnement

Institut de Politique Territoriale et d'Environnement Humain, IPTEH

**« Ecologie industrielle de l'aluminium,
flux de matières et d'énergie :
réalités et enjeux du recyclage »**

Thèse de doctorat

présentée à la

Faculté des Géosciences et de l'Environnement
de l'Université de Lausanne

par

Claude Nicolas Gentaz

*Ingénieur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble
Licencié ès Sciences des Universités de Paris et Grenoble*

Jury :

Prof. Klaus Holliger, Président du colloque

Prof. Jean Rüegg, Président de la soutenance publique

Prof. Suren Erkman, Directeur de thèse

Dr. Daniel CHAMBAZ, expert

Prof. Bernard LACHAL, expert

M. Jean-Marie PACHE, expert

Lausanne

Mai – 2009

A mon épouse

A mes enfants, Valérie
et Nicolas

Lausanne, le 5 Juin 2009



UNIL | Faculté des géosciences
et de l'environnement

Imprimatur

Vu le rapport présenté par le jury d'examen composé de

Président de la séance publique : M. le Professeur Jean Ruegg
Président du colloque : M. le Professeur Klaus Holliger
Directeur de thèse : M. le Professeur Suren Erkman
Expert externe : M. le Professeur Bernard Lachal
Expert externe : M. le Docteur Daniel Chambaz
Expert externe : M. le Docteur Jean-Marie Pache

le Conseil de Faculté autorise l'impression de la thèse de

Monsieur Claude Gentaz

*Titulaire d'un Diplôme d'ingénieur électrochimiste et électrométallurgiste délivré en 1965 par l'Ecole nationale supérieure d'électrochimie
et d'électrométallurgie de Grenoble*

intitulée

**Ecologie industrielle de l'aluminium, flux de matières et
d'énergie: réalités et enjeux du recyclage**

Lausanne, le 5 juin 2009

Pour le Doyen de la Faculté des géosciences et de l'environnement


Professeur Jean Ruegg

Table des matières

Table des matières	1
Liste des figures et tableaux	7
Première partie	13
Introduction.....	13
Chapitre 0. Avant propos	14
0.1. Les changements entre 2003 et 2008 : les acteurs de l'industrie de l'aluminium, les prix de l'aluminium, de l'énergie, de la bauxite, la croissance de l'industrie du recyclage de l'aluminium, la révolution culturelle des désignations	16
0.2 Glossaire	18
0.2.1.. Les produits.....	18
0.2.2. Les déchets (scraps)	19
0.2.3. Les industries du recyclage.....	20
0.2.4. Nos commentaires	21
0.2.5. Terminologie utilisée dans le présent travail.....	22
0.2.6. Nos recommandations	23
0.2.7. Bibliographie.....	24
0.3. Les méthodologies	25
0.3.1. Bibliographie.....	26
0.4. Les indicateurs	28
0.4.1. Les indicateurs globaux (ou intensité de recyclage)	28
0.4.2. Les indicateurs sectoriels.....	29
0.4.2.1. Les indicateurs de production des déchets.....	29
0.4.2.2. Les indicateurs de collecte des déchets	30
0.4.2.3. Les indicateurs de traitement des déchets	31
0.4.3.Bibliographie.....	31
0.5. Les données statistiques.....	33
0.5.1. Bibliographie.....	37
0.6. Les unités énergétiques	37
Chapitre 1. Le matériau aluminium	38
1.1. Bibliographie.....	45
Chapitre 2. La métallurgie extractive de l'aluminium	47
2.1. Evolution historique des procédés de fabrication de l'aluminium à partir du minerai	47
2.2. Du minerai, la bauxite, à l'alumine : le procédé BAYER aujourd'hui	50
2.2.1. Composition du minerai, la bauxite	50
2.2.2. Réserves mondiales utiles de bauxite.....	51
2.2.3. Environnement	51
2.3. De l'alumine à l'aluminium : le procédé HALL-HEROULT aujourd'hui	54
2.3.1. Consommation d'énergie	55
2.3.1. Consommation d'anode	56

2.3.3. Environnement	56
2.3.4. Production	60
2.4. Principales caractéristiques de la métallurgie extractive de l'aluminium aujourd'hui	61
2.5. Bibliographie.....	64
Chapitre 3. De l'aluminium liquide aux produits finis	70
3.1. Le matériau : aluminium et alliages.....	70
3.1.1. Les éléments structurels	70
3.1.2. Les éléments fonctionnels.....	73
3.1.3. Les éléments exogènes	73
3.2. Les semi-produits	73
3.2.1. Les trois familles de semi-produit : les laminés, les extrudés et les moulés.	73
3.2.2. Les semi-produits et les alliages	75
3.2.3. Les produits moulés ou produits de fonderie	76
3.2.4. Bilans énergie et matières de la fabrication des semi-produits	79
3.3. Les produits.....	80
3.4. L'aluminium et le développement supportable.....	82
3.4.1. La durée de vie.....	82
3.4.2. La dématérialisation	83
3.5. Bibliographie.....	86
Deuxième partie Le recyclage - du déchet (l'aluminaille) à l'aluminium liquide.....	93
Chapitre 4. L'histoire du recyclage de l'aluminium.....	94
4.1. Bibliographie.....	100
Chapitre 5. La matière première du recyclage	101
5.1. Classification	101
5.2. Les déchets neufs	104
5.2.1. Qualité	105
5.2.2. Quantité.....	109
5.2.3. Collecte et flux.....	110
5.2.4. Stock et délais	113
5.2.4.1. Délai entre création du déchet et collecte	113
5.2.4.2. Délai entre collecte et fusion	113
5.2.4.3. Stock	113
5.2.5. Marché	113
5.3. Les vieux déchets.....	114
5.3.1. Qualité	115
5.3.2. Quantité et gisement	115
5.3.3. Collecte et flux.....	118
5.3.4. Stock et délais	125
5.3.5. Marché	125
5.4. La problématique des déchets et les industries de l'acier et de l'aluminium	128
5.5. Bibliographie.....	134

Chapitre 6. L'industrie du recyclage.....	137
6.1. Les acteurs.....	137
6.1.1. La collecte	137
6.1.2. Le tri	137
6.1.3. La fusion.....	138
6.2. Rappel historique	138
6.3. La fusion.....	139
6.3.1. Les produits et leurs marchés	140
6.3.2. L'économie	140
6.3.3. La structure	140
6.3.4. La capacité	140
6.3.5. Les affineurs.....	141
6.3.6. Les refondeurs	143
6.4. L'avenir.....	143
6.5. Bibliographie.....	144
Chapitre 7. Les bases scientifiques du recyclage et leurs conséquences.....	146
7.1. Les bases scientifiques	146
7.1.1. Rappels sur la composition des déchets	146
7.1.2. Les propriétés physico-chimiques des principaux éléments d'alliage	146
7.1.3. Les propriétés physico-chimiques des principaux composés d'aluminium et d'autres éléments	147
7.1.4. Les propriétés thermodynamiques.....	147
7.2. Les conséquences	148
7.2.1. Des pertes irréversibles d'aluminium :	149
7.2.2. Des pertes réversibles d'aluminium :	152
7.2.3. La contamination par l'hydrogène :	156
7.2.4. Les possibilités de purification par élimination:	157
7.2.4.1. Par transformation physique sélective :	157
7.2.4.1.1. Par fusion	157
7.2.4.1.2. Par vaporisation	158
7.2.4.1.3. Par solidification fractionnée	158
7.2.4.2. Par réaction chimique sélective	159
7.2.4.2.1. Par oxydation	159
7.2.4.2.2. Par halogénéation (fluoration et chloration)	159
7.2.4.2.3. Par électrolyse	160
7.2.4.3. La réalité de la purification	161
7.3. Les solutions industrielles	162
7.4. Bibliographie.....	165
7.5. Annexe	168
7.5.1. Antimoine	168
7.5.2. Arsenic	168

7.5.3. Baryum	168
7.5.4. Béryllium.....	169
7.5.5. Bismuth	169
7.5.6. Bore.....	169
7.5.7. Cadmium	169
7.5.8. Calcium	170
7.5.9. Césium	170
7.5.10. Cobalt.....	170
7.5.11. Etain	170
7.5.12. Fer	170
7.5.13. Gallium	171
7.5.14. Germanium.....	171
7.5.15. Hafnium	171
7.5.16. Indium.....	171
7.5.17. Lithium.....	171
7.5.18. Manganèse.....	172
7.5.19. Tantale	172
7.5.20. Tellure	172
7.5.21. Titane	172
7.5.22. Tungstène	172
7.5.23. Vanadium	173
7.5.24. Yttrium	173
7.5.25. Zirconium.....	173
7.5.26. Terres rares.....	173
Chapitre 8. Les technologies du recyclage	174
8.1. Les conséquences de la qualité des déchets	174
8.1.1. Cas des déchets non mélangés.....	174
8.1.2. Cas des déchets mélangés.....	174
8.2. La métallurgie extractive du recyclage sans fusion	176
8.3. La métallurgie extractive du recyclage par fusion.....	177
8.3.1. Fours électriques.....	182
8.3.2. Four réverbère.....	182
8.3.3. Four rotatif à axe fixe ou oscillant	182
8.4. Les bilans de la métallurgie extractive par fusion	183
8.4.1. Le bilan matière.....	183
8.4.2. Le bilan énergie.....	186
8.4.3. Le bilan environnemental	191
8.4.3.1. Le bilan hors crasses	191
8.4.3.2. Le bilan avec crasses.....	192
8.5. Le bilan global de la métallurgie extractive du recyclage de l'aluminium par fusion:	198
8.6. Bibliographie.....	202

Chapitre 9. Principaux aspects économiques du recyclage	209
9.1. La problématique de l'économie du recyclage.....	209
9.2. Les prix de l'aluminium.....	210
9.3. Les coûts du recyclage	213
9.3.1. Le coût de la collecte	213
9.3.2. Le coût du tri.....	214
9.3.3. Le coût de la fusion	214
9.3.3.1. Les données technico-économiques	214
9.3.3.2. Le coût environnemental.....	216
9.3.3.3. Le coût de la fusion	217
9.3.4. Le coût global du recyclage	217
9.4. Le prix des déchets et la rentabilité du recyclage de l'aluminium.....	218
9.4.1. Méthodologie.....	218
9.4.2. Résultats	220
9.5. Bilans et interrogations économiques à propos de l'industrie du recyclage	223
9.5.1. Bilans économiques comparés des filières déchet et minéral	223
9.5.2. Structures de l'économie du recyclage et parallèle avec l'acier	225
9.5.3. Les facteurs de rentabilité économique	227
9.5.3.1. Fusion.....	227
9.5.3.2. Recyclage.....	227
9.5.4. Proposition de formation du prix des déchets.....	231
9.5.5. Conclusions.....	231
9.6. Bibliographie.....	233
9.7. Annexe : cas de l'Allemagne.....	236
9.8. Annexe : cas de l'Italie	238
9.8. Annexe : cas du Japon.....	240
Troisième partie Conclusions.....	242
Chapitre 10. Recyclage : état, bilan et enjeu	243
10.1. Les bilans	243
10.1.1. Le bilan scientifique.....	243
10.1.2. Les bilans de la fusion.....	244
10.1.2.1. Le bilan matière.....	244
10.1.2.1. Le bilan énergie.....	245
10.1.2.3. le bilan environnemental	245
10.1.3. Les bilans du recyclage.....	245
10.1.3.1. Le bilan matière.....	245
10.1.3.2. Le bilan énergie.....	246
10.1.3.3. Le bilan environnemental	247
10.1.4. Les autres bilans du recyclage bilan et les caractéristiques des déchets	247
10.1.4.1. Les différences entre déchets neufs et vieux déchets.....	247
10.1.4.2. Le bilan qualité	250

10.1.4.3. Le bilan économique de la fusion.....	251
10.1.4.4. Le bilan économique du recyclage.....	252
10.1.5. le bilan de l'écologie industrielle des filières de production de l'aluminium	255
10.1.6. commentaires et remarques sur les bilans du recyclage.....	256
10.1.6.1. Le bilan matière :.....	256
10.1.6.2. Le bilan économique	257
10.2. Enjeux critiques et développement supportable	258
10.2.1. Diminuer la quantité de déchets internes :.....	261
10.2.2. Développer les marchés de l'aluminium recyclé à partir des vieux déchets.....	263
10.2.3. Construire une économie du développement supportable	264
10.2.4. Eco-concevoir les produits :.....	265
10.2.5. Développer des technologies performantes	265
10.2.6. Thèmes d'études identifiés en relation avec le recyclage de l'aluminium.....	267
10.3. Conclusions.....	269
10.4. Bibliographie.....	275

Liste des figures et tableaux

Tableau 0.1: définition et désignation des déchets

Figure 1.1 : L'industrie de l'aluminium, du minerai et du déchet au produit fini.

Figure 1.2 : Réserves de bauxite, productions de bauxite, d'alumine, d'aluminium électrolytique et recyclé, et demande d'aluminium en 1995.

Tableau 1.1 : applications et parts de marchés estimées de l'aluminium en 2000 (IAI, the aluminium industry's sustainable development report) et 2005 pour le monde

Figure 1.3 : les principales applications mondiales de l'aluminium en 2005

Figure 1.4 : production mondiale d'aluminium (et des principaux métaux non ferreux et du nickel) depuis 1900.

Figure 1.5 : production mondiale d'acier brut (Tg/année) de 1860 à 2004.

Figure 1.6 : évolution de la population mondiale, de la consommation d'énergie et des émissions de gaz carbonique de 1850 à 2000 (Sarlos Haldi, systèmes énergétiques, PPUR et Daniel Favrat, industrial ecology, sustainable energy system analysis, Lausanne, décembre 2006)

Tableau 1.2 : intensité de recyclage de différents métaux en 2000 aux U.S.A (rapport de la quantité de métal recyclé à la quantité de métal consommé) (source USGS)

Tableau 1.3 : intensité de recyclage de l'aluminium en 2000 dans le monde, aux U.S.A et en France (rapport de la quantité de métal recyclé à la quantité de métal consommé) (sources IAI pour le monde en 1997, USGS pour les U.S.A. et PECHINEY pour la France)

Figure 2.1 : les principaux déchets de la métallurgie extractive à partir du minerai

Figure 2.2 : évolution historique de la consommation d'énergie de la métallurgie extractive de l'aluminium à partir du minerai (procédés BAYER et HALL-HEROULT) (IAI, the aluminium industry's sustainable development report)

Figure 2.3 : réserves et production mondiales de bauxite en 1997(1)

Figure 2.4 : évolution historique de la consommation globale d'énergie de la fabrication de l'alumine (IAI, the aluminium industry's sustainable development report)

Tableau 2.1 : capacités de production de bauxite et d'alumine (source : trade journals)

Figure 2.5 : évolution historique des productions mondiales de bauxite et d'aluminium à partir de la bauxite

Figure 2.6 : évolution historique de la production mondiale d'alumine (IAI, the aluminium industry's sustainable development report).

Figure 2.7 schéma d'une cellule d'électrolyse de l'aluminium

Figure 2.8 : évolution historique de la consommation d'électricité du procédé HALL-HEROULT (IAI, the aluminium industry's sustainable development report).

Figure 2.9 : évolution historique des émissions globales de PolyFluoroCarbones, PFC (IAI, the aluminium industry's sustainable development report)

Figure 2.10 : évolution historique de la consommation de fluor du procédé HALL-HEROULT (IAI, the aluminium industry's sustainable development report)

Figure 2.11 : les émissions de fluor suivant la technologie d'électrolyse (IAI, the aluminium industry's sustainable development report)

Figure 2.12 : évolution historique des émissions globales de gaz à effet de serre par le procédé électrolytique (IAI, the aluminium industry's sustainable development report)

Tableau 2.2 : production mondiale d'aluminium d'électrolyse en 2002 et 2003

Figure 2.13 : évolution historique récente (1990-2000) de la production d'aluminium électrolytique (IAI, the aluminium industry's sustainable development report)

Tableau 2.3 : consommations d'énergie et de matières premières, quantités émises de polluants, montant de l'investissement, de la métallurgie extractive à partir du minerai (par tonne d'aluminium liquide)

Tableau 2.4 : consommation d'énergie dans la CEE en 1977

Tableau 3.1 : séries d'alliages d'aluminium et éléments d'alliage

Tableau 3.2 : détail de la composition des alliages

Tableau 3.3 : nombre d'usines et capacités moyennes de production de semi-produits laminés, extrudés et moulés en Europe (Union Européenne avec 15 membres, Europe de l'Ouest avec Union Européenne et Islande, Norvège, Suisse et Turquie et Europe, avec Europe de l'Ouest du Centre (hors ex CIS) en 2003 (source market report 2003, European Aluminium Association)

Tableau 3.4 : correspondance qualitative entre semi-produit et série d'alliage (ce travail)

Tableau 3.5 : correspondance quantitative (part de marché) entre semi-produit et application (estimation en Europe de l'Ouest en 2003)

Tableau 3.6 : répartition en pourcentage entre les différents semi-produits dans différentes zones (monde de l'ouest en 2000, Europe en 2003, France en 1998)

Tableau 3.7 : application des alliages de fonderie

Figure 3.1 : productions d'aluminium moulé des 4 premiers pays.

Tableau 3.8 : 38ème recensement (2003) de la production mondiale de fonderie (tonnes métriques)

Tableau 3.9 : consommation brute et nette (lorsque le déchet est recyclé) d'énergie par tonne de semi-produit

Tableau 3.10 : consommation d'énergie en 1977 dans la CEE de l'époque depuis la fabrication de l'alumine jusqu'aux semi-produits extrudés et laminés

Figure 3.2 : les principales applications mondiales de l'aluminium en 2005

Tableau 3.11 : applications et propriétés de l'aluminium

Tableau 3.12 : application et série d'alliage

Tableau 3.13 : durée de vie moyenne estimée par application

Figure 3.3 : les semi-produits en aluminium dans l'automobile : moulés (cast) et extrudés et laminés (wrought)

Figure 3.4 : contenu aluminium d'un véhicule – Europe, USA & Japon (source PECHINEY)

Figure 3.5 : évolution de la quantité d'aluminium dans les véhicules

Figure 3.6 : évolution du poids des boîtes boisson acier et aluminium en Europe

Figure 4.1 : les étapes marquantes du recyclage de l'aluminium

Figure 4.2 : productions mondiales d'aluminium électrolytique, recyclé et consommé

Figure 5.1 : les flux de matière première du recyclage dans l'industrie de l'aluminium

Tableau 5.1 : les désignations anglo-saxonnes

Tableau 5.2 : les équivalences françaises

Figure 5.2 : les étapes du recyclage (d'après IAI, Key parameters for a recycling system, PEA Munich 17-18 mars 2003)

Figure 5.3 : les flux de déchets neufs

Figure 5.4 : norme européenne, PrEN 13920-1, 10.2002. Aluminium – scrap (matières premières pour recyclage)

Tableau 5.3 : autre nomenclature utilisée pour désigner les déchets d'aluminium

Tableau 5.4 : quantité de déchets internes et pertes métal lors de leur recyclage par tonne de semi-produit à froid

Tableau 5.5 : création de déchets neufs dans l'Union Européenne en 2003

Figure 5.5 : les flux de vieux déchets

Figure 5.6 : les vieux déchets d'aluminium dans le monde par application (Jürg Gerber, Aluminium Recycling, the global dimension – an update, 8th. International OEA Aluminium Recycling Congress, mars 2005)

Tableau 5.6 : bilan en 2000 des quantités mondiales d'aluminium en cours d'usage, devenues déchets et collectées

Figure 5.7 : recyclage (collecte) et législation en Europe

Tableau 5.7 : taux de collecte des vieux déchets d'aluminium par application donnés par la littérature en Europe en 2000 et comparés avec ceux d'acier (données 2003 et objectifs 2010)

Figure 5.8 : taux de recyclage (en réalité de collecte, la confusion recyclage / collecte étant très répandue) par secteurs d'utilisation

Tableau 5.8 : les caractéristiques des déchets d'aluminium

Tableau 5.9 : quantités mondiales de déchets (millions de tonnes métriques) et quelques ratios pour l'industrie de l'aluminium (données statistiques et estimations en 2002, International Aluminium Institute, IAI) et l'acier (données statistiques 2000 et Iron and steel scrap : its significance and influence on further developments in the iron and steel industries, eight updating, United Nations, Economic Commission for Europe, 1999)

Figure 5.9 : estimation des flux d'aluminium en 2003 (M. Bertram, Worldwide recycled aluminium from end-of-life products from 1950 to 2020, 2005)

Tableau 5.10 : création de déchets d'aluminium et taux de recyclage calculés (en caractères gras, les résultats du tableau 5.8, colonne estimation)

Tableau 6.1 : nombre d'affineurs et de refondeurs en Europe (EU 15) en 2002 (OEA. The strategic importance of the EU15 aluminium recycling industry. EAA , OEA, publication, 1st July 2004)

Tableau 6.2 : données statistiques des affineurs européens (source "Organisation of European Refiners and Remelters").

Tableau 7.1 : températures de fusion et d'ébullition et densités des principaux éléments d'alliage (et du fer)

Tableau 7.2 : températures de fusion et d'ébullition et densités des principaux composés d'aluminium et d'autres éléments pouvant être rencontrés pendant le recyclage

Figure 7.1 Energie libre des oxydes, chlorures et fluorures

Figure 7.2 Effet de l'épaisseur sur les pertes au feu

Tableau 7.3 : effet de l'épaisseur du semi-produit sur le pourcentage massique d'alumine formée à l'état solide à la température de fusion (surface plane d'alliage 3.003)

Figure 7.3 : oxydation de l'aluminium liquide

Tableau 7.4 : pertes d'aluminium suivant le produit organique et sa concentration

Figure 7.4 : les pertes totales, irréversibles et réversibles, d'aluminium en fonction de la qualité du déchet

Tableau 7.5 : principales méthodes industrielles d'élimination

Tableau 7.6 : spécifications comparées des alliages de la série 4000, aluminium – silicium, et de ceux des autres séries

Figure 7.5 : correspondance entre les qualités de l'aluminium recyclé et celles des vieux déchets

Figure 8.1 : correspondance entre les qualités de l'aluminium recyclé et celles des vieux déchets

Tableau 8.1 : correspondance entre les étapes de la métallurgie extractive à partir du minerai et celles de la métallurgie du recyclage à partir des déchets

Figure 8.2 : schéma d'une usine moderne de recyclage des déchets d'aluminium

Figure 8.3 : prétraitement à froid d'une automobile en fin de vie (OEA: The Global Aluminium Recycling Committee, Aluminium Recycling : a Cornerstone of sustainable Development, 2004, page 20)

Figure 8.4 : composition type de la charge fondue par les affineurs en Allemagne en 1997

Tableau 8.2 : pertes au feu (%) et taux de crasses (%) pour quelques types de déchets : valeurs industrielles et valeurs calculées

Figure 8.5 : les pertes totales, irréversibles et réversibles, d'aluminium en fonction de la qualité du déchet

Tableau 8.3 : consommation d'énergie théorique pour fondre une tonne d'aluminium et une tonne de fer

Tableau 8.4 : flux énergétiques entrant et sortant, bilan énergie pour quelques types de déchets (GJ/t d'aluminium coulé)

Figure 8.6 : Aluminium scrap melting Sankey diagram (diagramme Sankey de fusion des déchets d'aluminium)

Tableau 8.5 : caractéristiques techniques des procédés thermiques de traitement des crasses

Tableau 8.6 : caractéristiques (par tonne de crasse) des procédés pilotes et commerciaux

Tableau 8.7 : bilans matière, énergie, environnemental et données économiques de la métallurgie extractive du recyclage de l'aluminium par fusion suivant les catégories de déchet

Figure 8.7 : les pertes totales d'aluminium, brutes et nettes (après traitement des crasses) en fonction de la qualité du déchet

Figure 9.1 : prix de l'aluminium au LME (London Metal Exchange), du 01.01.2004 au 30.06.2005

Tableau 9.1 : prix de l'aluminium recyclé à 9% de silicium en fonction du prix de l'aluminium électrolytique (US\$/T)

Figure 9.2 : prix et stocks (alliage aluminium recyclé, Al-Si 13% ?)

Tableau 9.2 : montants d'investissement en fonction de la capacité du site de recyclage

Tableau 9.3 : données technico-économiques de la fusion par type de déchet d'aluminium

Tableau 9.4 : coût environnemental par tonne de crasses blanches

Tableau 9.5 : coût de la fusion en US\$/t pour une usine de recyclage de capacité 70.000 t/an en fonction du type de déchet d'aluminium

Tableau 9.6 : coût (US\$/t) du recyclage par étape du recyclage et par type de déchet d'aluminium

Tableau 9.7 : productions (milliers de tonnes) d'aluminium électrolytique, d'aluminium recyclé (hors recyclage captif), de produits de fonderie en Allemagne (A), en Italie (I) et au Japon (J) dans les années 1999, 2000 et 2001

Tableau 9.8 : rentabilité brute de la fusion des déchets neufs (découpe d'aluminium pur, aluminium recyclé à 99,7%, profit brut en US\$/t et en % du prix de vente de l'aluminium recyclé) en Allemagne (A), Italie (I) et Japon (J), en 1999, 2000 et 2001

Tableau 9.9 : rentabilité brute de la fusion des vieux déchets (fonte d'aluminium, aluminium recyclé en alliage aluminium silicium à 13% de silicium, profit brut en US\$/t et % du prix de vente de l'aluminium recyclé) en Allemagne, Italie et Japon, en 1999, 2000 et 2001

Tableau 9.10 : valeurs moyennes de la rentabilité brute avec entre parenthèses l'écart type, tous pays et années confondues

Tableau 9.11 : coûts de production de l'électrolyse de l'alumine et de la fusion des déchets et marges brutes comparées en US\$/t d'aluminium des deux filières

Tableau 9.12 : structure du prix du métal recyclé, aluminium et fer (acier), en US\$/t

Tableau 9.13 : prix en US ct/lb en Allemagne en 1999, 2000 et 2001 de l'aluminium électrolytique à 99,7% d'aluminium, de l'alliage aluminium silicium (legierung 231), d'un déchet neuf (découpe d'aluminium pur) et d'un vieux déchet (fonte d'aluminium donc un alliage aluminium silicium).

Tableau 9.14 : profit (US\$/t d'aluminium recyclé) par catégorie de déchets dans les conditions prévalent en Allemagne sur la période 1999-2001 d'achat du déchet en US\$/t d'aluminium contenu et valeur relative par rapport au prix du lingot d'aluminium électrolytique.

Tableau 9.15 : prix en US ct/lb en Italie en 1999, 2000 et 2001 de l'aluminium électrolytique à 99,7% d'aluminium, de l'alliage aluminium silicium GD AlSi 3 Fe, d'un déchet neuf (découpe d'aluminium pur) et d'un vieux déchet (fonte d'aluminium donc un alliage aluminium silicium).

Tableau 9.16 : profit (US\$/t d'aluminium recyclé) par catégorie de déchets dans les conditions prévalent en Italie sur la période 1999-2001 d'achat du déchet en US\$/t d'aluminium contenu et valeur relative par rapport au prix du lingot d'aluminium électrolytique.

Tableau 9.17 : prix en US ct/lb au Japon en 1999, 2000 et 2001 de l'aluminium électrolytique à 99,7% d'aluminium, de l'alliage aluminium silicium AD 12.1, d'un déchet neuf (découpe d'aluminium pur) et d'un vieux déchet (fonte d'aluminium donc un alliage aluminium silicium)

Tableau 9.18 : profit (US\$/t d'aluminium recyclé) par catégorie de déchets dans les conditions prévalent au Japon sur la période 1999-2001 d'achat du déchet en US\$/t d'aluminium contenu et valeur relative par rapport au prix du lingot d'aluminium électrolytique.

Tableau 10.1 : correspondance entre les étapes de la métallurgie extractive à partir du minerai et celles de la métallurgie du recyclage à partir des déchets.

Tableau 10.2 : rendements matières des étapes des filières déchet et minerai.

Tableau 10.3 : consommation d'énergie des filières déchet et minerai.

Tableau 10.4 : les caractéristiques des déchets d'aluminium.

Tableau 10.5 : résumé des caractéristiques de la fusion par catégorie de déchet après récupération de l'aluminium contenu dans les crasses.

Figure 10.1 : les pertes totales d'aluminium, brutes et nettes (après traitement des crasses) en fonction de la qualité du déchet

Tableau 10.6 : coût global du recyclage en fonction de la qualité du déchet

Tableau 10.7 : valeurs moyennes de la rentabilité brute avec entre parenthèses l'écart type, tous pays et années confondues

Tableau 10.8 : comparaison des deux filières de production de l'aluminium (valeurs par tonne d'aluminium liquide)

Figure 10.2 : aluminium recyclé dans le monde à partir des vieux déchets (M. Bertram)

Tableau 10.9 : 1er scénario : répartition des flux de déchets (quantités en millions de tonnes) identique à celle de l'acier – D pour déchet, et P pour production

Tableau 10.10 : objectifs de taux de collecte fixés dans l'Union Européenne par la sidérurgie en 2010 et en 2020.

Tableau 10.11 : 2ème scénario : répartition inchangée des flux de déchets (quantités en millions de tonnes) sauf la quantité de vieux déchets qui est portée 11,4 Mt – D pour déchet, et P pour production.

Figure 10.3 : quantité totale d'aluminium et part des alliages de moulage dans l'automobile.

Tableau 10.12 : thèmes d'études identifiés en relation avec le recyclage de l'aluminium

Première partie

Introduction

Chapitre 0. Avant propos

Dans les dernières années du 20ème siècle, l'aluminium a fait l'objet de beaucoup de communications outrancières et divergentes cautionnées par des scientifiques et des organismes faisant autorité. En 1986, la société PECHINEY le décrète perpétuel tel le mouvement « L'aluminium est éternel. Il est recyclable indéfiniment sans que ses propriétés soient altérées », ce qui nous avait alors irrité. Peu de temps après, en 1990, une communication tout aussi outrancière et irritante d'une grande organisation environnementale, le World Wild Fund, décrète que « le recyclage de l'aluminium est la pire menace pour l'environnement. Il doit être abandonné ».

C'est ensuite à partir de la fin des années 1990, l'explosion des publications relatives au développement durable, le bien mal nommé. Au développement, synonyme de croissance obligatoire, nous préférons société ou organisation humaine et à durable, mauvaise traduction de l'anglais « sustainable », nous préférons supportable : idéalement, nous aurions souhaité parler de société durable, mais, pour être compris de tous, nous nous sommes limités à parler dorénavant de développement supportable.

Pour l'essentiel, ces publications reconnaissent les très graves défauts de la métallurgie extractive de l'aluminium à partir du minerai et aussi les mérites extraordinaires du recyclage de l'aluminium puisqu'il représente moins de 10% de la consommation d'énergie de la métallurgie extractive à partir du minerai (on verra que c'est aussi moins de 10% de la pollution et du capital). C'est précisément sur le recyclage que se fondent les campagnes de promotion de l'emballage boisson, en Suisse en particulier.

Cependant, les données concernant le recyclage de l'aluminium publiées par l'industrie de l'aluminium reflètent seulement en partie ces mérites.

Dans les années 1970, les taux de croissance de la production recyclée sont devenus plus élevés que ceux de la production électrolytique. Par contre, les taux de recyclage, établis à indicateur identique, sont unanimement tous médiocres comparativement à d'autres matériaux tels le cuivre et le fer.

Composante de l'industrie de l'aluminium, le recyclage bénéficie d'une image favorable auprès du grand public, démontrant le succès des campagnes de communication. A l'inverse, à l'intérieur de l'industrie de l'aluminium, c'est une image dévalorisée. Les opinions émises par tous les acteurs, commerçants, techniciens, dirigeants, encore recueillies pendant ce travail, sont les suivantes : métier de chiffonnier, métier misérable, métier peu technique mais très difficile (un recycleur

d'aluminium n'a-t-il pas dit que son métier était un métier d'homme alors que celui du recycleur de cuivre était un jeu d'enfant).

A notre avis ces opinions appartiennent à un passé révolu qu'elles retraduisent cependant fidèlement car le recyclage est aujourd'hui reconnu comme une contribution majeure au développement supportable de l'aluminium. C'est bien pour cette raison que, en 2000, l'industrie de l'aluminium mondiale a décidé d'abandonner le qualificatif « secondaire » jusque là utilisé pour désigner le métal recyclé.

C'est en raison de toutes ces données discordantes et parfois contradictoires qu'a débuté ce travail encouragé par de nombreuses personnalités. Notre engagement a été incontestablement facilité par notre connaissance des savoirs indispensables (métallurgie, économie, statistiques) et surtout notre expérience acquise au cours d'une vie professionnelle menée à l'échelle mondiale dans (recherche et développement, production), pour (recherche, développement, marketing, stratégie) et autour (marketing, stratégie de produits connexes, les ferro-alliages, et concurrents, le fer) de l'industrie de l'aluminium.

Notre objectif est de faire la vérité sur le recyclage de l'aluminium, un matériau qui a très largement contribué à faire le 20ème siècle, grâce à une revue critique embrassant tous les aspects de cette activité méconnue ; ainsi il n'y a pas d'histoire du recyclage de l'aluminium alors qu'il est plus que centenaire. Plus qu'une simple compilation, cette revue critique a été conduite comme une enquête scientifique, technique, économique, historique, socio-écologique faisant ressortir les faits principaux ayant marqué l'évolution du recyclage de l'aluminium.

Elle conclut sur l'état réel du recyclage, qui se révèle globalement satisfaisant avec ses forces et ses faiblesses, et au-delà du recyclage sur l'adéquation de l'aluminium au développement supportable, adéquation largement insuffisante. C'est pourquoi, elle suggère les thèmes d'études intéressant tous ceux scientifiques, techniciens, historiens, économistes, juristes concernés par une industrie très représentative de notre monde en devenir, un monde où la place de l'aluminium dépendra de son aptitude à satisfaire les critères du développement supportable.

0.1. Les changements entre 2003 et 2008 : les acteurs de l'industrie de l'aluminium, les prix de l'aluminium, de l'énergie, de la bauxite, la croissance de l'industrie du recyclage de l'aluminium, la révolution culturelle des désignations

Ce travail, commencé au milieu de l'année 2003, s'est déroulé dans le contexte de grands changements dans l'industrie de l'aluminium et dans l'industrie du recyclage de l'aluminium.

Pour l'industrie de l'aluminium, on a assisté à la réalisation du grand projet avorté en 2001 de concentration entre trois majors ALCAN (Aluminium of Canada), ALUSUISSE (Schweizerische Aluminium AG) et PECHINEY (France). En fait d'association mutuellement consentie, c'est ALCAN qui a acheté ALUSUISSE en 2003, puis PECHINEY en 2004. Ces noms, qui ont tant contribué au développement de l'aluminium, ont donc disparu. D'autres sont venus s'ajouter, tels par exemple le nouveau conglomérat russe RUSAL en 2006 et devenu le premier producteur mondial, le groupe indien, HINDALCO avec NOVELIS et l'achat de ALCAN par le groupe minier RIO TINTO ZINC, RTZ en 2007.

Conjoncturellement (effet de la demande chinoise en relation avec les Jeux Olympiques de 2008), mais aussi structurellement (augmentation du prix de l'énergie et de la demande mondiale), les cours de l'aluminium sont sortis des valeurs médiocres, en dessous de 1.500 US\$/t, des années antérieures pour atteindre des valeurs permettant un retour à des bénéfices raisonnables voire très importants. Depuis moins de trois ans, les prix, autour de 3.000 US\$/t, sont le double de la référence historique d'environ 1.500 US\$/t¹.

Pour l'industrie du recyclage, on a assisté à la poursuite de sa mutation vers des unités de plus en plus grandes. En Europe surtout, elle a connu des moments difficiles avec la raréfaction des quantités et l'augmentation des prix de la matière première à recycler, conséquences de la forte demande asiatique. En Chine, elle s'est spectaculairement développée, conséquence d'un choix stratégique de produire à bon compte environnemental et énergétique un métal indispensable.

Enfin, l'industrie de l'aluminium a entrepris une révolution culturelle au début du XXIème siècle. C'est la décision de deux grands organismes professionnels internationaux de modifier leurs statuts avec l'abandon de la distinction plus que

¹ Le 8 Décembre 2008, le prix de l'aluminium est de 1.491 US\$/t, le plus bas depuis Octobre 2003 et les stocks mondiaux atteignent leur niveau le plus élevé depuis 14 ans.

centenaire entre aluminium appelé primaire, (primary), celui de la métallurgie extractive, obtenu par électrolyse de l'alumine elle même obtenue par traitement sodique du minerai (la bauxite) et aluminium appelé secondaire (secondary), celui du recyclage obtenu par fusion des déchets.

L'International Primary Aluminium Institute, IPAI, représentant l'industrie de l'aluminium au niveau mondial, est ainsi devenu l'International Aluminium Institute. C'était le 25 août 2000.

L'European Aluminium Association, EAA, de fait ne s'occupant que du métal primaire, a fusionné avec son homologue européen ne s'occupant que d'aluminium recyclé, l'Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters, OEA. C'était le 1er janvier 2004.

L'aluminium recyclé se voit ainsi et enfin reconnaître son rôle majeur dans le développement de l'industrie de l'aluminium en raison de l'importance croissante des quantités produites et de son excellente image écologique, parfaitement justifiée, seule capable de contrebalancer celle détestable de l'aluminium électrolytique.

0.2. Glossaire

Ce développement est nécessaire car les hermétismes des uns et des autres ne favorisent pas l'analyse rigoureuse des données et la compréhension du sujet, surtout lorsqu'on établit des parallèles avec d'autres matériaux. Nous avons reporté entre parenthèses la terminologie anglo-saxonne, prédominante dans le monde.

0.2.1. Les produits

Bauxite (bauxite) : minerai oxydé d'aluminium

Alumine (alumina) : oxyde d'aluminium pur extrait de la bauxite par le procédé BAYER

Aluminium primaire (primary ou unwrought aluminium) : aluminium pur obtenu par électrolyse de l'alumine par le procédé HALL-HEROULT.

Désigne aussi l'aluminium brut avant d'être transformé en semi-produit (voir définition ci-dessous). Cet aluminium brut peut être aussi bien obtenu par électrolyse que par recyclage des déchets produits pendant la transformation en semi-produits.

Depuis peu de temps, on rencontre, dans les publications anglo-saxonnes destinées au grand public, des appellations nouvelles, plutôt des surnoms, synonyme d'aluminium : « green metal » (métal vert) et « energy banking » (banque d'énergie).

Aluminium secondaire (secondary aluminium) : aluminium obtenu à partir de déchets d'aluminium métal et de fait plutôt réservé aux vieux déchets (old scraps)

Aluminium recyclé (recycled) : aluminium obtenu à partir de déchets d'aluminium en général, donc neufs et vieux ; parfois est synonyme d'aluminium secondaire.

Produit ouvré ou semi-transformé, semi-produit (wrought, semi-fabricated or semi-finished product) : classés suivant le degré de transformation, du plus simple au plus complexe, on a deux types de semi-produits :

- ceux de formes simples, le plus souvent en aluminium allié (alloyed), lingot (ingot), brame (slab) (première ébauche de forme de section parallélépipédique destinée à la fabrication de produits plats ou laminés), billette (billet) (première ébauche de forme de section circulaire destinée à la fabrication de produits longs ou extrudés) obtenus dans une première étape de transformation (first processing stage), à partir d'aluminium liquide, dite « à chaud » (hot),
- ceux, plus travaillés et souvent de formes complexes, obtenus à partir des précédents dans une deuxième étape de transformation (second processing stage), dite « à froid » (cold).

Suivant la forme géométrique du semi-produit, on a l'autre classement suivant :

- les produits plats (rolled, laminated alors que flat, qui est la traduction de plat, n'est pas utilisé et l'est par contre par la sidérurgie) : brame (rolling slab, can stock), tôle (sheet), feuille (foil), tube (tube),
- les produits longs (extruded alors que de la même façon, long qui est la traduction de long n'est pas utilisé et l'est par contre par la sidérurgie) : billette (extrusion billet), profilé (profile), fil (wire), barre (rod),
- les autres produits : principalement, pièce moulée (cast), aussi pièce forgée (forged).

Produit fini (finished product) : le produit semi-transformé est utilisé dans la fabrication d'un produit fini : automobile, boîte boisson, fenêtre, etc. Le produit fini est presque toujours fait de plusieurs matériaux. Lorsqu'il est seulement fait d'aluminium, on peut avoir la juxtaposition de plusieurs alliages d'aluminium : la boîte boisson est faite avec deux alliages, l'un pour le couvercle, l'autre pour le corps.

0.2.2. Les déchets (scraps)

Déchet (scrap) : c'est un objet majoritairement métallique que l'on trouve en divers endroits de la chaîne allant du minerai au produit fini en fin de vie.

La terminologie française distingue deux formes :

- **Déchets (scraps)** : ils apparaissent dans les usines travaillant l'aluminium et ses alliages : copeaux d'usinage, chutes de découpe, rebuts de fabrication, crasses de four de fusion.
- **Débris (wastes)** : ils apparaissent après usage des produits finis.

La terminologie anglo-saxonne, aussi utilisée dans l'industrie de l'acier, est plus précise et distingue aussi plusieurs formes de déchet :

- **New scrap (déchet neuf)** : ce sont les déchets obtenus aussi bien dans la fabrication des semi-produits (première transformation à chaud, et seconde transformation à froid) que dans celle des produits finis ; ce sont donc les déchets de la terminologie française.

Cependant, la distinction est poursuivie suivant le degré de transformation (ce que fait aussi l'industrie de l'acier) :

- **Internal scrap, mais aussi arising scrap, circulating scrap, home scrap, turn-around scrap (déchets internes)** : ce sont tous les déchets, apparaissant dans la production du métal liquide (tout ce qui peut être refondu), puis dans sa

transformation à chaud (billet, bloom, slab, bar, ingot) et finalement à froid, conduisant aux semi-produits. Pour l'acier, le terme « internal scrap » inclut celui de « capital scrap », un terme spécifique à l'industrie de l'acier pour désigner les immobilisations à long terme (constructions, machines), dites capitalistiques.

- **Prompt scrap, mais aussi production scrap, processing scrap (déchets de transformation) :** ce sont tous les déchets qui apparaissent dans la transformation des semi-produits en produits finis : carter automobile, boîte boisson, cadre de fenêtre, etc. Pour l'acier, le terme « prompt scrap » désigne un déchet extérieur à l'industrie de l'acier et comme tel regroupé avec celui de « obsolete scrap » sous le terme « external scrap » par opposition à celui de « internal scrap » désignant tous les déchets intérieurs à l'industrie de l'acier.
- **Old scrap, mais aussi obsolete scrap, capital scrap (vieux déchet) :** Ce sont tous les déchets apparaissant en fin de vie des produits finis ; ce sont les débris de la terminologie française. Pour l'acier, on parle aussi de « external scrap », regroupant les termes « obsolete scrap » et « prompt scrap ».

0.2.3. Les industries du recyclage

Recyclage (recycling) : c'est le métier du recycleur et on distingue deux filières quoique recyclage puisse parfois désigner l'ensemble de l'industrie de l'affinage.

Refusion (remelting) : métier du **refondeur (remelter)**, la refusion désigne la fusion de lots de déchets métalliques, le plus souvent neufs. On obtient un produit semi-transformé simple : brame pour laminage, billette pour extrusion. Souvent le refondeur et le producteur de déchets neufs sont la même entité.

Affinage (refining) : métier de l'**affineur (refiner)**, l'affinage est la mise en œuvre de techniques complexes de séparation des débris, donc de vieux déchets, de refusion des lots de déchets ainsi obtenus, éventuellement associés à des déchets neufs, et de traitement métallurgique de purification du métal liquide. On obtient le produit semi-transformé le plus simple, le lingot, ou l'aluminium liquide, destinés l'un et l'autre à la production de pièces moulées. On confond généralement pièces de fonderie et vieux déchets. Aussi, pour distinguer les pièces de fonderie faites à partir d'aluminium électrolytique, on parle alors de fonderie de première fusion et les pièces faites à partir d'aluminium recyclé, surtout à partir de vieux déchets, sont dites de fonderie de deuxième fusion.

On produit aussi des lingots de petites dimensions destinés au traitement de désoxydation de l'acier.

0.2.4. Nos commentaires

La terminologie présentement utilisée pour décrire la chaîne allant de l'aluminium liquide au métal recyclé, décrivant en particulier les déchets neufs et vieux, est confuse, manque de rigueur et déprécie le métal recyclé qualifié de secondaire, connotation incontestablement péjorative. L'abandon de l'appellation secondaire en 2000 s'inscrit incontestablement dans la perspective du développement supportable et s'impose lentement dans les mentalités marquées par une pratique plus que séculaire puisque, aujourd'hui, on parle encore souvent de secondaire « secondary » et de primaire « primary ».

Il est intéressant de voir ce qui se passe dans les autres métallurgies. Celles conduisant à des produits finis (à l'exclusion de celles des éléments d'alliages, le chrome, le manganèse, etc.) ont aussi souvent fait cette distinction. Celles du cuivre, du zinc, du plomb utilisent les mêmes terminologies et les mêmes définitions.

Seules, celles des métaux précieux, argent et or, et aussi celle du fer ne l'ont jamais faite.

L'industrie du fer, acier et fonte, ne distingue pas le fer recyclé du fer neuf produit à partir du minerai. On n'y a jamais parlé ni de métal primaire, ni de métal secondaire. Il y a une seule fonte, un seul acier, dans ce dernier cas l'acier brut liquide (crude steel), sans distinguer la matière première, déchet, la ferraille, ou minerai.

La distinction, il en existe une seule, est fondée sur la filière définie par l'outil de production, haut fourneau et convertisseur pour l'acier via le minerai et four électrique ou four Martin pour l'acier via la ferraille. Historiquement, cette distinction s'est étendue

- à la capacité des outils : usine intégrée (integrated plant) de plusieurs millions de tonnes par an, allant du minerai au semi-produit et mini-usine (mini-mill) d'au plus un million de tonnes par an, allant du déchet au même semi-produit
- aux applications de l'acier fabriqué : les produits longs, les moins sensibles à la qualité de la matière première et de plus en plus obtenus à partir de l'acier recyclé et les produits plats obtenus à partir de l'acier neuf de la filière minerai.

Aujourd'hui, cette distinction a pratiquement disparu. Les capacités de la filière ferraille sont presque devenues celles de la filière minerai, peu nombreux sont les produits exclusivement obtenus par l'une ou l'autre filière et on parle seulement d'acier liquide brut.

On conclura qu'on est loin de parler le même langage d'une industrie à l'autre, et même à l'intérieur de la même industrie.

0.2.5 Terminologie utilisée dans le présent travail

Nous avons utilisé la terminologie anglo-saxonne pour la chaîne allant de l'aluminium liquide au métal recyclé, décrivant en particulier les déchets neufs et vieux. Dans le présent travail, rédigé en français, on utilisera la traduction française :

- déchets internes pour désigner les déchets de production de l'aluminium liquide et de fabrication des semi-produits,
- déchets de transformation pour désigner ceux de fabrication des produits finis à partir des semi-produits,
- déchets neufs regroupant déchets internes et déchets de transformation
- vieux déchets désignant les déchets obtenus à partir de tous les produits arrivés en fin de vie.

Dans le tableau ci-dessous, résumant les différentes terminologies les plus courantes, on a indiqué en italique les définitions utilisées dans la présente étude.

Tableau 0.1: Définition et désignation des déchets (source C. Gentaz)

déchet ou mieux déchet neuf (<i>new scrap</i>)		débris ou mieux	
déchet interne		déchet de transformation	vieux déchet (<i>old scrap</i>)
<i>de la production à la transformation à chaud en semi-produit : lingot, brame, billette, aluminium liquide</i>	<i>au cours de la transformation à froid en semi-produit : feuille, tôle, barre, tube</i>	<i>au cours de la fabrication du produit fini : produit moulé, produit forgé</i>	<i>apparu en fin de vie des produits finis</i>
terme anglais		terme anglais	terme anglais
internal		prompt	obsolete
arising		process	capital (spécifique des bâtiments et machines)
circulating		processing	« dismantled »
home		production	secondary raw material
turn-around			

Lorsqu'il a fallu distinguer l'origine de l'aluminium, on a choisi d'utiliser aluminium électrolytique au lieu d'aluminium primaire et aluminium recyclé au lieu d'aluminium secondaire. Enfin on a seulement parlé de développement supportable.

0.2.6. Nos recommandations

A l'avenir, l'industrie de l'aluminium devra aller jusqu'au bout des changements en cours. La prochaine étape sera d'adopter une terminologie uniformisée avec celle utilisée par l'industrie métallurgique en général, donc avec celle de l'acier, qui devra de son côté abandonner des particularismes peu utiles comme la distinction entre déchets internes et externes.

Un intérêt non des moindres sera d'avoir un langage universel s'appliquant à toutes les métallurgies et permettant de faire des comparaisons, ce qui est aujourd'hui impossible. Le choix entre plusieurs matériaux pour la conception d'un produit fini se fait aujourd'hui sur la base de critères arbitraires.

On parlera enfin d'aluminium brut (crude ou raw aluminium) par analogie avec acier brut (crude steel), pour désigner l'aluminium liquide quelque soit l'origine, déchet ou minerai. Cette façon de faire n'interdira cependant pas de parler de filières, électrolyse pour le métal via le minerai, fusion pour le métal via le déchet.

0.2.7. Bibliographie

Références principales

- (1) Recycling Metals : Aluminum. United States Geological Survey, USGS. 2000

Références générales

- (2) L'aluminium ; un matériau idéal pour le recyclage. Tirage à part du "recycling magazin », 17/2002
- (3) Organisation of European aluminium Refiners and Remelters, OEA, Cannes, France, 6-7 Mars 2001
- (4) Iron and steel scrap, Economic Commission for Europe, United Nations, 1999
- (5) Katyal Anil. The changing pattern of secondary aluminium industry through the millennium. Proceedings of the 3rd ASM international conference on the recycling of metals, 237-253, Barcelona, Spain, 11-13 June 1997
- (6) Cael Jean-Philippe. Affinage et recyclage : l'aluminium de deuxième fusion. Réalités Industrielles, 38-43, Février 1994
- (7) Le recyclage de l'aluminium, La Technique Moderne, 106-110. Mai - Juin 1986

0.3. Les méthodologies

La connaissance du recyclage passe par celle des flux de matières. Ceux entrant sont les matières premières du recyclage, tous les déchets, et ceux sortant, le métal recyclé et quelques déchets internes, et sont traités par la méthodologie des flux de matières (Material Flow Analysis, MFA). Développée dans les années 90, c'est très récemment qu'elle a été perfectionnée, donnant un outil bien adapté à la connaissance des cycles anthropogéniques des métaux en général, incluant donc l'exploitation des minerais, et le recyclage en particulier. De tels cycles, où les flux et les stocks sont représentés dans l'espace (pays, région, monde) à un instant donné (l'année), existent aujourd'hui pour des métaux utilisés comme matériaux, l'argent⁽⁸⁾, le cuivre⁽⁹⁾, le zinc⁽¹⁰⁾ et le fer.

Les flux de métal recyclé et de déchets sont pratiquement simultanés et on peut facilement les mesurer.

Par contre, si on sait mesurer le flux de vieux déchets, on ne connaît pas le stock et le flux historique car l'un et l'autre dépendent de la durée de vie du produit, elle-même variable. On aura alors recours à une méthodologie complémentaire, celle des cycles de vie, CV (Life Cycle, LC). Cette méthodologie a été développée dans les années 80. Son importance pour les entreprises, en termes d'image, de politique commerciale, de stratégie industrielle par exemple, a largement contribué à une prolifération de variantes. L'anarchie résultante permettait à chacun de se montrer sous son meilleur jour vis à vis des concurrents. C'est ainsi que deux producteurs de boîte boisson, l'une en acier ⁽²³⁾, l'autre en aluminium ⁽²²⁾, se sont-ils affrontés la même année en faisant réaliser, par la même société, un écobilan pour chaque boîte boisson concluant sur l'absence de suprématie. Il faudra attendre 2000 avec la mise en place des normes 14.000 pour introduire un début d'ordre.

L'industrie de l'aluminium, en Europe, a saisi cette opportunité pour codifier la façon de prendre en compte le recyclage de l'aluminium dans l'étude du cycle de vie^(4, 5). Cette démarche, incontestablement bienvenue, ne résout cependant pas de façon satisfaisante, le cas de recyclages aussi différents que celui du cadre de fenêtre, recyclé après plusieurs dizaines d'années et celui de la boîte boisson, recyclée plusieurs fois dans la même année.

0.3.1. Bibliographie

Références principales

- (8) Johnson Jeremiah et al. Contemporary anthropogenic silver cycle : a multilevel analysis. Environ. Sci. Technol, 39, 4455-4466, 2005
- (9) Graedel T.E. and al. Exploratory data analysis of the multilevel anthropogenic zinc cycle. Journal of Industrial Ecology, vol 9, number 3, 91-108, 2005
- (10) Graedel T.E. and al. Multilevel cycle of anthropogenic copper. Environ. Sci. Technol, 38, 1242-1252, 2004
- (11) European Aluminium Association. Key features how to treat aluminium in LCAs, with special regard to recycling issues, 2002 (www.aluminium.org)
- (12) European Aluminium Association. Guidelines for life cycle assessment (LCA) of aluminium products with reference to the environmental profile Report for the European Aluminium Association. EAA, April 2000

Références générales

- (13) Vroonhof Jan, Schwenke Anne, Croezen Harry, Potjer Berend. Legislation using LCA concerning aluminium. Report by environment, economy and technology, Delft, Netherlands, December 2002
- (14) Werner Frank. Treatment of aluminium recycling in LCA ; development and evaluation of the value-corrected substitution procedure applied to window frames. Research & Work Report 115/47, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, EMPA, Dübendorf, Zürich, Switzerland, February 2002
- (15) Werner Frank. Interdependencies between LC-modelling and the use of LCA in product design-related decision situations, with special emphasis on the influence of cognitive models and values on the modelling of reuse & recycling and other end-of-life options. Doctorate thesis, ETH Zurich, 2002. Nous citons en particulier "case study I : development of the value-corrected substitution applied to aluminium window frame", pp 154 - 214
- (16) Bruggink P. R. Aluminium scrap supply and environmental impact model. Proceedings of the Recycling of metals and engineered materials, edited by Stewart D. J., Stephens R. and Daley J. C. The Minerals, Metals and Materials Society, TMS, 809-822, 2000

- (17) Aluminium applications and society. Paper 1: automotive. Life Cycle Inventory of the Worldwide Aluminium Industry with regard to Energy Consumption and Emissions of Greenhouse Gases report. International Aluminium Institute, May 2000
- (18) Birat Jean-Pierre. Le cycle du fer ou le recyclage durable de l'acier. jpbirat@imaginet.fr et jean-pierre.birat@irsid.usinor.com, 2000
- (19) Verfaillie Hendrick A., Bidwell Robin. Measuring eco-efficiency, a guide to reporting company performance. World Business Council for Sustainable Development, WBCSD June 2000
- (20) Iron and steel scrap, Economic Commission for Europe, United Nations, 1999
- (21) Marstrander Rolf. Tomorrow's customer support in an industrial ecology perspective. METEF 98, May 27-30, 1998
- (22) Pechiney. L'écobilan : un outil de dialogue et de décision. Communiqué de presse du 6 juillet 1994
- (23) Sollac – Groupe Usinor –Sacilor. Ecobilan de la filière aciers pour emballage. Numéro spécial de la revue des aciers pour emballage pour la protection de l'environnement, 1991

0.4. Les indicateurs

On mesure les flux par des quantités de matières par unité de lieu et par unité de temps. On a des mesures régulièrement publiées des quantités de produits finis fabriqués, de produits finis vendus, de vieux déchets collectés et d'aluminium recyclé produit. Par contre, des mesures indispensables sont rarement publiées telles les quantités de déchets internes et de transformation produits et collectés, la qualité de ces déchets exprimée par la teneur en aluminium ainsi que la quantité d'aluminium mise en œuvre dans les semi-produits.

Ces mesures servent à calculer des indicateurs caractérisant le recyclage et on note que ceux-ci, lorsqu'ils visent à exprimer la même caractéristique du recyclage, utilisent souvent des flux dont la définition n'est pas la même. Il en résulte une utilisation difficile à l'intérieur de l'industrie de l'aluminium, rendant impossible toute comparaison avec les autres métallurgies.

Nous proposons ci-après une réflexion sur les quantités de matières mesurées et mesurables ainsi que sur les indicateurs indispensables pour caractériser le recyclage.

Nous avons retenu de traiter le cas des vieux déchets, le plus complexe et le plus général, ceux des déchets neufs étant des cas particuliers et simplifiés du cas général.

On a deux familles d'indicateurs : les indicateurs globaux caractérisent l'activité du recyclage dans un domaine spatial (pays, région, monde) et pour une unité de temps donnée, le plus souvent l'année. Dans les mêmes conditions, les indicateurs sectoriels caractérisent un des trois secteurs de la chaîne du recyclage : la production des déchets, la collecte des déchets, le traitement des déchets.

0.4.1. Les indicateurs globaux (ou intensité de recyclage) : c'est la quantité d'aluminium recyclé produite divisée par la quantité totale d'aluminium utilisée, c'est-à-dire la somme des quantités d'aluminium recyclé et d'aluminium d'électrolyse corrigée par les soldes de stock et de commerce pendant une même année.

$$\text{intensité de recyclage} = \text{production d'aluminium recyclé} / \text{consommation totale}$$

C'est donc l'importance relative de l'aluminium recyclé dans l'industrie de l'aluminium et c'est bien une intensité de recyclage. Toutes les quantités d'aluminium devront être ramenées à une teneur en aluminium de 100% pour être homogènes. Enfin, de la même façon, on pourra accéder à une intensité de recyclage par type de déchet

L'indicateur actuel, avec les anciennes désignations, encore utilisées, d'aluminium primaire et secondaire, est le taux de recyclage (recycling rate ou share of secondary aluminium in overall production of aluminium). Par définition, on a :

$$\text{taux de recyclage} = \text{production secondaire} / \text{production totale}$$

la production totale étant la somme des productions d'aluminium primaire et secondaire. On rencontre aussi une variante de cette définition où on parle de « amount » (quantité) et de « total amount » au lieu de « production » (production).

Nous considérons que ces indicateurs ne conviennent pas car ils sont limités à la production.

0.4.2. Les indicateurs sectoriels

0.4.2.1. Les indicateurs de production des déchets

Les quantités de déchets produites, tout type de déchet confondu ou mieux par type de déchet, sont rapportées à la quantité de produits ayant créé ces déchets, c'est-à-dire la quantité de produits finis, la quantité de semi-produits ou la quantité d'aluminium d'électrolyse ou de recyclage mise en œuvre, corrigées par les soldes de stock et de commerce. On parlera de taux de production de déchets internes, de transformation et de vieux déchets. Pour les déchets neufs, internes et de transformation, on mesure ainsi l'efficacité de la transformation en semi-produits et en produits finis. Cet indicateur, déjà utilisé par l'industrie de l'acier, ne l'est pas encore par l'industrie de l'aluminium. Nous l'utiliserons dans la présente étude. Pour les vieux déchets, en l'absence de mesure on estime la quantité d'aluminium en cours d'usage et à l'état de vieux déchets : c'est le gisement ou stock capitalisé historiquement. Par contre, on connaît le flux entrant, la quantité de produits finis consommée et le flux sortant, la quantité de vieux déchets collectés. Malheureusement, ces flux ne sont pas homogènes par rapport au temps : les flux de produits finis, semi-finis ou d'aluminium mis en œuvre, diffèrent du flux de vieux déchets collectés par la durée de vie des produits. N'en pas tenir compte conduit à sous-évaluer le taux de production puisque toutes les quantités d'aluminium d'aujourd'hui sont supérieures à celles d'hier. C'est cependant ce qui est fait aujourd'hui. Idéalement, il faut connaître :

- la quantité stockée de vieux déchets, mais il est difficile d'arriver à une valeur fiable
- la quantité théorique de vieux déchets sortant du gisement : on peut proposer de calculer une quantité théorique à partir des flux de produits finis au moment de leur entrée dans le gisement. Il faut alors connaître la durée de vie par application, par marché. Par exemple, pour le marché de l'automobile, avec une durée de vie

moyenne estimée à 13 ans, connaissant le nombre d'automobiles consommées il y a 13 ans et la quantité d'aluminium contenue par automobile à ce moment là, on accèdera à une quantité théorique d'aluminium devenue vieux déchet. On devra évidemment répéter ce calcul par marché. La somme sera une quantité théorique de vieux déchets. Malgré l'importance de l'erreur commise en utilisant une valeur moyenne, cette méthode a été utilisée récemment. On notera enfin qu'elle convient bien pour le marché de l'emballage dont les produits ont une durée de vie inférieure à une année. La quantité consommée est alors égale à la quantité théorique de vieux déchets.

En résumé, on peut avoir accès aujourd'hui aux taux de production de déchets internes et de déchets de transformation. Ces taux, non utilisés, en tous cas non publiés aujourd'hui par l'industrie de l'aluminium, caractérisent l'efficacité de l'outil de transformation en semi-produits et produits finis.

Le même taux appliqué aux vieux déchets, dans les mêmes conditions, est sous-évalué et sa valeur reste toute relative.

On peut aussi mesurer la quantité théorique de vieux déchets sortant du gisement. La mesure reste cependant imprécise car elle demande la connaissance des marchés, des durées de vie, et des concentrations en aluminium des produits. Ce sont les raisons qui nous ont amené à renoncer à modéliser le recyclage. Nous avons pu vérifier que toutes les tentatives antérieures de modélisation ont buté sur les données, le résultat étant toujours très et trop approximatif.

0.4.2.2. Les indicateurs de collecte des déchets

C'est la quantité collectée divisée par la quantité produite ou consommée. Pour les déchets neufs, internes et de transformation, le taux de collecte est voisin de 100%, aux pertes près, plus importantes pour les déchets de transformation que pour les déchets internes. Pour les vieux déchets, sauf à connaître la quantité théorique sortant du gisement, on ne peut pas accéder au taux de collecte, ou sinon à un taux de collecte très approché et souvent très subjectif. C'est la raison pour laquelle on constate des variations importantes d'un auteur à l'autre. Cependant par modélisation ou par étude de cas lorsqu'il s'agit d'un domaine fermé (par exemple, la démolition avec collecte d'un bâtiment où on peut connaître la quantité d'aluminium utilisée à la construction), on pourra affiner le taux de collecte.

Enfin, on a le cas des produits avec une durée de vie très courte, tels les produits d'emballage, pour lesquels on sait calculer le taux de collecte.

Dans ce travail, nous avons retenu de prendre au dénominateur du taux de collecte la quantité totale d'aluminium utilisée. Nous n'échappons pas à la sous-évaluation du

taux de collecte des vieux déchets avec cependant l'avantage d'avoir le même dénominateur pour tous les déchets et d'être homogène avec la façon de calculer les taux de collecte des déchets d'acier.

0.4.2.3. Les indicateurs de traitement des déchets

Ce sont des indicateurs techniques indispensables à une gestion efficace : rendements de matière et d'énergie. On veillera seulement à utiliser la même convention de calcul pour la teneur en aluminium tant des déchets que du produit recyclé puisque on a un produit de plus en plus concentré en aluminium tout au long des étapes successives de traitement, pré-tri, tri à froid, enrichissement à chaud, fusion. Certains auteurs et aussi ce travail ont ramené toutes les quantités mesurées de déchets et d'aluminium recyclé à 100% d'aluminium contenu. On aura un rendement global du procédé de traitement, que l'on pourra désagréger par type de déchet et par type de traitement. La littérature ^(24, 25) cite plusieurs indicateurs.

- le taux de recyclage (recycling rate) : il désigne la quantité de déchets entrant physiquement dans les installations de recyclage rapportée à la quantité collectée.
- le rendement de recyclage (recovery rate) : c'est la quantité de métal récupéré divisée par la quantité de métal enfourné
- le rendement métallique (metal yield) : c'est la quantité d'aluminium récupéré par tonne de déchet enfourné
- le rendement métallurgique (metal recovery) : c'est la quantité d'aluminium récupéré par la quantité d'aluminium enfourné. Par exemple, on traite 1 tonne de déchet à 90% d'aluminium et on récupère 890 kg d'aluminium pur. Le rendement métallique est de $890/1000 = 89\%$ et le rendement métallurgique de $890/900 = 98,9\%$

0.4.3. Bibliographie

Références principales

(24) Boin Udo, Orbon Heinz and Probst Thomas. Secondary aluminium smelting : a system-analytical approach to cost reduction, proceedings of European Metallurgical Conference, 71-82, 2001

(25) Reuter M.A., Orbon Heinz and Probst Thomas. The impact of scrap type and melting conditions on metal yield and recovery. Proceedings of European Metallurgical Conference, 59-70, 2001

(26) Hoberg H and al. Modelling the material flow of recycling process for aluminium alloys by means of technical recycling quotas. Proceedings of REWAS 99, Symposium on recycling, waste treatment and clean technology, ed. by Gaballah, San Sebastian, Spain, 1999

Références générales

(27) Nordheim Erik. Sustainable development – why it is important for the aluminium Industry ?, 7th OEA International Aluminium Recycling Congress, München, Germany, 17/18 march 2003

(28) Rombach Georg and Friedrich Bernd. Future potential and limits of aluminium recycling. Proceedings of European Metallurgical Conference, 17-32, 2001

0.5. Les données statistiques

On dispose de données statistiques :

- de production :

- d'aluminium d'électrolyse ; d'après la définition de l'International Aluminium Institute « la production d'aluminium primaire est donnée par le poids d'aluminium liquide mesurée à la sortie de la cellule d'électrolyse, à l'exclusion des éléments d'alliage, des déchets ou de produits refondus ».
- de produits semi-finis à chaud : lingot, brame, billette
- de produits semi-finis à froid : tôle, feuille, tube, fil, barre, profilé, moulé, forgé

- de consommation :

- de produits finis : ceux de production +/- commerce +/- variation de stock
- des déchets commerciaux, donc excluant ceux n'entrant pas sur le marché commercial

Les données statistiques de production de l'aluminium d'électrolyse, des produits semi-finis et finis ainsi que celles de consommation et de commerce sont fiables. Celles de production et consommation de métal recyclé et de déchets sont peu nombreuses et le plus souvent de qualité médiocre.

Aujourd'hui, en Europe, on ne connaît pas la quantité de déchets neufs n'entrant pas sur le marché. Or c'est la plus grande partie. En effet, l'International Aluminium Institute définit l'aluminium recyclé : « l'aluminium recyclé est le poids d'aluminium récupéré à partir des déchets achetés ou traités à façon à l'exclusion des déchets internes ». Seules les données nord-américaines sont plus détaillées, sans cependant être complètement utilisables. Seule la quantité de vieux déchets générée par les boîtes boissons usagées, les UBC (Used Beverage Can), est parfaitement connue. Il est vrai que ce marché de l'aluminium ne peut être ignoré en raison de son importance. Aux USA, la moitié des vieux déchets sont des UBC.

Cette situation déplorable des données statistiques a été identifiée il y a une dizaine d'années par l'UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development) dans ses Ad Hoc review meetings on bauxite, indépendants des associations de producteurs. On a reproduit in extenso ci-après les conclusions les plus importantes du rapport de 1994 ⁽²⁹⁾. D'abord, en général sur celles de l'industrie des non-ferreux.

«In the non-ferrous metals industry, the need for more timely, complete and accurate information is increasingly recognized. A greater transparency of the market plays a

major role in the process of decision-making, at the industry as well as the government level.

Although statistical problems vary with the structure of each metal industry, the whole non-ferrous metals sector currently experiences increasing difficulties in producing or obtaining the information needed. Changes in the overall economic and political situation of the world are generally considered as responsible for the deterioration of the availability of comprehensive and reliable statistics, in particular :

(i) Constraints on public expenditure, deregulation, privatization, and the general move toward less government have in many instances reduced the effectiveness of governmental statistical collecting and releasing agencies.

(ii) Severely affected by the 1980s recession, the mining and metal producing industries reduced or at least delayed their participation in routine statistical enquiries: the timeliness and quality of responses consequently deteriorated.

(iii) With more severe international competition, producing companies have become more concerned about commercial secrecy, asking for the suppression of details of their activity. The existence of only few companies in a country resulted sometimes in the absence of detailed information for the whole country. The fact that significant volumes of production and consumption take place in wider range of countries has complicated the problems of collecting and analysing data.

(iv) Last but not least, as stated by Metallgesellschaft in the introduction to its 1991 edition of metals statistics : the opening up of eastern bloc is resulting in an abundance of partially contradictory information on their non-ferrous metals industries. Part of the problem is due to the fact that the statistical language is different to that spoken in the West. It is to be hoped that with the introduction of a market economy, the necessity for a uniform language is recognized and alignment is made with the standards of western statistics. Until then, for most countries we will have to rely, now as before, on analysis of western trade statistics in order to estimate trends in consumption.

The world bauxite / alumina / aluminium industry does not escape these statistical problems”.

Ensuite, sur celles de l'industrie de l'aluminium et en particulier du recyclage (secondary production) et des déchets (scrap) :

“Data on this part of the aluminium industry are notoriously unsatisfactory ; the problem arises both from the definition of scrap and the way scrap is collected. Recently Metallgesellschaft (Metal Statistics 1988) stressed the increasing difficulties

of a timely presentation of important statistical data, to be used as a basis for reliable forecasts. One reason is the increasing use of old and new scrap in the supply for so-called « primary refineries » as is to be found recently, for example, in many aluminium primary smelters.

Double counting caused by the direct use of scrap in the first processing stage is on the agenda in many countries, for example in the recycling of scraps from cans.

Statistics are indeed available, but quality is extremely variable, definitions are not harmonized and the geographical coverage is not sufficient. Owing to the increasing role of this resource, the aluminium industry hopes to improve the quality of the data related to secondary recovery ».

Mais en 2005, des données statistiques rigoureuses et fiables n'existent toujours pas et les Ad Hoc review meetings ont été supprimés en 2000 pour des raisons budgétaires (c'est l'industrie de l'aluminium qui finançait ces travaux).

Aujourd'hui on citera l'Organisation des Affineurs et Refondeurs européens d'aluminium (OEA) qui met en place des données statistiques séparées en coopération avec l'Association Européenne de l'Aluminium (EAA).

Outre le constat qu'il n'y a pas de données statistiques utilisables, on retiendra que celles disponibles, y compris celles de production et consommation sont trompeuses.

On notera surtout que les quantités de déchets neufs circulant en interne ne sont pas prises en compte, que les pièces moulées rentrent dans la consommation et qu'elles sont comptabilisées comme de l'aluminium pur, alors que la teneur moyenne en aluminium est de 90%.

A la décharge de l'industrie de l'aluminium, les données relatives aux déchets métallurgiques sont presque toujours inutilisables pour les mêmes raisons : définitions, données.

L'industrie de l'acier fait exception avec des données statistiques de meilleure qualité, ce en raison de l'importance stratégique de cette industrie et de l'obligation de connaître l'état de l'Europe à la fin de la deuxième guerre mondiale (Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier, CECA). Elle reconnaît cependant que des imprécisions subsistent encore, surtout dues aux différences d'interprétation dans les définitions : ce sont encore les déchets internes, les « circulating scrap » qui sont surtout concernés

La conclusion est claire : on doit mettre au point une base de données statistiques internationales commune à tous les métaux.

Quant au présent travail, nous avons très vite été confrontés à des données statistiques peu nombreuses, le plus souvent de qualité médiocre quand ce n'était pas inutilisables. C'est en raison de la qualité des données que nous nous sommes limités à des modélisations simples, suffisantes cependant pour comprendre globalement l'industrie du recyclage.

0.5.1. Bibliographie

Références principales

(29) United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), Committee on Commodities, Ad Hoc review meeting on bauxite, Geneva, May 1991 and May 1994

Références générales

(30) Recycling Metals: Aluminum. United States Geological Survey, USGS. 2000

(31) Iron and steel scrap: its significance and influence on further developments in the iron and steel industries, eight updating. United Nations Economic Commission for Europe, 1999

(32) Ayres Robert. U. Metals recycling: economic and environmental implications. Proceedings of the Third ASM International Conference on the Recycling of Metals, 6-21, Barcelona, Spain, 11-13 June 1997

(33) Recycling non-ferrous metals. United States Bureau of Mines, USB. 1991

0.6. Les unités énergétiques

$$1 \text{ J (joule)} = 0,239 \text{ cal (calorie)} \text{ ou } 1 \text{ cal (calorie)} = 4,179 \text{ J (joule)}$$

$$1 \text{ kcal (kilocalorie ou millithermie)} = 4,18 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ kWh (kilowatt-heure)} = 861,29 \text{ kcal (kilocalorie)} = 3,6 \text{ MJ}$$

Pratiquement on utilise l'équivalence de 10 MJ pour 1 kWh électrique en considérant un rendement de conversion thermique / électrique de 36%.

Pour le gaz naturel, on a pris 0,065 GJ/kg (ou 36 MJ/m³) et, pour le fuel, 42 MJ/kg.

Chapitre 1. Le matériau aluminium

L'aluminium est le nouveau matériau métallique le plus important du 20ème siècle. L'application aéronautique, bien que modeste en quantité, est celle qui a le plus marqué ce siècle. A partir des années 50, toutes les applications de l'aluminium ont connu un développement formidable qui s'inscrit dans cette croissance de l'activité humaine aujourd'hui confrontée au développement supportable.

Aluminium, titane, magnésium, silicium ont été les nouveaux matériaux du 20ème siècle. Tous sont des métaux électro-intensifs car ils partagent une métallurgie extractive forte consommatrice d'énergie électrique, ce qui explique la simultanéité de leur apparition industrielle avec celle de l'électricité. L'aluminium est le premier d'entre eux par la quantité, cent fois plus importante.

Les activités de l'industrie de l'aluminium sont décrites dans la figure 1.1 et leur importance quantitative reportée dans la figure 1.2.

Figure 1.1 : L'industrie de l'aluminium, du minerai et du déchet au produit fini.

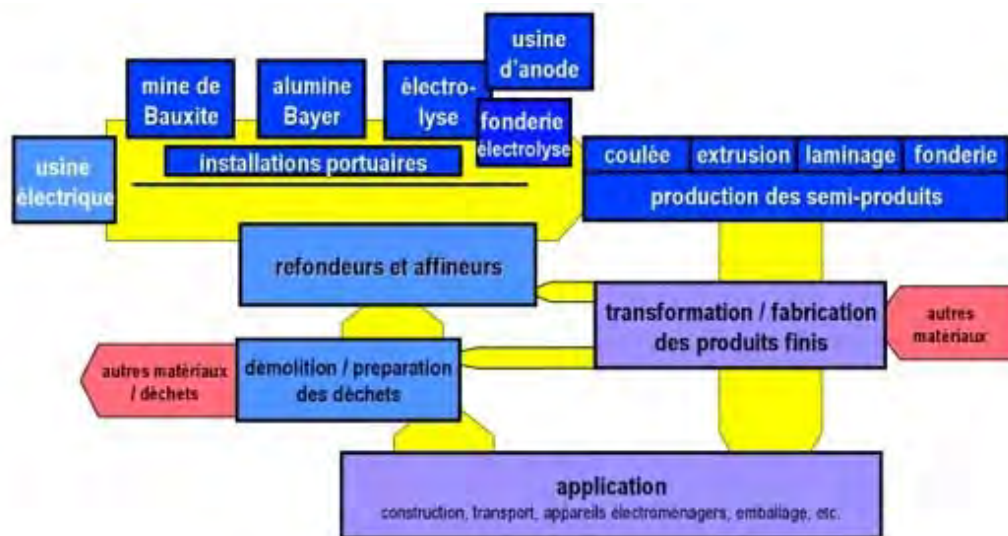
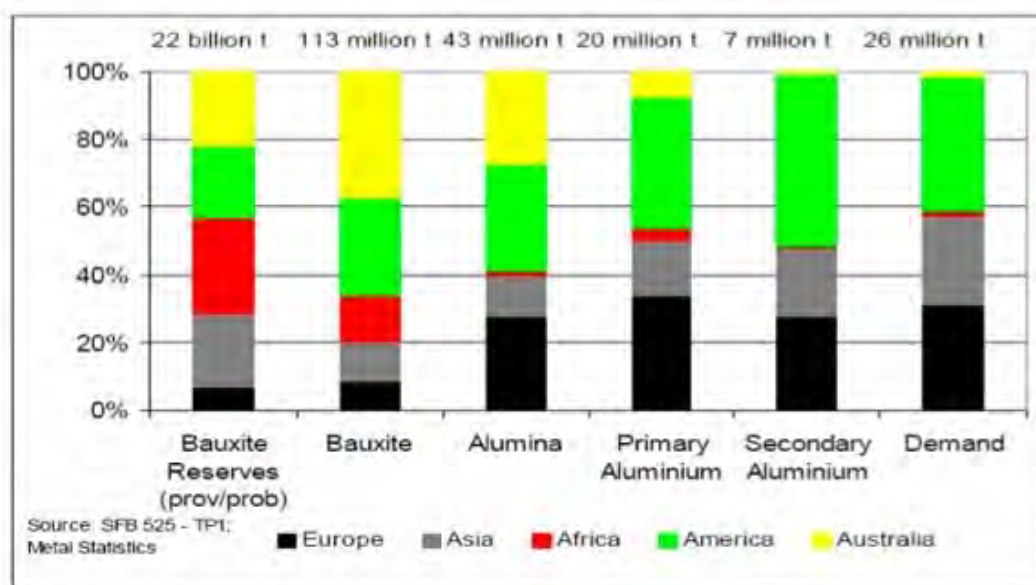


Figure 1.2 : Réserves de bauxite, productions de bauxite, d'alumine d'aluminium électrolytique et recyclé, et demande d'aluminium en 1995⁽⁵⁰⁾



L'aluminium et ses alliages, - pour la commodité on parlera seulement d'aluminium -, est né industriellement en 1886. Pendant plusieurs années, son prix élevé lui a valu de rester confiné à l'orfèvrerie. Puis l'aluminium a pénétré le domaine ménager : vaisselle, bouilloire, etc. et c'est en 1903 qu'apparaissent les premières applications industrielles, l'aéronautique, avec le premier vol des frères WRIGHT, et déjà l'automobile.

C'est l'application aéronautique qui se développe, d'abord avec l'aviation militaire pendant la 1ère guerre mondiale, ensuite, dès les années 20, avec l'aviation commerciale. La 2ème guerre mondiale consacre définitivement l'aluminium comme matériau aéronautique. Nouvelles applications et techniques de transformation ont alors incontestablement bénéficié des retombées technologiques de ce seul usage militaire de l'aluminium. Dans les années 1950-1960, on assiste au développement de masse de la plupart des applications actuelles. L'aluminium fait sa place à côté du cuivre dans l'application électrique, du magnésium, du titane et du fer dans le transport, des composites plastiques, du bois et du fer dans la construction, du papier, du verre, du plastique et du fer dans l'emballage.

Les années 1980 ont vu le développement spectaculaire de l'emballage rigide, la boîte boisson.

Aujourd'hui ce sont celles de l'application transport terrestre, l'automobile surtout où, en raison des augmentations importantes de poids constatées pour de bonnes (sécurité, airbag, ABS) et moins bonnes (air conditionné, électronique, confort)

raisons, il faut alléger en utilisant aluminium, magnésium et plastique pour réduire la consommation de carburant.

Le tableau ci-après donne les parts de marché en 2000 dans différents pays et on retiendra que les applications sont variables dans le temps et dans l'espace.

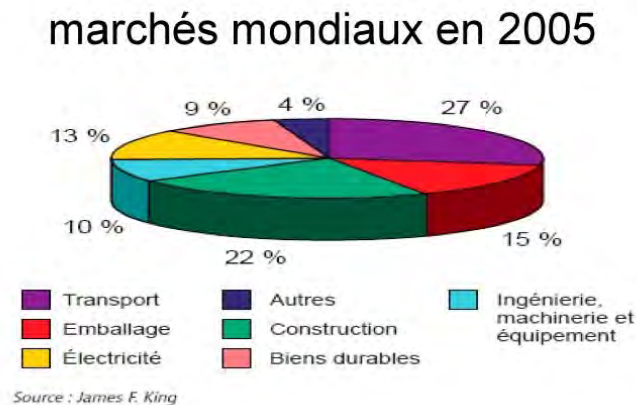
Tableau 1.1 : Applications et parts de marchés estimées de l'aluminium en 2000 (IAI, the aluminium industry's sustainable development report) ⁽³⁶⁾ et 2005 dans le monde⁽³⁵⁾

part de marché (%) par application	Monde 2000	Monde 2005	Europe 2000	France 2000	Allemagne 2000
transport (*)	26 (*)	27	26	29	33
construction	20	22	24	20	16
emballage	20	15	14	12	27
électricité	9	13	8	11	3
mécanique	9	10	8	4	4
électroménager	6	9	n.d.	9	3
autres	10	4	20	15	14
production électrolytique (Mt/an)	32		7,1	1,0	2,4

(*) dont

Transport	26
aéronautique	1
rail	1
automobile	22
naval	2

Figure 1.3 : Les principales applications mondiales de l'aluminium en 2005⁽³⁷⁾



C'est dans cette deuxième moitié du 20^{ème} siècle que l'on assiste à la plus formidable croissance jamais connue de l'activité humaine : la production de tous les métaux de base, aluminium, cuivre, zinc, plomb, nickel, fer, mais aussi la population, la consommation d'énergie et la modification de l'environnement mesurée par la concentration de l'air en CO₂. L'allure des courbes est toujours la même.

Figure 1.4 : Production mondiale d'aluminium (et des principaux métaux non ferreux et du nickel) depuis 1900

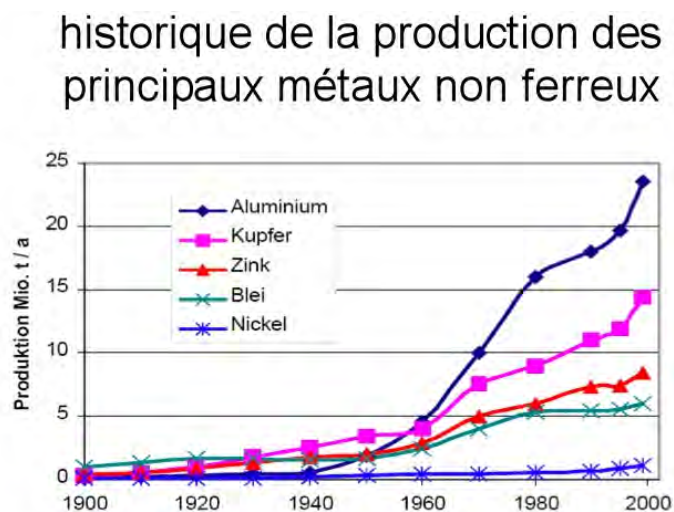
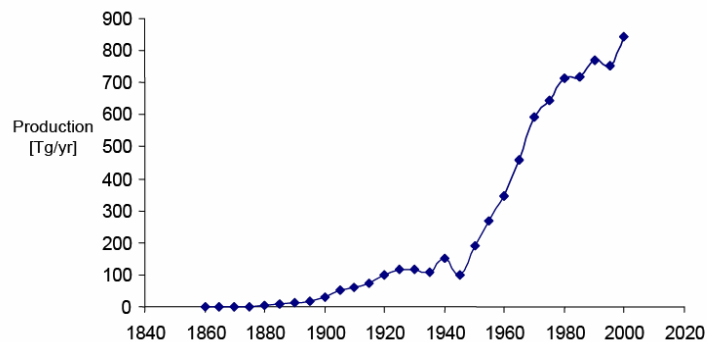
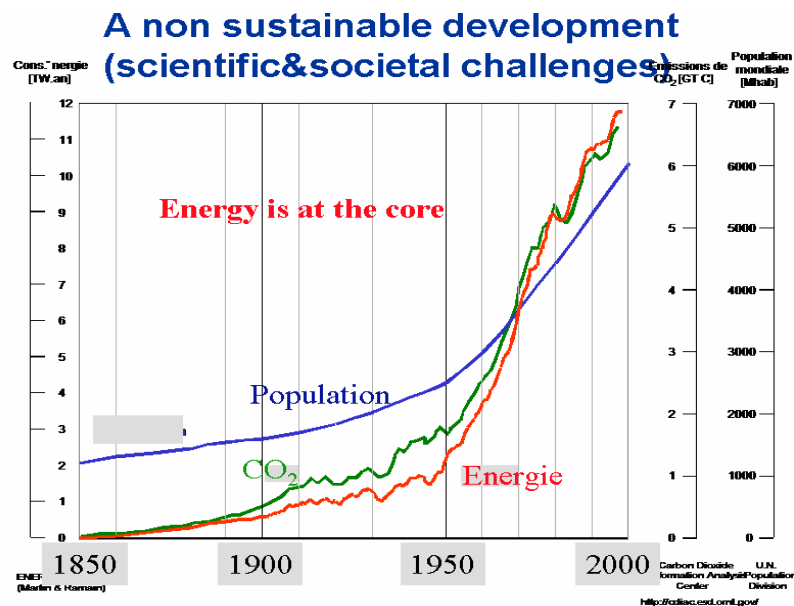


Figure 1.5 : Production mondiale d'acier brut (Tg/année) de 1860 à 2004 (communication privée)



Ces graphiques de production des deux principaux métaux ont une allure étonnamment identique à ceux, reportés dans le figure suivante, de la population mondiale, de la consommation d'énergie et des émissions de gaz carbonique.

Figure 1.6 : Evolution de la population mondiale, de la consommation d'énergie et des émissions de gaz carbonique de 1850 à 2000 (Sarlos Haldi, systèmes énergétiques, PPUR et Daniel Favrat, industrial ecology, sustainable energy system analysis, Lausanne, décembre 2006)



A côté de ces développements impressionnants, l'industrie de l'aluminium a une réputation très contrastée alliant le pire et le meilleur.

Le pire ce sont les émissions polluantes et l'énorme consommation d'énergie de sa métallurgie extractive à partir du minerai. On citera aussi des effets controversés sur la santé (troubles neurologiques) quoiqu'il ne soit aucun métal dont les effets sur la santé ne soient mis en doute.

Le meilleur concerne les produits finis - à même utilisation ils sont allégés (dématérialisation relative) grâce à la faible densité de l'aluminium et inaltérables (durée de vie) grâce à l'exceptionnelle résistance à la corrosion de l'aluminium - et une métallurgie extractive à partir des déchets, le recyclage, avec des émissions polluantes et une consommation d'énergie très faibles.

L'industrie de l'aluminium est caractérisée par une intensité de recyclage dont on trouve les valeurs dans la littérature, mais avec des définitions différentes.

L'une est définie par le rapport de la quantité d'aluminium recyclé divisée par la quantité d'aluminium électrolytique : elle est d'environ 30%. Le même indicateur est utilisé pour calculer l'intensité de recyclage d'autres métaux, fer, cuivre, plomb par exemple : elles sont égales ou supérieures à 50%.

Une autre est définie par le rapport de la quantité d'aluminium recyclé à la quantité d'aluminium consommé. On a reporté dans les deux tableaux ci-après les valeurs calculées de l'intensité de recyclage de différents métaux aux USA, en 2000 (tableau 1.2) et de l'intensité de recyclage de l'aluminium dans différentes aires géographiques en 2000 (tableau 1.3).

Tableau 1.2 : Intensité de recyclage de différents métaux en 2000 aux U.S.A (rapport de la quantité de métal recyclé à la quantité de métal consommé) (source USGS)⁽³⁹⁾

Métal	quantité recyclée tous déchets confondus (millions de tonnes)	consommation apparente (millions de tonnes)	I intensité de recyclage (%)
Aluminium	3,45	7,18	48
Cuivre	1,52	3,03	50
Plomb	1,12	1,74	64
Titane	n.d.	n.d.	50
Acier	n.d.	n.d.	64

Tableau 1.3 : Intensité de recyclage de l'aluminium (rapport de la quantité de métal recyclé à la quantité de métal consommé) en 2000 dans le monde, aux U.S.A et en France (sources IAI pour le monde en 1997, USGS pour les U.S.A. et PECHINEY pour la France) ^(34,35,39)

Zone géographique	quantité recyclée tous déchets confondus (millions de tonnes)	consommation apparente (millions de tonnes)	intensité de recyclage de l'aluminium (%)
Monde	11,6	31,5	37
U S A	3,45	7,18	48
France	0,35	1,0	35

Les intensités de recyclage ainsi calculées sont parfaitement homogènes car la méthodologie utilisée est la même. De plus, dans le tableau 1.2, les sources (USGS) sont les mêmes.

On constate que l'intensité de recyclage varie d'un pays à l'autre, d'une zone à l'autre, ce qui n'est pas surprenant. Ce qui l'est par contre, c'est la médiocre, pour ne pas dire mauvaise, intensité de recyclage de l'aluminium comparée à celle d'autres métaux. Si l'excellence de l'intensité de recyclage n'est pas une fin en soi, celles de l'aluminium et aussi du cuivre, métaux dont la valeur économique fait unanimement dire que rien n'est perdu, devraient être égales, voire supérieures à celles des autres métaux. Or l'intensité de recyclage de l'acier est bien plus élevée.

Une explication réside dans la fiabilité de l'indicateur, de sa définition et des valeurs utilisées pour le calculer. Cependant, l'industrie de l'aluminium avalise ces valeurs qui sont en contradiction flagrante avec le langage tenu par ailleurs depuis plusieurs années : il va de soi que tout l'aluminium est recyclé.

Ce sont ces contradictions que nous nous proposons d'expliquer dans le présent travail.

1.1. Bibliographie

Références générales

(34) Série (1980-2004) des rapports annuels et des sites de ALCAN (www.alcan.com), ALCOA (www.alcoa.com), ALUSUISSE (www.algroup.ch), ELKEM (www.elkem.no), NORSK HYDRO ou HYDROALUMINIUM (www.hydro.com), PECHINEY (www.pechiney.com)

(35) International Aluminium Institute, IAI, (www.world-aluminium.org)

(36) Sustainable aluminium; the aluminium industry's sustainability development report. International Aluminium Institute

(37) European Aluminium Association, EAA (www.eaa.net)

(38) Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters, OEA (www.oea-alurecycling.org)

(39) United States Geological Survey (USGS) (www.usgs.gov), anciennement United States Bureau of Mines (USBM)

(40) The Aluminum Association, Inc. (www.aluminum.org)

(41) Institut de l'Histoire de l'Aluminium, I.H.A. (www.histalu.org)

(42) Morrison Jim. Can recycling survive in Europe? Aluminium (Isernhagen, Germany) 81 (6), 551-555, 2005

(43) L'aluminium ; un matériau idéal pour le recyclage. Tirage à part du Recycling Magazin, 17/2002

(44) Recent and planned changes in production capacity for bauxite, alumina and aluminium. Note by the United Nations Conference on Trade And Development, UNCTAD, 12 April 2000.

(45) Ayres Robert. U. Metals recycling : economic and environmental implications. Proceedings of the third ASM International Conference & Exhibition on The Recycling of Metals, Barcelona, Spain, 5-31, 11-13 June, 1997

(46) Armand Richard. Quatre axes pour la politique de l'environnement. Pechiney, Direct Magazine, n° 10, 5-8, Avril 1992

(47) Lovatt Melanie. US producers see growing primary involvement. Metal Bulletin Monthly, 60-63, March 1992

(48) Frankenfeldt R. E. Aluminium : a squanderer or a valuable material?

Adress delivered at the Aluminium Seminar, The Hague, Netherlands, on the 21st of February 1991

(49) Jacky Henri. Aluminium : la nouvelle frontière de l'aval. Marché unique,

marché multiple : stratégie européenne des acteurs industriels. Observatoire des Stratégies Industrielles. Ed. Economica. 303-322, 1990

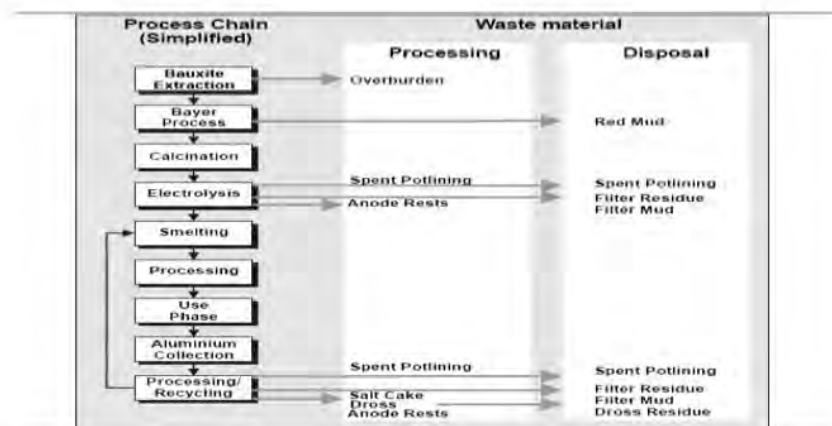
Chapitre 2. La métallurgie extractive de l'aluminium : du minerai, la bauxite, à l'aluminium liquide

Environnement et énergie, telle est la problématique inéluctable de la métallurgie extractive de l'aluminium. Les pollutions les plus importantes seront toujours les boues rouges pour le procédé BAYER de transformation de la bauxite en alumine et les gaz à effet de serre, composés fluorés et CO₂, pour le procédé HALL-HEROULT d'électrolyse de l'alumine. Sa dernière génération réduit spectaculairement les émissions de composés fluorés, mais pas celles de CO₂, et la consommation d'énergie n'y est plus capable de réduction importante.

2.1. Evolution historique des procédés de fabrication de l'aluminium à partir du minerai

La chaîne technologique allant du minerai au métal est caractérisée par sa très grande maturité et peu de gains de matière et d'énergie sont encore à faire. Ceux-ci se font surtout avec la création de nouvelles capacités ou le remplacement de capacités de production obsolètes.

Figure 2.1 : Les principaux déchets de la métallurgie extractive à partir du minerai⁽⁵⁰⁾



Toute la chaîne est justement critiquée pour ses atteintes à l'environnement. On a d'abord l'extraction minière de la bauxite avec ses stériles et le bouleversement du terrain, puis le procédé BAYER de conversion de la bauxite en alumine avec ses boues rouges, enfin le procédé HALL-HEROULT d'électrolyse de l'alumine avec sa consommation d'électricité et ses émissions de gaz à effet de serre, dioxyde de

carbone, CO₂, et composés fluorés. Depuis son apparition, l'industrie de l'aluminium conduit en permanence des programmes de recherche et développement sur ces deux procédés de la métallurgie extractive. Lorsque les améliorations régulières des gains de matière et d'énergie ont amené le procédé à un stade de maturité, il faut alors innover et trouver de nouveaux procédés plus économes de matières et d'énergie. C'est ce qui s'est passé historiquement dans les années 30, puis surtout dans les années 50-60, enfin dans les années 80-90.

Pour l'alumine, dans les années 50-60, il s'agissait d'utiliser des bauxites sans limitation de la teneur en silice, SiO₂. Il fallait écarter le risque d'envolée des prix en raison de la diminution des réserves à basse teneur en silice et garantir la sécurité d'approvisionnement en raison des risques politiques représentés par certains pays producteurs. On était alors en pleine "guerre froide". Puis de nouveaux gisements de bauxite à faible teneur en silice ont été découverts et sont entrés en exploitation dans des pays sûrs. L'approvisionnement était assuré, les prix étaient contenus. Ces menaces disparues, les procédés mis au point pour traiter les bauxites contenant de la silice, ainsi le procédé H⁺ de PECHINEY, ne furent jamais industrialisés.

Pour l'aluminium, dans les mêmes années 50-60, c'était la recherche de nouveaux procédés de production avec pour objectif de réduire drastiquement la consommation d'énergie. On partait d'un autre composé intermédiaire que l'alumine, ce qui répondait aussi à l'objectif des programmes bauxite ci-dessus. Certains d'entre eux ont alors été développés jusqu'au stade du pilote industriel capable de produire plus de 10.000 t/an. Ce sont les contributions des "majors" d'alors de l'industrie de l'aluminium, ALCAN, ALCOA, ALUSUISSE, KAISER, REYNOLDS et PECHINEY et on doit citer :

ALCAN avec un procédé fondé sur la chimie des chlorures d'aluminium^(103,104).

ALCOA avec un procédé fondé sur la chimie des chlorures d'aluminium et l'électrolyse du trichlorure d'aluminium, AlCl₃. C'est dans le cadre de ce programme qu'a été proposé l'emploi d'une anode non consommable. Cette innovation sera reprise ultérieurement^(105,106).

PECHINEY avec un procédé fondé sur l'électro-carbothermie via le carbure d'aluminium⁽⁹⁶⁾.

Tous ces procédés ont été abandonnés dans les années 1970 car, dans le même temps où ils étaient développés, le procédé HALL-HEROULT accomplissait des progrès formidables :

- l'augmentation de la capacité unitaire de la cellule d'électrolyse : l'intensité passait de 30.000 A à 300.000 A avec pour corollaire l'augmentation des

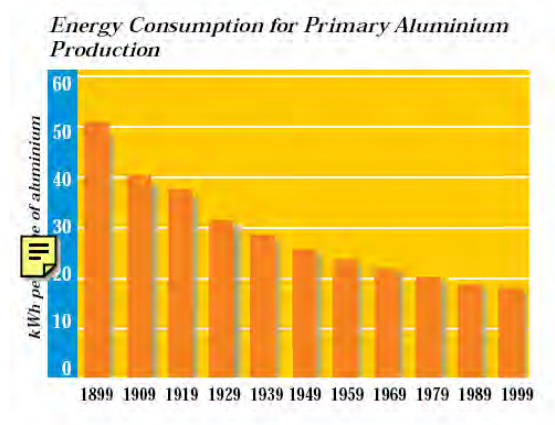
capacités des usines, elles aussi décuplées, passant de 30.000 t/an à 300.000 t/an,

- des gains de productivité grâce à l'automatisation et à la mécanisation associés à l'augmentation de la capacité unitaire,
- la diminution spectaculaire des atteintes environnementales occasionnées par les produits fluorés (contrôle de l'effet d'anode, captation des gaz d'électrolyse, récupération des composés fluorés ensuite réutilisés dans l'électrolyse).

La consommation spécifique d'énergie d'électrolyse diminuait en moyenne et aujourd'hui on l'estime à environ 14.500 kWh/t. Elle devrait encore baisser avec la modernisation du parc des cellules d'électrolyse et probablement atteindre à terme une moyenne de 13.000 kWh/t. Une partie de ces gains énergétiques est cependant absorbée par les nouvelles consommations d'énergie apparues avec le traitement des gaz d'électrolyse.

Ces progrès remarquables sont le fruit d'efforts permanents de maîtrise des champs magnétiques, - ceux-ci favorisent la ré-oxydation de l'aluminium -, des matériaux carbonés de cathode et d'anode et aussi des pertes thermiques. On vient juste de retrouver, au niveau d'une série entière, soit plus d'une centaine de cellules, les valeurs minimales enregistrées dans les années 60, 12.500 kWh/t⁽⁷⁷⁾. Depuis les années 80-90, c'est la recherche de nouveaux procédés de production de l'aluminium avec l'objectif de réduire la production de CO₂, critique alors la plus importante formulée par les mouvements écologistes (les boues rouges du procédé BAYER ont elles apparemment été oubliées). Fondés sur l'emploi d'anodes non consommables, une technologie de matériaux, ils ont donné lieu à des prototypes industriels sans cependant franchir le cap de l'industrialisation.

Figure 2.2 : évolution historique de la consommation d'énergie de la métallurgie extractive de l'aluminium à partir du minerai (procédés BAYER et HALL-HEROULT) (IAI, the aluminium industry's sustainable development report)⁽⁶¹⁾



Un dernier et récent programme ambitieux, le procédé MOLTECH⁽⁷⁸⁾, fondé sur l'électrolyse du trichlorure d'aluminium avec une anode non consommable, a rencontré un soutien poli et critique de l'industrie de l'aluminium et devra attendre de meilleurs jours pour faire l'objet d'un prototype industriel. Aucun changement d'importance ne doit être attendu et on sent très bien qu'à l'exception du procédé MOLTECH les programmes d'après 1990 ont été engagés sans beaucoup de conviction ou en tous cas d'espoir d'aboutir.

Très récemment, une métallurgie extractive intégrée a été proposée. Elle réunit sur un même site la production d'alumine, la production d'électricité par la technologie de la pile à combustible et l'électrolyse avec anode non consommable. Cette réunion, bénéficiant des dernières technologies permet de plus la valorisation des énergies secondaires : l'alumine est introduite à 900 °C dans l'électrolyseur qui est chauffé par les gaz sortant de la pile à combustible. C'est un brevet^(79,80) et aucune communication technique n'a suivi ce qui n'aura été qu'une réflexion sur le papier.

La métallurgie extractive de l'aluminium reste donc très pénalisée par la consommation d'énergie et la production de gaz à effets de serre, CO₂ et fluoro-carbones, CF₄ et C₂F₆, du procédé HALL-HEROULT et la production des boues rouges du procédé BAYER. Comme nous le développerons plus loin, c'est seulement le développement du recyclage qui pourra introduire les changements d'importance attendus. A production égale d'aluminium, plus de recyclage réduira globalement la consommation de bauxite, la production de CO₂ et de fluoro-carbones dont les quantités émises restent toujours insupportables malgré les réductions faites, la consommation d'énergie, etc.

Dans les paragraphes suivants, nous procèderons à un rappel succinct des performances des procédés BAYER et HALL-HEROULT et de leur importance industrielle.

Pour compléter les résumés suivants décrivant la métallurgie extractive de l'aluminium, on se reportera à l'abondante littérature citée dans la bibliographie.

2.2. Du minerai, la bauxite, à l'alumine : le procédé BAYER aujourd'hui

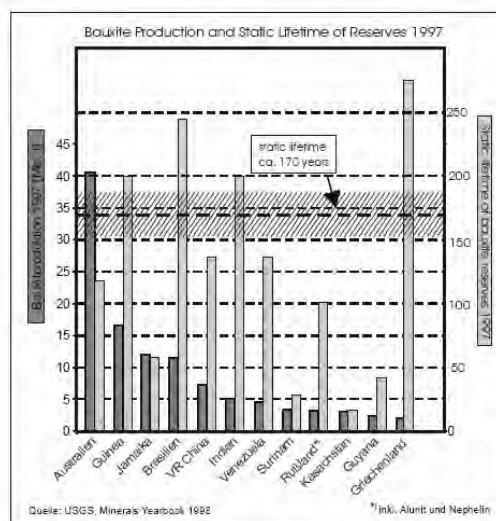
2.2.1. Composition du minerai, la bauxite

L'aluminium, troisième élément le plus abondant de l'écorce terrestre avec 8%, se trouve à l'état combiné, généralement oxydé. Le minerai présentant la plus forte teneur en alumine, Al₂O₃, entre 40 et 60%, est la bauxite, une alumine hydratée. La composition d'une bauxite est typiquement : Al₂O₃, 55%, SiO₂, 3%, Fe₂O₃, 9%, TiO₂, 3%, pertes au feu (humidité et matières organiques), 24%.

La teneur en oxyde ferrique, Fe_2O_3 , est la plus variable, entre 1 et 25%. La silice, SiO_2 , est sous deux formes, l'une pure et inerte, du sable, l'autre combinée et réactive, des silicates dont la teneur est critique car elle entraîne des pertes matières d'alumine et de soude, NaOH .

2.2.2. Réserves mondiales utiles de bauxite

Figure 2.3 : Réserves et production mondiales de bauxite en 1997⁽⁵⁰⁾



90% de la bauxite et de l'alumine sont utilisés pour la fabrication de l'aluminium. Pour 10%, ce sont des applications dans les réfractaires, les abrasifs, les ciments et les laitiers métallurgiques.

Les réserves utiles de bauxite sont calculées en appliquant une teneur maximale en silice de 7%. En 1953, elles étaient de 1,5 milliard de tonnes métriques d'après le United States Bureau of Mines, USBM. En 1993, le même USBM évalue la consommation mondiale annuelle de bauxite à 106 millions de tonnes avec un contenu en aluminium métal de 19% correspondant à environ 20 millions de tonnes d'aluminium.

Les réserves utiles seraient comprises entre 150 ans au rythme actuel de consommation (d'après les données de 1953 du USBM) et 300 ans (d'après l'International Aluminium Institute, IAI, qui évalue les réserves utiles à 36 milliards de tonnes d'aluminium).

2.2.3. Procédé BAYER d'extraction de l'alumine de la bauxite^(51,52).

C'est une mise en solution sélective de l'alumine par une solution aqueuse de soude, à une température d'environ 250° C et sous une pression de 35 à 40 bars. Les autres oxydes dont les silicates précités sont insolubles et forment les boues rouges, coloration conférée par l'oxyde ferrique. L'hydroxyde d'aluminium est ensuite extrait

de la solution par décomposition, puis cristallisation sélective et décantation. Enfin, par calcination à environ 1300° C on obtient l'alumine anhydre.

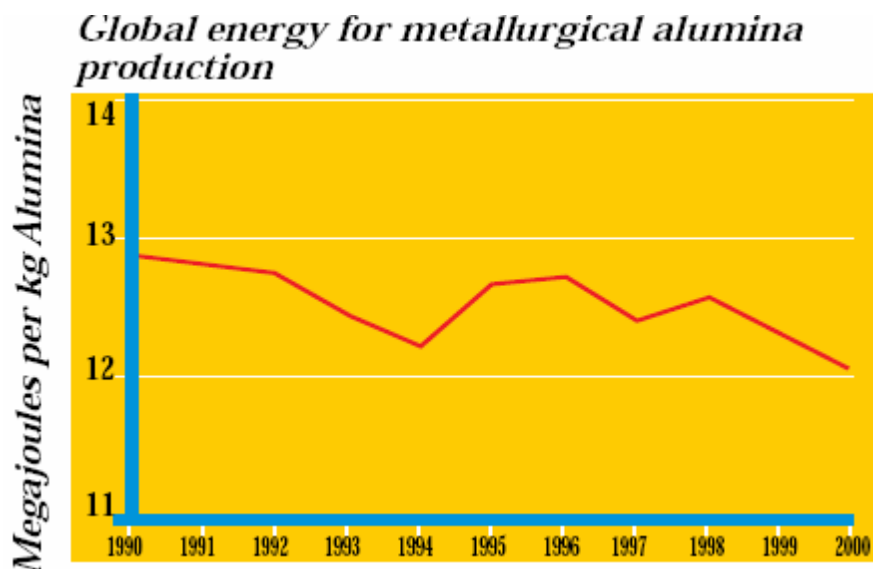
Ce procédé a atteint sa maturité. On considère encore aujourd'hui antiéconomique de traiter une bauxite contenant plus de 7% de SiO₂ réactive.

La transformation de la bauxite en alumine est faite à côté de la mine ou, le plus souvent, dans des sites portuaires, en raison des contraintes économiques liées au transport. Transporter la bauxite, c'est transporter presque autant de stérile que d'alumine. Comme la transformation de l'alumine en aluminium se fait dans une zone électro-intensive, coïncidant rarement avec un gisement de bauxite, c'est généralement un site portuaire apte à recevoir l'alumine.

2.2.3.1. Energie :

La consommation d'énergie globale est de 12-13 GJ/t d'alumine, dont environ 8 GJ/t pour le procédé BAYER proprement dit et environ 4 GJ/t pour la calcination de l'hydroxyde en oxyde d'aluminium.

Figure 2.4 : Evolution historique de la consommation globale d'énergie de la fabrication de l'alumine (IAI, the aluminium industry's sustainable development report) ⁽⁶¹⁾



2.2.3.2. Environnement

La première atteinte environnementale intervient dès l'extraction minière. Les mines de bauxite sont à ciel ouvert et la couche de bauxite est recouverte de terre et

d'autres matières minérales. Ce sont les stériles et on en produit en moyenne 0,5 t/t de bauxite. Le remède est simple et à la charge du mineur : réhabiliter le terrain.

L'autre atteinte environnementale, c'est le procédé BAYER par ses déchets finaux, les « boues rouges ». Celles-ci sont constituées par tous les composés minéraux autres que l'alumine et présents dans la bauxite. Ce sont principalement de l'oxyde ferrique, Fe_2O_3 , environ 50%, - c'est lui qui confère la coloration rouge -, de la silice, SiO_2 , et, en quantités bien moindres, des entraînements des produits chimiques de traitement, de la soude, NaOH , environ 0,2 t, et de la chaux, CaO , environ 0,1 t toujours par tonne d'alumine. Ces dernières pertes, ainsi que celles d'alumine, sont imputables à la silice réactive, entre 0,9 et 2,3 kg de soude et entre 1 et 2 kg d'alumine par kg de silice réactive.

Les boues rouges représentent environ 2,5 t de matières sèches et 5 t de boues à 50% de matières sèches par t d'alumine. La production mondiale de boues rouges à 50% de matières sèches est d'environ 400 Mt/an dont la moitié au moins va en décharge. La recherche de valorisations des boues rouges n'a jamais abouti pour des raisons économiques.

Tableau 2.1 : Capacités de production de bauxite et d'alumine suivant les qualités, métallurgiques et non métallurgiques (source : trade journals) ⁽⁵²⁾

Année capacités de production (milliers de tonnes)	1998	1999	2000	2003
Bauxite dans le monde				
metallurgical grade, MG	127.570	128.770	140.270	146.170
non metallurgical grade, NMG	4.564	4.564	4.564	4.564
Alumine dans le monde				
metallurgical grade, MG	49.181	49.881	52.921	56.493
non metallurgical grade, NMG	3.285	3.281	3.285	3.295
Alumine dans les pays industrialisés				
metallurgical grade, MG	19.136	19.436	20.676	23.848
non metallurgical grade, NMG	695	695	695	695

Figure 2.5 : Evolution historique des productions mondiales de bauxite et d'aluminium à partir de la bauxite⁽⁵⁰⁾

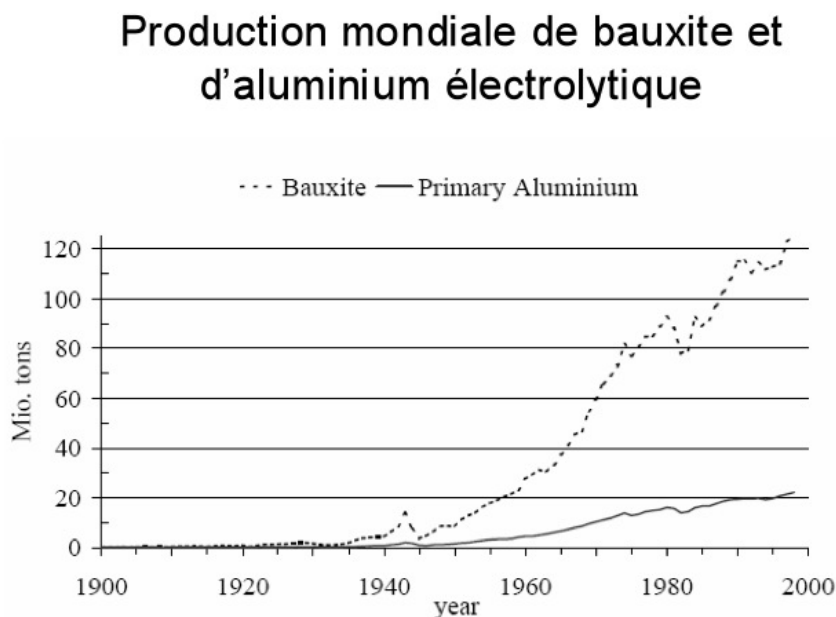
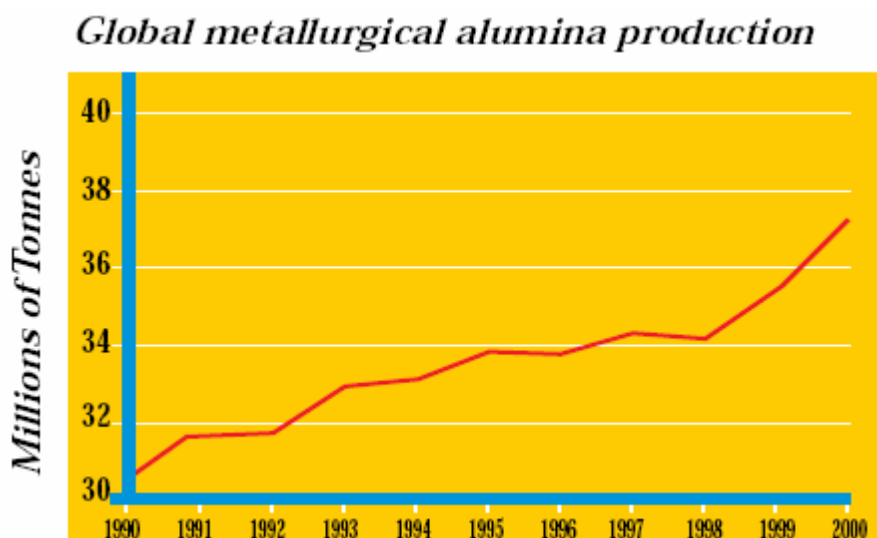


Figure 2.6 : Evolution historique de la production mondiale d'alumine (IAI, the aluminium industry's sustainable development report)⁽⁶¹⁾

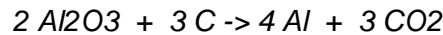


2.3. De l'alumine à l'aluminium : le procédé HALL-HEROULT aujourd'hui

L'aluminium est extrait de l'alumine par électrolyse, le procédé HALL-HEROULT, du nom des inventeurs presque simultanés en 1886, puisque les demandes de brevet ont été déposées par HALL aux U.S.A le 9 Juillet et HEROULT en France le 23 Avril.

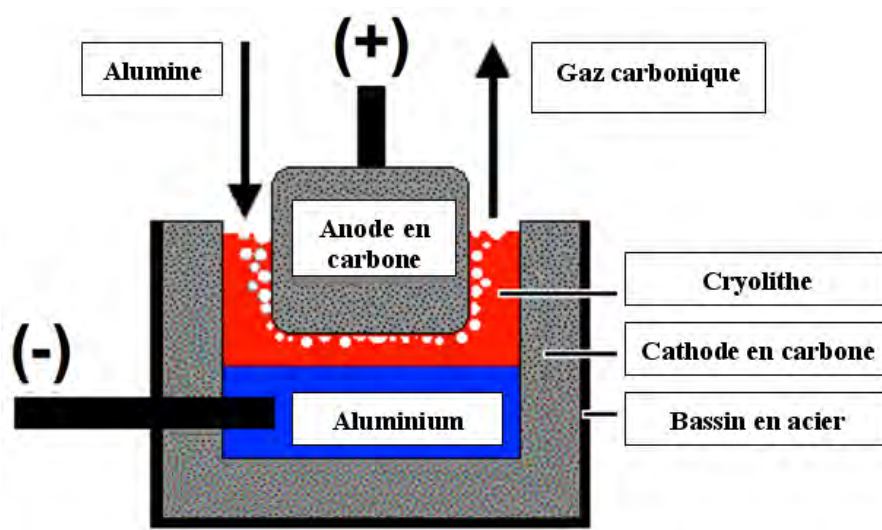
L'alumine est dissoute à raison de quelques pourcents dans un mélange de fluorures minéraux, principalement d'aluminium et de sodium, la cryolithe, et décomposée par électrolyse à environ 960° C. L'électrolyseur, la cuve d'électrolyse, est un

parallélépipède dont la face inférieure en carbone est la cathode et la face supérieure, aussi en carbone, est l'anode. L'aluminium se dépose sur la cathode et il est extrait à intervalles réguliers par aspiration. L'oxygène, apparu à l'anode, se combine avec le carbone pour former du dioxyde de carbone, CO₂ suivant la réaction globale :



et il faut 2 tonnes d'alumine par tonne d'aluminium, soit environ 25% du coût de production de l'aluminium.

Figure 2.7 : Schéma d'une cellule d'électrolyse de l'aluminium (source C. Gentaz)



L'aluminium obtenu est pur, - la qualité standard A7 contient plus de 99,7% d'aluminium -, les impuretés principales étant le fer et le silicium présents dans l'alumine (le fer vient aussi de l'amenée de courant à l'anode, une barre en fer, lorsque la consommation du carbone de l'anode n'est pas maîtrisée).

C'est sous forme alliée que l'aluminium est surtout utilisé. L'introduction des éléments d'alliages est faite dans la fonderie dite d'électrolyse (pour la distinguer de la fonderie de pièces moulées), immédiatement en aval des installations électrolytiques. Après la mise au titre, le métal est coulé et solidifié soit en lingot, soit en semi-produits, billette, brame, plateau, barre, qui seront ensuite transformés à froid. Ce procédé a aussi atteint sa maturité ;

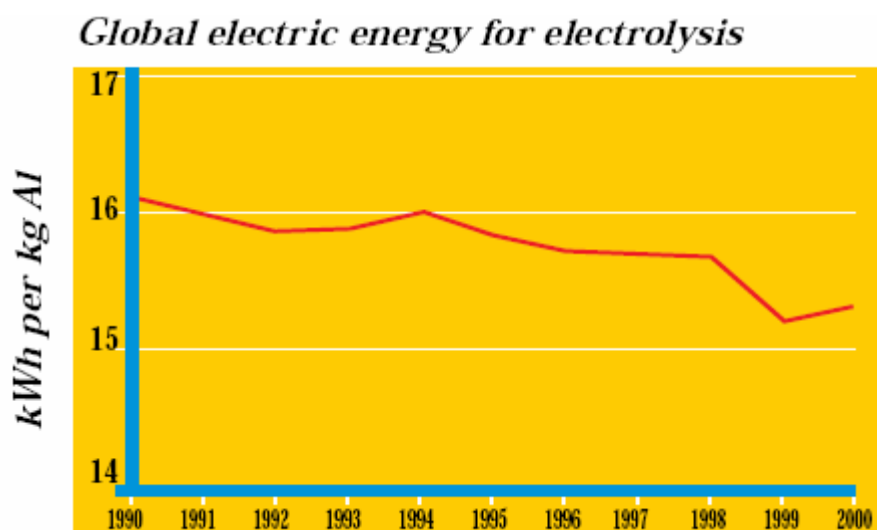
2.3.1. Consommation d'énergie

En 2000, la consommation d'énergie électrique de l'électrolyse par tonne d'aluminium est en moyenne d'environ 14.500 kWh mais avec une fourchette importante comprise entre 13.000 et 19.000 kWh.

La source d'électricité est d'origine hydraulique pour environ 55% en moyenne mondiale. Les autres sources d'énergie sont non renouvelables, d'abord le charbon, puis le gaz et, très rarement l'atome. Les chocs pétroliers successifs ont conduit, dans les années 1980, à abandonner la production thermique d'électricité à partir du fuel, trop cher, au profit du charbon. L'énergie, à égalité avec l'alumine, représente typiquement environ 25% du coût de production de l'aluminium.

Figure 2.8 : Evolution historique de la consommation d'électricité du procédé HALL-HEROULT (IAI, the aluminium industry's sustainable development report)

(61



2.3.2 Consommation d'anode

Pour l'anode de type préculée (l'autre type, dit Söderberg, est en cours d'abandon, car les électrolyseurs équipés de ce type d'anode maîtrisent moins bien l'émission de fluor et de composés fluorés), on reporte une valeur moyenne de 460 kg/t d'aluminium. Sa fabrication requiert environ 34 MJ/t d'anode (dont environ 30 MJ pour la cuisson).

2.3.3. Environnement

Les principales atteintes environnementales sont les émissions gazeuses à l'anode, du fluor, des composés fluorés et du dioxyde de carbone, CO₂, tous gaz à effet de serre. La quantité de dioxyde de carbone est fixée par la réaction globale et va donc dépendre de son rendement massique. Elle est aujourd'hui comprise entre 1,7 et 1,9 t/t d'aluminium. A terme, on pourrait espérer au mieux 1,5 à 1,6 t/t d'aluminium. Seule, une nouvelle technologie telle l'anode non consommable pourrait permettre de supprimer cette émission.

Les émissions de fluor et de composés fluorés sont surtout liées à l'effet d'anode. De façon simplifiée, lorsque la teneur en alumine du bain d'électrolyse devient trop faible,

c'est le trifluorure d'aluminium qui est décomposé par l'électrolyse. A l'anode, au lieu d'oxygène, c'est le fluor qui se forme et se combine au carbone pour donner des polyfluorocarbones, PFC, principalement du tétrafluorocarbone, CF_4 , ainsi que, en quantités beaucoup plus faibles, de l'hexafluorocarbone, C_2F_6 . Tous ces gaz, isolants électriquement, enveloppent le bloc anodique, siège de l'effet d'anode, et l'électrolyse est localement interrompue. La tension aux bornes de la cellule augmente jusqu'à ce qu'éclate un arc électrique dont l'effet est alors d'augmenter considérablement la température locale du bain d'électrolyse. On a alors volatilisation des composés fluorés du bain, principalement le trifluorure d'aluminium, AlF_3 , et le fluorure de sodium, NaF . Les émissions gazeuses sont donc un mélange de composés fluorés, fluorure de sodium, trifluorure d'aluminium, polyfluorocarbones et de fluor.

Pour réduire ces émissions, on a d'abord recherché une meilleure maîtrise de la fréquence et de la durée de l'effet d'anode. Ensuite on a capoté les cellules d'électrolyse ce qui a permis de capter les gaz. Enfin on a traité les gaz au contact d'un lit d'alumine qui fixe les composés fluorés et on renvoie le mélange alumine-composés fluorés dans la cellule d'électrolyse.

Figure 2.9 : évolution historique des émissions globales de polyfluoroarbones, PFC (IAI, the aluminium industry's sustainable development report)⁽⁶¹⁾

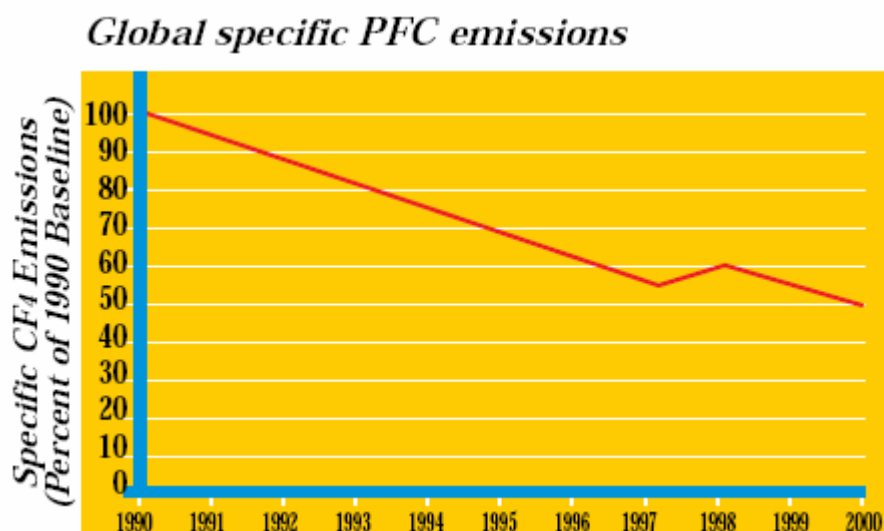
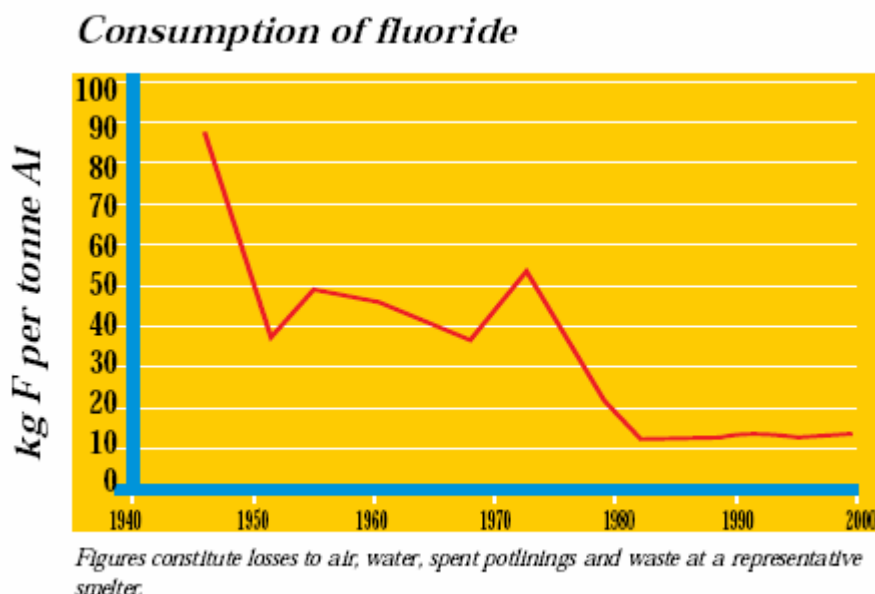


Figure 2.10 : Evolution historique de la consommation de fluor du procédé HALL-HEROULT (IAI, the aluminium industry's sustainable development report)

(61)



Aujourd'hui ces émissions ont été spectaculairement réduites, de 10 fois par rapport au standard d'il y a 30 ans, et de 40 fois par rapport à celui d'il y a 50 ans. Aujourd'hui, on arrête plus de 98% du fluor émis, mais ce sont encore entre 0,4 et 0,8 kg de fluor par tonne d'aluminium qui vont dans l'atmosphère. Malgré ces progrès incontestables, l'impact sur l'effet de serre reste toujours inadmissible. En effet, les fluorocarbones ont des taux de forçage radiatif instantanés beaucoup plus élevés que ceux du dioxyde de carbone. D'après la littérature, 1 kilogramme de CF₄, a la même action que 6,5 tonnes de CO₂ et 1 kilogramme de C₂F₆ que 9,5 tonnes de CO₂. Selon une autre source, l'équivalence serait de 9,1 tonnes de CO₂ par kilogramme de CF₄. La contribution des émissions de composés fluorocarbonés à l'effet de serre est aujourd'hui comprise entre 2,6 et 5,2 t d'équivalent CO₂ /t d'aluminium.

C'est beaucoup plus que les émissions de CO₂, correspondant à la consommation et à la fabrication de l'anode. Celles-ci sont restées inchangées et sont comprises entre 1,7 et 1,9 t/t d'aluminium. Au total, hors énergie, la métallurgie extractive de l'aluminium produit entre 4,3 et 7,1 tonnes de gaz à effet de serre exprimés en équivalent CO₂ par tonne d'aluminium.

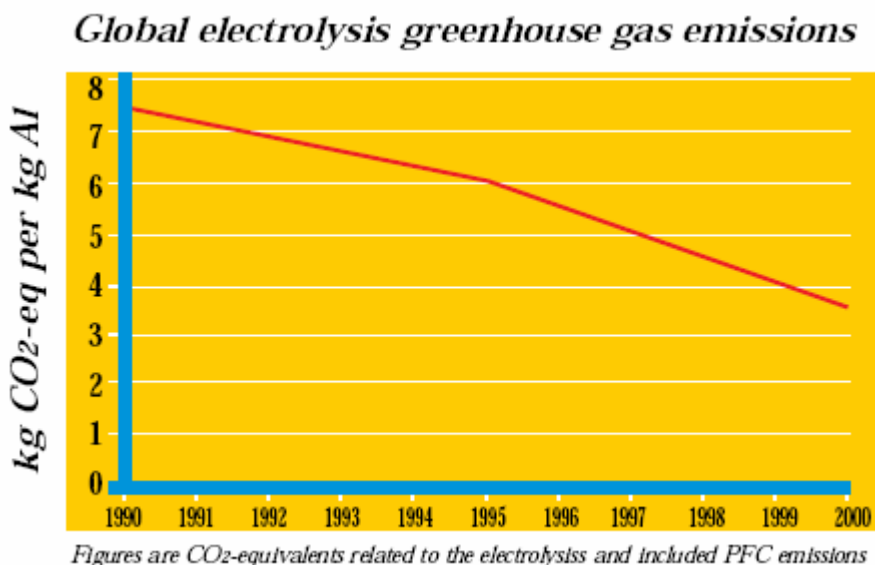
L'annonce très récente d'une quatrième génération d'électrolyseur, avec suppression de l'effet d'anode, laisse espérer la réduction spectaculaire tant attendue. L'émission

Figure 2.11 : Les émissions de fluor suivant la technologie d'électrolyse (IAI, the aluminium industry's sustainable development report) ⁽⁶¹⁾

DEVELOPMENT IN FLUORIDE EMISSIONS FROM ALUMINIUM SMELTERS KILOGRAM FLUORIDES (GAS AND PARTICULATE) PER TONNE OF ALUMINIUM PRODUCED		
1st Generation Plants	1940 - 1955	12 -15 kg per tonne
2nd Generation Plants	1955 - 1975	2 - 6 kg per tonne
3rd Generation Plants	1975 - today	0.5 - 1 kg per tonne

totale de gaz à effet de serre est ramenée entre 1,75 et 2,15t d'équivalent CO₂ /t d'aluminium, correspondant à une contribution de seulement 0,25 à 0,35 t pour les composés fluorocarbonés. L'empreinte environnementale de l'aluminium sera alors ramenée à des valeurs supportables, sa réduction se faisant au fur et à mesure de l'introduction de cette quatrième génération d'électrolyseur

Figure 2.12 : Evolution historique des émissions globales de gaz à effet de serre par le procédé électrolytique (IAI, the aluminium industry's sustainable development report) ⁽⁶¹⁾



2.3.4. Production

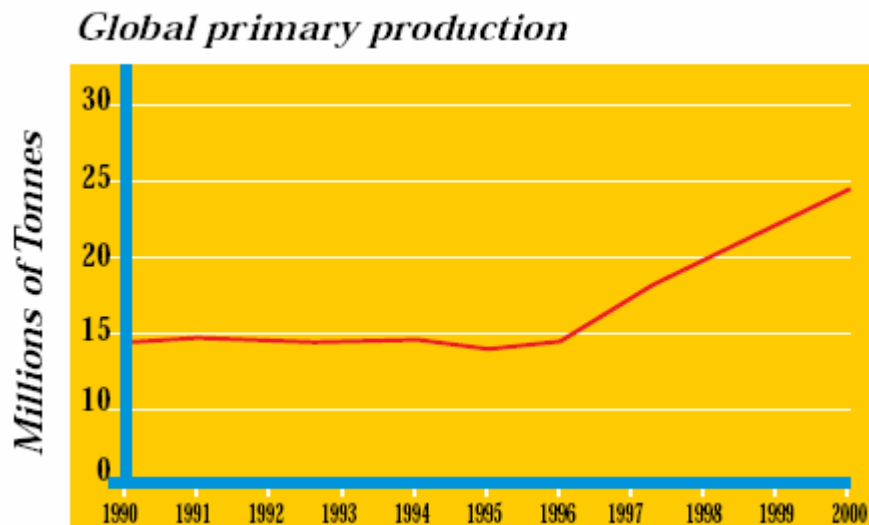
La production mondiale d'aluminium d'électrolyse est la suivante en 2002 et 2003 alors qu'en 2001 elle avait été d'environ 24 millions de tonnes (et 8 millions de tonnes avaient été alors produites par recyclage)

Tableau 2.2 : Production mondiale d'aluminium d'électrolyse (milliers de tonnes) en 2002 et 2003⁽⁵³⁾

Pays	production		capacité de production		taux d'utilisation	
	2002	2003	2002	2003	2002	2003
U.S.A.	2.707	2.700	4.120	4.120	65,7	65,5
Australie	1.836	1.850	1.820	1.850	100	100
Brésil	1.318	1.390	1.330	1.400	99,1	99,3
Canada	2.709	2.800	2.730	2.800	99,2	100
Chine	4.300	5.200	5.300	6.500	81,1	80,0
France	450	430	480	440	93,8	97,7
Norvège	1.096	1.150	1.150	1.180	100	97,5
Russie	3.347	3.400	3.350	3.400	100	100
Afrique du Sud	676	690	690	690	98,0	100
Venezuela	570	580	640	640	89,1	90,6
Autres	6.910	7.150	7.830	8.110	88,2	88,2
Monde	25.900	27.300	29.300	31.100	88,9	87,8
Monde hors U.S.A.	23.193	24.600	25.180	26.980	92,1	91,2

On notera l'absence du Japon qui, dans les années 80, a décidé d'abandonner la production de l'aluminium par électrolyse et n'est plus producteur depuis 1990.

Figure 2.13 : Evolution historique récente (1990-2000) de la production d'aluminium électrolytique (IAI, the aluminium industry's sustainable development report) ⁽⁶¹⁾



2.4. Principales caractéristiques de la métallurgie extractive de l'aluminium aujourd'hui

Nous avons résumé dans le tableau ci-après les principales caractéristiques des procédés de la métallurgie extractive de l'aluminium à partir du minerai, la bauxite.

Tableau 2.3 : Consommations d'énergie et de matières premières, quantités émises de polluants, montant de l'investissement, de la métallurgie extractive à partir du minerai (par tonne d'aluminium liquide et pour une capacité d'électrolyse de 300.000 t/an) (source C. Gentaz)

Item par tonne d'aluminium	métallurgie extractive (BAYER et HALL-HEROULT)
énergie totale dont :	175 GJ - 220 GJ
extraction minière de la bauxite	3 GJ - 5 GJ
procédé BAYER (alumine)	22 GJ - 30 GJ
procédé HALL-HEROULT (aluminium)	150 GJ - 185 GJ
matières premières principales dont :	
bauxite	4,0 - 5,0 t
alumine	1,9 t
produits carbonés, surtout coke de pétrole (anode, 0,43 t, cathode, 0,018 t)	0,50 - 0,55 t
soude à 50%	0,2 - 0,4 t
calcaire pour chaux	0,1 - 0,2 t
trifluorure d'aluminium, AlF ₃ (exprimé en fluor), hors recyclage (3 - 3,5 kg avec recyclage)	15 - 25 kg (7,5 – 12,5 kg)
émissions polluantes dont :	
stériles, déblais miniers	1 t – 3 t
boues rouges BAYER (base sec)	1 t – 3 t
CO ₂ (centrale thermique exclue)*	1,7 - 1,9 t
tétrafluorocarbène, CF ₄ (exprimé en fluor)	0,4 – 0,8 kg (0,3 – 0,6 kg)
CO ₂ (inclus équivalence CF ₄ mais centrale thermique exclue)	4,3 - 7,1 t
montant total de l'investissement dont :	10.000 US\$
mine	1.000 US\$
usine BAYER	2.500 US\$
usine HALL-HEROULT	4.500 US\$
centrale électrique	2.000 US\$

Enfin, on constate que les valeurs de consommation d'énergie des fabrications de l'alumine et de l'aluminium sont peu différentes de celles reportées en 1977, dans la CEE.

Tableau 2.4 : Consommation d'énergie dans la CEE en 1977⁽⁵³⁾

énergie	électrique		thermique		totale	
Procédé	kWh/t	GJ/t	th/t	GJ/t	th/T	GJ/t
BAYER (alumine)	327	3,3	6.156	25,7	6.940	29,0
HALL-HEROULT (aluminium électrolytique ⁹)	16.966	169,7	5.793	24,2	46.400	193,9
Filage	972	9,7	1.100	4,6	3.420	14,3
Laminage	630	6,3	1.090	4,6	2.600	10,9

2.5. Bibliographie

LA BAUXITE ET L'ALUMINE

(50) Hausberg J. and al. Resource-oriented assessment of bauxite quality-effects on alumina production. 12th International Symposium of ICSOBA (travaux du Comité international pour l'étude des bauxites et de l'alumine, ICSOBA). Vol 26, n°30, 1999

(51) Red mud recycling. Metal Bulletin Monthly, June 1995

(52) A country case study prepared by the UNCTAD secretariat. Environmental aspects of bauxite and aluminium production in Indonesia. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), Committee on Commodities, Ad Hoc review meeting on bauxite, Geneva, 4 March 1994

(53) Mazodier J-L. Compétitivité fonte-aluminium dans l'automobile, cas du bloc moteur. Hommes et Fonderie, 27-35, Octobre 1981

(54) Adamson A. N., Bloore E. J. and Carr A. R. Basic principles of BAYER process design. Proceedings of International Symposium on the extractive metallurgy of aluminium, New-York, USA, 23-58, February 1962,

(55) Pearson T. G. The chemical background of the aluminium industry. The Royal Institute of Chemistry, London, U-K, 1955

L'ALUMINIUM

Références générales

(56) Exposition « l'âge de l'aluminium », Cité des Sciences et de l'Industrie de Paris, octobre 2003

(57) International Aluminium Institute, statistiques

(58) U.S. Geological Survey (site www.usgs.gov)

(59) Lagioia G., Amicarelli V, and De Marco O. The material basis of the italian aluminium industry - preliminary results. Workshop « Quo Vadis MFA », Wuppertal, Germany, 9-10 October 2003

(60) The Aluminium Federation, Alfred. Sustainable development report. 2002 (www.alfed.org.uk)

- (61) International Aluminium Institute. The aluminium industry's sustainable development report. 2002 (www.world-aluminium.org)
- (62) Legacy for future generations. International Aluminium Institute, 2002 ([site www.world-aluminium.org](http://www.world-aluminium.org))
- (63) Schlimbach J. and al. Resource conservation by improvements of primary aluminium production. Proceedings of Light Metals, 2001
- (64) Schlimbach Jürgen, Friedrich Bernd, Krüger Joachim and Rombach Georg. Energy and emission analysis in primary aluminium production – a technical contribution to an integrated resource management. Proceedings of EMC 2001, 99-116, 2001
- (65) Recent and planned changes in production capacity for bauxite, alumina and aluminium. Note by the UNCTAD secretary, April 2000
- (66) Life cycle inventory report. International Aluminium Institute, Aluminium applications and society, paper 1, automotive, may 2000
- (67) Strieter Bob. Aluminium technology and environmental developments. The Aluminium Association, October 1999
- (68) Environmentally benign manufacturing technologies. Some materials on the United States : draft summaries of the roadmaps for U.S. industries. International Technology Research Institute, October 11, 1999
- (69) Jouvin Guy. L'aluminium : un métal jeune à l'avenir prometteur. SESSI, Ministère de l'économie et des finances, Secrétariat d'Etat à l'Industrie, France, Le « 4 pages des statistiques industrielles », n°114, juin 1999
- (70) Marstrander R. Industrial ecology ; a driving force for change and new opportunities. The Aluminium 97 conference and exhibition, Essen, Germany, 24-26 September 1997
- (71) United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), Committee on Commodities, Ad Hoc review meeting on bauxite, Geneva, May 1991 et May 1994
- (72) L'environnement. Revue interne PECHINEY : DIRECT magazine,

n°10, avril 1992

(73) Grjotheim Karl and Welch Barry. Impact of alternative processes for aluminum production on energy requirements. Journal of Metals, 26-32, September 1981

(74) Evaluation comparative des récentes méthodes d'élaboration de l'aluminium. Journal du Four Electrique, 4, 75-77, 1975

(75) Rolin M. Etude bibliographique et théorique des procédés de réduction des composés de l'aluminium. Sans date.

(76) Sources Institut Economique et Juridique de l'Energie, Université de Grenoble, France, 1969

Le procédé HALL – HEROULT

(77) Lapierre Richard. Aluminerie Alouette et efficacité énergétique. Conférence sur l'énergie et le développement durable dans l'industrie de l'aluminium, Céddi-AI 2007, Baie-Comeau, Québec, Canada, 19-21 septembre 2007

(78) de Nora Vittorio. VERONICA and TINOR 2000, new technologies for aluminium production. The Electrochemical Society Interface, 20-24, winter 2002

(79) Fuel cell aluminium production, United States patent, 6,117,302, 12 September 2000, ALCOA

(80) An aluminium revolution : a stunning new ALCOA patent would link alumina refining, power production and smelting in one efficient process. CREDIT SUISSE FIRST BOSTON, October 2, 2000

(81) Fonds TRANSTEC (1985-2005)

(82) Aslam M., Khalil K and al. Atmospheric Perfluorocarbons, Environ. Sci. Technol. 37, 4358 – 4361, 2003

(83) Schlimbach Jurgen and al. Energy and emission analysis in primary aluminium production – a technical contribution to an integrated resource management. Proceedings of European Metallurgical conference, 99-116, 2001

(84) Environmental profile report for the European Aluminium Industry,

Aluminium for future generation. European Aluminium Association, April 2000

(85) Marks von Würtemberg J. Lightweight materials for automotive applications. Iron and Steel Maker, I&SM, 11-21, August 1994

(86) Steel and aluminium energy conservation and technology competitiveness. Act of 1998, fiscal year 1993 annual report, US Department of Energy Metals Initiative Annual Report 1993

(87) Frankenfeldt R. E. Aluminium : a squanderer or a valuable material ? Adress delivered at the Aluminium Seminar, The Hague, Netherlands, on the 21st of February 1991

Articles publiés en 1986 dans des numéros spéciaux des revues françaises pour le centième anniversaire de la production industrielle de l'aluminium par électrolyse.

One hundred years of aluminium, Matériaux et Techniques, special issue N° 5-6, 1986

(88) Peria. P. L'aluminium a cent ans. 148-158

(89) Rastier E. Le développement de la technologie électrolyse Pechiney. 159-169

One hundred years of aluminium. La Technique Moderne, special issue N° 5-6, 1986

(90) Ravier E. et Laparra M. Evolution en France et dans le monde de la capacité de production d'aluminium de la société Pechiney. 15-31

(91) Dugois J-P. Les cuves d'électrolyse 280.000 ampères. 32-34

(92) Fonds PECHINEY (1964-1985)

(93) Fonds BATTELLE, dont BATTELLE Energy Program (1970-1976)

Les autres procédés

références générales

(94) les procédés carbothermiques (EFIM, Aluminio Italia, ALCOA, PECHINEY, MITSUI, etc.)

(95) Blast furnace for direct reduction of aluminium. Light Metal Age, 18-19, August 1985,

(96) sources PECHINEY (procédé électrocarbothermique ALCAR), 1964 - 1985

(97) European Patent Application. Process for carbothermic reduction of alumina. REYNOLDS METALS. Publication number : A1 0 126 810, 5 December 1984

(98) United States Patent. Carbothermic reduction with parallel heat sources. ALCOA. Patent number 4,486,229, 4 December 1984

(99) Stevenson D. T. Feasibility of an aluminum-silicon blast-arc process. 1613-1631, Light Metals, 1984

(100) Leghe Al-Si da leucite italiana. Source EFIM, 1982

(101) EFIM et Alluminio Italia. Procédé de fabrication d'alliage aluminium-silicium à partir de la leucite italienne, bimestrale di informazione EFIM, 1982/2

(102) Paolini A. L'alluminio Elettrotermico. La fonderia italiana, 5, 127-142, 1979

Les procédés partant des chlorures d'aluminium

Le procédé ALCAN

(103) Hermann E. Aluminiumgewinnung nach dem subchloridenverfahren. Aluminium-Verlag, 46, 764-771, 1970

(104) Go directly to aluminium. Chemical Week. 89-96, September 16, 1967

Le procédé ALCOA (électrolyse $AlCl_3$)

(105) Peacey J. G. and Davenport W. G. Evaluation of alternative methods of aluminum production. Journal of Metals, 25-28 July 1974

(106) Keller Rudolf. Aluminiumchlorid – elektrolyse. Neue Zurcher Zeitung, 37, 26 Février 1973

Le procédé TOTH

(107) Des chlorures métalliques à partir d'argile : annonce du projet ARMANT – TOTH Aluminium de traitement d'argile kaolinique de fabrication d'alumine de haute pureté pour les céramiques réfractaires, Informations Chimie Hebdomadaire, 27 Février 1984

(108) Grojtheim K., Krohn C. and Oye H. Aluminiumherstellung aus aluminiumchlorid – eine kritische betrachtung von TOTH und ALCOA verfahren. Aluminium-Verlag, 51, 697-699, 1975

(109) sources BATTELLE Memorial Institute, 1974-1975

(110) Harris Roy. J. Jr. Mr Toth labors hard to alter the course of world's industry. Wall Street Journal, 8 March 1974

(111) sources TOTH Aluminum Corporation, 1972-1974

(112) Aluminium. Breakthrough in embryo. Metal Bulletin Monthly, 28-30, August 1973

Chapitre 3. De l'aluminium liquide aux produits finis

3.1. Le matériau : aluminium et alliages

C'est le plus souvent un alliage, principalement avec des éléments métalliques. On a trois groupes d'éléments d'alliages : celui des éléments structurels, celui des éléments fonctionnels, les modificateurs de structure, et celui des éléments exogènes, souvent spécifiques du recyclage, en particulier à partir des vieux déchets ou déchets de consommation.

3.1.1. Les éléments structurels

Ce sont les éléments d'alliages proprement dits, se répartissant en trois familles :

A. les éléments principaux (major) : cuivre, Cu, manganèse, Mn, silicium, Si, magnésium, Mg, zinc, Zn, lithium, Li, et étain, Sn. Ce sont tous, sauf le silicium, des métaux. Les cinq premiers caractérisent les séries d'alliages d'aluminium, au nombre de 8 (repérées de 2000 à 8000) en incluant l'aluminium non allié (repéré 1000).

Ils peuvent jouer plusieurs rôles simultanément. Par exemple, le manganèse durcit, augmente les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion. Le silicium améliore la coulabilité et les propriétés mécaniques. Le cuivre durcit et le magnésium augmente la résistance à la corrosion.

Les fourchettes de composition des séries d'alliage sont reportées dans les deux tableaux ci-dessous et on notera que les concentrations des éléments principaux sont relativement faibles, avec seulement quatre éléments dépassant 5% : Cu, Si, Mg et Zn.

Tableau 3.1 : Séries d'alliages d'aluminium et éléments d'alliage^(126,127)

Série d'alliages	éléments d'alliage (nom courant)	élément principal domaine composition	autres éléments domaine composition
1000	aluminium seul	Al, plus de 99%	
2000	cuivre (duralumin)	Cu, entre 1 et 7%	
3000	manganèse	Mn, entre 0,5 et 1,5%	
4000	silicium (alpax)	Si, entre 1 et 13%	
5000	magnésium	Mg, entre 0,5 et 6%	
6000	magnésium et silicium	Mg, entre 0,4 et 1,5%, Si entre 0,3 et 1,7%	
7000	zinc	Zn, entre 1 et 9%	
8000	cuivre, manganèse, silicium, magnésium, étain, bore, zirconium	généralement moins de 1% pour chacun	les alliages avec l'étain, Sn, contiennent entre 5 et 22%.

Tableau 3.2 : Détail de la composition des alliages^(126, 127)

alliage	Série	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Cr	%Ni	%Ti	total autres
Al - X											
Al non allié	1.000	0 - 0,35	0 – 0,60	0,01- 0,35	0,01- 0,05	0,01- 0,20	0,01- 0,10	-	-	-	0,05
Al –Cu	2.000	0,1 - 1,3	0,1- 1,4	0,8- 6,8	0,05- 1,2	0,02- 1,9	0,1- 0,8	0,05- 0,2	0,1- 0,3	-	0,15
Al-Mn	3.000	0,08- 1,8	0,1- 1,0	0,05- 0,5	0,05- 1,8	0,05- 1,3	0,05- 0,5	0,05- 0,4	0 - 0,05	-	0,15
Al-Si	4.000	0,8- 13,5	0,4- 1,0	0,1- 5,0	0,03- 1,5	0,01- 2,0	0,05- 0,25	0,05- 0,25	0,15 - 1,3	-	0,15
Al-Mg	5.000	0,04- 0,5	0,05- 1,0	0,03- 0,35	0,01- 1,4	0,2 - 5,6	0,05- 1,5	0,03- 0,35	0,01 - 0,05	-	0,15
Al-Mg- Si	6.000	0,2- 1,7	0,1- 1,0	0,04- 1,2	0,03- 1,1	0,25- 1,5	0,03- 2,4	0,03- 0,35	0 – 0,2	-	0,15
Al-Zn	7.000	0,1- 0,6	0,1- 0,7	0,03- 2,6	0,02- 1,5	0,1- 3,7	0,8- 8,7	0,04- 0,35	0,05- 0,1	-	0,15
	8.000	0,1- 2,0	0,1- 2,0	0,03- 2,2	0,02- 1,0	0,05- 1,4	0,03- 1,8	0,05- 0,2	0,2 - 1,3	-	0,15

élément principal d'alliage



élément secondaire d'alliage



B. les éléments secondaires (minor) : ils complètent les effets des éléments principaux. Ce sont : titane, Ti, bore, B, sodium, Na, phosphore, P, béryllium, Be, bismuth, Bi, chrome, Cr, plomb, Pb, vanadium, V, zirconium, Zr, strontium, Sr.

C. les éléments traces : à très faibles teneurs, ce sont plutôt des éléments fonctionnels (voir ci-dessous). Ils appartiennent le plus souvent aux deux précédentes familles et peuvent être aussi d'origine extérieure, par exemple le fer, le cuivre, le

nickel et le chrome. Les plus souvent présents sont : antimoine, Sb, béryllium, Be, calcium, Ca, fer, Fe, plomb, Pb, magnésium, Mg, phosphore, P, silicium, Si, sodium, Na, strontium, Sr, zirconium, Zr.

3.1.2. Les éléments fonctionnels

En quantités très faibles, ils induisent des modifications structurelles et on parle d'affinage ou de modification. Certaines sont recherchées car elles améliorent considérablement les propriétés dues aux éléments d'alliage. Le sodium, dans les alliages aluminium-silicium à 13% de silicium, transforme la structure granulaire en structure fibreuse alors que l'antimoine conduit lui à une structure lamellaire. Par contre d'autres modifications sont subies et peuvent avoir des effets préjudiciables sur les propriétés de l'alliage. Ces éléments fonctionnels sont le plus souvent les éléments secondaires précités.

3.1.3. Les éléments exogènes

Les produits finis sont rarement en aluminium ou en alliages d'aluminium seuls. Ils sont associés à d'autres composants, organiques (vernis, papier, plastique), minéraux (verre, pigments) et métalliques. Les métaux et alliages les plus fréquemment employés en association avec l'aluminium sont le fer, le cuivre, le zinc et leurs alliages. On retrouvera tous ces composants au moment de la collecte, première opération du recyclage de tous les déchets. L'aluminium recyclé va contenir ces éléments en particulier du fer, et dans une moindre mesure du chrome et du nickel

3.2. Les semi-produits

3.2.1. Les trois familles de semi-produits : les laminés, les extrudés et les moulés.

L'aluminium liquide est d'abord solidifié en semi-produit, une ébauche de la forme du produit fini, suivant les techniques principales de la métallurgie, laminage, extrusion et moulage, cette dernière technique conduisant directement à un semi-produit très proche du produit fini qu'il deviendra par usinage.

Alors que le moulage se fait en une seule opération, - le métal liquide est coulé dans un moule où il se solidifie -, laminage et extrusion nécessitent deux opérations. La première est une transformation à chaud à partir de l'aluminium liquide et conduit à une première ébauche spécifique, billette (section circulaire) destinée à l'extrusion, brame ou plateau de laminage (section parallélépipédique) destinée au laminage. La deuxième est une transformation à froid de la première ébauche et conduit à un semi-produit prêt à être transformé en produit fini, tôle forte ou épaisse (de 12,7 à 350 mm d'épaisseur), tôle ou bande (de 0,2 à 12,7 mm d'épaisseur), feuille ou bande mince

(de 0,005 à 0,2 mm d'épaisseur), par laminage, profilé, tube, barre, fil, par extrusion. Ces deux opérations sont faites soit en semi-continu, soit en continu. Les semi-produits sont désignés par la technique de transformation et ils sont alors dits laminés, extrudés et moulés.

On notera que les autres métallurgies, celle de l'acier en particulier, désignent les semi-produits par leur forme, plat, obtenu par laminage, long, obtenu par extrusion, et moulé par moulage.

On notera enfin que la production des semi-produits d'aluminium présente deux particularités très importantes pour le recyclage. Première particularité, les températures de travail sont beaucoup plus basses que celles de l'acier et du cuivre. Comparativement à l'acier, le forgeage se fait à 400-450° C contre 1.000° C, la coulée des pièces de fonderie à 750° C contre 1.250° C, etc. Deuxième particularité, les capacités de tous les outils, surtout celles de l'extrusion, sont anormalement faibles si l'on prend pour référence la capacité standard des usines d'électrolyse. On développera ce dernier constat dans le chapitre 10.

Tableau 3.3 : Nombre d'usines et capacités moyennes de production de semi-produits laminés, extrudés et moulés en Europe (Union Européenne avec 15 membres, Europe de l'Ouest avec Union Européenne et Islande, Norvège, Suisse et Turquie et Europe, avec Europe de l'Ouest du Centre (hors ex CIS) en 2003 (source market report 2003, European Aluminium Association)

données 2003	Union Européenne		Europe de l'Ouest		Europe	
	nombre d'usines	capacité (t) moyenne de production	nombre d'usines	capacité (t) moyenne de production	nombre d'usines	capacité (t) moyenne de production
produits laminés (dont 21% de feuilles)	40	91.000	55	70.000	64	64.000
produits extrudés	239	9.400	318	7.500	333	8.100
produits moulés	1.400	2.320	2.000	2.410	n.d.	n.d.

3.2.2. Les semi-produits et les alliages

Les tableaux suivants donnent les correspondances qualitatives entre la série d'alliage et le semi-produit et entre l'application et le semi-produit.

Tableau 3.4 : Correspondance qualitative entre semi-produit et série d'alliage (source C. Gentaz)

série d'alliage semi-produit	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000
		Cu	Mn	Si	Mg	Mg, Si	Zn	divers
plat (laminé)	X	X	X	x	X	X	X	
long (extrudé)	X	X			x	X	X	X
moulé		X		X	X		X	

X pour usage principal, x pour usage secondaire

Tableau 3.5 : Correspondance quantitative (part de marché) entre semi-produit et application (estimation en Europe de l'Ouest en 2003 ; source market report 2003, European Aluminium Association)

semi-produit application	plat (laminé) (%)	long (extrudé) (%)	moulé (%)
transport	23	21	75
emballage (rigide)	31	0	0
électrique, mécanique	18	19	12
construction	21	48	7
autres	7	12	6
total	100	100	100

En 2000, on avait la répartition pondérale suivante entre les différents semi-produits :

Tableau 3.6 : Répartition en pourcentage entre les différents semi-produits dans différentes zones (monde de l'ouest en 2000, Europe en 2003, France en 1998)

semi-produit	tôles et tous produits plats	profilés, fils, et tous produits longs	tous produits moulés et autres divers	Total
Monde de l'ouest, 2000	41,5%	30,9%	27,6%	100%
	57,3%	42,7%		100%
Europe, 2003 (8,444 Mt)	38,3%	29,9%	31,8%	100%
	56,1%	43,9%		100%
France, 1998 (1,013 Mt)	45,3%	27,8%	26,9%	100%
	62%	38%		100%

La répartition 60% de semi-produits laminés / 40% de semi-produits extrudés se rencontre dans d'autres métallurgies, en particulier le fer. La tendance historique générale à l'augmentation de la part des semi-produits laminés est aussi vérifiée pour l'aluminium : les quantités de semi-produits laminés augmentent entre 2,5 et 3,0%/an et celles des semi-produits extrudés seulement entre 1,0 et 1,5%/an.

3.2.3. Les produits moulés ou produits de fonderie

Les produits moulés sont des semi-produits ayant la particularité d'être des ébauches très proches des produits finis qu'un parachèvement simple (usinage) suffit pour obtenir. C'est le marché principal de la branche affinage (fusion des déchets commerciaux, neufs de transformation, tournures, meulures, crasses et vieux, surtout mélangés) de l'industrie du recyclage. La production mondiale est d'environ 10 millions de tonnes/an, dont environ 7 millions de tonnes représentent le marché de l'affinage. L'autre grand marché de l'affinage est celui des produits de désoxydation de l'acier. La sidérurgie utilise en effet de l'aluminium pour terminer la désoxydation de l'acier et on en consomme mondialement environ 0,5 million de tonnes/an avec des exigences de qualité moins strictes, - évidemment pas de contrainte sur la teneur en fer -, le plus souvent sous forme de lingotins.

Les affineurs fournissent à l'industrie de la fonderie de l'aluminium, le plus souvent un alliage de la série 4.000, de qualité convenue, livré sous forme soit de lingot, soit d'aluminium liquide transporté par camion en poche isotherme jusque sur plusieurs centaines de kilomètres. C'est le constituant principal de la charge métallique avec

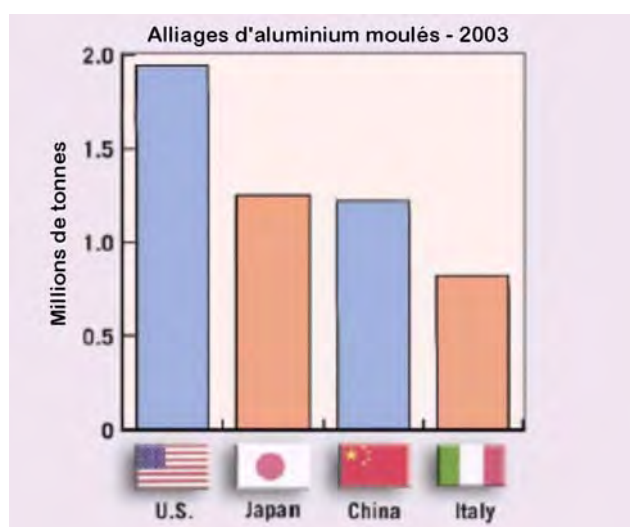
les déchets neufs, internes, de la fonderie (les retours) éventuellement complétés par de l'aluminium d'électrolyse en lingot.

La fabrication des pièces fait appel à différentes techniques, le plus souvent spécifiques de l'aluminium, en raison de la température de mise en œuvre, autour de 750° C. Ce sont la coulée en moule métallique sous pression (die cast, 75% de la production de pièces), seule technique acceptant de l'aluminium contenant plus de 1% de fer, la coulée en moule métallique par gravité (permanent mold, 15%) et la coulée en sable par gravité (sand, 10%). Les pièces les plus courantes sont pour celles coulées sous pression des blocs moteur, des carters de boîte de vitesse, des pompes à eau, et pour celles coulées par gravité des culasses, des roues.

Tableau 3.7 : Applications des alliages de fonderie⁽¹¹³⁾

application	part du marché mondial en 2002 (%)
transport	75
construction mécanique	6
électricité	8
construction	5
appareils domestiques	6

Figure 3.1 : Productions d'aluminium moulé des 4 premiers pays⁽¹¹³⁾



Les marchés des produits de fonderie, environ 10 millions de tonnes dans le monde, sont reportés dans le tableau ci-après :

**Tableau 3.8 : 38ème recensement (2003) de la production mondiale de fonderie
(tonnes métriques)⁽¹¹³⁾**

Pays	Fonte grise	Fonte GS	Fonte malléable	Acier	Alliages cuivreux	Aluminium	Magnésium	Zinc	autres non ferreux	TOTAL
Autriche	48,427	113,660	-	13,769	-	104,398	4,749	10,780	-	295,783
Belgique	80,859	15,455	36,075	10,233	537	26,316	-	996	241	170,712
Brésil	1,949,186	-	-	123,783	15,839	149,990	4,557	6,058	-	2,249,413
Canada **	684,000	-	-	152,000	-	76,000E	-	-	-	912,000
Chine	10,800,000	3,630,000	400,000	1,770,000	156,966	1,249,000	-	140,000	-	18,145,966
Tchèque	271,206	45,088	7,674	78,236	1,503	67,545	-	2,148	716	474,116
Finlande	52,116	39,080	-	16,867	3,898	5,287	-	474	8	117,730
France ***	927,766	1,091,240	-	107,769	28,314	329,078	367	32,253	-	2,516,787
Allemagne	2,295,608	1,342,280	38,994	181,393	91,291	677,061	25,987	65,862	4,107	4,722,583
Grande Bretagne	537,000	366,500	-	91,000	15,000	185,000	-	25,000	2,000	1,221,500
Hongrie	49,000	30,000	97,000	5,000	5,000	67,000	-	-	-	253,000
Inde	2,840,000	363,000	39,000	465,000	-	331,000E	-	-	-	4,038,000
Iran	310,000	108,000	1,600	32,000	27,000	34,000	-	7,000	-	519,600
Italie	907,000	458,000	9,000	67,000	107,000	805,000	16,000	72,000	-	2,441,000
Japon	2,455,700	1,930,729	81,173	235,352	100,625	1,262,893	97	35,379	9,657	6,111,405
Corée	943,600	539,200	48,400	146,700	22,200	78,000	-	-	5,700	1,783,800
Mexique	790,000	200,000	-	7,980	175,000	550,000	-	100,000	-	1,822,980
Pays Bas	61,000	60,000	5,000	-	-	-	-	-	-	126,000
Pologne	423,000	93,200	15,700	46,500	6,300	134,500	-	8,100	2,100	729,400
Portugal	39,250	52,970	-	10,563	6,000	19,450	300	1,200	115	129,848
Roumanie *	400,000	-	-	-	-	29,600E	-	-	-	365,491
Russie *	5,700,000	-	-	-	-	600,000E	-	-	-	6,200,000
Afrique du Sud	214,500	58,000	1,800	135,000	14,500	39,000	-	2,600	-	465,400
Espagne *	497,700	420,000	-	77,300	6,303	131,918	-	13,289	3,168	1,149,678
Suède	157,800	59,000	-	19,100	10,900	37,100	1,400	4,400	-	289,700
Suisse	27,169	46,125	-	1,381	2,437	15,917	-	1,569	-	94,598
Taiwan	782,463	257,262	1,000	68,930	46,422	250,502	5,313	54,310	1,901	1,468,103
Thaïlande	82,680	107,640	31,980	3,450	-	3,200	-	-	6,900 ^E	235,850
Turquie	592,000	187,000	6,000	112,000	2,840	51,360	-	3,800	-	955,000
Ukraine *	626,610	40,000	10,000	266,060	11,000	20,500	-	-	-	974,170
Etats Unis	4,329,063	3,828,300	105,233	949,817	276,690	1,952,251	73,482	344,728	209,999K	12,069,563
TOTAUX	40,032,328	15,593,017	940,679	5,220,560	1,141,565	9,340,398	135,252	903,391	247,346	73,554,626
** Tonnages 2001 * Tonnages 2002 *** NdT: Tonnages France d'après les chiffres-clés des Fondateurs de France										

3.2.4. Bilans énergie et matières de la fabrication des semi-produits

Bilan matières : C'est grâce à des études récentes que des données fiables sont disponibles. Elles sont détaillées au chapitre 5, la matière première du recyclage.

Bilan énergie : elle est électrique pour les moteurs d'entraînement des presses, laminoirs, et thermique pour le réchauffage et les traitements thermiques. Ces opérations se faisant à relativement basse température, les consommations d'énergie sont plutôt faibles. Nous avons reporté dans le tableau ci-dessous quelques valeurs de la littérature,

Tableau 3.9 : Consommation brute et nette (lorsque le déchet est recyclé) d'énergie par tonne de semi-produit⁽¹¹⁹⁾

consommation d'énergie par tonne de semi- produit	électricité (kWh)			gaz naturel (kg)			énergie totale (GJ)		
	brute	recyc- lage déchet	nette	brute	recyc- lage déchet	nette	brute	recyc- lage déchet	nette
tôle									
sans homogénéisation	547	75	622	46,5	33	79,5	7,6	2,2	9,8
avec homogénéisation			667			94,5			10,9
feuille (0,02-0,2 mm)	1.475	130	1.605	75	57	132	18,1	3,9	22
feuille (0,005-0,02 mm)	1.780	156	1.936	98	69	167	22,2	4,7	26,9
profilé									
sans homogénéisation	1.142	179	1.321	66	35	101	14,4	3,4	17,8
avec homogénéisation			1.493			119			20,3

On rappelle (chapitre 2, tableau 2.3) les valeurs de consommation d'énergie pour le filage et le laminage, tous produits confondus : 25 ans plus tard, les consommations d'énergie sont peu différentes pour la tôle et les produits filés. Par contre, celle des produits laminés a augmenté en raison de la part beaucoup plus élevée des feuilles surtout utilisées dans l'emballage.

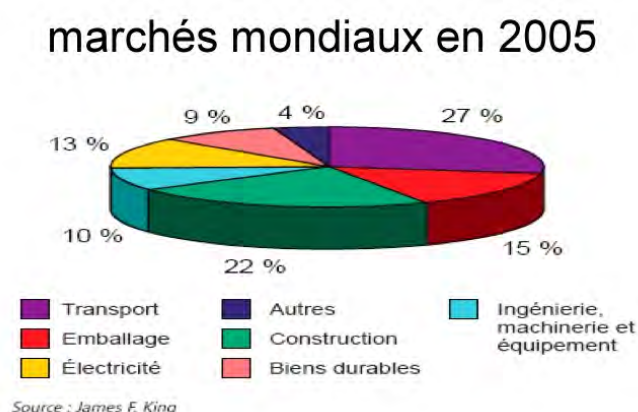
Tableau 3.10 : Consommation d'énergie en 1977 dans la CEE de l'époque depuis la fabrication de l'alumine jusqu'aux semi-produits extrudés et laminés⁽¹⁸⁴⁾

énergie produit	électrique		thermique		énergie totale	
	kWh/t	GJ/t	th/t	GJ/t	th/t	GJ/t
Alumine	327	3,27	6.156	25,7	6.878	28,8
Aluminium électrolytique	16.966	169,7	5.793	24,2	43.120	180,4
Filé (extrudé, profilé)	972	9,7	1.100	4,6	3.240	13,6
Laminé	630	6,3	1.090	4,6	2.470	10,3

3.3. Les produits

Nous avons vu au chapitre 1 les applications de l'aluminium et les parts de marché mondiaux qu'elles représentaient en 2005.

Figure 3.2 : Les principales applications mondiales de l'aluminium en 2005



Ces applications sont celles d'un matériau associant de bonnes propriétés mécaniques, électriques et thermiques à deux propriétés exceptionnelles, la légèreté et la résistance à la corrosion ou inaltérabilité, cette dernière largement responsable de la très grande durée de vie des applications. La facilité de mise en œuvre est enfin une condition très favorable au choix du matériau aluminium. Nous avons représenté dans le tableau suivant la correspondance entre les propriétés utilisées et l'application.

Tableau 3.11 : Applications et propriétés de l'aluminium (source C. Gentaz)

Propriété Application	légèreté	inaltérabilité	autres propriétés	durée de vie
transport aérien	XXX	XXX	XXX mécaniques	XXX
transport maritime	X	XXX	XX mécaniques	XXX
transport terrestre	XXX	XX	XX mécaniques	XXX
construction	X	XXX		XXX
matériel électrique	X	X	XXX électriques	XXX
emballage	XX	XX		X

XXX propriété très importante

XX propriété importante

X propriété moins importante

Toutes les applications de l'aluminium ont une forte composante technique, ce qui explique les exigences en matière de composition de l'alliage. Nous le vérifions dans le tableau ci-dessous indiquant qualitativement la correspondance entre l'application et la série d'alliage

Tableau 3.12 : Application et série d'alliage (source C. Gentaz)

famille alliage / application		1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000
transport	aéronautique	X	X		X	X	X	X	
	automobile	X	X		X		X	X	
	Ferroviaire	X			X		X		
	Maritime	X			X	X	X	X	
emballage		X		X		X			X
électricité		X					X		
construction							X		
autres									

3.4. L'aluminium et le développement supportable

Ses vertus sont évidemment la durée de vie et la dématérialisation des produits.

3.4.1. La durée de vie

Durées de vie et plus généralement cycles de vie des produits ont accompagné le développement supportable ; des rapports ont déjà été publiés sur l'automobile et la construction, d'autres sont prévus pour l'emballage et le transport terrestre.

Tableau 3.13 : Durée de vie moyenne estimée par application

application	% part de marché 2000	durée de vie moyenne estimée (années) 2000		
		source ALCOA	source HYDRONITRO	Source C. Gentaz
transport :	26	13	10	10-15 (13)
aérien	1			30-40
ferroviaire	1			30-40
automobile	22			10-15
naval	2			10-20
construction	20	40	35	30-40 (40)
emballage	20	1	1	1
électricité	9	35	35	25-35 (30)
mécanique	9	15	5	5-15 (10)
électroménager	6			5-15 (10)
autres	10	15	12	5-15 (10)

Toutes les durées de vie sont longues, allant de 10-15 ans dans l'automobile à 30-40 ans dans l'aéronautique, le rail, le transport de l'électricité et la construction. Seule, l'application dans l'emballage se distingue par une durée de vie très courte, moins d'une année.

3.4.2. La dématérialisation

La dématérialisation, retraduite seulement en allègement du produit à fonction égale, permet de diminuer l'énergie de fabrication du produit, appelée aussi énergie grise, et l'énergie de mise en œuvre du produit. On a les exemples suivants :

Dans l'application automobile⁽¹⁶⁵⁾, l'allègement permet de réduire l'énergie de mise en œuvre, la consommation spécifique de carburant. Par contre, à fonction égale, si on remplace une pièce en fonte de fer par une pièce en fonte d'aluminium, on augmente l'énergie grise. Le bilan est cependant en faveur de l'emploi de l'aluminium en substitution de la fonte de fer au-delà d'un kilométrage parcouru suffisant, généralement compris entre 50 et 60.000 km.

Figure 3.3 : Les semi-produits en aluminium dans l'automobile : moulés (cast) et extrudés et laminés (wrought) ⁽¹⁶⁵⁾

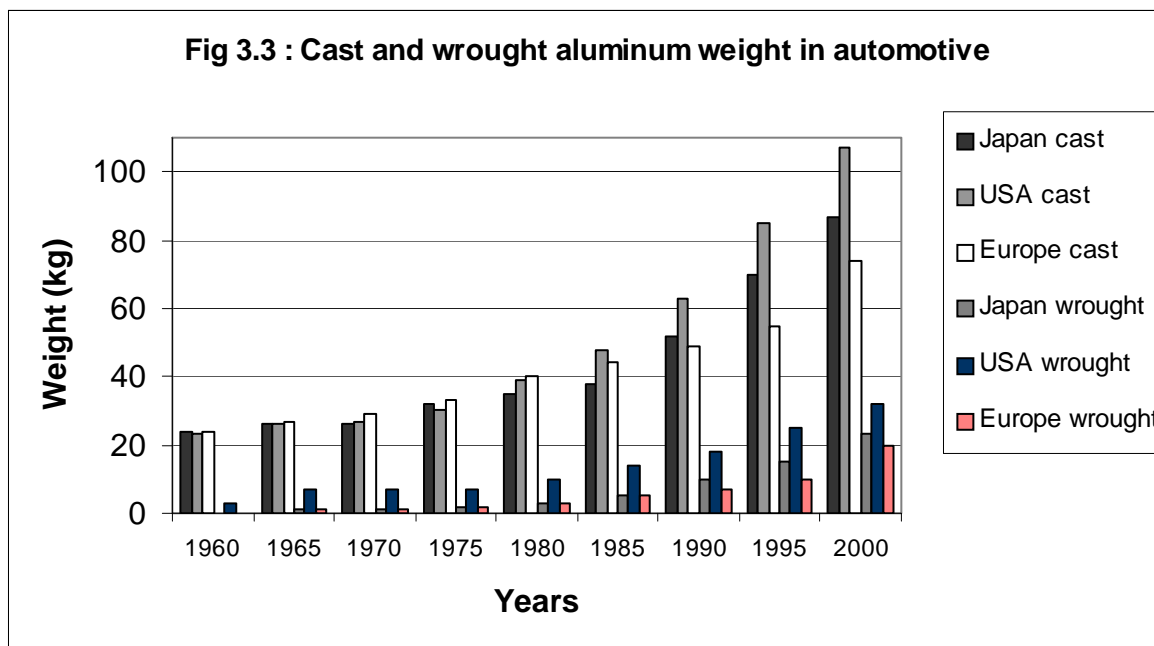


Figure 3.4 ⁽¹⁶⁵⁾

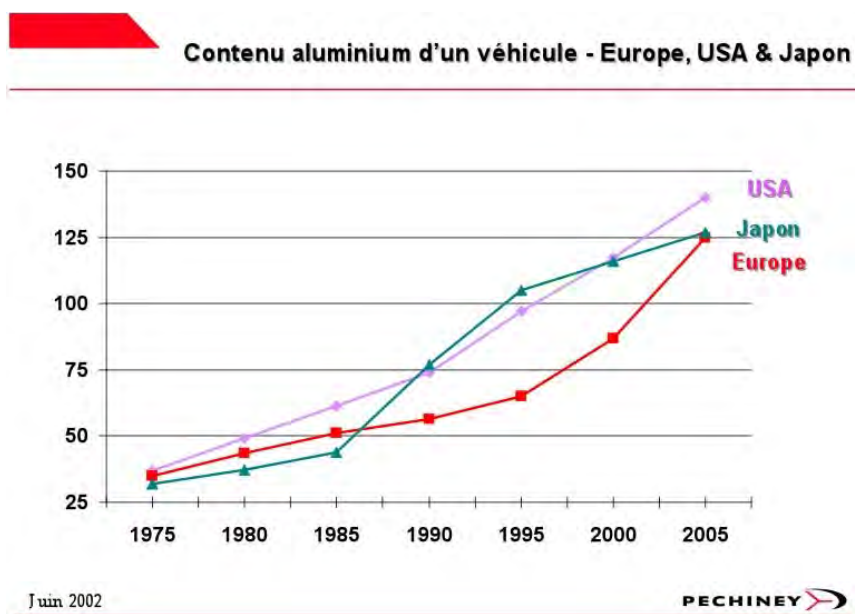
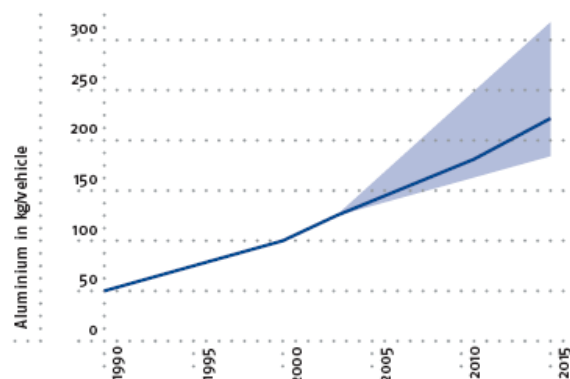


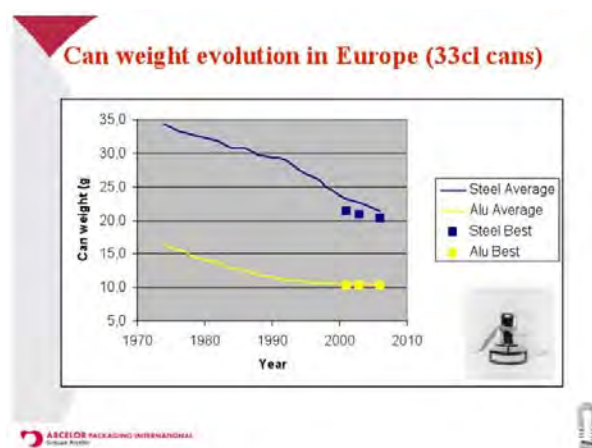
Figure 3.5 : Evolution de la quantité d'aluminium dans les véhicules

(Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters)



Dans l'emballage, cas de la boîte boisson, l'allègement diminue l'énergie de fabrication contenue, l'énergie grise. Il a été obtenu, à propriétés mécaniques égales, grâce à l'amélioration de la propreté « inclusionnaire », c'est-à-dire l'absence de défaut dans la masse des alliages utilisés. On a alors pu réduire l'épaisseur de la feuille. L'allègement a servi uniquement à maintenir la compétitivité économique de l'aluminium par rapport aux autres matériaux d'emballage : la feuille d'aluminium représente 70% du prix de la boîte. En passant de 15,85 à 13,62 g, on a réalisé un allègement de 14%. Malheureusement, diminuer l'épaisseur c'est, comme on le verra plus loin (chapitre 7) augmenter les pertes d'aluminium à la fusion pendant le recyclage. Elles augmentent de 16% tout en restant constantes en valeur absolue.

Figure 3.6 : Evolution du poids des boîtes boisson acier et aluminium en Europe (158 et communication privée ARCELOR Packaging International)



3.5. Bibliographie

Elle reprend beaucoup d'articles parus dans les revues Matériaux et Techniques, Mai-Juin 1986 et La Technique Moderne Mai-Juin 1986, pour commémorer le centenaire de la production industrielle de l'aluminium par le procédé HALL – HEROULT. Ce fut alors l'occasion d'une synthèse des développements de l'aluminium entre 1886 et 1986. Elle est complétée par les articles les plus importants publiés depuis 1986.

Généralités

- (113) 38ème rapport annuel de la production mondiale des fonderies en 2003. Modern Casting Review, décembre 2004
- (114) Portalier R. L'aluminium et la fonderie. Hommes et Fonderie, 346, 90-93, Août 2004
- (115) Gerber Jürg. The global dimension of aluminium recycling. 7th International OEA aluminium recycling congress, 17-18 mars 2003, Munich, Germany
- (116) European Aluminium Association- Aluminium for Future Generations : progressing through dialogue. Chapter One and Two. 2003 (www.eaa.net, www.aluminium.org)
- (117) The aluminium industry's sustainable development report. International Aluminium Institute, 2002 (site www.world-aluminium.org)
- (118) Rombach G. Future potential and limits of aluminium recycling. Proceedings of EMC 2001, 17-32.
- (119) Environmental profile report for the European Aluminium Industry, Aluminium for future generation. European Aluminium Association, April 2000
- (120) Jacob Sylvain. Les alliages d'affinage : applications, marchés, caractéristiques. Congrès TransAl, Chicoutimi, Canada, octobre 1999
- (121) L'aluminium : un métal jeune à l'avenir prometteur. SESSI, ministère de l'économie et des finances, secrétariat d'état à l'industrie, France, 114, « 4 pages de statistiques industrielles », juin 1999
- (122) Procédés de transformation de l'aluminium. Hommes et Fonderie, 13, Décembre 1997

- (123) Macchini R. La coulée semi-liquide : le scénario d'une réalité innovante. Hommes et Fonderie, 27, Novembre 1997
- (124) Jacky Henri. Aluminium : la nouvelle frontière de l'aval. Marché unique, marché multiple : stratégie européenne des acteurs industriels. Observatoire des Stratégies Industrielles. Ed. Economica. 303-322, 1990
- (125) Rooy Elwin. E. Trends and developments in the aluminum industry. INFACON 1989 proceedings by the ferro-alloy association of the United States, Arlington, Va, U.S.A., 58-65, 1989
- (126) Registration record of international alloy designations and chemical composition limits for wrought aluminium and wrought aluminium alloys. The Aluminum Association, USA, revised May 1987
- (127) Registration record of Aluminum Association : alloy designations and chemical composition ns limits for aluminium alloys in the form of casting and ingots. The Aluminum Association, USA, July 1985
- Matériaux et Techniques, Mai-Juin 1986*
- (128) Dévelay Roger. Les progrès de la métallurgie en vue de l'amélioration des propriétés d'usage des alliages d'aluminium. 171-186
- (129) Allier A. Fonderies, coulées continues : où est-on ? 201-207
- (130) Akeret R. Sélection d'alliages d'aluminium pour la mise en forme de tôles mince, 37-46
- La Technique Moderne, Mai-Juin 1986*
- (131) Zagoury J-C. Que se passe-t-il dans les usines de filage. 47-52
- (132) Mercier J-L. Progrès dans le filage à chaud des alliages à hautes caractéristiques 53-58
- (133) Guillot R. De la recherche à l'application. 65-72
- (134) 100 ans d'aluminium, en France et dans le monde (bilans et perspectives), Hommes et Fonderie, 41-43, Mars 1986

Application aéronautique

- (135) Les dernières générations d'avions commerciaux : Airbus A-380 et Boeing 787. Extraits de presse 2007
- (136) Portalier R. Aperçu sur l'évolution des alliages d'aluminium de moulage utilisés en aéronautique. Hommes et Fonderie, 346, 100-103, 2004
- (137) Aluminium applications, aluminium in the air. International Aluminium Association, site février 2003
- (138) L'industrie spatiale et aéronautique, moteur de croissance et technologie-clé du 21ème siècle. Fédération internationale des Organisations de travailleurs de la Métallurgie, FIOM.
- (139) Conférence mondiale sur l'industrie aérospatiale, Toulouse, France, 16-19 juin 2002
- (140) Ad Hoc review meetings on bauxite, may 1991, may 1994, standing committee on commodities, Trade and Development Board, UNO

Matériaux et Techniques, Mai-Juin 1986

- (141) Huret N. De Bony Y. Retombées sur le développement des applications civiles des recherches aéronautiques. 219-225
- (142) Hilaire G. Les exigences de constructeurs aéronautiques envers les matériaux nouveaux. 213-225

La Technique Moderne, Mai-Juin 1986

- (143) L'aluminium au service de l'aéronautique : le site d'Issoire. 73-79
- (144) Robin G. Les alliages d'aluminium dans la construction aéronautique aujourd'hui par 81-89
- (145) Mercier J-L- Application de la métallurgie des poudres aux alliages d'aluminium. 90-95
- (146) Alliage aluminium-lithium. Hommes et Fonderie, 45, Octobre 1984

Application emballage

- (147) International Aluminium Institute. Aluminium packaging. www.world

aluminium.org

- (148) Export Cigarette and Tobacco Study Group. Aluminium : don't substitute it, recycle it. Bern, Switzerland, sans date (probablement 2002).
- (149) Zapp Petra and al. Technological Development in aluminium production – contributions to environmental changes. Proceedings of European Metallurgical Conference, 83-89, 2001
- (150) Kayla Anil. The changing pattern of secondary aluminium industry through the millennium. . Proceedings of the third ASM International Conference & Exhibition on The Recycling of Metals, Barcelona, Spain, 237-253, 11-13 June, 1997
- (151) Ad Hoc review meetings on bauxite, may 1991, may 1994, standing committee on commodities, Trade and Development Board, UNO
- (152) Wrapping up the European market. Aluminium to-day, 72-77, November 1992
- (153) Portion Packaging. Aluminium to-day, 17, September 1992
- (154) The preferred drinks package. Aluminium to-day, 17, September 1992
- (155) Gandois Jean. L'environnement est devenu une politique de premier rang dans notre stratégie. Pêchiney, Direct Magazine, n° 10, 2-4, Avril 1992
- (156) Ferrat J-M. L'aluminium dans l'emballage rigide, semi-rigide, souple. Matériaux et techniques, 259-268, Mai-Juin 1986
- (157) Delaruelle J. Aluminium et emballage, alliés naturels. La Technique Moderne, 96-101, Mai-Juin 1986
- (158) APEAL, Association of European Producers of steel for packaging. Appeal News et www.apeal.org et www.steelpackaging.org

Application automobile

- (159) Jacob Sylvain. Les alliages d'aluminium moulés et l'automobile ; un peu d'histoire. Hommes et Fonderie, 346, 94 – 99, Août 2004
- (160) Von Zengen K-H. Aluminium in the past and future (automotive) - not only light. 7th OEA International Aluminium Recycling Congress, München, Germany,

17/18 March 2003

- (161) International Aluminium Institute. Aluminium applications, road transport, www.world-aluminium.org
- (162) De Gelas Bernard. Recyclage de l'aluminium dans la filière automobile en Europe. TransAl, Lyon, France, juin 2002
- (163) Quel avenir pour l'automobile ? Crédit Suisse, Bulletin, 67-68, mars 2002
- (164) AUTO 2000 report. International Metalworkers Federation, IMF, 2000
- (165) Santarini Marc. L'aluminium moulé dans l'automobile. Hommes et Fonderie, 12-21, Août-Septembre 1998
- (166) Katyal Anil. The changing pattern of secondary aluminium industry through the millennium. . Proceedings of the third ASM International Conference & Exhibition on The Recycling of Metals, Barcelona, Spain, 237-253, 11-13 June, 1997
- (167) Jacob Sylvain. Les alliages de moulage et l'automobile : un peu d'histoire. Hommes et Fonderie, 19-24, Avril 1997
- (168) Alusuisse roule en Porsche. PME Magazine, 9, Janvier-Février 1997
- (169) Santarini Marc. L'aluminium moulé dans l'automobile : état et perspectives du développement. Hommes et Fonderie, 13-18, Janvier et Février 1996
- (170) Lowe Ken. Une longueur d'avance dès la conception. Hommes et Fonderie, 17-19, Août-Septembre 1995
- (171) Fonderie – Fondeur d'aujourd'hui, 4, Mai 1995
- (172) Aluminium et alliages : les emplois de l'aluminium se développent dans l'industrie automobile. Hommes et Fonderie, 23-24, Août-Septembre 1994
- (173) Marks Von Wurtemberg J. Lightweight materials for automotive applications. Iron and Steelmaker, I&SM, 11-21, August 1994
- (174) Perrier J.-J. Les produits moulés en alliages d'aluminium. Hommes et Fonderie, 27-34, Avril 1994
- (175) Prospective d'emplois de l'aluminium dans l'industrie automobile. Matériaux et Techniques, numéro spécial sur les métaux non ferreux, n° 8-9, 1993

- (176) Report towards the aluminium car. UK's Aluminium Extruders Association, 1992
- (177) Aluminium : une industrie liée à l'avenir de l'automobile (reprise d'une conférence de presse de European Aluminium Association, EAA, président Jochen SCHIRNER, à Düsseldorf, Germany), Journal de Genève, 4, 8 Juillet 1991
- Matériaux et Techniques, Mai-Juin 1986.*
- (178) Allier André. Fonderies, coulée continue : où en est-on ? 201-208
- (179) Estrosi G. Les alliages d'aluminium et les transports terrestres. 227-232
- (180) Fiat M. Les produits moulés dans l'automobile. 246-249
- La Technique Moderne, Mai-Juin 1986*
- (181) Portalier R. Choix des techniques de moulage et des alliages appropriés. 59-64
- (182) Mériquet J-M. Les échangeurs thermiques en aluminium dans l'automobile. 103- 104
- (183) Foisy P. Compétitivité fonte – aluminium dans l'automobile. Hommes et Fonderie, 31-35, Octobre 1981
- (184) Mazodier J-L. Compétitivité fonte – aluminium dans l'automobile, cas du bloc moteur. Hommes et Fonderie, 27-30, Octobre 1981
- Application navale*
- (185) Vargel Christian. L'aluminium et la mer. Matériaux et techniques, 233-246, Mai-Juin 1986.
- Application électrique*
- (186) Ad Hoc review meetings on bauxite, may 1991, may 1994, standing committee on commodities, Trade and Development Board, UNO
- (187) J. Conducteurs électriques en aluminium : une famille d'alliages adaptés à chaque besoin. Matériaux et techniques, 250-258, Mai-Juin 1986.

Application construction

- (188) European Aluminium Association, www.eaa.net
- (189) Groupement des lamineurs et Fileurs d'Aluminium, GLFA. www.glfa.fr
et www.aluminiumarchitecture.com
- (190) Sintef, Building and Construction. www.sintef.no
- (191) Gay Jean-Bernard. Habitat, infrastructure et mobilité. 1- Energie de construction et d'exploitation. Actes de la 14ème journée du Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, Cuepe, Université de Genève, 2004
- (192) European Aluminium Association. Report, Building the future with aluminium, recycling of aluminium building products. 2003
- (193) International Aluminium Institute. Aluminium applications and society, paper 2. Construction. www.world-aluminium.org

Autres applications

- (194) Martinez S.S. et al. Recycling of aluminium to produce green energy. Solar Energy Materials and Solar Cells 88, 237-243, 2005
- (195) Aluminium applications, aluminium in cooking. World International Aluminium. Site de février 2003
- (196) Bike industry, Metal Bulletin Monthly, 101, June 1995
- (197) la désoxydation des aciers par fil ou morceau d'aluminium recyclé
(source Transtec 1993)
- (198) le revêtement anticorrosion des aciers par des alliages Zn-Al (5%)
(source Transtec 1993)
- (199) Lantelme Frédéric, Haas Otto et Mayor Jean-Claude. L'aluminium pour stocker l'électricité. La Recherche, 216, 1456-1462, Décembre 1989
- (200) Dessault F. L'aluminium, les sports et les loisirs. La Technique Moderne, 111-112, Mai-Juin 1986

Deuxième partie

Le recyclage - du déchet (l'aluminaille) à l'aluminium liquide

Chapitre 4. L'histoire du recyclage de l'aluminium

Alors que l'histoire de la production est bien connue, celle du recyclage reste à écrire. On connaît seulement quelques noms de lieu et de personne, quelques données chiffrées. En fait, le recyclage existe bel et bien depuis le premier lingot et le premier objet produits en 1886 et nous avons relevé les étapes marquantes suivantes :

Figure 4.1 : les étapes marquantes du recyclage de l'aluminium (source C. Gentaz)

1886 ; naissance de l'aluminium et premier recyclage intégré des déchets neufs et vieux	
	1913 ; premier recyclage non intégré des déchets neufs par un refondeur
	1916 ; premier recyclage non intégré de vieux déchets par un affineur
	1920 ; recyclage des vieux déchets dans la production des alliages de fonderie
	1960-1980 : les délocalisations de l'électrolyse et la rupture de la chaîne jusqu'aux semi-produits
	1980 ; la boîte boisson
	1990 ; le développement supportable
	2000 ¹ ;

Temps en année

¹ La distinction entre aluminium primaire, d'électrolyse, et aluminium secondaire, recyclé, est mondialement abolie.

Dés 1886, en raison du prix de l'aluminium, l'industrie de l'aluminium a utilisé ses déchets de production et transformation. Une très faible part a été mise sur le marché, justement la seule à faire l'objet de données statistiques. Celles nord-américaines^(201,202), les plus documentées et tenues depuis 1900, reportent la première production d'aluminium à partir de déchets neufs en 1913 et c'est à cette

date qu'on peut faire remonter l'apparition des premiers refondeurs non intégrés, soit 27 ans après la première production industrielle de l'aluminium.

Quant aux déchets de consommation, ils sont apparus beaucoup plus tard et les mêmes données nord-américaines mentionnent pour la première fois la production d'aluminium à partir des vieux déchets en 1939. Ce serait cependant aux U.S.A., en 1916, qu'aurait démarré la première usine de recyclage de déchets de consommation et l'Allemagne aurait suivi en 1917. On admet cependant que ces vieux déchets seraient des crasses de la production électrolytique, les crasses dites blanches, celles-là qui sont à l'origine de l'apparition des premiers affineurs. Nous aurions là l'explication de la structure de la branche affinage du recyclage (voir chapitre 6) où coexistent de grandes entreprises industrielles avec de petites entreprises familiales.

Dans les années 1920, c'est donc le début du recyclage industriel des déchets de consommation qui commencent à apparaître en quantités appréciables sur le marché. C'est en raison de leur qualité médiocre et variable que l'industrie de l'aluminium ne souhaitait pas et surtout ne savait pas où les utiliser en grandes quantités. On connaissait déjà le rôle du silicium sur la coulabilité de l'aluminium mais les pièces moulées étaient inutilisables en raison d'un défaut métallurgique inéluctable (la retassure). C'est grâce à une innovation technique, la découverte par PACZ en 1920 de l'action du sodium sur la modification structurale des alliages d'aluminium et de silicium, qu'ont pu se développer la fonderie d'aluminium, ses alliages aluminium-silicium de la série 4000, autrefois appelée ALPAX et l'utilisation de masse recherchée des vieux déchets dont la relativement moins bonne qualité restait acceptable, grâce aussi à l'effet indirect diluant du silicium puisque on en ajoute environ 10%.

Dans les années 1960, on assiste aux premières délocalisations des usines d'électrolyse là où l'électricité est abondante et bon marché.

Dans les années 1970, la croissance de la capacité mondiale d'électrolyse se fait de plus en plus dans les pays disposant d'électricité bon marché et stables politiquement, évidemment favorisés par les « crises de l'énergie » : Canada, Venezuela et U.S.A. La transformation en semi-produits et en produits finis reste dans les vieux pays producteurs, Europe, Japon, U.S.A.

Dans les années 1980, le JAPON va jusqu'au bout de la logique des délocalisations et met en place une politique industrielle d'abandon de la production électrolytique de l'aluminium pour privilégier l'affectation de ses ressources énergétiques limitées au profit d'industries moins consommatrices d'énergie. Depuis, son industrie de

l'aluminium repose sur le recyclage devenu la seule filière nationale de production d'aluminium et l'importation de métal d'électrolyse.

Encore dans les années 1980, c'est la conséquence imprévue et prévisible à posteriori des délocalisations. Jusque là les usines d'électrolyse européennes, japonaises et nord-américaines alimentaient en semi-produits à chaud les usines de transformation en produits semi-finis à froid, le plus souvent intégrées, celles de laminage plus que celles de tréfilage dont les usines, beaucoup plus petites sont souvent dépourvues de moyens de fusion. La délocalisation des usines d'électrolyse a rompu la chaîne et on a vu apparaître des usines de transformation non intégrées approvisionnées par des lingots d'électrolyse importés et des déchets neufs internes. Il a aussi fallu remplacer les moyens de fusion disparus et sont alors apparus des acteurs souvent indépendants de la production du métal d'électrolyse, les refondeurs.

De même, l'arrivée en quantités croissantes des vieux déchets a favorisé l'apparition de nouveaux affineurs.

Toujours dans les années 1980, REYNOLDS développe aux USA l'application emballage rigide, la boîte boisson et met en œuvre à grande échelle une stratégie visionnaire pour l'époque car élaborée dans les années 1970 : le recyclage du produit devenu déchet de consommation. Sa collecte spécifique, sa fusion et son retour dans la fabrication de la boîte boisson sont inclus dans la stratégie de développement du nouveau produit car il était hors de question d'augmenter de plusieurs centaines de milliers de tonnes les 1,5 millions de tonnes de déchets de consommation mis en décharge en 1976 !

C'est aussi le premier déchet de consommation apparaissant sur le marché dans un délai aussi court, environ 2 mois.

Délai d'apparition, quantité et qualité, si non bonne, en tout cas connue, le font alors considérer comme un déchet de production et de transformation.

Enfin, alors que la principale utilisation des vieux déchets ce sont les alliages de fonderie, c'est la première fois, à très grande échelle, qu'un déchet de consommation retourne dans le circuit de fabrication. Ce premier recyclage en boucle fermée, reposant sur une collecte sélective, a eu des conséquences sur la consommation non seulement d'aluminium électrolytique mais aussi sur celles de magnésium et de manganèse, composants des deux alliages utilisés dans la fabrication de la boîte boisson ⁽²⁰³⁾. Leur consommation a chuté dès que les quantités recyclées ont été importantes puisque le magnésium, en partie, le manganèse, presque en totalité, étaient eux aussi recyclés.

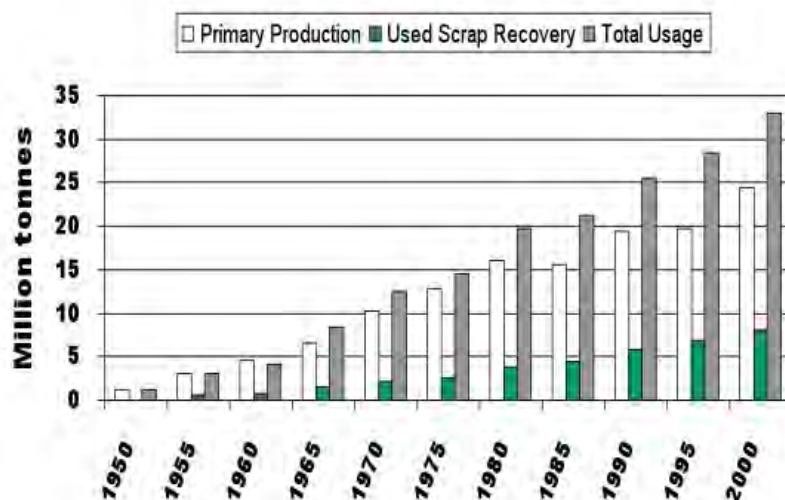
C'est précisément à cause de cette conception à deux alliages que, quelques années plus tard, la boîte boisson s'illustre par l'une des premières éco-conception. Dans la conception à deux alliages, l'un est utilisé pour faire le corps cylindrique, plus de 80% en masse, l'autre, le couvercle. Par fusion de l'ensemble, - il est en effet impossible de séparer le corps du couvercle -, on obtient un alliage avec une composition assez proche, ensuite facilement réajustée, de celle de l'alliage du corps de boîte. Deux inconvénients cependant : d'abord, il n'y a pas de recyclage dans la fabrication du couvercle, ce qui crée un déséquilibre dans les flux de matières. Ensuite, le magnésium de l'alliage de couvercle, environ 5%, est en partie perdu pendant la fusion, une perte économiquement importante. On a donc recherché à employer un seul alliage répondant simultanément aux fonctions de corps et de couvercle et au recyclage, l'alliage « uni-alloy ».

Dans les années 1990^(204, 205), c'est le développement supportable, prise de conscience mondiale que la croissance de l'humanité sous tous ses aspects, démographique, énergétique, environnemental, climatique, doit être contrôlée. Au même moment, les déchets de consommation commencent à apparaître massivement, conséquence de la longue durée de vie moyenne des produits et du développement des applications de masse de l'aluminium dans les années d'après-guerre.

L'industrie de l'aluminium, consciente de l'importance du développement supportable, augmente sa production d'aluminium recyclé dont le taux de croissance augmente plus vite, ces dernières années, que celle du métal d'électrolyse, 4%/an contre seulement 2,7%/an. Il est vrai qu'en valeur absolue, la quantité de métal d'électrolyse augmente deux fois plus que celle de métal recyclé.

Quant aux taux de croissance historiques, sur 50 ans de 1950 à 2000, ils confirment que l'importance du recyclage n'avait pas échappé à une industrie de l'aluminium confrontée à une croissance extraordinaire de la consommation. Sur cette période, la production de l'aluminium électrolytique est passée de moins de 3 Mt/an à 24 Mt/an, soit un taux de croissance moyen de plus de 4%/an alors que celle du métal recyclé a augmenté encore plus, passant de moins de 0,3 Mt à 8 Mt, un taux moyen de croissance de plus de 6%/an.

Figure 4.2 : Productions mondiales d'aluminium électrolytique (primary production), recyclé (used scrap recovery) et consommé (total usage)



Source: Metallgesellschaft AG/World Bureau of Metal Statistics

Ces étapes de l'histoire du recyclage ignorent apparemment les guerres mondiales. S'il est bien connu que celles-ci ont contribué incontestablement au développement de l'application aéronautique, elles n'ont pas joué de rôle déterminant dans le développement du recyclage. Au contraire, la deuxième guerre mondiale a probablement contribué à ralentir son développement aux U.S.A. et par la suite dans le monde. En effet, la seule application militaire de l'aluminium, l'aéronautique, génère d'énormes quantités de déchets de transformation, ce que montrent par exemple les données statistiques nord-américaines entre 1942 et 1946. Pendant cette période, l'industrie aéronautique nord-américaine a livré 300.000 avions et la quantité de déchets neufs recyclés a alors représenté jusqu'à dix fois celle des vieux déchets dont le recyclage est alors devenu quantitativement marginal.

L'effort de guerre terminé, on a prioritairement continué à consommer le stock de déchets neufs de l'industrie aéronautique, tous de qualité excellente et bien supérieure à celle des vieux déchets et il a fallu une dizaine d'années pour résorber ce stock. Quant aux vieux déchets aéronautiques, les quantités accessibles étaient limitées, les avions détruits au combat étant disséminés sur les théâtres d'opération et ceux désarmés entamant une nouvelle carrière civile.

On est évidemment très loin des conditions extrêmement favorables rencontrées par l'industrie du recyclage de l'acier. A la fin de la 2ème guerre mondiale, on a alors eu une abondance de déchets, les équipements lourds (bateaux, engins terrestres, etc.) désaffectés ou détruits (surtout en Europe et pas du tout aux U.S.A.). C'est la

conjonction de ferrailles en quantité et en qualité avec une technique de fusion performante, le four électrique, qui a conduit à l'apparition d'une industrie spécifique du recyclage de l'acier. Celle de l'aluminium n'a pas bénéficié de telles conditions favorables.

Pour terminer ce chapitre consacré à l'histoire du recyclage de l'aluminium, il faut parler de la façon dont on désigne l'aluminium recyclé : aluminium « secondaire » (« secondary » aluminium en anglais) est riche de signification puisqu'il y a une connotation d'infériorité de l'aluminium recyclé par rapport à l'aluminium électrolytique. Aux U.S.A, où le recyclage s'est spectaculairement développé avec le développement du marché de l'emballage, on parle plutôt d'aluminium « recouvert » (« recovered » aluminium).

On soulignera que, l'industrie du fer, acier et fonte, ne fait pas cette distinction puisqu'on ne parle pas d'acier et de fonte « primaire » et « secondaire », mais d'acier et de fonte.

Par contre, la même distinction entre métallurgies « primaires » et « secondaires » existe aussi pour la plupart des métaux non ferreux : plomb, zinc, cuivre.

Cette même appellation « aluminium « secondaire » accroît la confusion car elle désigne aussi l'aluminium destiné à la fonderie, celui-ci pouvant indistinctement être de l'aluminium « primaire » ou « secondaire ». Il est vrai qu'une part importante de l'aluminium recyclé à partir des vieux déchets est toujours allée dans les alliages destinés à la fonderie, ce qui a évidemment contribué à assimiler aluminium secondaire à aluminium de fonderie.

Où en est aujourd'hui le recyclage ? Qu'en sera-t-il demain avec l'impulsion du développement supportable et surtout l'arrivée massive des déchets de consommation ?

C'est ce que nous allons voir dans les chapitres suivants

4.1. Bibliographie

Références principales

- (201) Plunkert Patricia A. Aluminum recycling in The United States: a historical perspective. Proceedings of the Second International Symposium on recycling of metals and engineered materials, 61-68, 1990
- (202) United States Geological Survey (www.minerals.usgs.gov)
- (203) Rooy Elwin. E. Trends and developments in the aluminum industry. INFACON 1989 proceedings by the ferro-alloy association of the United States, Arlington, Va, U.S.A., 58-65, 1989
- (204) Morrison Jim. Trend in the European aluminium industry. OEA, 2004
- (205) Valand Joseph S. A secondary's view of recycling. Proceedings of the Second International Symposium on recycling of metals and engineered materials, 21-31, 1990

Chapitre 5. La matière première du recyclage

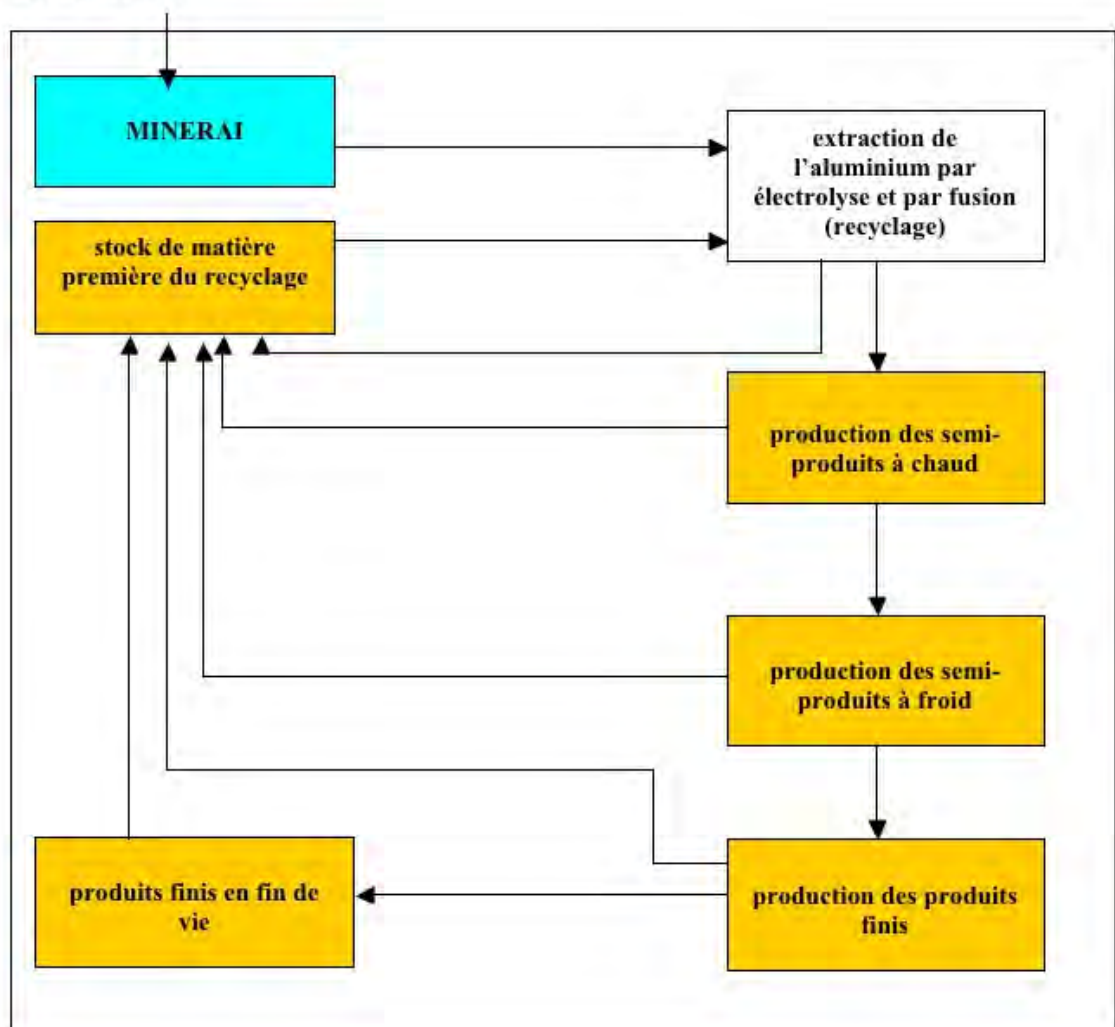
5.1. Classification

Conduisant aussi au métal, la matière première du recyclage, malgré de nombreuses analogies, est très différente de l'autre matière première, le minerai.

C'est une ressource créée par l'homme, de nature métallique, présente en surface de la terre, en formation permanente et disséminée et de stock faible si on le compare à celui des réserves du minerai. Nous avons représenté le système global qui la régit dans le schéma fonctionnel ci-dessous.

Figure 5.1 : Les flux de matière première du recyclage dans l'industrie de l'aluminium (source C. Gentaz)

LITHOSPHERE



On a affaire à un système dynamique avec les caractéristiques suivantes :

- Le flux entrant dans le stock de matières premières du recyclage est fixé à tout instant par la quantité des produits devenant déchets, neufs et vieux.

- Le flux sortant du stock de matières premières du recyclage est fixé à tout instant par la collecte, elle-même fixée par les applications, c'est-à-dire les marchés du métal recyclé.

- Le stock est la résultante, à tout instant, des flux entrant et sortant.

Pour désigner la matière première du recyclage, la langue française utilise les termes de débris, morceau d'une chose brisée, détruite en partie, ce qui correspond au produit arrivé en fin de vie, et de déchet, ce qui est perdu dans l'emploi d'une matière, et correspond à la matière restant inutilisée dans la fabrication du produit.

La langue anglaise utilise un terme générique, « scrap » dont la traduction française est déchet, complété par un qualificatif spécifique du déchet.

Nous avons reporté dans les tableaux ci-après les désignations anglo-saxonnes les plus couramment utilisées et leurs traductions et équivalences françaises, en regrettant que les différentes métallurgies n'utilisent pas le même langage, ce qui n'est pas sans ajouter à la confusion régnante pour commencer dans les données statistiques.

Tableau 5.1 : Les désignations anglo-saxonnes (source C. Gentaz)

family	new scrap		old scrap
origin (step of the life cycle)	from liquid aluminium to semis (drosses or skim-mings are included)	from semis to finished products	from end-of-life product
current designation	home, internal, internal arising, own, circulating, runaround, turnaround	prompt, production, processing, process, industrial	obsolete, capital, demolition, consumption

Tableau 5.2 : Les équivalences françaises (source C. Gentaz)

famille	déchet neuf		vieux déchet
origine (étape du cycle de vie)	de l'aluminium liquide au semis (les crasses sont incluses)	des semis aux produits finis	à partir des produits en fin de vie
appellation usuelle	déchet	déchet	Débris

Dans cette étude, nous avons donc retenu de désigner toutes les matières premières du recyclage par déchet, un objet métallique en totalité ou en partie et sans application.

Nous avons aussi retenu d'utiliser la traduction française du terme anglo-saxon le plus utilisé pour désigner les différentes catégories de déchets.

Nous avons enfin retenu d'utiliser la classification historique par origine¹, calquée sur les étapes du cycle de vie et toujours en usage par l'industrie de l'aluminium.

Les résultats de ces choix sont les suivants :

- de la bauxite ou des déchets à l'aluminium liquide :

Des déchets apparaissent pendant la manutention de l'aluminium liquide entre son extraction de la cellule d'électrolyse ou du four de fusion du déchet et la coulée en semi-produit. Ils sont inclus dans les déchets suivants, les déchets internes.

¹Pratiquement, cette classification n'est pas la plus adaptée pour savoir comment faire le recyclage. L'industrie de l'acier l'a abandonné en 1996 au profit de la classification par qualité⁽²¹⁶⁾ (% fer, densité, dimensions, sécurité, par exemple radioactivité du déchet) qui présente aussi l'intérêt de mieux comprendre les caractéristiques des flux. Par exemple, dans le cas de l'aluminium, le déchet pourra avoir une concentration métallique en dessous de 10% en poids, ce en raison de la valeur économique de l'aluminium. Il n'y a pas de tels déchets dans l'industrie de l'acier.

La connaissance de la nature du déchet, sa concentration, la complexité des autres composants, le nombre d'objets, la masse unitaire de l'objet est nécessaire. Par exemple, on sait collecter une boîte boisson pesant 13g, mais on ne sait pas collecter une poignée de porte pesant moins de 100g sur un chantier de démolition.

- de l'aluminium liquide aux semi-produits

Issus de la transformation de l'aluminium liquide en semi-produits, ce sont les déchets internes, traduction littérale de « internal scrap », car surtout recyclés sur place, en interne.

- des semi-produits aux produits finis

Issus de la transformation des semi-produits en produits finis, ce sont les déchets de transformation, traduction approchée de « process scrap ».

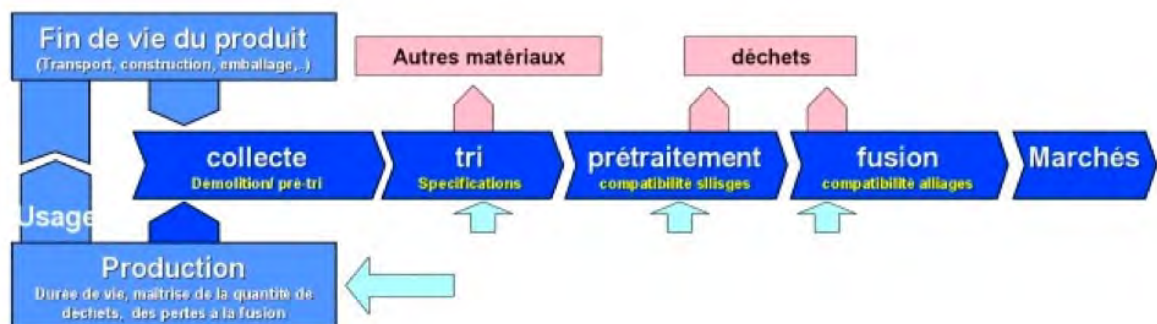
Déchets internes et déchets de transformation sont réunis sous le nom de déchets neufs, traduction littérale de « new scrap ».

- des produits finis après usage

Issus des produits en fin de vie, ce sont les vieux déchets, traduction littérale de « old scrap ».

Cette classification, qui met de suite en évidence les très grandes différences entre les déchets neufs issus de la production et les vieux déchets issus de la consommation, sera utilisée pour décrire les caractéristiques des déchets en termes de qualité, quantité, délai entre formation et application ainsi que les étapes du recyclage, en particulier la collecte, le pré-tri et le tri.

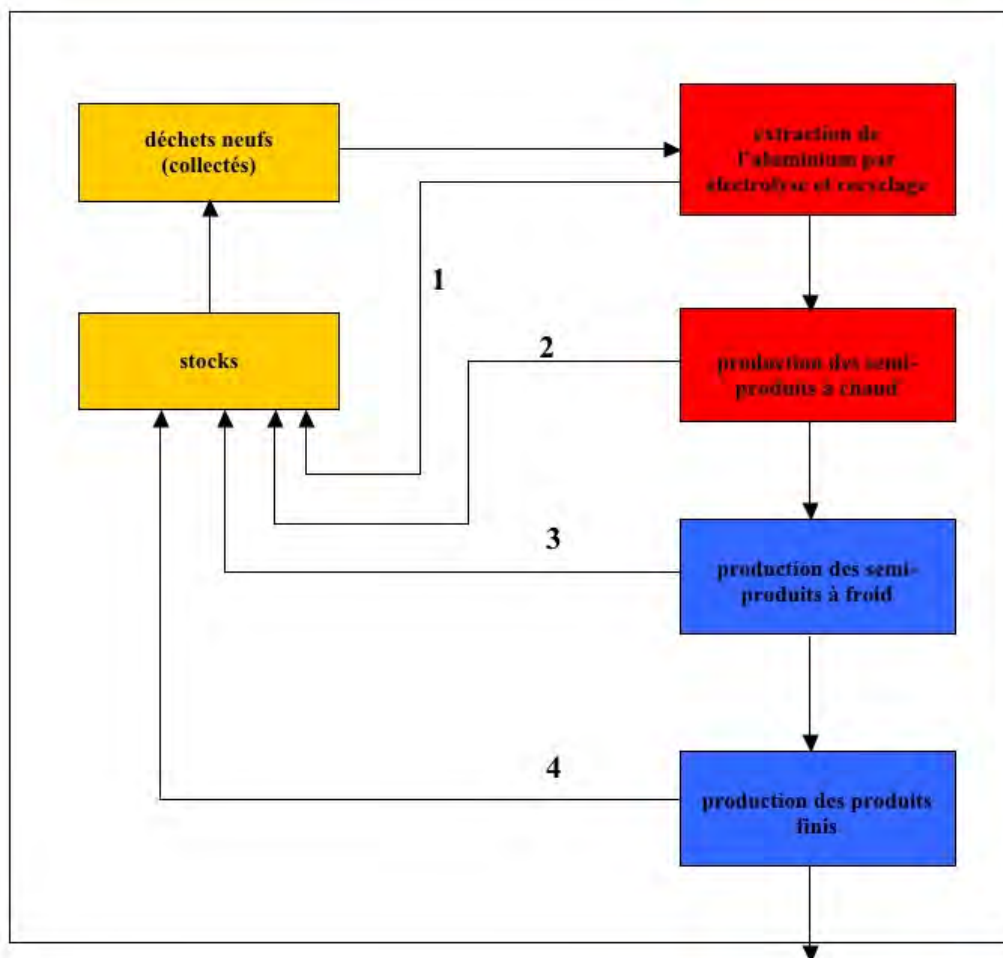
Figure 5.2 : Les étapes du recyclage (d'après IAI, Key parameters for a recycling system, PEA Munich 17-18 mars 2003)



5.2. Les déchets neufs

C'est une ressource qui ne présente aucune analogie avec le minerai car elle est formée et consommée immédiatement sans qu'il y ait stock.

Figure 5.3 : Les flux de déchets neufs (source C. Gentaz)



5.2.1. Qualité

Suivant qu'il s'agit des déchets internes apparus entre la production de l'aluminium liquide, par électrolyse et par fusion, et la fabrication des semi-produits et des déchets de transformation apparus pendant la transformation des semi-produits en produits finis, on a :

Des déchets internes : ils regroupent plusieurs types de déchets, en pratique confondus sous l'appellation de déchets internes, et nous les avons précisés pour mieux comprendre la qualité variable des déchets.

Pendant la manipulation de l'aluminium liquide (repère 1), on a des crasses et des « éclaboussures ». Les crasses, résultat de l'action de l'oxygène de l'air, contiennent seulement de l'aluminium, de l'alumine et, lorsqu'elles sont traitées pour en extraire l'aluminium, aussi des chlorures de sodium et de potassium. Les premières, dites blanches sont riches en aluminium, jusqu'à plus de 70%. Les secondes, dites grises et noires, sont moins à beaucoup moins riches (voir le chapitre 7). La composition est variable, l'aluminium est mélangé et la qualité est médiocre. Les « éclaboussures » sont de l'aluminium tombé au sol, solidifié sur les parois des

conteneurs, les poches, et dans les becs de coulée. Les formes sont très variées, l'aluminium est nu (par opposition à revêtu, voir ci-dessous) et de composition souvent connue.

Pendant la solidification de l'aluminium liquide en semi-produits à chaud (lingots, brames, semi-produits de section rectangulaire, et billettes, semi-produits de section circulaire) (repère 2), on a des chutes. Les débuts (ou têtes) et les fins (ou pieds) des brames et billettes sont toujours coupés car ils présentent toujours des structures et des compositions métallurgiques différentes de celles visées et sont impropres aux transformations ultérieures. Il s'agit toujours d'aluminium nu. La composition est connue et la qualité est bonne

Pendant la transformation par laminage et filage des semi-produits à chaud en semi-produits à froid (tôle, feuille, fil, tube, etc.) (repère 3), on a aussi pour les mêmes raisons que précédemment des chutes de coupe. L'aluminium est soit nu, soit revêtu. Le revêtement pour des raisons le plus souvent commerciales et esthétiques par un vernis, une laque, une peinture, est réalisé dans une dernière étape de finition. La composition est connue et la qualité est bonne, moins bonne lorsque l'aluminium est revêtu.

Des déchets de transformation (repère 4) : la transformation des semi-produits en produits finis se fait par de nombreuses opérations de découpage, usinage, meulage, fraisage, tournage, cisailage, sciage, ébarbage, donnant lieu à autant de déchets, allant des plus fins aux plus massifs. Beaucoup de ces opérations se font en présence d'eau, de graisses, d'huiles. La composition de ces déchets est connue, mais la qualité est seulement assez bonne et variable. Ce sont des objets de toutes les formes en aluminium nu ou revêtu, incluant aussi les produits rebutés lors des contrôles de qualité, contenant souvent de l'eau, des huiles et des graisses.

Les déchets neufs, déchets internes et de transformation réunis, ne sont jamais produits volontairement « never purposely created ». Ils sont donc fatals, on les dit aussi inévitables, et on retiendra la décroissance de la qualité en allant du déchet interne au déchet de transformation.

Pratiquement, on a une nomenclature commerciale des déchets, toutes origines confondues, où on distingue de façon détaillée les propriétés et caractéristiques suivantes :

- La composition (homogénéité, précision)
- La forme (massive, divisée, ratio surface à épaisseur)
- La propreté de mélange (humidité, poussières, corps étrangers, plastiques,

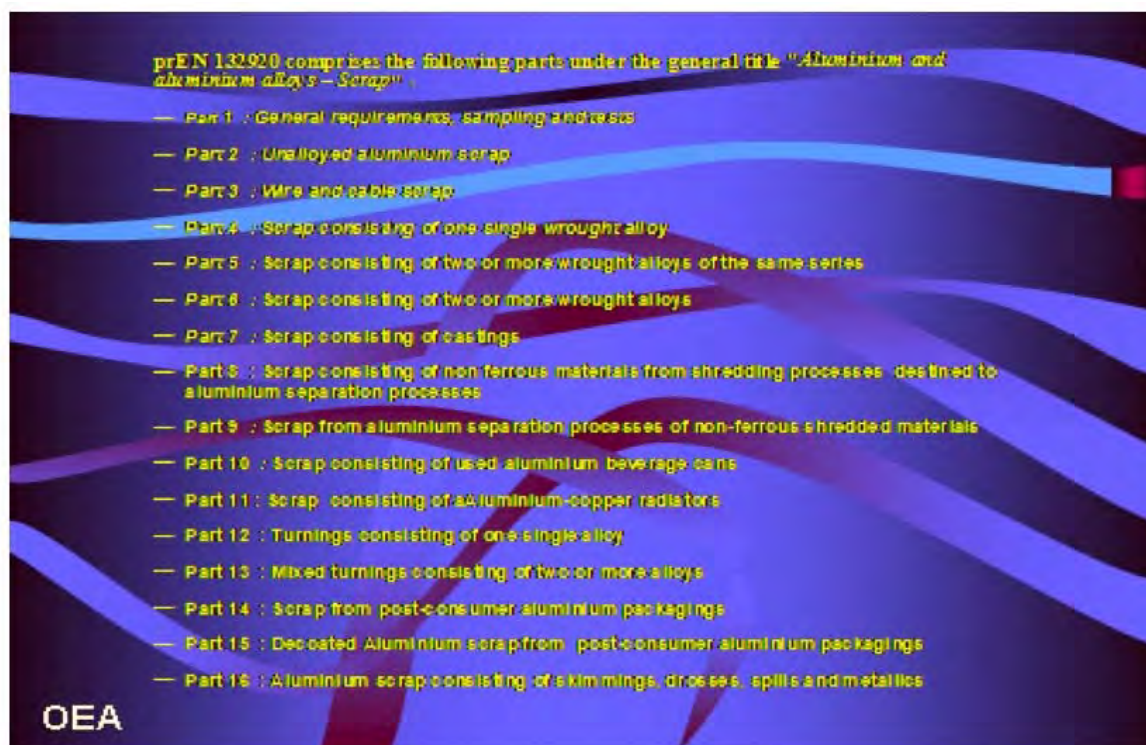
autres métaux

- Le revêtement (métal nu ou revêtu par des vernis, laques, peintures).
- Les traitements avant le recyclage diffèrent techniquement, et aussi

économiquement, de ces propriétés et caractéristiques.

En Europe, la nomenclature suivante est appliquée :

Figure 5.4 : Norme européenne, PrEN 13920-1, 10.2002. Aluminium – scrap⁽²¹⁵⁾
(matières premières pour recyclage)



Nous avons aussi reporté dans le tableau 5.3, la nomenclature encore en 2003 en usage en Suisse, où les déchets neufs sont surtout des déchets de transformation.

Tableau 5.3: Nomenclature suisse (Jaeger et Bosshard, récupérateurs Genève)

Classe	N°	Définition
N, T	1	Rognures fraîches d'aluminium non allié
N, T	2	Fils et câbles neufs d'aluminium non allié
V	3	Fils et câbles usagés d'aluminium non allié
N, T	4	Rognures séparées neuves d'aluminium
N, T	5	Rognures mélangées neuves d'aluminium
N, T	6	Rognures mélangées d'alliage d'aluminium à bas cuivre
V	7	Tôles mélangées d'aluminium de récupération
N, T	8	Déchets de tôle d'aluminium
N, T	9	Morceaux séparés de moulage, forgeage, extrusion, d'aluminium primaire
N, T	10	Morceaux mélangés de forgeage d'aluminium primaire
N, T	11	Morceaux mélangés de moulage d'aluminium primaire
N, T	12	Moulages « automobile »
N, T	13	Moulages « aéronautique »
N, T	14	Moulages mélangés
V	15	Pistons
V	16	Tôles et moulages de récupération « aéronautique »
N, T	17	Feuilles neuves
V	18	Vieilles feuilles
V	19	Tous produits à base de feuilles
N, T	20	Tournures et limailles séparées
N, T	21	Tournures et limailles mélangées
N, T	22	Gouttes
N, I	23	Meulures
N, I	24	Crasses, écumes, éclaboussures, balayures
V	25	Fils fins
V	26	Fils épais
V	27	Déchets revêtus
N, T	28	Boîtes neuves
V	29	Boîtes usagées
V	30	Tôles peintes
V	31	Radiateurs en alliage aluminium-cuivre
V	32	Conteneurs de tout type (huile, nourriture, boisson, aérosol)
V	33	Déchets « automobile » de broyage
V	34	Autres
N, I, déchet neuf interne, N, T, déchet neuf de transformation, V, vieux déchet		

Note concernant les déchets de fonderie de moulage (ou de pièces) : les procédés de fonderie conduisent en une seule opération de l'aluminium solide à un produit semi-fini à chaud très proche du produit fini. A côté des crasses et éclaboussures associées à la fusion et au maintien de l'aluminium, on a des déchets spécifiques du procédé, désignés par « retours », comprenant tout le métal solidifié contenu dans les conduits amenant le métal liquide dans le moule et évacuant l'air hors du moule, les « masselottes » et les canaux d'alimentation. Nous avons considéré qu'ils étaient des déchets internes et les avons distingués des déchets de transformation générés par les traitements de finition (meulage, tournage, ébavurage, etc..) des pièces moulées.

Les déchets internes, les retours, mais pas les crasses, sont toujours utilisés sur place comme composant de la charge métallique entrant dans le four de fusion. Les déchets de transformation et les crasses alimentent le marché des déchets.

5.2.2. Quantité

Crasses et « éclaboussures » (repère 1) : pour l'électrolyse, les quantités sont proportionnelles à la quantité d'aluminium liquide et sont très faibles, entre 0,1 et 0,2%.

Pour la fusion des déchets, les crasses blanches et noires sont beaucoup plus importantes et dépendent de la qualité du déchet et des conditions de fusion (voir le chapitre 8).

Nous rappelons que ces déchets sont toujours inclus dans les déchets internes.

Déchets internes (repères 1,2 et 3) : les quantités sont proportionnelles aux quantités de semi-produits. Cependant, les données statistiques prennent en compte seulement les quantités allant sur le marché alors que l'essentiel est recyclé en interne par ceux qui les ont produites. En dehors de quelques données publiées, très rarement utilisables, on ne sait rien.

Soucieuses de l'intérêt de la profession, les associations de l'industrie de l'aluminium ont mis en œuvre depuis 2000 des programmes d'abord pour connaître et ensuite estimer ces quantités. C'est l'étude des cycles de vie, outil nécessaire pour mesurer l'impact potentiel en terme de développement supportable, qui a permis une meilleure connaissance de ces quantités.

En Avril 2000, l'Association Européenne de l'Aluminium (European Aluminium Association, EAA) a publié un rapport « environmental profile report for the european aluminium industry » ⁽²²⁵⁾ dont quelques résultats sont résumés dans le tableau ci-après.

Tableau 5.4 : Quantité de déchets internes et pertes métal lors de leur recyclage par tonne de semi-produit à froid⁽²²⁵⁾

semi-produit	quantité de déchet interne		pertes métal au recyclage du déchet	
	kg	%	kg	%
tôle 2-5 mm	497	49,7	11	1,1
feuille 0,02-0,2 mm	859	85,9	27	2,7
feuille 0,005-0,02 mm	1.034	103,4	32	3,2
profilé	600	60	13	1,3

Ces données, les premières jamais publiées pour elles-mêmes, confirment celles antérieures, peu nombreuses, citées dans des études des techniques de fabrication des semi-produits (on a relevé par exemple 478 kg de déchets internes par tonne de profilé).

Ces quantités sont énormes, encore plus énormes comparées à celles de l'acier, environ 100 kg par tonne de semi-produit. Il est vrai qu'il y a 40 ans, c'était aussi environ 400 kg pour l'acier. Nous reviendrons sur les raisons pouvant expliquer ces différences à priori inexplicables puisque le passage du métal liquide au même semi-produit est rigoureusement identique.

Les déchets internes de la fonderie de moulage, les retours, ainsi bien nommés, retournent dans le métal liquide. L'industrie de la fonderie, tant au niveau national que mondial, bien que traditionnellement plus encline à partager ses données techniques, ne publie pas de données statistiques sur ses déchets internes. Nous avons pu extraire les données suivantes des nombreuses communications techniques ; les quantités de déchets internes sont, pour les retours, comprises entre 300kg et 500 kg par tonne de pièces finies (la charge métallique est toujours composée de lingot, ou de métal liquide, généralement pour 50 à 60% et de retours pour 40 à 50%) et pour les crasses entre 1 et 4% de l'aluminium coulé, soit entre 15 et 60 kg par tonne de pièces finies.

Déchets de transformation (repère 4) : Les quantités sont proportionnelles aux quantités de produit fini et dépendent du procédé de fabrication : emboutissage, extrusion, laminage, moulage. A ces quantités, il faut ajouter les quantités de produits

rebutés au contrôle de qualité, représentant au plus quelques pourcents de la production.

Les données sont difficiles à obtenir car les applications sont très nombreuses, les opérateurs industriels n'appartiennent pas le plus souvent à l'industrie de l'aluminium et l'efficacité de la transformation est une donnée très souvent confidentielle. Les quantités sont donc estimées et sont corroborées de façon satisfaisante si le même produit est aussi fabriqué à partir d'acier car l'industrie de l'acier communique plus volontiers de telles données. Par exemple, les étapes de la fabrication de la boîte boisson métallique à partir de la feuille d'acier ou d'aluminium sont très semblables et on a les mêmes ratios de déchets de transformation, environ 30% de la masse d'acier ou d'aluminium de la boîte finie.

Nous avons admis des ratios compris entre 5 à 10%, pour les produits faits à partir des profilés, 5 à 30% pour ceux faits à partir des laminés et 2 à 6% pour les produits moulés. On observe des ratios plus élevés, entre 500 et 1.000%, dans l'application aéronautique.

A partir de ces ratios et de la segmentation des produits (38% de produits laminés, 30% de produits extrudés, 26% de produits moulés et 6% d'autres produits, fils, poudres) nous avons calculé les quantités de déchets internes et de transformation dans l'Union Européenne en 2003.

Nous arrivons à un total de 5,3 Mt de déchets neufs en accord avec l'estimation de l'« European Aluminium Association ». Par contre, on calcule une quantité de déchets internes plus importante, 4,07 Mt comparée à l'estimation de 3,7 Mt, et une quantité de déchets de transformation plus faible, 1,25 Mt pour 1,6 Mt.

Tableau 5.5 : Création de déchets neufs (millions de tonnes) dans l'Union Européenne en 2003 (source C. Gentaz)

produit quantités (Mt)	total	laminés (rolled)	extrudés (extruded)	moulés (cast)	autres (fil, poudre)
quantité de produits finis	9,4	3,7	2,3	2,6	0,8
pourcentage de déchets de transformation (%) par tonne de produit fini	13,3	20	15	5	5
quantité de déchets de transformation	1,25	0,74	0,34	0,13	0,04
quantité de semi- produits	10,65	4,44	2,64	2,73	0,84
pourcentage de déchets internes par tonne de semi-produit	38,2	50	60	10	0
quantité de déchets internes	4,07	2,22	1,58	0,27	0
quantité totale de déchets neufs	5,32	2,96	1,92	0,40	0,04

5.2.3. Collecte et flux

Ces caractéristiques sont les mêmes pour tous les déchets neufs, internes et de transformation. Les flux entrant et sortant sont égaux aux pertes près pendant la manutention des déchets. La collecte est toujours faite par nuance, série, alliage sur les lieux de production par les producteurs ou par des prestataires de services. Les taux de collecte, le ratio du flux sortant par le flux entrant, sont très élevés, certainement plus de 95% pour les déchets internes et plus de 90% pour les déchets de transformation, car ceux-ci, de plus petites dimensions, sont de nature plus variée que les déchets internes. Cependant, selon certains auteurs, on pourrait avoir des taux inférieurs.

5.2.4. Stock et délais

5.2.4.1. Délai entre création du déchet et collecte

Le délai est nul pour tous les déchets neufs, la collecte étant faite immédiatement sur place.

5.2.4.2. Délai entre collecte et fusion

Pour les déchets internes du transformateur à chaud, la fusion a lieu sur place puisqu'il dispose d'un outil de fusion et le délai est de quelques jours. Le transformateur à froid, ne disposant pas d'outil de fusion, envoie ses déchets internes au transformateur à chaud qui lui a fourni les semi-produits à chaud, à un industriel de la fusion, ou à un négociant de déchets. Le délai est un peu plus long, de quelques jours à quelques semaines

La situation est la même pour les déchets de transformation avec la même contrainte d'outil de fusion aggravée par la qualité, surtout si l'aluminium est revêtu : l'installation de fusion est plus complexe car elle demande des installations de traitement des gaz. Le délai reste court et se chiffre au plus en semaines.

5.2.4.3. Stock

Ils sont très faibles de quelques jours à au plus quelques semaines. Ils varient très peu car le niveau d'activité de la fusion est aligné sur celui de la production des semi-produits et produits.

5.2.5. Marché

Les déchets internes du transformateur à chaud ne vont pas sur le marché, ceux du transformateur à froid peu, et ceux de transformation proprement dit, un peu plus. Faute de données, on est limité à cette appréciation qualitative. Entre le marché et les producteurs de déchets, on a un intermédiaire, le négociant, appelé aussi ferrailleur, qui revend le déchet à l'industrie du recyclage des vieux déchets.

Le débouché principal et naturel des déchets neufs est la chaîne de fabrication des produits où ils sont apparus et le marché de ceux commercialisés est celui d'un succédané de l'aluminium électrolytique. L'exception, ce sont les crasses et les déchets d'usinage, qui, bien que par définition des déchets neufs, mais des déchets neufs de médiocre qualité, vont sur le marché des vieux déchets.

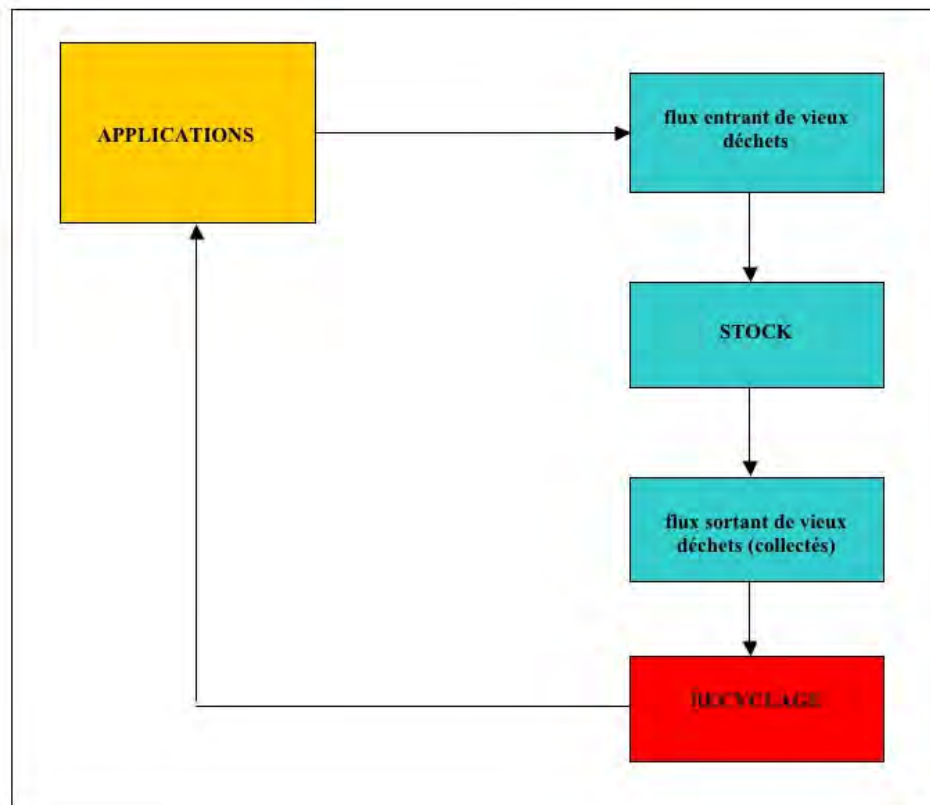
Compte tenu du délai très court entre l'apparition du déchet neuf et son recyclage, au plus quelques semaines pour les déchets de transformation, nous considérons qu'offre et demande sont équilibrées à tout moment au niveau mondial. Par contre,

on a des déséquilibres locaux créés par le commerce international des déchets en général, vieux et neufs confondus.

5.3. Les vieux déchets

C'est une ressource qui présente des analogies avec le minerai, le stock par exemple qui est un gisement, mais aussi des différences, le flux permanent de formation de la ressource.

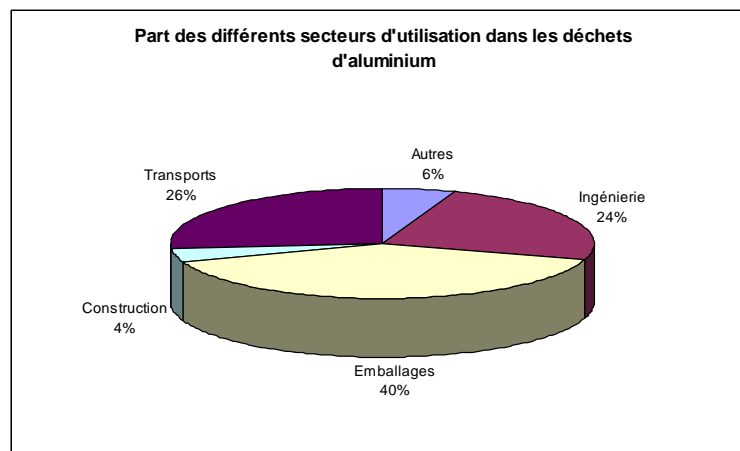
Figure 5.5 : Les flux de vieux déchets (source C. Gentaz)



On parle de vieux déchets en général. Il n'y a pas de classement des vieux déchets alors qu'on pourrait envisager de le faire par application, par catégorie d'application (usage industriel, individuel, collectif), par durée de vie de l'application, par dimension.

La littérature donne cependant des représentations, telles celles de la figure 5.8 de la répartition du flux de vieux déchets par application.

Figure 5.6 : Les vieux déchets d'aluminium dans le monde par application (Jürg Gerber, Aluminium Recycling, the global dimension – an update, 8th. International OEA Aluminium Recycling Congress, mars 2005) ⁽¹¹⁵⁾



5.3.1. Qualité

Les vieux déchets sont des produits finis après usage, par exemple des composants des véhicules automobiles et des ordures ménagères. Tous déchets de consommation, nous avons renoncé à la distinction parfois faite entre déchets de biens durables (durable goods) et déchets ménagers (household wastes), puisqu'il s'agit seulement d'une différence de durée de vie du produit. Ils sont le plus souvent mélangés avec d'autres alliages d'aluminium, d'autres métaux, des produits organiques, matières plastiques, et inorganiques, verre et d'autres composés chimiques. La qualité est le plus souvent inconnue, très variable et donc assez médiocre. Par contre, lorsqu'ils sont sélectivement collectés, les vieux déchets tels les boîtes boisson, les câbles électriques de puissance, la menuiserie, etc. ont une qualité connue qui reste cependant médiocre car ce sont des produits vernis, laqués, peints et enrobés et, malgré le soin apporté à la collecte, on a d'autres matériaux présents en faibles quantités.

Pratiquement, on utilise la nomenclature précitée en usage pour les déchets neufs.

5.3.2. Quantité et gisement

On a des données statistiques fiables dans tous les pays industrialisés à la condition qu'il y ait une transaction commerciale connue.

La quantité de vieux déchet est proportionnelle à la consommation de l'aluminium avec un décalage dû aux durées de vie des produits. C'est dans les années 1980 que les quantités de vieux déchets ont commencé à augmenter significativement, correspondant à l'explosion de la consommation des années 1960. Leur connaissance et à fortiori leur prévision restent des exercices difficiles car

consommation, produit et durée de vie, sont variables dans le temps et dans l'espace.

On appelle gisement la quantité d'aluminium immobilisée dans les applications en cours et dans les vieux déchets non encore recyclés et c'est à partir de ce gisement que se forme en permanence le flux de déchets allant vers les installations de recyclage. Cette information est utile dans la mesure où elle permet de connaître le flux entrant et de savoir s'il existe un stock dormant de vieux déchets pouvant aussi alimenter le flux sortant.

L'importance du gisement est très variable suivant les auteurs, les hypothèses et les modes de calcul. L'International Aluminium Institute estime que la quantité d'aluminium en usage dans le monde est comprise entre 400 et 500 millions de tonnes d'aluminium, ALCOA l'évalue à 485 millions de tonnes (et à 750 millions de tonnes la production électrolytique depuis 1886), ALCAN à 400-500 millions de tonnes (et 660 millions de tonnes électrolytiques produites de 1890 à 2001). Malgré l'écart important entre les quantités d'aluminium électrolytique évaluées par ALCOA et ALCAN, l'opinion générale prévaut pour estimer à environ 450 MT dans le monde la quantité d'aluminium immobilisée dans ses applications. Cependant, beaucoup d'incertitudes sur les durées de vie, sur la demande de déchets, sur l'évolution du prix du déchet, rendent très imprécis l'évaluation quantitative du flux.

Nous avons utilisé un modèle simplifié (voir les résultats dans le tableau 5.6 ci-dessous) où nous avons admis que la consommation mondiale avant 1950 était négligeable et que, depuis 1950, les durées de vie moyennes, les taux de collecte et la répartition des marchés par application étaient constants.

Nous avons considéré une durée moyenne du cycle de vie, toutes applications confondues, d'environ 17 ans (21 ans hors emballage), une durée qui a justement tendance à raccourcir avec le développement de l'emballage et d'une partie des emplois divers (tout ce qui est soumis à la mode, les articles de sport, le mobilier par exemple).

Tableau 5.6 : Etat en 2000 des quantités mondiales d'aluminium (millions de tonnes) en cours d'usage, devenues déchets et collectées (source C. Gentaz)

application	% marché 2000 (32 Mt)	durée cycle de vie (année)	année de fabrication et délai en années depuis 1950	quantité immobilisée dans les applications	quantité de déchets produits	taux de collecte (%)	quantité de déchets collectés
Transports	25	16,2	1984 (34)	95	82	65	56
dont							
Aéronautique	1	30	1970 (20)	6	1	0	0
Ferroviaire	1	30	1970 (20)	6	1	70	0,7
Automobile	22	15	1985 (35)	79	77	70	53,9
Marine	1	15	1985 (35)	4	3	50	1,5
Emballage	20	1	1999 (49)	6	137	30	41
Bâtiment	20	35	1965 (15)	129	13	0	0
Electricité	10	30	1970 (20)	60	11	100	11
Divers	25	10	1990 (40)	63	114	70	80
Total				353	357		188

Au bilan, nous confirmons que :

- la production cumulée d'aluminium depuis l'origine est bien d'environ 750 Mt.
- la quantité d'aluminium immobilisée dans les applications en cours, le gisement, est d'environ 400 Mt, plus de la moitié de la production depuis l'origine, en 1886.

Nous ajoutons que :

- la quantité de déchets produits depuis l'origine est d'environ 350 Mt.
- la quantité collectée a été de 190 Mt (taux de collecte de 53%), soit 170 Mt recyclées et 20 Mt perdues pendant le recyclage principalement dans les crasses.

Et nous concluons que

- l'application bâtiment représente avec près de 40% la plus grosse part de la quantité d'aluminium immobilisée.

- on a perdu environ 180 Mt, la majeure partie pour ne pas pouvoir être collectée (dans les décharges autorisées et sauvages, dans les mâchefers d'incinération mis en terfil sans traitement, etc.). Une partie demeure encore accessible et pourra alimenter le flux des vieux déchets entrant dans le recyclage.

Nous estimons que, toujours par analogie avec le fer, on pourrait récupérer 70% de la quantité théorique alors qu'aujourd'hui c'est de l'ordre de 40%, un accroissement que confirment de nombreux experts pour lesquels on pourrait de suite augmenter la récupération d'environ 20%.

- le flux de déchets alimentant les affineurs a reposé historiquement sur les déchets divers et l'automobile.

- les caractéristiques diamétralement opposées de deux applications importantes, l'emballage, producteur de déchets, et la construction, stockeur de produits dans le gisement.

5.3.3. Collecte et flux

La connaissance des flux est imprécise. D'abord, on ne connaît pas exactement le gisement d'aluminium en cours d'utilisation car, si les données de consommation incluent bien les importations/exportations de produits finis, la quantité d'aluminium contenu dans des produits finis multi-matériaux peut ne pas être comptabilisée (cas d'un véhicule automobile, d'un appareil électroménager). Ensuite on ne connaît pas précisément le flux de produits en fin de vie entrant dans le stock en tant que vieux déchets. On peut cependant l'estimer à partir des cycles de vie, de la durée de vie (moyenne et écart type) des produits, sous réserve de connaître aussi les parts de marché tout au long de la durée de vie. Enfin, on connaît approximativement le flux total sortant car la segmentation par flux spécifique de produit n'est pas toujours possible et la saisie de la donnée, même commerciale, n'est pas systématique. La mise en place de dispositions législatives destinées à connaître ces flux, ainsi dans l'automobile, l'emballage, demain dans la construction, l'électroménager, etc. est en cours mais il faudra attendre encore quelques années avant de disposer de résultats complets.

La collecte, souvent associée au tri, plus exactement à un pré-tri, est spécifique des vieux déchets en général. En effet, elle concerne non seulement l'aluminium, mais aussi tous les métaux et tous les matériaux. Elle est donc « généraliste » et est spécialisée seulement dans certains cas de collecte sélective. A la différence des

déchets neufs, les vieux déchets ne sont ni immédiatement, ni systématiquement collectés par nuance sur les lieux de production (qui sont ceux de la consommation ou de l'après consommation), donc très dispersés dans l'espace (les zones urbaines, à forte densité de population, sont plus favorables que les zones rurales). Conséquence de l'évolution formidable de la société depuis un demi-siècle, la collecte est en pleine mutation et nous avons résumé ainsi les périodes ayant, à notre avis, marqué cette évolution.

Jusqu'en 1950-1960, la collecte était l'initiative des « ferrailleurs » tant artisanaux qu'industriels et portait d'abord sur des objets ménagers (poêle, casserole), puis sur des objets très divers lorsque l'aluminium est devenu un produit de consommation courant, pour les ménages (emballage, menuiserie, automobile, loisir) et pour l'industrie (électricité, bâtiment, tous les transports). Dans les années 1970-1980, les vieux déchets, surtout ceux des ménages en raison de leur durée de vie très courte (emballage) ou courte (produits imposés par la mode, avec une durée d'au plus 10 ans), finissaient dans les ordures ménagères ou dans une décharge souvent sauvage. Seule l'automobile échappait au gaspillage grâce au fer contenu et, avec la croissance des quantités d'aluminium contenu dans l'automobile, le « ferrailleur » industriel s'est vite rendu compte que l'aluminium faisait son bénéfice après la vente de l'acier et de la fonte.

C'est à partir des années 1980-1990, que la collecte a entrepris sa mutation lorsque le ferrailleur artisanal a cédé la place au ferrailleur industriel. Pendant cette période, on a pris conscience qu'on allait être submergé sous l'avalanche des déchets. Alors que les modes de consommation n'étaient pas modifiés, on a invité les consommateurs à faire preuve de civisme et on a commencé à créer des centres de stockage et pré-tri : les déchetteries. On a généralisé, même dans les campagnes les plus reculées, le ramassage des ordures ménagères, mais celles-ci, faute d'installations de traitement, finissaient cependant souvent dans des décharges dites contrôlées. Très vite, on a alors développé des centres de traitement industriel, souvent par incinération. C'est pendant cette période qu'a été créé le marché de la boîte boisson en aluminium aux U.S.A., puis en Europe.

C'est aussi dans les années 1980 que sont apparus les premiers vieux déchets de l'industrie, les câbles à haute et moyenne tensions posés dans les années 1950. Très vite, une collecte obligatoirement sélective s'est mise en place et ils ont été recyclés par l'industrie des câbles au même titre qu'un déchet neuf.

Aujourd'hui dans les années 2000, pour rendre la collecte encore plus efficace, elle devient une obligation légale et concerne, en Europe, les automobiles, en partie les emballages, demain probablement la construction. En parallèle, se poursuivait la

mutation du métier de la collecte, devenu indissociable d'un pré-tri et du négoce des métaux, et le ferrailleur est devenu un industriel de la récupération avec, pour certains, une dimension internationale.

De tous les déchets, ceux d'aluminium sont probablement les plus concernés par cette évolution, en raison de l'obligation de tri.

En effet, jusqu'à maintenant, la fonderie d'aluminium a été seule à pouvoir utiliser l'aluminium recyclé à partir des vieux déchets, le plus souvent mélangés, faute d'une collecte sélective. C'est le recyclage ouvert (open loop), puisque les déchets vont dans la fabrication d'autres produits.

C'est avec le développement de l'aluminium dans l'automobile et dans la boîte boisson, dans les années 1980, qu'est apparu le recyclage fermé (closed loop) rendu possible par la collecte sélective. Fortuitement, le hasard a bien voulu que les alliages de ces déchets appartiennent tous à la même série (série 4.000 pour l'automobile), ou, bien que de nature différente, soient capables de donner l'alliage principal (la boîte boisson). La construction sera aussi dans ce cas, les déchets appartenant tous à la même série d'alliages.

Enfin, on a vu qu'en l'état actuel de la technique, le tri, distinct du pré-tri grossier qui sépare l'aluminium des autres métaux, reste un pré-tri complémentaire. Il faudra un tri final, dans l'usine de recyclage, pour séparer les alliages d'aluminium et de tels procédés de séparation sont en passe de devenir industriel.

La tendance est claire : la collecte non sélective, le recyclage ouvert, perdra de son importance au profit de la collecte sélective, le recyclage fermé. La collecte va dépendre du déchet, d'abord caractérisé par son volume, son contenu en aluminium, sa facilité de recyclage et sa concentration spatiale.

Lorsque le déchet est très encombrant et/ou concentré spatialement, il est collecté immédiatement au passage de l'état de produit à celui de déchet. C'est aujourd'hui l'automobile, le câble électrique, demain les produits de la construction. Leur collecte est toujours prise en charge par un professionnel lequel se charge du démontage éventuel pour isoler la partie en aluminium. On a un chemin de collecte court et le recyclage est du type fermé, les déchets allant dans la chaîne de fabrication des mêmes produits.

Lorsque le déchet est léger et/ou peu encombrant et dispersé spatialement, c'est le cas des déchets ménagers avec les applications de l'aluminium de grande consommation, l'emballage, le petit électroménager (une poêle, un fer à repasser) et grand (un réfrigérateur), le mobilier, les équipements de loisir (un bâton de ski, une trottinette). La collecte repose au départ sur un acte individuel transformant le déchet

en aluminium recyclé et s'arrêtant au premier centre de stockage, un sac poubelle dédié ou non, une déchetterie. Cet acte individuel, ce bon vouloir peut être obtenu de façon très différente : elle peut être gratuite, rémunérée, contrainte par loi et payante.

Le bon vouloir gratuit fait appel à la responsabilité du citoyen consommateur encouragée par la référence aux grands thèmes sensibilisateurs, protection de l'environnement, changement climatique, développement supportable et solidarité.

Une variante est le dépôt (ou consignation), largement utilisé pour les emballages ; ce bon vouloir, encouragé par la gratuité puisque le dépôt est remboursé lorsque l'emballage est remis au point de collecte, est réputé efficace : en Suède, le taux de collecte de la boîte boisson est de 85% et le dépôt non récupéré, les 15% manquant soit environ 350 US\$/t de boîte collectée, rémunèrent les commerçants et grossistes qui abritent les points de collecte.

Le bon vouloir rémunéré, ce fut la solution retenue par l'industrie de l'aluminium aux USA avec la boîte boisson car il fallait atteindre très vite les taux de collecte élevés retenus pour son développement commercial (et on a très vite atteint plus de 65%). Depuis, la rémunération a fortement baissé sans cependant beaucoup d'effet sur le taux de collecte qui est cependant revenu aux environs de 60%.

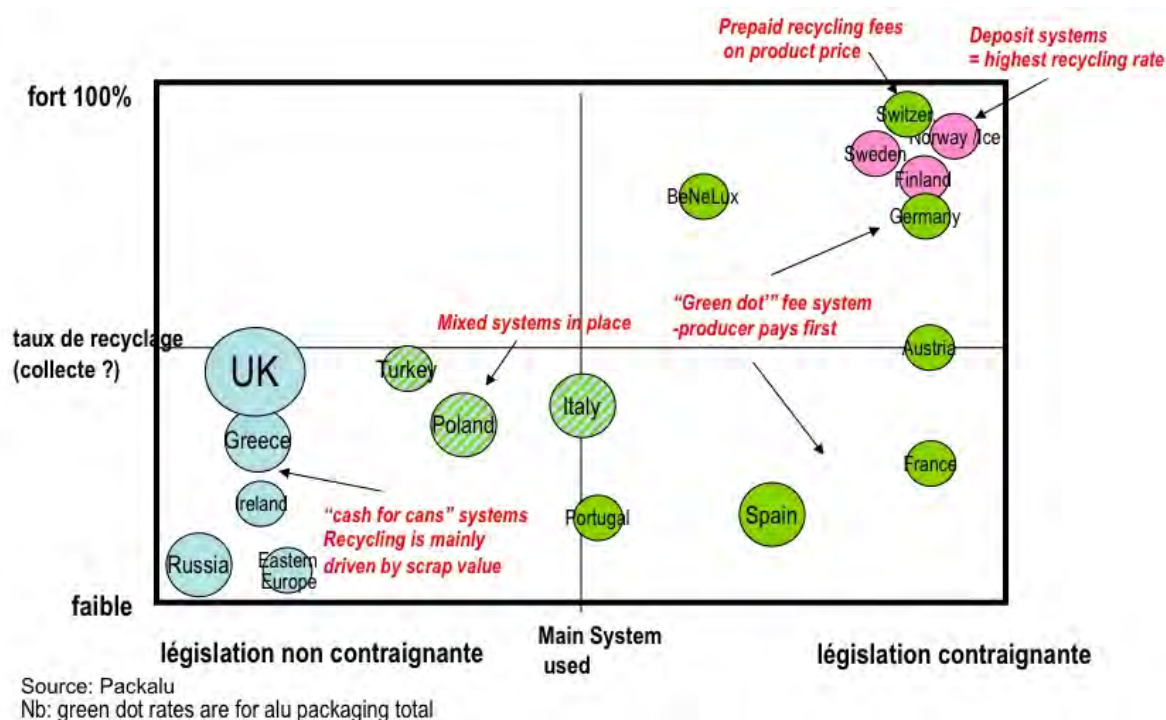
Le bon vouloir contraint est imposé par la législation, l'enfreindre, c'est le plus souvent être passible d'amende et c'est pourquoi on le confond souvent avec le bon vouloir payant.

Le bon vouloir payant, introduit depuis une quinzaine d'années, en particulier en Europe, ce sont les différentes taxes ou impôts. Elles peuvent être acquittées à l'achat du produit, - ce sont des taxes de recyclage -, ou à la formation du déchet,

- ce sont des taxes d'ordures ménagères et d'utilisation des centres de stockage -. Elles ont peu d'effets sur la collecte et ont surtout contribué à créer un ensemble fonctionnellement et juridiquement opaque avec l'effet évident d'avoir favorisé le passage du ferrailleur artisanal au récupérateur industriel.

Dans ces collectes encadrées, soit par les autorités publiques, soit par les industriels, les taux de collecte sont toujours élevés, plus de 60%. Une étude récente, reportée dans la figure ci-dessous, a évalué la relation entre la collecte et la législation.

Figure 5.7 : Recyclage (collecte) et législation en Europe (OEA, Munich, mars 17-18 2003) ⁽¹¹⁵⁾



La mutation de la collecte s'est poursuivie avec le tri pour isoler le déchet d'aluminium. Celui des déchets ménagers dépend de la filière d'élimination. Dans la décharge, le déchet est perdu, dans le compostage et l'incinération, on peut isoler le déchet d'aluminium en amont (compostage et incinération) et/ou en aval (incinération et traitement du mâchefer). Tous ces traitements sont faits par des professionnels publics, les collectivités locales, et privés, récupérateurs et grands groupes industriels.

Un autre effet de tous ces changements, c'est la simplification du travail de celui rémunéré pour faire la collecte et le tri puisque son travail commence avec des déchets de plus en plus collectés et pré-triés. Le ferrailleur est devenu ainsi un exploitant de matières premières qui stocke, classe, pré-trie les matériaux entre eux, puis vend le déchet trié à des consommateurs ou à des marchands nationaux et internationaux.

Le taux de collecte, qu'on peut calculer par produit, par application, toutes applications confondues, est évidemment estimé puisque les flux de produits en fin de vie le sont aussi. Dépendant des sources de données, des auteurs, l'écart entre les valeurs maximum et minimum peut être très grand et c'est ce qu'on constate dans le tableau ci-après.

Tableau 5.7 : Taux de collecte des vieux déchets d'aluminium par application donnés par la littérature en Europe en 2000 et comparés avec ceux d'acier (données 2003 et objectifs 2010) ⁽²¹⁶⁾

marché	emballage	construction	électricité	électroménager	transports				autres
					aérien	automobile	maritime	ferroviaire	
part de marché (%)	20	20	10	10	1	27	1	1	10
durée de vie (années)	< 1	40 +/- 20	30 +/- 10	10 +/- 3	30 +/- 10	13 +/- 4	15 +/- 4	25 +/- 8	10 +/- 3
taux de collecte (%)									
- maximum	60	90	90	70	30	90	30	70	60
- minimum	25	15	10	20	10	70	10	50	50
taux de collecte (%)									
- de l'acier en 2003	48	68		65		95			
- de l'acier en 2010	75	80		90		98			

Plusieurs remarques :

i) Le taux de collecte, toutes applications confondues et après pondération par la part de marché, est compris entre 50 et 70 % de la production d'il y a environ 22 ans, durée de vie moyenne aussi toutes applications confondues. Il n'a évidemment aucune signification sinon de confirmer la durée de vie moyenne des produits en aluminium¹.

ii) Le taux de collecte de l'acier, toutes applications confondues, est de 65% en 2003, valeur comparable à celle de l'aluminium. Les objectifs visés en 2010 conduisent à un taux d'environ 75%, grâce à des objectifs ambitieux concernant les applications dans le bâtiment, l'électroménager et l'emballage.

(iii) Certains taux de collecte nous paraissent trop faibles ou trop forts. Trop faibles,

¹ En France, en 1992, on calcule un taux de collecte, quantité collectée (315.000 t) par gisement théorique (450.000 t) d'environ 70%.

c'est le cas de l'application aéronautique, probablement parce que le marché géographique des matériels aéronautiques d'occasion est rarement celui des matériels neufs et que ces commerces sont rarement connus.

Trop forts, ce sont ceux supérieurs à 100% lorsque le flux sortant est supérieur au flux entrant, situation de déstockage le plus souvent déclenchée par des prix élevés du déchet ou par des incitations réglementaires, par exemple un prix de reprise élevé du véhicule ancien à l'achat d'un véhicule neuf.

Des valeurs élevées, près de 90%, du taux de collecte du bâtiment ont été confirmées par des études très récentes, rendant inexplicable la très grande dispersion entre le maximum et le minimum. L'effet sur le taux de collecte, toutes applications confondues reste faible car c'est la production d'il y a 40 ans, peu importante alors, qui arrive aujourd'hui sur le marché des vieux déchets.

Le médiocre taux de collecte de l'emballage a par contre un effet important, car cette fois c'est la production d'emballages de l'année en cours et il dégrade le taux de collecte, toutes applications confondues.

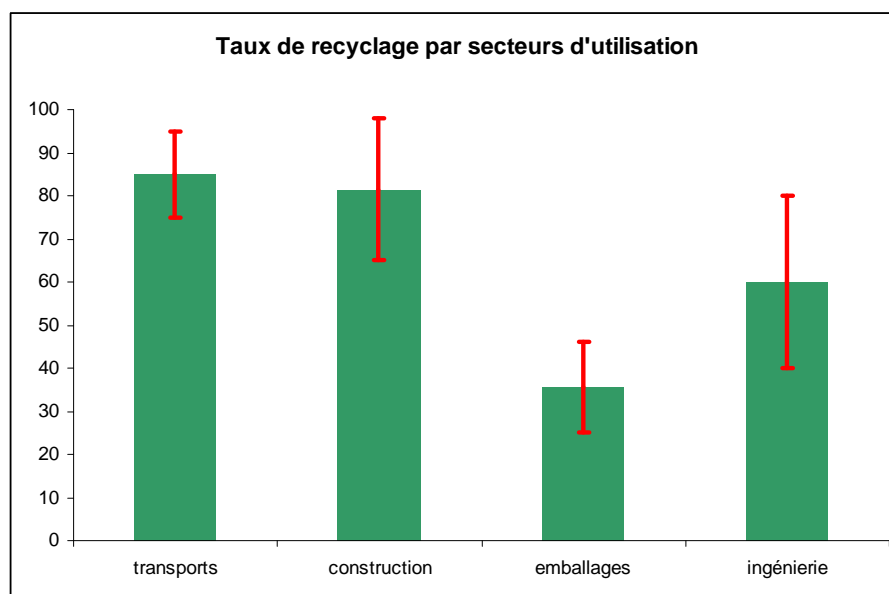
(iv) Les taux de collecte par application de l'acier et de l'aluminium sont le plus souvent semblables et lorsqu'il y a des différences elles sont explicables.

Par exemple, l'application de l'acier dans l'emballage concerne uniquement les emballages rigides (les boîtes). Celle de l'aluminium comprend aussi les emballages souples (les tubes, les feuilles), ces derniers mal collectés, alors que la répartition quantitative entre les deux emballages est très voisine.

Par exemple, l'application de l'acier dans le bâtiment concerne pour une part importante les armatures d'acier du béton qui, au moment de la démolition se retrouvent avec les gravats et vont encore souvent à la décharge.

Par contre les différences observées dans l'application automobile sont inexplicables car les deux matériaux sont présents dans la même automobile collectée. Les taux de collecte des véhicules hors d'usage sont, au moins en Europe, connus précisément depuis la mise en place de directives fixant les taux de collecte à 85% en 2005 et 95% en 2015.

Figure 5.8 : Taux de recyclage (en réalité de collecte, la confusion recyclage / collecte étant très répandue) par secteurs d'utilisation⁽²¹⁵⁾



5.3.4. Stock et délais

- Délai entre création du déchet et collecte

Le délai, plutôt court, est très variable, de quelques jours, les ordures ménagères contenant par exemple des emballages, les boîtes boisson sélectivement collectées à quelques semaines, les véhicules hors d'usage.

- Délai entre collecte et fusion

Le délai court, autour d'un mois, dépend des conditions surtout économiques (financement du stock, spéculation à la hausse ou à la baisse du prix du déchet).

- Stock

Il peut seulement être estimé car il comprend, à côté d'un stock utile de vieux déchets accessibles, des stocks, l'un fictif de vieux déchets perdus à tout jamais, l'autre potentiel de vieux déchets qui seront collectés si les conditions s'y prêtent. Nous considérons qu'il y a eu historiquement un déséquilibre structurel entre flux entrant et flux sortant, celui-ci bien inférieur, avec pour conséquence une augmentation du gisement.

5.3.5. Marché

Le marché des vieux déchets dépend d'abord de leur qualité, mélangée ou non.

Les vieux déchets mélangés de la collecte non sélective sont transformés en alliages de fonderie dont le marché principal, pour 70%, est l'industrie automobile. L'autre

marché, environ 5%, est celui des produits standards de désoxydation de l'acier, les lingotins, majoritairement utilisés (les produits élaborés, fil, poudre, sont eux fabriqués à partir d'aluminium électrolytique).

Le marché des vieux déchets sélectivement collectés est celui des produits ou de la même famille de produits dont ils sont issus à leur arrivée en fin de vie. Si les conditions de marché et de qualité du produit à fabriquer le permettent, c'est donc dans la chaîne de production dont ils sont issus qu'ils seront recyclés. Aujourd'hui, sont ainsi concernés en partie les boîtes boissons, les câbles électriques et l'automobile.

Les boîtes boissons : avec des délais de quelques semaines, entre la production de la boîte neuve et son apparition comme vieux déchet, elles appartiennent par leur qualité à la classe des déchets de transformation, des découpes de tôle mince et des boîtes rebutées. La qualité est médiocre malgré un contenu d'aluminium élevé car en plus des laques et vernis elles contiennent toujours de l'eau, tant à l'intérieur (résidu de boisson) qu'à l'extérieur (intempéries) de la boîte. De plus, pour certaines boîtes on a deux alliages d'aluminium, l'un pour le corps cylindrique, l'autre pour le couvercle.

L'offre et la demande sont en permanence quantitativement équilibrées autour d'une valeur fixée par le taux de collecte, des contraintes techniques (nous estimons que la proportion maximale de boîte usagée admissible dans la charge du four de fusion produisant l'alliage destiné à faire la boîte neuve correspond à un taux de collecte d'environ 60%), éventuellement des incitations économiques (taxe de recyclage, rémunération de la collecte par l'industrie des emballages en aluminium).

Lorsque l'offre, les boîtes collectées, est supérieure à la demande, la quantité recyclée dans la production des boîtes, l'excédent va sur le marché des vieux déchets mélangés, celui des alliages de fonderie produits par l'affineur. La collecte sélective aura conduit alors aux deux modes de recyclage, la boucle fermée et la boucle ouverte.

Les câbles électriques à haute et moyenne tension : ceux-ci, avec une durée de vie d'environ 30 ans, sont bien un vieux déchet. La collecte sélective associée à des spécifications de l'aluminium pour câble pratiquement constantes depuis 30 ans, garantit une qualité homogène mais cependant médiocre qui est aussi celle des câbles rebutés au contrôle de qualité car les câbles sont enrobés (tissus, films, isolants, soit de nombreux produits minéraux et organiques), ce à quoi s'ajoute la présence d'eau (intempéries).

L'offre est inférieure à la demande car l'efficacité de la collecte, bien qu'élevée, n'est pas totale et surtout parce qu'on consomme aujourd'hui beaucoup plus de câbles qu'il y a 30 ans. L'équilibre se fait essentiellement sur des bases économiques, de fait le coût important des postes prétraitement et environnement occasionné par la nature technique du vieux câble.

L'automobile : la durée de vie est comprise entre 10 et 15 ans avec une moyenne d'environ 13 ans et la collecte des véhicules automobiles hors d'usage est devenue sélective. La plus grande part de l'aluminium utilisé dans l'automobile est représentée aujourd'hui par les alliages de fonderie utilisés, avec des compositions variables, dans des pièces très variées (principalement le moteur) qui, devenues déchets mélangés d'alliages, retournent dans des pièces dont les applications sont les moins exigeantes et aussi les plus importantes quantitativement. Les produits en aluminium représentent une proportion croissante du véhicule automobile et on est passé en quelques dizaines d'années de quelques pourcents à plus de 10% car l'aluminium s'est imposé par ses qualités de durée, de légèreté et de recyclage, trois axes du développement supportable. Encore aujourd'hui, l'offre de déchets automobiles est inférieure à la demande de pièces automobiles.

Depuis de nombreuses années, on s'interroge sur l'opportunité d'utiliser l'aluminium dans la structure, le châssis et la carrosserie. De telles applications sont déjà rentrées dans les faits, par exemple des produits laminés dans la carrosserie, mais sont encore mineures. A côté de beaucoup d'avantages, peu d'inconvénients majeurs sont avancés, le seul étant le recyclage car, comme ces pièces ne sont pas des alliages de fonderie, il faudra séparer des alliages différents.

Dans ces trois exemples, boîte, câble et automobile, le marché du produit neuf est en principe à même de recycler ses vieux déchets dans la chaîne de production. Quantitativement, en raison des taux de collecte toujours inférieurs à 100% et des quantités produites, toujours très supérieures à celles à l'origine des vieux déchets (effet de la durée de vie des produits, sauf la boîte boisson), l'offre équilibre la demande fixée par des considérations de qualité parfois et économiques toujours, le plus souvent en relation avec la qualité (prix du déchet, coût de la collecte, coûts du prétraitement et des dispositifs anti-pollution).

Lorsque l'offre excède cette demande, les vieux déchets alimentent le marché des alliages de fonderie, celui d'exportation ...ou ne seront plus collectées, finissant dans les décharges contrôlées (ordures ménagères incluant celles incinérées dont les mâchefers ne sont pas valorisés) et sauvages.

Aujourd'hui, malgré des taux de croissance plus qu'honorables, ces marchés sont-ils capables d'absorber des quantités croissantes de vieux déchets ? Il est difficile de le savoir faute de données fiables et on en est réduit à des batailles d'experts. Cependant, on pressent l'urgence d'accroître les marchés des vieux déchets car l'extension de la collecte sélective d'abord et surtout aux vieux déchets de la construction, ensuite à ceux de l'électroménager, des loisirs et de l'équipement, accroîtra les quantités de vieux déchets. Sans accroissement des marchés, ce sont les stocks de déchets qui augmenteront. L'exportation des vieux déchets est certes une solution et ces marchés sont en forte croissance, en particulier en Asie. On risque cependant d'accroître aussi les quantités allant en décharge et on devra s'interroger sur le gaspillage induit par certaines applications de l'aluminium qui pourraient être interdites faute de recyclage suffisant. C'est ainsi qu'on peut imaginer un scénario « catastrophe » où la boîte boisson est interdite. L'industrie de l'aluminium perd 10% de ses marchés et si cette interdiction d'usage de l'aluminium s'étendait à tous les emballages, 20% du marché disparaîtraient.

5.4. La problématique des déchets et les industries de l'acier et de l'aluminium

Nous avons résumé dans le tableau 5.8 après les caractéristiques des déchets d'aluminium.

Ensuite comparer les industries de l'acier et de l'aluminium nous a paru utile pour mieux comprendre, en raison de leurs similitudes, la problématique si complexe des déchets. Acier et aluminium sont deux matériaux, présents dans les mêmes applications où ils sont parfois concurrents et souvent complémentaires, avec des durées de vie comparables. La seule différence importante, ce sont les quantités produites et consommées, ainsi que les capacités et les outils de production.

Une première comparaison (tableau 5.9) porte sur les quantités de déchets et sur quelques ratios rendus possibles en raison de définitions de déchets très voisines.

Tableau 5.8 : Les caractéristiques des déchets d'aluminium (source C. Gentaz)

famille de déchets	neuf		vieux
origine (étape du cycle de vie)	de l'aluminium liquide aux semi-produits à froid	des semi-produits à froid aux produits finis	à partir des produits en fin de vie
appellation courante	interne	transformation	vieux
qualité	bonne en général, moyenne pour les meulures, sciures et les crasses	variable, avec souvent la présence d'autres produits (matériau, vernis, laque, peinture, huile, eau)	très variable dépendant de l'importance et de la nature du mélange à la collecte
quantité	proportionnelle à la quantité de semi-produits à froid, avec un ratio moyen d'environ 60% par tonne de semi-produit	proportionnelle à la quantité de produits finis, avec un ratio entre 5 et 30%, (croissant des extrudés et moulés aux laminés)	dépend de la consommation antérieure (durée de vie des produits), de la demande, du prix, de la collecte, de la législation
délai entre passage à l'état de déchet et collecte	journée	jours	jours à semaines
longueur du chemin de collecte	très court.	court	long à très long
taux de collecte	100% aux pertes près	100% aux pertes près	entre 0 à 100%, dépendant du produit, de son poids, de sa dissémination, de l'organisation
délai entre collecte et fusion	jours – semaines	semaines - mois	semaines - mois
venue sur le marché	non car fusion sur place. Seule la qualité inférieure entre sur le marché	en partie pour la qualité supérieure car le plus souvent cession directe à des sociétés équipées pour la fusion. oui pour les autres qualités	presque tout sauf rachat par sociétés impliquées dans la chaîne du produit (boîte boisson, câble électrique, etc.) et équipées pour la fusion.
évolution des quantités spécifiques	stable à décroissante (technologie de fabrication des semi-produits, augmentation des capacités)	stable à décroissante (conception des produits finis et leur technologie de fabrication)	croissante
évolution des qualités	stable	stable	à la hausse (collecte et tri plus efficace)

Tableau 5.9 : Quantités mondiales de déchets (millions de tonnes métriques) et quelques ratios pour l'industrie de l'aluminium (données statistiques et estimations en 2002, International Aluminium Institute, IAI) et l'acier (données statistiques 2000 et Iron and steel scrap : its significance and influence on further developments in the iron and steel industries, eight updating, United Nations, Economic Commission for Europe, 1999) ⁽²²⁸⁾ (source C. Gentaz)

classe de déchet	quantités (Mt)			ratios (%)					
	acier	aluminium		acier		aluminium			
	statistiques	statistiques	estimation	statistiques		statistiques		estimation	
				déchet/production métal	déchet/total déchet	déchet/production métal	déchet/total déchet	déchet/production métal	déchet/total déchet
interne	156	1,1	15	19,0	36,9	2,8	7,5	28,5	52,4
transformation	87	6,7	6,7	10,6	20,6	17	45,6	12,7	23,4
neuf (interne et transformation)	243	7,8	21,7	29,5	57,5	19,8	53,1	41,2	75,9
vieux	180	6,9	6,9 ¹	21,9	42,5	17,5	46,9	13,1	24,1
total, neuf et vieux	423	14,7	28,6	51,4	100	37,3	100	54,3	100
quantité de métal brut	823	39,4	52,7	100					

¹ Aux 6,9 millions de tonnes de vieux déchets, il faut ajouter 5,9 millions de tonnes qui ne sont pas collectées, dont 2,9 Mt sont mis en décharge et 3,0 Mt sont sans destination connue. Le rendement de la collecte est donc d'environ 54% (6,9/6,9 + 5,9).

Nous avons calculé les ratios suivants :

Ratio (1) = quantité de déchet / quantité de métal brut, pour chaque classe de déchet. La quantité de métal brut (crude metal en anglais) désigne pour l'acier la

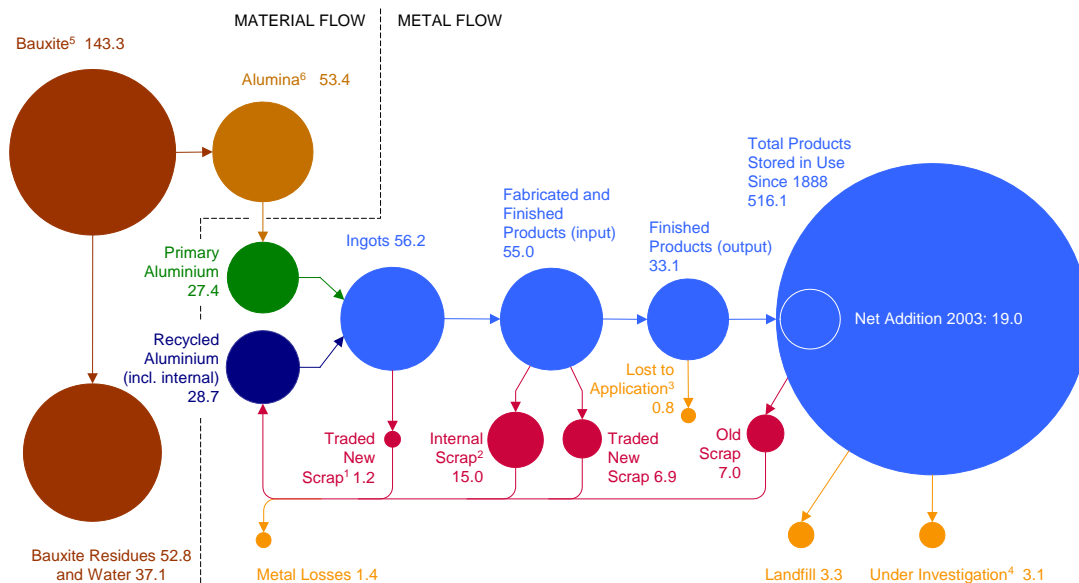
quantité totale d'acier produit à partir du minerai et à partir du déchet, donc à priori une donnée publiée peu différente de la somme des quantités produites d'aluminium électrolytique (« primaire ») et recyclé (« secondaire »).

Ratio (2) = quantité de déchet / quantité totale de déchet, pour chaque classe de déchet.

Le ratio (1) appliqué aux déchets neufs, internes et de transformation, d'aluminium donne un résultat aberrant pour les déchets internes, beaucoup trop faible car il devrait être de l'ordre de grandeur de celui de l'acier. De plus, il contredit les valeurs élevées des quantités spécifiques de déchets (tableau 5.4 de ce chapitre), il sous-estime la part du recyclage dans la production de l'aluminium et il conduit à conclure que l'industrie de l'acier est plus engagée dans le développement supportable puisqu'elle recycle plus que celle de l'aluminium. Nous en avons cherché les causes et avons découvert que la donnée statistique des déchets internes était très sous-évaluée pour prendre seulement en compte ceux commercialisés. Un rapport de l'EAA, juste publié en 2005, donnait des estimations et ce sont celles-là, peu différentes des nôtres, que nous avons utilisées. On calcule un nouveau ratio (1) qui se révèle identique pour les déchets de transformation de l'aluminium et du fer, concordance que nous attendions compte tenu des structures très semblables des deux industries, mais par contre très différent pour les déchets internes et pour les vieux déchets.

Le ratio des déchets internes, beaucoup plus élevé, nous a surpris parce que la production des semi-produits d'aluminium se fait dans des conditions, en particulier de température, bien plus faciles que celle des semi-produits d'acier. Une explication immédiate, qui avait attiré précédemment notre attention (chapitre III), ce sont les faibles capacités des outils de transformation. Il y a aussi d'autres explications qui sont l'une la quantité produite par alliage (production en série), l'autre les performances des outils. Tout contribue donc à attendre de l'industrie des semi-produits de l'aluminium des gains formidables de productivité⁽²⁰⁶⁾.

Figure 5.9: Estimation des flux d'aluminium (millions de tonnes) en 2003 (M. Bertram, Worldwide recycled aluminium from end-of-life products from 1950 to 2020, 2005)



Values in millions of metric tonnes. Values might not add up due to rounding.
¹ Aluminium in skimmings; ² Not taken into account in statistics; ³ Such as powder, paste and deoxidation aluminium (metal property is lost)
⁴ Area of current research to identify final aluminium destination (reuse, recycling or landfilling); ⁵ Includes, depending on the ore, between 30% and 50% alumina; ⁶ Includes on a global average 52% aluminium

Les industries du fer et de l'aluminium ont réalisé d'énormes progrès de productivité depuis les années 1960. Dans celle du fer, c'est l'industrie des semi-produits qui a accru le plus spectaculairement sa productivité. En 1960, la coulée continue de l'acier n'existait pas et aujourd'hui 100% de l'acier sont coulés en continu. On commence même à couler en continu des semi-produits ou des ébauches de semi-produits (near net shape casting). On coule des feuilles et on a multiplié les vitesses de coulée par 200 pour passer d'une brame de 200 mm d'épaisseur à une feuille de 1 mm d'épaisseur ! Le pourcentage de déchets internes est passé de plus de 30% du produit semi-fini à aujourd'hui moins de 8%.

Le ratio des vieux déchets est faible et le ratio total, tous déchets confondus, est comparable indiquant que l'industrie de l'aluminium recycle autant que celle de l'acier, résultat plus satisfaisant mais toujours surprenant quand il s'agit d'un métal cher, réputé pour être recyclé totalement.

Le ratio (2) permet de caractériser l'importance d'un déchet spécifique par rapport au total des déchets. Selon les données statistiques, déchets neufs et vieux déchets ont une importance égale pour les deux matériaux. Par contre, selon les données estimées, les déchets neufs d'aluminium ont une importance énorme, environ 75%, au détriment des vieux déchets, environ 25%, ce qui confirme le ratio (1) : on ne recycle pas autant de vieux déchets qu'on devrait.

Nous avons alors reconstruit la situation des déchets de l'industrie de l'aluminium à partir des résultats et données européennes vérifiés dans cette étude. D'abord, nous calculons la quantité pondérée de déchet à partir du produit de la répartition des produits finis entre produits laminés (39% dont 9% ont été laminés deux fois), extrudés (25%), moulés (28%), autres (8%) par la quantité spécifique de déchet par produit fini. Le produit du résultat obtenu par le taux de collecte du déchet, puis par le taux net de recyclage du métal (voir chapitre 8), enfin par la quantité de produit fini (pour les vieux déchets avec une durée de vie d'environ 20 ans, nous l'avons estimé à 0,4), au total 4 paramètres, donne le taux de recyclage d'aujourd'hui.

Tableau 5.10 : Création de déchets d'aluminium et taux de recyclage calculés (en caractères gras, les résultats du tableau 5.8, colonne estimation) (source C. Gentaz)

classe de déchet	quantité de déchet (% produit fini)	taux de collecte (%)	taux net de recyclage du métal (%)	quantité de produit fini concerné	taux spécifique de recyclage calculé (%)
interne	34	95	90-95	1	29-30 28,5
transformation	15	95	85-90	1	12-13 12,7
sous total (neufs)		95	85-95	1	41-43 41.2
vieux	100	54	80-90	0,4	17-19 13,1
total					58-62 54,3

Nous notons une excellente concordance entre les taux de recyclage calculés et estimés pour les déchets internes et de transformation. Nous confirmons la différence importante des taux spécifiques de recyclage des vieux déchets d'acier et d'aluminium. Elle reste cependant inexpliquée tant voisines sont toutes les caractéristiques des industries de l'acier et de l'aluminium : applications, collecte, tri très liées comme dans l'automobile, le bâtiment, l'électroménager, en partie l'emballage.

On signalera enfin une étude nord-américaine ⁽²³⁰⁾ qui conclut que, sans grand effort, il est possible d'augmenter d'environ 30% la quantité de vieux déchets collectés, avec pour effet de réduire d'environ 5% la demande d'aluminium électrolytique. On peut raisonnablement supposer que, en faisant des efforts pour plus collecter les vieux déchets d'aluminium, on atteindra alors un taux de recyclage comparable voire supérieur à celui de l'acier.

5.5. Bibliographie

- (206) Guthrie Roderick I. L. Steel strips – the long and winding road. Iron and Steel Technology, 104-114, November 2006
- (207) Minster Adam. A grinding hunger for scrap. Far Eastern Economic Review, 26-29, March 25, 2004
- (208) Collection of aluminium from buildings in Europe. A study by Delft University of Technology for European Aluminium Association, EAA, 2004
- (209) Recyclage des métaux : le revers de la ferraille. Environnement Magazine, n° 1617, 48-49, Mai 2003
- (210) Lagioia G., Amicarelli V., De Marco O. Aluminium embodied in commodities, a commodity science contribution. Università di Bari, 2003
- (211) Kirchner Günther. Raw material source aluminium recycling Today and Tomorrow. 7th OEA International Aluminium Recycling Congress, München, Germany, 17/18 march 2003
- (212) World Steel in Figures, International Iron and Steel Institute, 2003 (site www.worldsteel.org)
- (213) The aluminium industry's sustainable development report. International Aluminium Institute, 2002 (site www.world-aluminium.org)
- (214) Coopérative IGORA (site www.igora.ch)
- (215) Norme européenne PrEN 13920-1, aluminium et alliages d'aluminium, scrap (matières premières pour recyclage), partie 1 : exigences générales, échantillonnage et essais, octobre 2002
- (216) Le cycle du fer ou le recyclage durable de l'acier. Conférence IRSID – USINOR, 2002, (jpbirat@imaginet.fr et jean-pierre.birat@usinor.com)
- (217) Rombach Georg . Future availability of aluminium scrap. Proceedings of TMS, 2002
- (218) Vigeland Pål. Aluminium recycling : the commercial benefits, the technical issues and the sustainability imperative. Metal Bulletin 9th international secondary conference, Prague, Tchéquie, 7-9 November 2001

Proceedings of European Metallurgical Conference, 2001

- (219) Boin Udo, Orbon Heinz and Probst Thomas. Secondary aluminium smelting : a system-analytical approach to cost reduction. 71-82
- (220) Reuter M. A., Orbon Heinz and Probst Thomas. The impact of scrap type and melting conditions on metal yield and recovery. 59-70
- (221) Rombach Georg and Friedrich Bernd. Future potential and limits of aluminium recycling. 17-32.

Proceedings of the Recycling of metals and engineered materials, edited by Stewart D. J., Stephens R. and Daley J. C. The Minerals, Metals and Materials Society, TMS, 2000

- (222) Bruggink P. R. Aluminium scrap supply and environmental impact model. 809-822
- (223) Steverson W. B. Recycling – a fan of the can. 923-949
- (224) Eurofer and EFR. Elements to progress the discussion “when waste ceases to be waste”. The case of ferrous scrap. 28 June 2000
- (225) Environmental profile report for the European Aluminium Industry. Aluminium for future generation, European Aluminium Association, EAA, April 2000
- (226) Aluminium recycling, the road to high quality products. OEA
- (227) Hoberg H. and al. Modelling the material flow of recycling process for aluminium alloys by means of technical recycling quotas. REWAS 99, Symposium on recycling, waste treatment and clean technology, ed. by Gaballah, San Sebastian, Spain, 1999
- (228) Iron and steel scrap : its significance and influence on further developments in the iron and steel industries, eight updating, United Nations, Economic Commission for Europe, 1999

Proceedings of the third ASM International Conference & Exhibition on The Recycling of Metals, Barcelona, Spain, 11-13 June, 1997

- (229) Ayres Robert U. Metals recycling : economic and environmental implications. 5-31

- (230) McKinley Michael and al. U.S. metals consumption and recycling – an up-date. 36-45
- (231) Proceedings of the 2nd International Congress Recycling of Metals : a secondary 's view of recycling, 21-31
- (232) Aufauvre Dominique. Livre blanc « le recyclage de l'acier dans les emballages ménagers : un exemple d'effort collectif ». Technique et Documentation, 1997
- (233) Péchiney. Emballages et environnement. Direct Magazine (publication interne), n°1, 1995
- (234) Cael Jean-Philippe. Affinage et recyclage : l'aluminium de deuxième fusion. Réalités Industrielles, Annales des Mines, 38-43, Février 1994
- (235) Nijhof G. H., Steenpoorte H. E. The separation of aluminium out of household waste using the eddy current technique and re-use of the metal fraction. HOOGOVENS Group report, 1994
- (226) Recycling non-ferrous metals. US Bureau of Mines, 1991
United Nations Conference on Trade and Development, committee on Commodities,
Ad hoc review meeting on bauxite, May 1991
- (227) Eliasco E. Le recyclage de l'aluminium.
- (228) Andersson Rolf. Discussion of issues for improved producer-consumer co-operation. Recycling of aluminium cans: environmental and economic aspects.
- (229) Le recyclage de l'aluminium. La Technique Moderne, 106-110, Mai-Juin 1986

Chapitre 6. L'industrie du recyclage

6.1. Les acteurs

L'industrie du recyclage regroupe plusieurs activités, la collecte, le tri et la fusion, activités distinctes dont les acteurs sont aussi le plus souvent distincts.

6.1.1. La collecte

L'industrie de production et de transformation collecte ses déchets neufs. Les vieux déchets sont eux collectés par des acteurs indépendants, les ferrailleurs (aujourd'hui on parle plutôt de récupérateurs ou de métiers de la propreté) et des organismes publics locaux ayant souvent recours à des sous-traitants, les ferrailleurs précités. La collecte concerne tous les déchets dont ceux d'aluminium représentent une partie infime du tonnage mais notable du chiffre d'affaire.

Les ferrailleurs regroupent des entreprises de taille très variable, de l'entreprise individuelle à la grande entreprise multinationale en passant par l'entreprise moyenne.

La saisie des données caractérisant cette activité, quantité et qualité de produits collectés, prix d'achat et de vente, est la plupart du temps inconnue pour les déchets neufs puisqu'il s'agit de mouvements à l'intérieur d'une même entreprise ou de reprises (le producteur s'engage par contrat à reprendre à l'acheteur les déchets neufs qu'il produit). Par contre, on connaît les quantités de déchets neufs négociées sur le marché des déchets, environ 10% du total des déchets neufs.

Quant aux vieux déchets, il n'y a pas de données publiées de cette activité, cependant de plus en plus impliquée officiellement par le biais des dispositions légales de recyclage décidées par les pouvoirs politiques, locaux, nationaux, et européens.

Nous concluons que les données quantitatives de collecte ne sont pas accessibles.

6.1.2. Le tri

Les déchets collectés sont regroupés pour être triés, c'est-à-dire qu'on sépare les déchets d'aluminium des autres déchets, puis les déchets d'aluminium entre eux, par catégorie caractérisant l'application (bâtiment, automobile, etc.), voir le produit (bloc moteur, etc.). Le tri est très variable, du plus rudimentaire, le pré-tri manuel, au plus complexe, des installations automatisées de tri. Le tri est souvent confondu avec la collecte et c'est la règle pour les déchets neufs. La saisie des données de quantité et qualité des produits collectés est généralement réalisée alors que celle des prix ne

l'est pas. Nous concluons que le tri est en bonne partie connu, avec cependant des données souvent insuffisantes.

6.1.3. La fusion

Elle est faite par des entreprises industrielles et elle est connue parce qu'elle est industrielle. On a des données statistiques sur les produits entrants, les déchets, et sur les produits sortants, l'aluminium recyclé. Les déchets neufs constituent une exception d'importance puisqu'on en connaît seulement les 10% faisant l'objet de transactions commerciales. Les données statistiques des déchets, certainement rigoureuses puisque résultat d'une pesée, sont cependant entachées d'une erreur variable et systématique car la teneur en aluminium, connue de l'industriel, n'est souvent pas donnée.

Nous concluons que la fusion est assez bien connue pour les vieux déchets, et très mal pour les déchets neufs.

Parler de l'industrie du recyclage se ramène donc, quantitativement à parler de la fusion des vieux déchets, et seulement qualitativement des autres activités, collecte, tri, ainsi que de la fusion des déchets neufs.

6.2. Rappel historique

Les premiers déchets d'aluminium ont été des déchets neufs, les vieux déchets du même produit n'étant apparus que plus de 20 ans plus tard. Ils ont été immédiatement recyclés, donc dès 1886, par l'industrie de production et de transformation alors que les vieux déchets l'ont été seulement lorsque leurs quantités ont été suffisamment importantes, ce qui veut dire que, les vieux déchets ont été seulement recyclés environ 40 ans plus tard, à partir des années 20.

La collecte et le tri des premiers vieux déchets ont été naturellement faits par les ferrailleurs, auxquels il suffisait d'ajouter un matériau à leur liste. La fusion, en raison du manque d'intérêt de l'industrie de production et de transformation déjà bien occupée au recyclage de ses déchets neufs, ajouté à un attrait économique certain à l'époque, a conduit à la création d'une industrie spécifique très disparate, allant de l'entrepreneur indépendant à la société industrielle. C'est seulement dans les années 30, avec le développement des alliages de fonderie, que l'industrie de production de l'aluminium électrolytique s'est impliquée dans la fusion des vieux déchets.

Dans le même temps, la croissance des quantités de déchets de transformation a favorisé la création de sociétés industrielles spécialisées dans leur fusion.

6.3. La fusion

6.3.1. Les produits et leurs marchés

Les vieux déchets conduisent principalement à des alliages de fonderie de qualité comparable à la plupart de ceux obtenus à partir du métal d'électrolyse et secondairement à des produits de désoxydation de l'acier. Tous sont commercialisés sous forme de lingots et, depuis les années 70, pour les alliages de fonderie, sous forme d'aluminium liquide livré par camions isothermes aux usines de fonderie distantes d'au plus quelques centaines de km.

Les déchets neufs redonnent des semi-produits de l'alliage de départ.

6.3.2. L'économie

Alors que le montant de l'investissement et la main-d'œuvre sont des avantages économiques évidents de la fusion sur l'électrolyse (voir chapitre 9), le bilan global, fixé par les prix des déchets et de l'aluminium, peut conduire à une rentabilité très bonne ou très mauvaise.

Historiquement, le bilan économique a plutôt été favorable au recyclage. C'est seulement ces dernières années qu'il s'est dégradé pour différentes raisons : productivité insuffisante, prix bas de l'aluminium, coût environnemental de plus en plus élevé. Récemment, l'envolée des prix de l'aluminium a restauré un contexte favorable au recyclage, malgré des prix élevés des déchets et pratiquement, l'industrie du recyclage a plus souffert de la raréfaction des sources de déchets à recycler, captées par les industriels chinois, que de leurs prix élevés.

6.3.3. La structure

Conséquence de l'histoire du recyclage de l'aluminium, deux structures très différentes coexistent, fixées par les natures du déchet recyclé et du produit fabriqué.

Les déchets neufs sont fondus, soit par l'industrie de production et de transformation à chaud, soit par des opérateurs dédiés à cette activité, les refondeurs (ou remelters).

Les vieux déchets, en mélange avec des quantités plus ou moins importantes de déchets neufs ou d'aluminium électrolytique, sont fondus par les affineurs (ou refiners), certains étant plus spécialisés dans le traitement des crasses produites par l'ensemble de l'industrie de l'aluminium. Les affineurs sont en règle générale des sociétés indépendantes, avec l'exception cependant, en Europe, de quelques sociétés dépendantes des producteurs « majors » d'aluminium électrolytique. Faisant fonction surtout de vitrine technologique, et plus récemment médiatique avec l'avènement du développement supportable, ce sont toujours des usines de grande capacité dont seule subsiste aujourd'hui celle de VAW du groupe

HYDROALUMINIUM (70.000 t/an en Allemagne) puisque celle de AFFIMET (70.000 t/an en France) du groupe ALCAN (aujourd'hui RIO TINTO ZINC) après l'acquisition de PECHINEY a fermé en 2007 (et les outils de fusion et le site revendus à un refondeur britannique) et celle de REFONDA (35.000 t/an en Suisse) du groupe ALUSUISSE a fermé en 1997.

Refondeurs et affineurs forment l'industrie de la fusion, le plus souvent indépendante techniquement, commercialement et financièrement de l'industrie d'électrolyse. En 2002, affineurs et refondeurs se distribuaient comme suit en Europe (EU 15) :

Tableau 6.1 : Nombre d'affineurs et de refondeurs en Europe (EU 15) en 2002 (OEA. The strategic importance of the EU15 aluminium recycling industry. EAA-OEA, publication, 1st July 2004) ⁽²³¹⁾

Pays	affineurs	refondeurs	total
Allemagne	15	21	36
Autriche	3	3	6
Benelux	3	10	13
Espagne	28	7	35
France	17	15	32
Grèce	1	4	5
Italie	38	23	61
Portugal	1	2	3
Royaume-Uni et Irlande	25	10	35
total EU 15	134	108	235

6.3.4. La capacité

En Europe, l'organisation faîtière des affineurs et refondeurs (Organisation of European aluminium Refiners and Remelters, ou OEA) publie régulièrement des données statistiques sur le nombre et la capacité des entreprises ainsi que sur les productions nationales et européennes. Ce sont les données relatives aux affineurs qu'on a reportées dans le tableau ci-après. Les données publiées en 1994, 1999 et 2001 permettent une vue dynamique de l'évolution de cette industrie.

Les données relatives aux refondeurs sont plus difficiles à exploiter puisque leur matière première, le déchet neuf, n'est le plus souvent pas inclus dans les statistiques et aussi en raison de leur plus grande intégration avec la production d'aluminium électrolytique. En 1999, on comptait en Europe 174 affineurs et 110 refondeurs avec au total environ 20.000 employés.

6.3.5. Les affineurs

Tableau 6.2 : Données statistiques des affineurs européens (source "Organisation of European Refiners and Remelters")⁽²⁴¹⁾

capacité de production	Europe en 1994	Europe en 1999	Europe en 2001 dont	Allemagne	Italie	Royaume-Uni	France
> 50.000 t	4	13	14	4	6		2
40-50.000 t	2	3	2			1	
20-40.000 t	16	14	17	5	3	4	1
10-20.000 t	20	20	22	1	5	6	7
5-10.000 t	25	24	24	2	3	5	6
1-5000 t	60	63	56		21	12	3
< 1000 t	100 (44%)	37 (21%)	30 (18%)			20	2
total sociétés	227	174	165	12	38	40	21
Capacité totale de production estimée (t/an)	2.000.000	2.260.000 ¹	2.650.000	460.000	660.000	330.000	328.000
Capacité moyenne de production (t/an)	15.000	16.000	19.000	38.000	17.000	8.000	16.000
Production totale (t/an)	1.771.000	2.199.000	2.523.000				
Taux d'utilisation de la capacité ²	88,6%	97,7%	95,2%				

¹ 128 affineurs ont une capacité de 1.663.000 t, soit une moyenne de 13.000 t/an. On a appliqué cette valeur moyenne aux 174 affineurs, d'où la capacité estimée de 2,26 Mt/an.

² Production totale divisée par capacité totale

Pour exploiter ces données, nous avons supposé qu'on avait une usine par société, ce qui a permis d'estimer une capacité moyenne.

D'un point de vue statique, nous notons que, en 2001, en Europe,

- 165 affineurs ont produit environ 2,5 Mt d'aluminium de recyclage.
- Les affineurs avec une capacité inférieure à 1.000 t/an représentent 18% des sociétés et moins de 1% de la capacité installée.
- La capacité moyenne (excluant les capacités inférieures à 1.000 t/an) est estimée à 19.000 t/an
- Le taux d'utilisation de la capacité est très élevé, 95%.

Nous notons surtout la différence considérable existant entre les capacités d'électrolyse, entre 100.000 et 400.000 t/an et en moyenne 200.000 t/an, et celles de fusion des vieux déchets, entre 10.000 et 70.000 t/an et en moyenne, environ 20.000 t/an, soit 10 fois moins. Nous considérons que cette capacité de fusion est inconciliable avec une industrie performante du recyclage.

D'un point de vue dynamique, nous notons que, entre 1994 et 2001,

- Le nombre des sociétés d'affinage s'est contracté de 227 à 165 (en 2002, on est passé à 134)
- Celles avec une capacité de moins de 1.000 t/an ont vu leur nombre passer de 44% à 18% et leur capacité de 5% à moins de 1% du total des affineurs
- La capacité moyenne (excluant les capacités inférieures à 1.000 t/an) a augmenté de 14.000 t/an à 19.000 t/an, soit 35%
- Le taux d'utilisation de la capacité est toujours très élevé, plus de 88% avec tendance à l'augmentation
- La production a augmenté de 4,5%/an, beaucoup plus que la croissance mondiale de la production d'aluminium électrolytique sur la même période, 2,7%/an, et la capacité de production seulement de 3,6%/an.

Sur ces 8 années, nous confirmons une dynamique rapide de transformation d'une activité artisanale vers une activité industrielle performante. Cependant, on est encore loin de la performance recherchée et la croissance de la production se fait

plus par le taux d'utilisation de plus de 95% que par la croissance insuffisante de la capacité de production. Il est aujourd'hui nécessaire de construire de nouvelles installations de fusion dont on peut supposer que la capacité unitaire sera de plus de 20.000 t/an et plutôt proche de 100.000 t/an.

6.3.6. Les refondeurs

Les 110 refondeurs de 1999 étaient devenus 108 en 2002 avec une production de 1,3 millions de tonnes, soit peu de différences avec les affineurs s'agissant de la production et de la capacité moyenne.

Note : capacité de fusion optimale et parallèle avec le fer

On a vu que le fer, de fait l'acier, et l'aluminium présentaient de nombreux points communs, en particulier le recyclage des déchets, neufs et vieux, mais aussi différents, ainsi les quantités mises en œuvre. Poursuivant cette comparaison, on note qu'on produit dans le monde environ 30 fois plus d'acier (environ 1 milliard de tonnes en 2005) que d'aluminium (un peu plus de 30 millions de tonnes aussi en 2005). Les capacités de production de l'acier sont typiquement de 8 Mt/an (le maximum, 12 Mt/an) pour une usine dite « intégrée » à partir du minerai et de 1 Mt/an (le maximum, 2 Mt/an) pour une usine dite « mini-usine » à partir du déchet, la ferraille.

Avec ce ratio de 30, la capacité d'une usine d'électrolyse devrait être typiquement de 250.000 t/an et au maximum de 400.000 t/an, et celle d'une usine de recyclage, à la condition de réaliser l'adéquation entre les quantités de déchet et d'aluminium recyclé commercialisé au maximum de 70.000 t/an (les plus grandes connues sont de 100.000 t/an), valeurs conformes à la réalité. Seule la capacité type, environ 30.000 t/an est beaucoup plus grande que celle réelle, 19.000 t/an, qui serait trop faible.

6.4. L'avenir

Le recyclage de l'aluminium vit une période de transformation profonde engagée depuis un peu plus de 10 ans, coïncidant avec la prise de conscience universelle du « sustainable development ». On est en train de passer de l'artisanat à l'industrie en même temps que changent les distinctions entre les filières déchets neufs / refondeurs et vieux déchets / affineurs et entre les activités de collecte / tri et fusion en raison d'abord de la collecte sélective qui permet aux vieux déchets de retourner dans la fabrication des produits dont ils viennent (câble électrique, boîte boisson, demain menuiserie, etc.). Une nouvelle structure industrielle, celle de l'aluminium du futur, est en train de se mettre en place

6.5. Bibliographie

- (230) Morrison Jim. European aluminium recycling under threat? OEA Conference, Essen, Germany, 2004
- (231) OEA. The strategic importance of the EU15 aluminium recycling industry. EAA , OEA, publication, 1st July 2004
- (232) Morrison Jim. Trend in the European Aluminium Industry. 7th OEA International Aluminium Recycling Congress, München, Germany, 17/18 march 2003
- (233) Recyclage des métaux. Environnement Magazine, 1617, Mai 2003
- (234) Gerber Jürg. The global dimension of aluminium recycling. 7th International OEA aluminium recycling congress, Munich, Germany, 17-18 mars 2003
- (235) Building the future with aluminium, recycling of aluminium building products. Report. European Aluminium Association, EAA, 2003
- (236) Le recyclage : matériaux et filières. Dossier établi par l'Agence Rhône-Alpes pour la Maîtrise des Matériaux (BP 292, 73375 Le Bourget du Lac Cedex)
- (237) L'aluminium ; un matériau idéal pour le recyclage. Tirage à part du Recycling Magazin, 17/2002
- (238) Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters. Aluminium Recycling Report 99/01. October 2002
- (239) Norsk Hydro. A global remelt technology leader. 2002
(www.hydro.com)
- (240) Aluminium Recycling Report 99/01, OEA, 1999
- (241) Katyal Anil. The changing pattern of secondary aluminium industry through the millenium. Proceedings of the third ASM International Conference & Exhibition on The Recycling of Metals,, Barcelona, Spain, 237-253, 11-13 June, 1997

Documentation

- (242) OEA Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters,
- (243) www.oea-alurecycling.org
- (244) EAA European Aluminium Association, www.eaa.net

- (245) Aluminium PECHINEY, AFFIMET, usines de Compiègne, Rioupéroux
et Sabart, France
- (246) ALUSUISSE, REFONDA, usine de Niederglatt, Zurich, Suisse
- (247) Aluminium MARTIGNY, Martigny, Valais, Suisse
- (248) EAA (réunion à Cannes les 6-7 Mars 2001 – www.eaa.net)
- (249) Archives TRANSTEC

Chapitre 7. Les bases scientifiques du recyclage et leurs conséquences

7.1. Les bases scientifiques

7.1.1. Rappels sur la composition des déchets

- les déchets neufs, internes : c'est la qualité de l'aluminium d'électrolyse, pur ou allié
- les déchets neufs, de transformation : c'est la qualité précédente, cependant associée aux produits utilisés pendant la transformation, eau, huile, souvent revêtue de vernis, laques et peintures et parfois mélangée avec d'autres métaux, par exemple d'autres alliages d'aluminium, lorsqu'il s'agit de produits finis rebutés par le contrôle de qualité. La contamination est essentiellement le fait de l'eau et des composés organiques.
- les vieux déchets : en plus de la contamination précitée par l'eau et les produits organiques, on peut trouver, dépendant du mode de collecte, tous les autres matériaux, métalliques (divers alliages d'aluminium, alliages ferreux et non ferreux) et non métalliques s'agissant du verre, des plastiques, du papier, du bois, etc.

7.1.2. Les propriétés physico-chimiques des principaux éléments d'alliage

Tableau 7.1 : Températures de fusion et d'ébullition et densités des principaux éléments d'alliage (et du fer)

Elément	température de fusion (° C)	température d'ébullition (° C)	densité volumique du solide (g/cm3)
Aluminium	660	2.500	2,67 solide 2,56 liquide
Cuivre	1.083	2.570	8,92
Manganèse	1.244	2.010	7,39
Silicium	1.420	3.280	2,27
Magnésium	650	1.105	1,74
Zinc	420	907	7,15
Etain	232	2.590	7,29
Fer	1.539	3.070	7,84

Les diagrammes de phase avec l'aluminium présentent des eutectiques, monotectiques, péritectiques ainsi que des composés définis dont on peut exploiter les propriétés pour séparer les composants de l'aluminium. Par exemple, les composés définis formés avec les métaux du groupe du fer ont des températures de fusion plus élevées que celle de l'aluminium et ils se séparent de l'aluminium liquide en raison de leurs densités volumiques plus élevées.

7.1.3. Les propriétés physico-chimiques des principaux composés d'aluminium et d'autres éléments

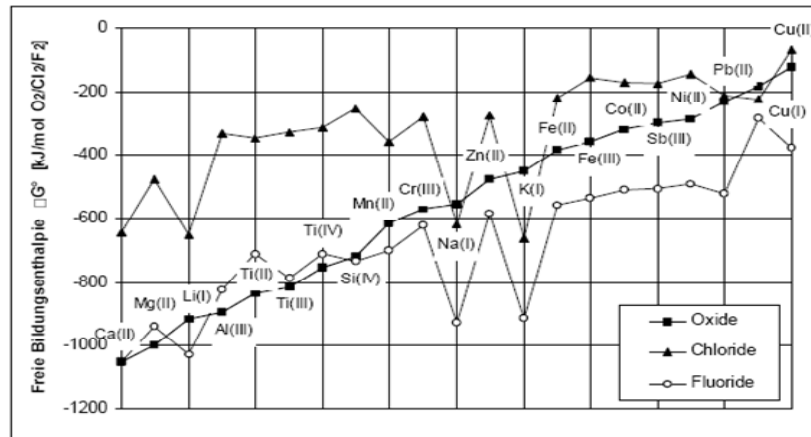
Tableau 7.2 : Températures de fusion et d'ébullition et densités des principaux composés d'aluminium et d'autres éléments pouvant être rencontrés pendant le recyclage

composé chimique	température de fusion (° C)	température d'ébullition (° C)	densité volumique du solide (g/cm ³)
Oxyde d'aluminium, Al ₂ O ₃	2.030	(3.300)	3,97 pour α-Al ₂ O ₃ 3,50 pour γ-Al ₂ O ₃
Oxyde de magnésium, MgO	2.800		
Oxyde de silicium, SiO ₂	1.610 (a) 1.713 (b)		2,65 (quartz)
Oxyde de fer, Fe ₂ O ₃	1.457		5,12
Chlorure de sodium, NaCl	801	1.465	2,10
Chlorure de potassium, KCl	770	1.407	1,98

7.1.4. Les propriétés thermodynamiques

Le graphique ci-dessous regroupe les diagrammes d'Ellingham-Richardson des principaux composés, oxydes et halogénures, fluorures et chlorures, de l'aluminium et d'autres éléments pouvant être rencontrés pendant le recyclage. Ces composés d'aluminium ont une énergie libre parmi les plus négatives, traduisant l'avidité de l'aluminium pour l'oxygène, le fluor et le chlore ainsi que la très grande stabilité de ces composés. Seuls le calcium, le magnésium et le lithium ont des énergies libres encore plus négatives.

figure 7.1 : énergie libre des oxydes, chlorures et fluorures des principaux éléments



7.2. Les conséquences

La métallurgie de l'aluminium à l'état liquide, entre 700 et 800° C, conduit, pour le recyclage, à :

- * des pertes irréversibles d'aluminium retransformé en alumine (pour le recyclage seulement car la transformation de l'alumine en aluminium est bien sûr toujours réversible)
- * des pertes réversibles d'aluminium (dans les crasses)
- * la contamination de l'aluminium par l'hydrogène
- * des possibilités restreintes de purification de l'aluminium.

Ce sont ces constats et leurs conséquences pour l'industrie du recyclage qui font l'objet des développements suivants.

AVERTISSEMENT

Dans le développement des paragraphes suivants, on cite des indicateurs quantitatifs des pertes irréversibles et réversibles d'aluminium. Au nombre de deux, les pertes au feu et le taux de crasses, ils sont fondés sur des pesées.

Les pertes au feu (en anglais ignition losses ou loss on ignition, LOI), données en pourcentage de la masse coulée d'aluminium liquide, sont les pertes d'aluminium, au moment de quitter le four de fusion, constatées, soit par entraînement dans les crasses, soit par oxydation en alumine. C'est la différence entre les masses d'aluminium enfournée, ce qui impose de connaître la teneur en aluminium des

déchets, et coulée, divisée par la masse coulée. Les pertes au feu sont le complément au rendement métal. Pour connaître la répartition entre aluminium oxydé, l'alumine, et aluminium entraîné, il faut connaître la teneur en alumine ou en aluminium de la crasse juste à la coulée, lorsque les pertes au feu deviennent crasses.

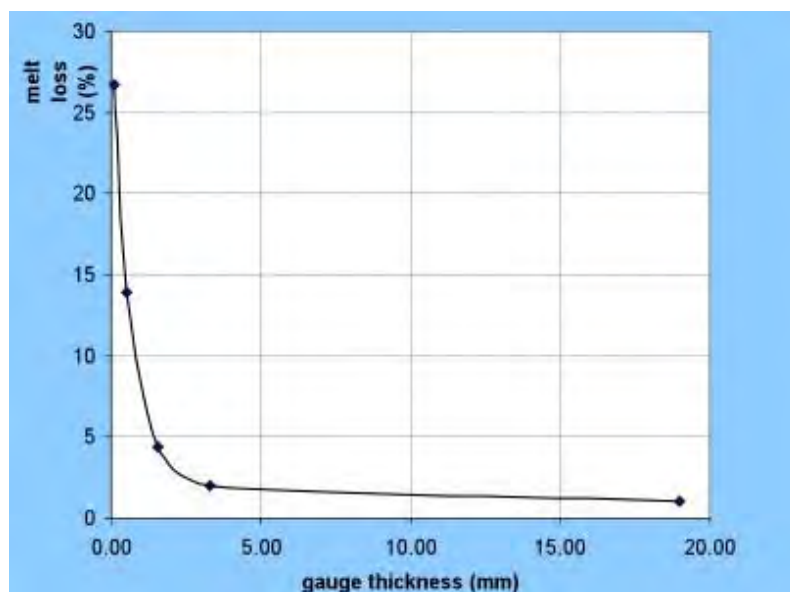
Le taux de crasses, donnée en pourcentage de la masse coulée d'aluminium, est la masse de crasses pesée à n'importe quel moment entre la crasse chaude juste séparée de l'aluminium liquide et la crasse refroidie à la température ambiante, moment le plus couramment utilisé pour cette mesure. Pour être utilisable, cette masse doit être complétée par la teneur en aluminium des crasses qui, comme on le verra, varie dans cet intervalle de temps. Nous avons donc choisi d'utiliser les pertes au feu et de calculer le taux de crasses en faisant l'hypothèse que la teneur en aluminium de la crasse au moment de la coulée est constante et égale à 90%.

7.2.1. Des pertes irréversibles d'aluminium^(261,268)

L'oxygène et les composés oxygénés réagissent d'abord avec les éléments dont l'énergie libre est la plus négative, c'est-à-dire outre l'aluminium, le magnésium pour les éléments d'alliage et le sodium pour les éléments mineurs. En application de la loi d'action de masse, l'oxydation va surtout porter sur l'aluminium et on pourra seulement rechercher les meilleures conditions pour la limiter.

A l'état solide, l'oxydation de l'aluminium a déjà lieu. Sont responsables de cette oxydation l'oxygène et la vapeur d'eau contenus dans l'air, atmosphère habituellement utilisée dans les procédés, et l'humidité du déchet. Même, à la température ambiante, la surface d'aluminium « frais » est immédiatement oxydée sur une épaisseur de quelques angströms, formant une couche étanche et protectrice (à l'origine de l'inaltérabilité). Pendant le chauffage jusqu'à l'état liquide, l'oxydation de l'aluminium se poursuit et, juste avant la fusion, la couche d'alumine atteint au plus 0,2 μm . Les paramètres favorisant l'oxydation sont soit propres au procédé et ce sont la température et le temps, soit propres à la matière première, le déchet, et c'est la géométrie. Plus la surface est grande et plus l'épaisseur est faible, plus importante et plus rapide est l'oxydation (figure 7.2).

Figure 7.2 : Effet de l'épaisseur sur les pertes au feu⁽²⁶¹⁾



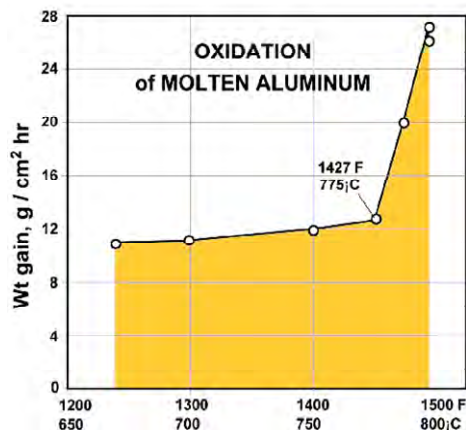
Pour compléter cet effet de la géométrie, nous avons reporté dans le tableau ci-après la quantité d'alumine maximale formée juste avant la fusion pour différentes épaisseurs. C'est seulement pour celles inférieures à 0,1mm, la feuille d'aluminium et ses applications dans l'emballage, que l'oxydation est appréciable et pour celles inférieures à 0,01mm qu'elle est très importante. Or c'est le domaine de dimension de la poussière d'aluminium qui se forme dans toutes les étapes de prétraitement, surtout au broyage, mais aussi au tamisage et dans toutes manutentions où il y a abrasion.

Tableau 7.3 : Effet de l'épaisseur du semi-produit sur le pourcentage massique d'alumine formée à l'état solide à la température de fusion (surface plane d'alliage 3.003)^(261 et source C. Gentaz)

semi-produit et application	épaisseur type du semi-produit		pourcentage massique d'alumine (%)
	(mm)	(μ m)	
tôle et emballage rigide (aérosol)	10	10.000	0,006
tôle et emballage semi-rigide (tube souple)	1	1.000	0,06
feuille et emballage rigide (boîte)	0,1	100	0,59
feuille et emballage souple (ménage)	0,075	75	0,78
feuille et emballage souple (sur-bouchage)	0,050	50	1,18

poussière de broyage	0,005	5	11,76
----------------------	-------	---	-------

figure 7.3 : oxydation de l'aluminium liquide



Dans l'état liquide, l'oxydation se poursuit sous l'effet de l'oxygène et de la vapeur d'eau contenus dans l'air, de l'humidité du déchet et des oxydes minéraux capables d'être réduits par l'aluminium. Les paramètres la favorisant sont soit propres au procédé de fusion et ce sont le temps, la température (au dessus de 775° C, on a une accélération brutale de la vitesse d'oxydation)⁽²⁶¹⁾ et l'agitation de l'aluminium liquide, soit propres au déchet et ce sont la présence de magnésium, de zinc (donc les alliages au magnésium, séries 5000 et 6000, et au zinc, série 7000), d'eau et de composés organiques volatils, graisses, huiles, vernis, laques, qui, en devenant vapeurs, contribuent à l'agitation de l'aluminium liquide. Par exemple, à concentration égale, les laques augmentent trois fois plus les pertes d'aluminium que les huiles.

Tableau 7.4 : Pertes d'aluminium suivant le produit organique et sa concentration⁽²⁶¹⁾

composé organique	laque		huile	
concentration en composé organique	0%	2%	0%	2%
pertes d'aluminium	3%	25%	2%	8%

Sauf à réaliser des conditions d'atmosphère et de déchet sans oxygène ni composé oxygéné, l'oxydation de l'aluminium est inévitable et on sait quelles sont les meilleures conditions à réunir pour avoir l'oxydation la plus faible.

Pour le déchet, ce sont la géométrie et la propreté. La géométrie, c'est la plus grande épaisseur pour la plus petite surface, en d'autres termes un déchet massif. La propreté, c'est avoir les plus faibles teneurs possibles en magnésium, en zinc, en eau, en composés organiques volatils et minéraux oxydés. Préventivement seule l'eau peut être évitée en plaçant le déchet à l'abri des intempéries et c'est avant la fusion, alors que l'élimination de l'eau, des composés organiques volatils et des oxydes minéraux est possible, qu'on introduira des prétraitements de séparation physique, de séchage et de décomposition chimique.

Ensuite, on a la fusion, c'est-à-dire la technique utilisée et ses conditions de mise en œuvre.

Pour la technique, on a :

- la méthode de fusion, électrique (résistance, induction), combustible (gaz, fuel)

et son action sur l'état hydrodynamique de l'aluminium fondu

- la méthode d'enfournement des déchets

et pour les conditions opératoires,

- la température
- les temps de fusion et de maintien
- l'atmosphère : contrôle des entrées d'air, réglage des brûleurs si le four est à gaz ou au fuel, emploi d'un gaz neutre de couverture, argon ou azote

- les flux ou laitiers de protection vis-à-vis de l'atmosphère

- la séquence d'introduction des déchets

- l'agitation du bain : en régime calme, l'oxyde d'aluminium forme une couche superficielle rendue possible par les propriétés de surface (tension superficielle, mouillabilité) de l'aluminium, malgré la densité plus élevée de l'alumine. En régime turbulent, cette couche est rompue et l'oxydation a lieu. Ces conditions sont celles de la coulée du four en poche et du traitement du bain par injection de gaz dans le bain.

7.2.2. Des pertes réversibles d'aluminium :

L'alumine et d'autres composés en faibles concentrations, principalement du nitrure d'aluminium, se mettent en suspension dans l'aluminium liquide. Le « mélange » alumine-aluminium se sépare de l'aluminium liquide et va surnager à sa surface. C'est ce qu'on appelle les crasses, système unique en son genre, même s'il présente

quelques analogies avec les laitiers, des mélanges liquides d'oxydes minéraux, et les entraînements de métal, fréquents en métallurgie extractive.

Peu nombreuses sont les études fondamentales des mécanismes à l'origine de cette suspension d'alumine dans l'aluminium. Beaucoup de paramètres liés sont en jeu et les plus importants sont les suivants :

- le faible écart entre les densités de l'aluminium, 2,7 g/cm³, et de l'alumine, 3,97 g/cm³ pour la variété α , le corindon, et 3,50 g/cm³ pour la variété γ . Cependant l'écart est plus que suffisant comparé à d'autres systèmes et l'alumine devrait se déposer au fond du bain.
- les propriétés de surface, en particulier la tension superficielle, expliquent en bonne partie la formation des crasses.
- la suspension d'alumine dans l'aluminium, - l'aluminium est littéralement collé à l'alumine -, traduit un effet d'ordre à courte distance, souvent comparée à la structure d'une éponge.

Pratiquement, on sait seulement mesurer la perte de masse du bain d'aluminium à la fusion, et on l'exprime en quantité d'aluminium disparu, sans distinguer celui qui a été oxydé en alumine non plus que ce qui n'est pas aluminium et a disparu (par exemple une partie du magnésium pour un alliage contenant du magnésium). Cette mesure imprécise, ce sont les pertes au feu. A la sortie du four, les pertes au feu deviennent des crasses et on admet qu'un point de pertes au feu se répartit entre 90% d'aluminium et 10% d'alumine et donne lieu à 1,089 point de crasses contenant 17,4% d'alumine et 82,6% d'aluminium. Plus on a d'alumine, plus la suspension est importante et la minimiser passe par limiter la formation d'alumine.

Les crasses, séparées mécaniquement de l'aluminium liquide, sont refroidies jusqu'aux environs de 500° C, température en dessous de laquelle l'aluminium entraîné par l'alumine cesse de s'oxyder en alumine au contact de l'oxygène de l'air. Comme l'oxydation est rapide et on admet que la perte d'aluminium est de 1% en poids par minute, limiter cette nouvelle perte irréversible d'aluminium passe par la recherche :

- du temps de refroidissement le plus court possible
- d'une atmosphère sans oxygène.

Dans de bonnes conditions de refroidissement, la composition finale des crasses refroidies est de 50 – 60% d'aluminium et de 40 – 50% d'alumine. On notera que cette perte irréversible au refroidissement est deux à trois fois plus importante que

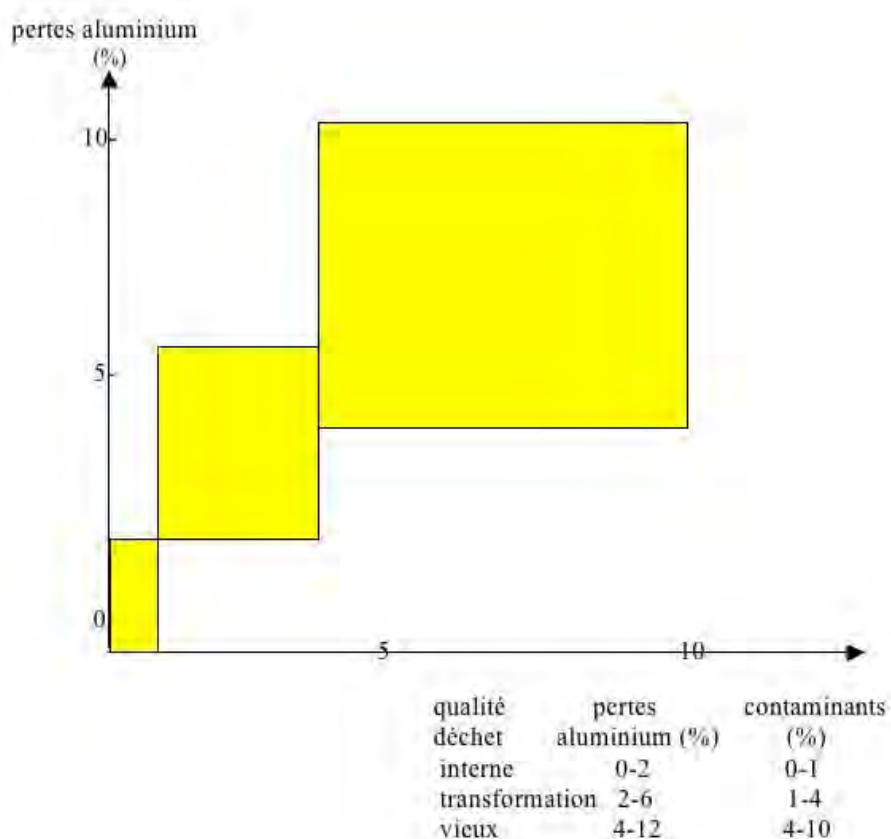
celle au chauffage jusqu'à la fusion et que, au total, 30% des pertes au feu sont définitivement perdus comme aluminium.

Nous avons représenté dans la figure 7.4 dessous les amplitudes des variations des pertes au feu totales (irréversibles et réversibles) en fonction du type de déchet, interne, de transformation et vieux. Nous avons évalué pour chacun, la somme des contaminants intervenant dans les pertes au feu à savoir l'eau, les composés organiques volatils (huile, vernis, etc.), les éléments d'alliages volatils (magnésium et zinc) ainsi que l'alumine déjà présente avant la fusion.

Les conséquences des pertes totales d'aluminium sont importantes et nombreuses. Elles concernent les procédés de recyclage et leur mise en œuvre et le type de déchet, de la conception du produit fini à l'entrée dans les procédés de recyclage.

Une ultime conséquence de ces pertes est l'augmentation des concentrations de tous les éléments restés dans l'aluminium avec le risque d'aboutir à une composition de l'aluminium recyclé en dehors des spécifications.

Figure 7.4 : Les pertes totales, irréversibles et réversibles, d'aluminium en fonction de la qualité du déchet (source C. Gentaz)



Suivant les conditions, les pertes d'aluminium vont de quelques pourcents à quelques dizaines de pourcents pour les plus importantes, - ce qui s'est par exemple passé lors des premières tentatives de fondre des boîtes boissons usagées sans prétraitement aucun - . Les conséquences sont que les crasses sont inacceptables à deux titres :

- économiquement, l'aluminium emprisonné représente une nouvelle perte de matière venant s'ajouter à la perte irréversible. Les pertes réversibles représentent quantitativement environ 70% des pertes au feu.
- techniquement, l'alumine dispersée, dans une moindre mesure les autres oxydes et composés contenus, est une cause d'altération de la qualité des produits finis ; les inclusions d'alumine conduisent à des points durs, amorces de rupture (ce phénomène est aggravé par la transformation $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ en $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, le corindon) dans les pièces de fonderie et à des déchirures dans les feuilles minces.

Très vite on a développé les deux techniques suivantes de traitement des crasses :

1. traitement des crasses pendant la fusion : on modifie les propriétés de surface par l'addition de composés chimiques qui sont rarement des solvants de l'alumine. Ces composés sont des chlorures alcalins, chlorures de sodium et de potassium, seuls ou en mélange eutectique pour être liquide au dessus de 700° C. Eventuellement, on ajoute d'autres composés, par exemple de la cryolithe, un composé double de fluorure d'aluminium et de sodium, le solvant de l'alumine à la base du bain d'électrolyse. Tous ces sels devront être idéalement anhydres et on veillera pratiquement à ce qu'ils contiennent le moins d'eau possible. Ainsi traitées, les crasses, moins riches en aluminium, aux environs de 25%, puisqu'une partie de celui-ci est retournée dans le bain, flottent plus rapidement et plus complètement et sont séparées mécaniquement de l'aluminium liquide par écrémage au moment de la coulée. Ce traitement est surtout réservé aux fusions s'accompagnant de crasses abondantes.
2. traitement des crasses après la fusion. Séparées mécaniquement de l'aluminium liquide au moment de la coulée, elles refroidissent au contact de l'air et l'aluminium emprisonné dans l'alumine continue à s'oxyder jusque vers 500° C, cependant moins pour les crasses traitées par les sels.

Les crasses sont alors classées :

- en crasses riches, celles qui n'ont pas été traitées par les chlorures alcalins, avec une teneur moyenne en aluminium d'environ 50-60 % en poids. On les appelle « crasses blanches » en raison de leur couleur conférée par l'alumine.

- en crasses traitées par les chlorures alcalins avec une teneur en aluminium d'environ 25% et des teneurs en sels d'environ 20%, elles sont dites « asséchées » (dried en anglais). L'addition de sels donne une couleur allant du gris au noir, suivant la quantité de sels utilisés, et les crasses traitées sont aussi appelées « crasses noires ».

Après refroidissement, traitées ou non, blanches ou noires, les crasses sélectivement collectées avant d'être traitées. Par définition ce sont des déchets neufs, internes.

Plusieurs techniques ont été proposées, certaines sont commerciales et la référence est le four à bain de sels.

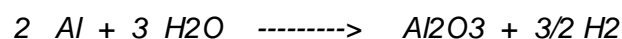
On a d'abord les techniques de traitement des crasses chaudes. Certains proposent l'emploi de gaz neutres pour limiter significativement l'oxydation de l'aluminium, d'autres utilisent les propriétés mécaniques à chaud pour forcer la séparation de l'aluminium liquide par pression ou par centrifugation. Ces procédés disparaissent car ils sont difficiles à mettre en œuvre et concernent seulement les faibles tonnages des crasses riches dites « blanches ». Ensuite, on a les techniques fondées sur le principe de casser la liaison aluminium - alumine, le moyen utilisé pouvant être en plus de mécanique, à chaud et aussi à froid :

- thermique (chauffage)
- physico-chimique (modification des propriétés de surface)

et les procédés industriels sont le plus souvent une combinaison de ces moyens.

7.2.3. La contamination par l'hydrogène :

L'hydrogène dissous est responsable de la formation de piqûres à la solidification, lesquelles piqûres ainsi que les oxydes en suspension détériorent les caractéristiques mécaniques. A l'origine du couple hydrogène / alumine, la réaction de l'eau avec l'aluminium suivant la réaction :



L'eau peut être apportée par :

- les déchets et ceux ayant été exposés aux intempéries sont toujours humides
- les flux de traitement et les chlorures alcalins, malheureusement hygroscopiques, sont très souvent humides
- les revêtements des moules (en fonderie) qui peuvent être insuffisamment séchés.

- l'atmosphère au dessus de l'aluminium liquide et elle contient de la vapeur d'eau provenant des gaz de combustion et de l'air.

De nombreux facteurs favorisent la dissolution de l'hydrogène et ce sont souvent les mêmes que ceux qui favorisent la formation des crasses : l'élément d'alliage lui-même (Mg, Ti, Ni, Na, Sr, Ca augmentent la solubilité de l'hydrogène alors que Si, Cu, Mn, Zn la diminuent), la température (elle augmente le passage en solution de l'hydrogène. D'après la loi de Sieverts, le volume d'hydrogène dissous par 100 g d'aluminium passe de 0,92 cm³ à 700° C à 1,67 cm³ à 800° C).

Les conditions pour éviter si non réduire la dissolution de l'hydrogène sont les mêmes que pour la formation des crasses ; d'abord éviter l'eau partout et l'éliminer par chauffage, ensuite fondre rapidement sans surchauffe et sans régime turbulent. Enfin, les temps de maintien et de traitement doivent être les plus courts possibles et la vitesse de solidification élevée contribue à réduire les piqûres.

Comme on ne sait éviter totalement l'eau, on a des techniques de traitement du métal liquide : le dégazage avec un effet de flottation par injection d'un gaz neutre (azote, argon) ou réactif (chlore et composés chlorés), ces derniers de moins en moins utilisés en raison des problèmes environnementaux créés, et la filtration pour éliminer les inclusions restantes, principalement d'alumine.

Grâce à ces traitements, la qualité a été spectaculairement améliorée. Par exemple, la réduction du poids de la boîte boisson a été rendue possible par la diminution de l'épaisseur de la feuille, elle même rendue possible grâce à un métal exempt d'inclusions.

7.2.4. Les possibilités de purification par élimination :

En raison de la stabilité thermodynamique des composés d'aluminium, l'élimination des éléments sous forme de composés est très limitée dans le domaine de température du recyclage par fusion entre 700 et 800° C.

7.2.4.1. Par transformation physique sélective : en raison de la miscibilité de l'aluminium avec la plupart des éléments, les propriétés physiques pouvant permettre une séparation vraiment sélective sont peu nombreuses :

7.2.4.1.1. Par fusion : La température de fusion de l'aluminium est relativement basse comparativement à celles des métaux que l'on rencontre le plus fréquemment associés avec l'aluminium métal dans les vieux déchets; c'est le cas du cuivre et surtout du fer, avec des températures de fusion plus grandes que 1.000° C. On peut donc en principe séparer sélectivement l'aluminium du fer et du cuivre par fusion. C'est le principe des fours de déferrage encore aujourd'hui utilisés; la

technique est simple mais inefficace car l'aluminium recueilli contient toujours du fer, en quantités souvent trop importantes.

7.2.4.1.2. Par vaporisation : Les courbes de tension de vapeur en fonction de la température indiquent que, théoriquement, les éléments suivants ont une tension de vapeur plus grande que celle de l'aluminium : Hg, P, S, As, Se, K, Na, Zn, Te, Mg, Li, Ca, Ba, Pb, Mn, Ag. Deux techniques éprouvées ont été développées en même temps que celles de production de l'aluminium par d'autres procédés que le procédé HALL-HEROULT car ils aboutissaient à un aluminium brut contenant du silicium et du fer qu'il fallait éliminer.

L'une est la vaporisation directe qui conduit à séparer au moins partiellement le zinc, le magnésium et le lithium pour les éléments d'alliage et le sodium, le phosphore et l'hydrogène pour les autres éléments. Par contre, silicium, cuivre, fer resteront avec l'aluminium. Seule une distillation directe, qui porterait alors sur l'aluminium, laisserait silicium, cuivre et fer dans les résidus de vaporisation. Demandant de très hautes températures et de très hauts vides, portant sur l'aluminium, la masse la plus importante, cette technique n'est économiquement pas envisageable.

L'autre est la vaporisation indirecte qui combine la solidification sélective (voir ci-après) avec la vaporisation. On mélange à l'état liquide l'aluminium impur avec un métal qu'on pourra facilement séparer ensuite par volatilisation, magnésium (procédé BECK), zinc, plomb ou même mercure. Au refroidissement, on a d'abord la solidification de composés définis de fer, manganèse, silicium et aluminium qui sont séparés par filtration, puis on vaporise le métal volatil, magnésium ou zinc. Cependant restent dans l'aluminium ainsi purifié le cuivre et le nickel.

Nous devons enfin mentionner la technique du dégazage qui a pour premier objet l'élimination de l'hydrogène et des inclusions. Le dégazage est soit naturel soit par injection de gaz neutre, couramment l'azote, voire réactif comme le chlore et ses composés. La pression partielle des éléments les plus volatils est abaissée ce qui correspond à un vide peu poussé, suffisant cependant pour vaporiser partiellement le magnésium, le calcium et les éléments alcalins.

7.2.4.1.3. Par solidification fractionnée : On exploite la propriété des diagrammes de phases présentant des eutectiques, monotectiques et péritectiques. Dans des conditions thermiques appropriées, à partir d'une composition donnée, on peut obtenir deux phases, l'une liquide, l'autre solide, avec des teneurs différentes dans l'élément à éliminer.

Des procédés industriels sont fondés sur cette propriété, ancien comme le procédé PATTINSON (extraction de l'argent du plomb), plus récent comme la fusion de zone.

La cristallisation fractionnée a été appliquée pour produire de l'aluminium de haute pureté jusqu'à 7 fois 9 (total des impuretés inférieur à 0,00001%) et récemment elle a été à nouveau envisagée. En principe, on pourrait éliminer la plupart des éléments d'alliages y compris ceux réputés difficiles, voire impossibles à éliminer mais, en pratique, la liste se ramène à silicium, cuivre et magnésium. La mise en œuvre demande un très bon contrôle des conditions opératoires : concentrations initiales, profil thermique du four pour satisfaire les gradients de température parfois très faibles, quelques degrés dans le cas du fer et du manganèse. On doit avoir une bonne séparation entre le liquide et le solide, avec un rendement satisfaisant en fraction épurée. Enfin les pertes liées au procédé et surtout la fraction enrichie en élément à éliminer doivent être en quantités les plus faibles possibles car il faudra aussi valoriser cette fraction. Ces procédés n'ont pas encore franchi l'étape du développement et nous pensons, malgré leur intérêt, qu'ils ne la franchiront probablement jamais en raison de leur faible rendement.

7.2.4.2. Par réaction chimique sélective : parmi les composés couramment utilisés en métallurgie extractive, oxyde, chlorure, fluorure, ceux d'aluminium sont dans les plus stables.

7.2.4.2.1. Par oxydation : Les diagrammes d'énergie libre en fonction de la température (ELLINGHAM) des oxydes montrent que seuls ceux des éléments plus stables que l'aluminium peuvent être éliminés. C'est le cas du calcium, du baryum, du béryllium et de deux éléments d'alliages, le lithium et le magnésium, ce dernier seulement d'usage courant. Pratiquement, ils peuvent être éliminés si non totalement au moins en partie. Le magnésium est oxydé en magnésie, MgO , lorsque les teneurs en magnésium de l'alliage sont supérieures à environ 0,4% et, quand on fond seulement des déchets des alliages Al-Mg, on ne peut éviter une perte de magnésium

7.2.4.2.2. Par halogénéation (fluoration et chloration) : On retrouve les mêmes éléments susceptibles d'élimination sous forme de fluorures par action du fluorure d'aluminium, ainsi le magnésium. Le procédé ALCAN, fondé sur les propriétés des mono et trichlorure d'aluminium (voir chapitre du minerai à l'aluminium liquide), permet en principe la purification totale de l'aluminium, mais n'a jamais été industrialisé en raison de la corrosion des installations. Un autre inconvénient c'est l'aluminium qu'on extrait, pas les impuretés. Industriellement, la chloration par injection de chlore ou d'un composé chloré ou la fluoration par le tri-fluorure d'aluminium permet d'éliminer le magnésium, le sodium et le lithium. Ces traitements sont inclus dans la technique de dégazage précédemment citée.

7.2.4.2.3. *Par électrolyse* : Plusieurs techniques sont envisageables.

A la température de l'aluminium liquide, c'est l'électro-raffinage utilisé depuis très longtemps pour porter la pureté de l'aluminium d'électrolyse de 99,5% à 99,99% et plus. Dans les procédés industriels HOOPES, GADEAU et ALUSUISSE, dits à trois couches, le principe est le suivant : une anode, un alliage cuivre-aluminium à purifier, au fond d'un électrolyseur du type HALL-HEROULT, un électrolyte contenant toujours de la cryolithe, $\text{AlF}_3\text{-NaF}$, et surnageant au dessus, l'aluminium purifié, sont les trois couches. Récemment, il a été proposé d'utiliser un diaphragme en céramique, matériau nouveau pour ce type d'application; on en est au stade des essais de laboratoire.

A la température de l'aluminium solide, on utilise des électrolytes ioniques à base de trichlorure d'aluminium et de composé organique ; cette technique est au stade de programmes de recherche et développement.

Toutes ces techniques permettent d'éliminer le fer, le manganèse, le silicium, le cuivre ainsi que le titane et le nickel, mais pas le zinc et le magnésium lorsque l'aluminium est produit à l'état liquide. Le dépôt de l'aluminium purifié à l'état solide permet d'éliminer aussi le zinc et le magnésium.

L'obstacle au développement industriel de ces procédés, c'est leur nature électrochimique. D'abord, il faut se rappeler que leur application industrielle a été la purification de l'aluminium d'électrolyse, qui avec toujours plus de 99,5% d'aluminium peut être considéré déjà comme pur. Or, un déchet aura une teneur très variable en aluminium, le plus souvent entre 85 (les alliages aluminium-silicium) et 98%. Il faudra donc trier préalablement les déchets, et séparer ceux en alliages de silicium, zinc et magnésium. Même ce tri fait, il faut la plus grande constance possible de leur composition pour un bon déroulement de l'électrolyse. Ensuite, ce sont les inconvénients de l'électrolyse : consommation d'énergie (l'électrolyseur à trois couches précité consomme entre 15 et 20 kWh/kg d'aluminium raffiné, autant que l'électrolyseur HALL-HEROULT), montant de l'investissement, faible productivité caractéristique des procédés électrochimiques, contraintes environnementales (émission de vapeurs d'électrolyte). Enfin, reste posé le sort de l'aluminium et de l'électrolyte qui eux s'enrichissent en cuivre, fer, etc. et qu'il faudra périodiquement extraire de la cellule d'électrolyse.

Pour toutes ces raisons, le traitement électrochimique des déchets pourra au mieux être une solution limitée à quelques cas très particuliers.

7.2.4.3. La réalité de la purification :

Dans les conditions réelles, - sous atmosphère d'air et dans des conditions de pression et d'activités thermodynamiques qui sont celles de solutions complexes et diluées des éléments à éliminer -, on peut tabler naturellement, pour les éléments habituellement présents avec l'aluminium, sur :

- l'élimination poussée du baryum, du béryllium, du cadmium et du calcium (gadolinium ?)
- l'élimination partielle de l'antimoine, du bismuth, du bore, de l'étain, du sodium, du potassium, du lithium, du magnésium et du zinc, ces deux derniers étant des éléments d'alliages
- aucune élimination du fer, du titane, du vanadium, du zirconium, du plomb, du chrome, du nickel, du manganèse, du silicium et du cuivre, ces trois derniers étant des éléments d'alliages.

Des éléments d'alliage et de la principale impureté, le fer, on éliminera seulement et partiellement le magnésium, le zinc et le lithium.

L'élimination forcée (voir tableau 7.5), complément de l'élimination naturelle précitée, fait appel à des moyens inhabituels, l'emploi du vide, l'action du chlore. Elle améliore les résultats de l'élimination naturelle sans cependant les modifier spectaculairement.

En conclusion, c'est une vingtaine d'éléments dont tous les éléments d'alliage et le fer qui restent partiellement ou totalement dans l'aluminium. Par analogie avec la métallurgie du fer, aussi confrontée à des éléments difficiles ou impossibles à éliminer, - ils sont au nombre de 5, le cuivre, l'étain, le molybdène, le chrome et le nickel, et on parle des cinq grandes impuretés, les « big five » - , on doit alors parler, pour l'industrie de l'aluminium, des «big twenty», les 20 grandes impuretés.

Tableau 7.5 : Principales méthodes industrielles d'élimination (source C. Gentaz)

méthode d'élimination	effets
Dégazage par injection d'un gaz neutre, azote le plus souvent, dans l'aluminium liquide	élimination de H, Li, Na, Mg, Ca, Sr; aussi élimination des inclusions
Action du chlore ou d'un composé libérant du chlore dans l'aluminium liquide, dite chloration (chlorination)	élimination des alcalins et des alcalino-terreux
Distillation sous vide	élimination de Li, Zn, Mg, Na
Action de mélange de sels, AlF_3 , NaCl, KCl, liquides à la température de l'aluminium liquide (salt refining)	élimination de Li, Na, Ca, Sr. Aussi élimination des inclusions et séparation facilitée de l'aluminium des crasses
Electrolyse	élimination de Fe, Mn, Cu, Si (et Ti, Ni)
Fusion sélective de l'aluminium	élimination de Fe, voire Cu
Addition d'aluminium d'électrolyse ou de déchets internes de l'alliage concerné	dilution de tous les éléments
Addition de silicium ou de déchets internes de l'alliage concerné	dilution de tous les éléments, mais vaut seulement pour les alliages aluminium – silicium

7.3. Les solutions industrielles

Alors que le recyclage est exclusivement fait par fusion, l'application des lois fondamentales de la chimie et de la physico-chimie met en évidence des limitations au recyclage éternel souvent revendiqué par l'industrie de l'aluminium. Il y a des pertes d'aluminium, irréversibles lorsque l'aluminium est transformé en alumine, réversibles lorsque l'aluminium est entraîné par l'alumine, dans le mélange alumine-aluminium, les « crasses ». Ces pertes peuvent être importantes suivant les conditions opératoires et la qualité des déchets.

Les pertes d'aluminium ont aussi pour conséquence d'augmenter la concentration de tous les éléments restés dans l'aluminium. Le recyclage d'un déchet contenant lui-

même de l'aluminium recyclé, - c'est le cas de la boîte boisson et on parlera de recyclage successif - entraîne une accumulation croissante des impuretés dont on ne connaît pas aujourd'hui la limite acceptable.

La purification de l'aluminium est très limitée. Pour les impuretés majeures, les éléments d'alliage, on éliminera partiellement le zinc et le magnésium. Par contre, le cuivre, le manganèse, le silicium, et la véritable impureté, le fer, restent.

L'industrie du recyclage, confrontée à la quasi impossibilité d'éliminer éléments d'alliages et impuretés à l'état liquide, dispose cependant de deux solutions industrielles.

L'une consiste à diluer par de l'aluminium d'électrolyse ou des déchets neufs, de préférence internes, ou par un élément d'alliage et un seul s'y prête, le silicium. La dilution par l'aluminium est limitée par le coût, celle par le silicium par sa concentration, environ 10% en moyenne, et aussi son prix, voisin de celui de l'aluminium.

L'autre, c'est classer les déchets avant la fusion. Par le classement, s'il peut être fait par série d'alliage, mieux encore par nuance d'alliage, on peut alors espérer obtenir la même série, voire la même nuance. Si le classement même par série est impossible, on obtiendra un alliage d'aluminium de composition trop variable suivant les déchets enfournés pour répondre aux spécifications des applications envisageables.

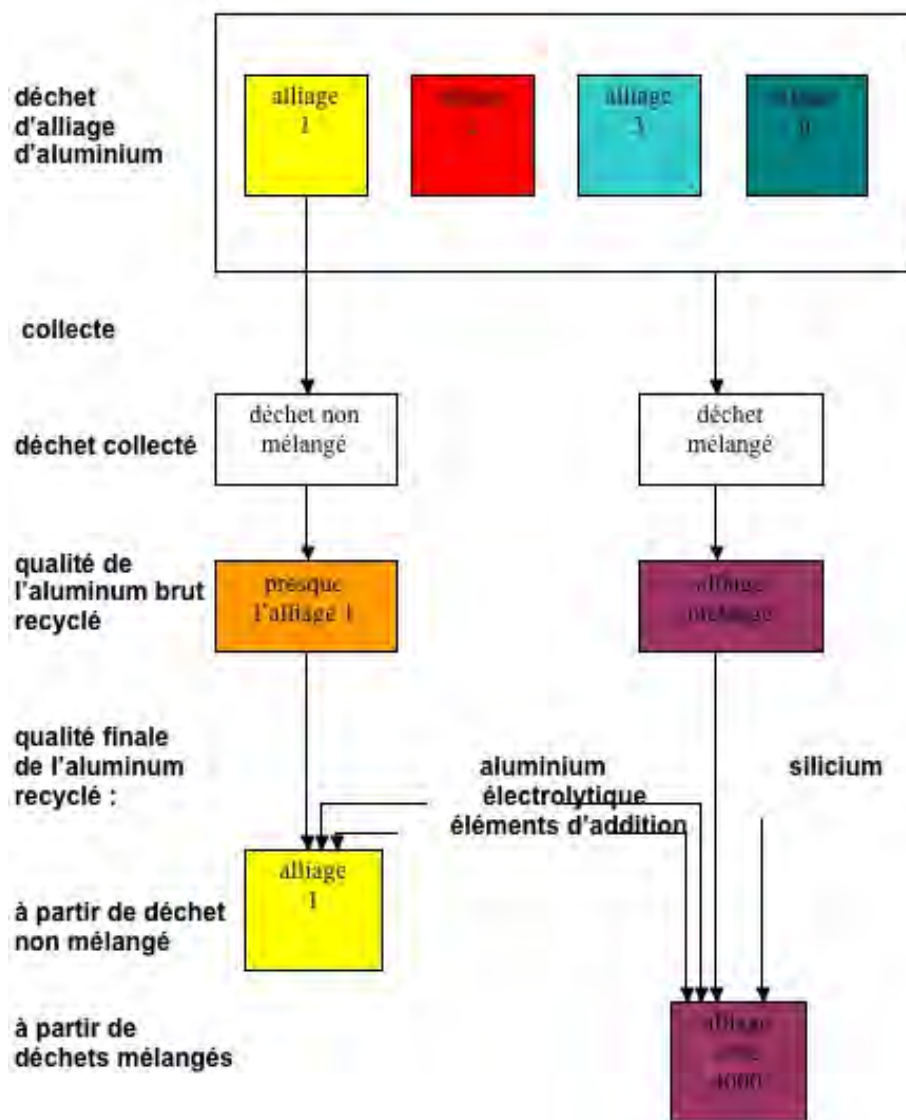
L'industrie du recyclage a recours à ces deux solutions, dilution et classement. C'est le marché de la fonderie qui accepte les spécifications les plus larges et les minimales les plus élevées des teneurs en éléments d'alliage et en fer (voir tableau ci-dessous). C'est la raison pour laquelle le langage courant confond souvent recyclage et alliages de fonderie puisqu'ils sont la première application, historiquement et quantitativement, des vieux déchets.

Tableau 7.6 : Spécifications comparées des alliages de la série 4000, aluminium – silicium, et de ceux des autres séries ^(126, 127)

élément (%)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni
spécification série 4000, aluminium – silicium	0,8-13,5	0,4-1,0	0,1-5,0	0,03-1,5	0,01-2,0	0,05-0,25	0,05-0,25	0,15-0,30
spécification minimum des autres alliages	0,04	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01
spécification maximum des autres alliages	2,0	2,0	6,8	1,8	5,6	8,7	0,4	1,3

Nous avons enfin représenté dans la figure 7.5 la liaison entre les qualités de l'alliage recyclé et des déchets utilisés.

Figure 7.5 : Correspondance entre les qualités de l'aluminium recyclé et celles des vieux déchets



7.4. Bibliographie

- (250) Cox Antony and Fray Derek. J. Separation of Mg and Mn from Beverage Can Scrap using a Recessed-Channel Cell. *Journal of the Electrochemical Society*, 150 (12), D200-D208 (2003)
- (251) Reuter M. A., de Jong T. P. R., Castro M. G. B., van Schark A. Boin O. Automatic sorting, metallurgy and system engineering – keys to closing the aluminium cycle. 7th OEA International Aluminium Recycling Congress, München, Germany, 17/18 march 2003
- (252) Rombach Georg and Friedrich Bernd. Future potential and limits of aluminium recycling. *Proceedings of the European Metallurgical Conference*, 17-32, 2001
- (253) Racunas B. J. Recovery of aluminium from secondary sources by means of agitated molten salts. Sans date ni source
Proceedings of Recycling of Metals and Engineered Materials, edited by Stewart D.L. Stephens R. and Dailey J.C., TMS, 2000
- (254) Ohtaki Mitsuhiro, Arakawa Tetsuzo, Murata Fujio. A new proposal of continuous agitation vacuum distillation process (CAVP) to remove Zn from aluminum scrap melt. 993-1.003
- (255) Kahveci Ali I. and Unal Ali. Refining of a 5XXX series aluminum alloy scrap by ALCOA fractional crystallization process. 979-991
- (256) Sillekens W. H. and Schade Van Westrum J.A.F.M, Bruinsma O.S-L., Mehmetaj B., Nienoord M. Refining aluminium scrap by means of fractional crystallisation : basic experimental investigations. 963-977
- (257) Wu Banqiu, Reddy Ramana G., Rogers Robin D. Aluminum recycling via near room temperature electrolysis in ionic liquids. 845-856
- (258) Polyakov P., Mikhalev Yu. Electrolytic refining of aluminium using ceramic diaphragm for separating of refined and impure metals. Confidential report, 1999

- (259) Katyal Anil. The changing pattern of secondary aluminium industry through the millenium. Proceedings of the third ASM International Conference & Exhibition on The Recycling of Metals, Barcelona, Spain, 237-253, 11-13 June, 1997
- (260) Comportement des réfractaires vis-à-vis de l'aluminium. Fonderie, Fondateur d'aujourd'hui, 131, 35, Janvier 1994
- (261) Fox M. H. and Nilmani M. Dross minimisation – its relationship to melting and melt handling practice. Aluminium melt treatment & casting, edited by Nilmani, The Minerals, Metals and Materials society, 223-239, 1993
- (262) Erard J-P. Dégazage et lavage des bains d'aluminium par insufflation d'azote à l'aide d'un rotor. Hommes et Fonderie, 23-30, Novembre 1990
- (263) Hiebel D., Richard M. Tendances actuelles dans le traitement de l'aluminium liquide. Fonderie . Fondateur d'aujourd'hui. 92, 7-10, Février 1990
- Proceedings of the 2nd International Symposium on the Recycling of Metals and Engineered Materials, edited by van Linden Jan H. L., Stewart Jr Donald. S. and Sahai Yogeshwar, The Minerals, Metals and Materials Society, 1990*
- (264) McAvoy B., McNeish J., Stevens W. The Alcan decoater process for UBC decoating. 203-214
- (265) Ho. Francis K. and Sahai Yogesh. Interfacial phenomena in molten aluminum and salts systems. 85-103
- (266) Rooy Elwin L. Trends and development in the aluminium industry. INFACON proceedings, 58-65, 1989
- (267) Registration record of international alloy designations and chemical composition limits for wrought aluminum and wrought aluminum alloys. The Aluminium Association, revised May 1987
- (268) McCubbin and al. Melting aluminium and aluminium alloys. Aluminium industry energy conservation workshop, 1979

(269) Layne G. S., Huml J. O., Bangs L. B., Meserve J. H. Aluminum extraction from impure source by vapor transport with magnesium fluoride. Proceedings of the fourth mineral waste utilization symposium, Chicago, Illinois, USA, 381-392, May 7-8, 1974

(270) Kubashewski O et Evans E. La thermochimie en métallurgie. Monographies de chimie minérale, Gauthier-Villars éditeurs, 1964

7.5. Annexe

Une conséquence inéluctable de la fusion est l'augmentation de la concentration de des éléments contenus dans l'aluminium. Plusieurs fusions successives accroîtront cette augmentation et, malheureusement, nous n'avons trouvé aucune information traitant de l'effet de plusieurs fusions successives, situation pourtant rencontrée avec le recyclage des boites boissons usagées. C'est pourquoi nous avons reporté dans cette annexe l'article suivant, « Influence des principaux éléments présents en faible teneur dans les alliages d'aluminium de moulage », par R. PORTALIER, Hommes et Fonderie, Octobre 1996, pp 15-16, Novembre 1996, pp 19-20, Janvier-Février 1997, pp 17-18, Avril 1997, pp 8 et 11 : 35 corps simples sont analysés pour leurs effets significatifs tant sur les alliages d'électrolyse que sur les alliages de recyclage utilisés en fonderie. On rappellera que la teneur en cuivre doit être abaissée pour obtenir une meilleure résistance à la corrosion et que celle en silicium doit être portée entre 5 et 20% pour obtenir une meilleure fluidité

7.5.1. Antimoine

Sur la structure : affine sans modification la phase eutectique des alliages Al-Si, fragilise les alliages Al-Mg avec formation de Mg_3Sb_2 à partir de 0,2% d'antimoine.

Sur les propriétés de fonderie : utile car inhibe la formation d'hydrogène.

Sur le recyclage : difficile à éliminer ; possibilité d'élimination par action massive du sodium et formation du composé $NaSb_2$ qui passe dans le flux de lavage.

7.5.2. Arsenic

Sur la structure : pour une teneur supérieure à 0,8%, il y a formation d'un composé défini AlAs.

Sur les propriétés de fonderie : dégradation des propriétés de moulage et d'usinage lorsque la teneur en AlAs est supérieure à 0,8%.

Sur le recyclage : s'élimine par fusion jusqu'à 0,8%, au delà formation de AlAs.

7.5.3. Baryum

Sur la structure : modifie la phase austénitique des alliages Al-Si.

Sur les propriétés de fonderie : peut utilement remplacer le sodium.

Sur le recyclage : s'élimine facilement.

7.5.4. Beryllium

Sur la structure : diminue les risques d'oxydation ; affine légèrement le grain.

Sur les propriétés de fonderie : désoxydant ; améliore faiblement les propriétés mécaniques.

Sur le recyclage : s'élimine avec des flux désoxydants.

7.5.5. Bismuth

Sur la structure : non miscible au dessus de 0,2% à 270° C. Pas d'effet si la teneur est inférieure à 0,2%. Peut remplacer l'antimoine.

Sur les propriétés de fonderie : en dessous de 0,2%, améliore légèrement la résistance mécanique. Au dessus de 0,2%, dégrade les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion, améliore l'usinabilité.

Sur le recyclage : difficile à éliminer ; en présence de plomb, formation de phases non miscibles séparables par décantation.

7.5.6. Bore

Sur la structure : affine en association avec le titane sous forme de diborure de titane, TiB₂. Sans effet jusqu'à 0,02%.

Sur les propriétés de fonderie : c'est le meilleur affineur du grain en présence de titane avec une teneur inférieure à 0,2%. Au delà, il rend l'usinage difficile (points durs).

Sur le recyclage : insoluble dans l'aluminium, est toujours sous forme de borures seulement séparables par décantation.

7.5.7. Cadmium

Sur la structure : non miscible au dessus de 0,05% à 320° C, affine légèrement le grain.

Sur les propriétés de fonderie : diminue les propriétés mécaniques en améliorant l'usinabilité. Altère les effets du traitement thermique des alliages Al-Cu.

Sur le recyclage : élimination relativement facile en raison de sa température de vaporisation relativement basse, 770° C.

7.5.8. Calcium

Sur la structure : modifie la phase eutectique des alliages Al-Si.

Sur les propriétés de fonderie : nuisible au dessus de 30 ppm.

Sur le recyclage : s'élimine assez bien ; utile en addition pour éliminer l'étain, le bismuth, l'antimoine et le plomb.

7.5.9. Césium

Sur la structure : très peu miscible, modifie la phase eutectique des Al-Si.

Sur les propriétés de fonderie : rarement employé comme dopant du Na.

Sur le recyclage : disparaît en raison de son point de vaporisation bas ($T_{eb} = 670^{\circ} \text{C}$)

7.5.10. Cobalt

Sur la structure : rend moins fragilisant les composés Al_3Fe .

Sur les propriétés de fonderie : améliore les propriétés mécaniques de fatigue et de fluage.

Sur le recyclage : impureté peu gênante mais difficile à éliminer.

7.5.11. Etain

Sur la structure : affine très faiblement le grain.

Sur les propriétés de fonderie : améliore les propriétés de frottement.

Sur le recyclage : peut s'éliminer avec le plomb par décantation car il n'est pas miscible dans l'aluminium.

7.5.12. Fer

Sur la structure : forme des composés fragilisant Al_3Fe , modifiables par le cobalt et le manganèse. Ces composés apparaissent pour des teneurs en fer supérieures à 0,05%.

Sur les propriétés de fonderie : abaisse les propriétés mécaniques à partir de 0,10%, très fortement à partir de 0,25%, en particulier la ductilité. Améliore usure et frottement à chaud.

Sur le recyclage : ne peut être éliminé. Diminution par dilution et fusion, puis séparation de phases.

7.5.13. Gallium

Sur la structure : totalement miscible.

Sur les propriétés de fonderie : à haute teneur, peut altérer la résistance à la corrosion.

Sur le recyclage : oxydation en Ga_2O_3 et élimination par flux comme pour Al_2O_3 .

7.5.14. Germanium

Sur la structure : comportement voisin de celui du silicium.

Sur les propriétés de fonderie : améliore légèrement la résistance aux criques de retrait.

Sur le recyclage : pas d'élimination possible.

7.5.15. Hafnium

Sur la structure : affine comme le titane et le zirconium, via le composé HfAl_3 .

Sur les propriétés de fonderie : améliore les propriétés mécaniques.

Sur le recyclage : très difficile à éliminer sauf par décantation.

7.5.16. Indium

Sur la structure : est miscible partiellement au dessus de 0,15%.

Sur les propriétés de fonderie : améliore la résistance à la corrosion ; dans les alliages Al-Cu modifie les phénomènes de durcissement structural par traitements thermiques.

Sur le recyclage : disparaît grâce à sa faible température de vaporisation.

7.5.17. Lithium

Sur la structure : est soluble en dessous de 1% à la température ordinaire; dans les alliages Al-Cu, il y a formation de phases CuAlLi qui permettent un durcissement structural par traitements thermiques.

Sur les propriétés de fonderie : améliore le module de Young.

Sur le recyclage : l'oxydation du lithium augmente les pertes au feu.

7.5.18. Manganèse

Sur la structure : la phase AlMn₆ peut modifier et fragiliser Al₃Fe.

Sur les propriétés de fonderie : sans influence pour les teneurs inférieures à 0,2%. Au dessus, utile pour les alliages contenant l'impureté fer en diminuant la fragilisation et la tendance aux micro-retassures. Moins efficace que le cobalt.

Sur le recyclage : ne peut être éliminé.

7.5.19. Tantale

Sur la structure : affine au même titre que le titane, le zirconium, le hafnium.

Sur les propriétés de fonderie : affine le grain, diminue la dureté entre 0,1 et 0,25%. Sans influence si < 0,15%.

Sur le recyclage : ne peut être éliminé.

7.5.20. Tellure

Sur la structure : entraîne la nucléation du silicium (rôle analogue au phosphore).

Sur les propriétés de fonderie : inutilisable car très oxydable.

Sur le recyclage : s'élimine par oxydation dans les oxydes de surface.

7.5.21. Titane

Sur la structure : affine la matrice des alliages.

Sur les propriétés de fonderie : très utilisé entre 0,10 et 0,20%.

Sur le recyclage : très stable; son accumulation peut altérer l'usinage (points durs).

7.5.22. Tungstène

Sur la structure : affine légèrement le grain.

Sur les propriétés de fonderie : aucune action en dessous de 0,06%. Au dessus, améliore la résistance à la corrosion.

Sur le recyclage : toujours considéré comme une impureté.

7.5.23. Vanadium

Sur la structure : affine le grain au même titre que le titane et le zirconium.

Sur les propriétés de fonderie : pas d'effet en dessous de 0,1%. Au dessus complète l'effet du titane.

Sur le recyclage : très stable.

7.5.24. Yttrium

Sur la structure : pas d'action notable.

Sur les propriétés de fonderie : pas d'action notable.

Sur le recyclage : aucune information.

7.5.25. Zirconium

Sur la structure : entre 0,1 et 0,3% affine le grain.

Sur les propriétés de fonderie : sans effet jusqu'à une teneur de 0,2%. Au dessus améliore les caractéristiques mécaniques à chaud et la résistance à la corrosion sous tension.

Sur le recyclage : élément très stable.

7.5.26. Terres rares

Sur la structure : affine le grain.

Sur les propriétés de fonderie : améliore les caractéristiques en général en raison de ses actions désoxydante et désulfurante.

Sur le recyclage : par oxydation passent dans les crasses.

Chapitre 8. Les technologies du recyclage

8.1. Les conséquences de la qualité des déchets

Selon le mode de collecte, les déchets sont non mélangés ou mélangés :

8.1.1. Cas des déchets non mélangés

C'est le cas des déchets neufs, internes toujours (c'est la qualité de l'aluminium d'électrolyse, pur ou allié), de transformation le plus souvent (c'est la qualité précédente mais associée à de l'eau et à des composés organiques), et des vieux déchets, plus rarement mais de plus en plus souvent avec la collecte sélective. Ces déchets ont la même composition métallurgique.

Théoriquement et dans une large mesure pratiquement, on peut refaire le produit à l'origine du déchet, évidemment au prix de pertes d'aluminium qui ont pour effet d'enrichir l'aluminium recyclé en éléments impossibles à éliminer. Pour retrouver la spécification initiale, on a alors recours à la dilution par de l'aluminium pur.

Par exemple, les vieux câbles électriques sélectivement collectés au moment de la démolition conduisent par fusion à un métal convenable pour refaire un nouveau câble identique; de même, les boîtes boissons sélectivement collectées après usage, alors qu'il s'agit d'un produit complexe avec deux alliages d'aluminium, conduisent par fusion à un métal convenable pour refaire le corps, la plus grande partie, de la boîte neuve, mais pas le couvercle.

8.1.2. Cas des déchets mélangés

C'est surtout le cas des vieux déchets de consommation, un mélange hétérogène, toujours humide, de matériaux métalliques (ferreux et non ferreux) et non métalliques (verre, plastiques, papier, bois, etc.). Divers traitements permettent d'isoler ce qui est aluminium mais il est impossible d'extraire en totalité la plupart des métaux qui verront donc leurs teneurs augmenter dans l'aluminium recyclé. Les propriétés mécaniques et électriques de l'aluminium sont sinon perdues, en tout cas dégradées, et seules sont conservées en totalité la légèreté et en bonne partie la résistance à la corrosion.

Les applications d'origine sont donc exclues la plupart du temps.

Seules conviennent l'application dissipative en aciérie – l'aluminium est un produit de désoxydation et l'aluminium, transformé en alumine, va dans le mélange d'oxydes constituant le laitier – et surtout la production des pièces de fonderie en alliages aluminium-silicium de la série 4000 qui permettent d'étendre le domaine d'emploi des vieux déchets mélangés pour les deux raisons suivantes :

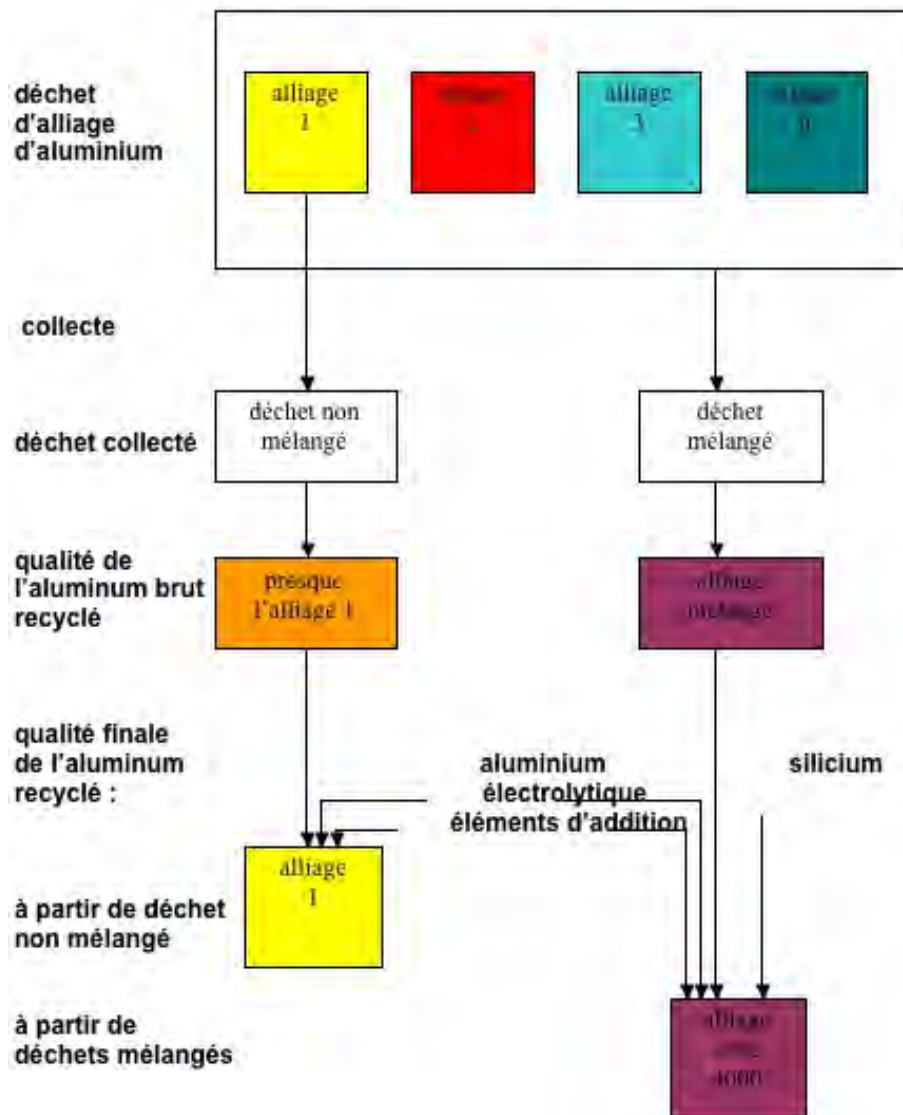
D'une part, la teneur moyenne en silicium des alliages de fonderie est d'environ 7% et on doit ajouter du silicium. On a un effet de dilution important avec un apport moyen d'environ 5% (valeur utilisée par les producteurs de silicium pour calculer la demande de silicium par l'industrie de la fonderie d'aluminium).

D'autre part, leurs spécifications analytiques, plus larges, introduisent une souplesse supplémentaire.

Dilution et spécifications élargies permettent seulement de repousser les limites d'emploi des vieux déchets. Le cas du fer, le pire des contaminants car partout présent, impossible à éliminer et détériorant les propriétés, en est une parfaite illustration. Lorsque sa teneur dépasse 1%, l'alliage ne peut plus être coulé par gravité. Heureusement, on peut encore le couler sous pression.

Nous avons représenté dans la figure 8.1 cette correspondance entre les qualités de l'alliage recyclé et celles des vieux déchets suivant le mode de collecte :

Figure 8.1 (aussi figure 7.5) : Correspondance entre les qualités de l'aluminium recycle et celles des vieux déchets (source C. Gentaz)



8.2. La métallurgie extractive du recyclage sans fusion ^(272,273)

Fondée sur la compression mécanique, et ce sont le plus souvent des techniques d'extrusion, elle est à priori séduisante par ses avantages incontestables. Supprimer la fusion conduit en effet à consommer moins d'énergie, à supprimer les pertes par oxydation ainsi que l'absorption de l'hydrogène, à réduire les émissions polluantes, fumées et crasses, à supprimer les pertes de matières de la fabrication du semi-produit. On peut ainsi espérer une installation plus simple, moins de main d'œuvre et un coût de production plus bas. Mais c'est aussi s'interdire toute purification et il faut donc disposer au départ de déchets très propres, de haute pureté, de qualité identique à celle du produit fini recyclé, ce qui passe nécessairement par un prétraitement complexe du déchet. Celui-ci comprend des étapes de broyage et

criblage pour obtenir une charge homogène de granules, exempte de fractions grosses et fines, puis de purification par un prétraitement thermique, éventuellement sous vide, à basse température, pour éliminer eau, huiles, graisses. Par extrusion de cette charge ainsi prétraitée, dans des conditions correctes en particulier de température et de pression, on obtient des produits extrudés très semblables à ceux obtenus conventionnellement à partir à partir des billettes et barres. Malheureusement la faible couche d'alumine existant sur les granules, couche qu'il est impossible d'éliminer par prétraitement, les rend impropres aux traitements d'anodisation et aux traitements thermiques et les produits finis se ramènent aux produits désoxydants de l'acier, des lingotins, et à des produits sans caractéristiques.

Au bilan, des prétraitements contraignants, des rendements aluminium (aluminium dans le produit fini par l'aluminium dans les déchets) médiocres car il faut tenir compte de l'élimination des granules trop gros et trop fins qui doivent par ailleurs trouver des applications, des produits finis aux marchés limités, annihilent les avantages espérés.

8.3. La métallurgie extractive du recyclage par fusion

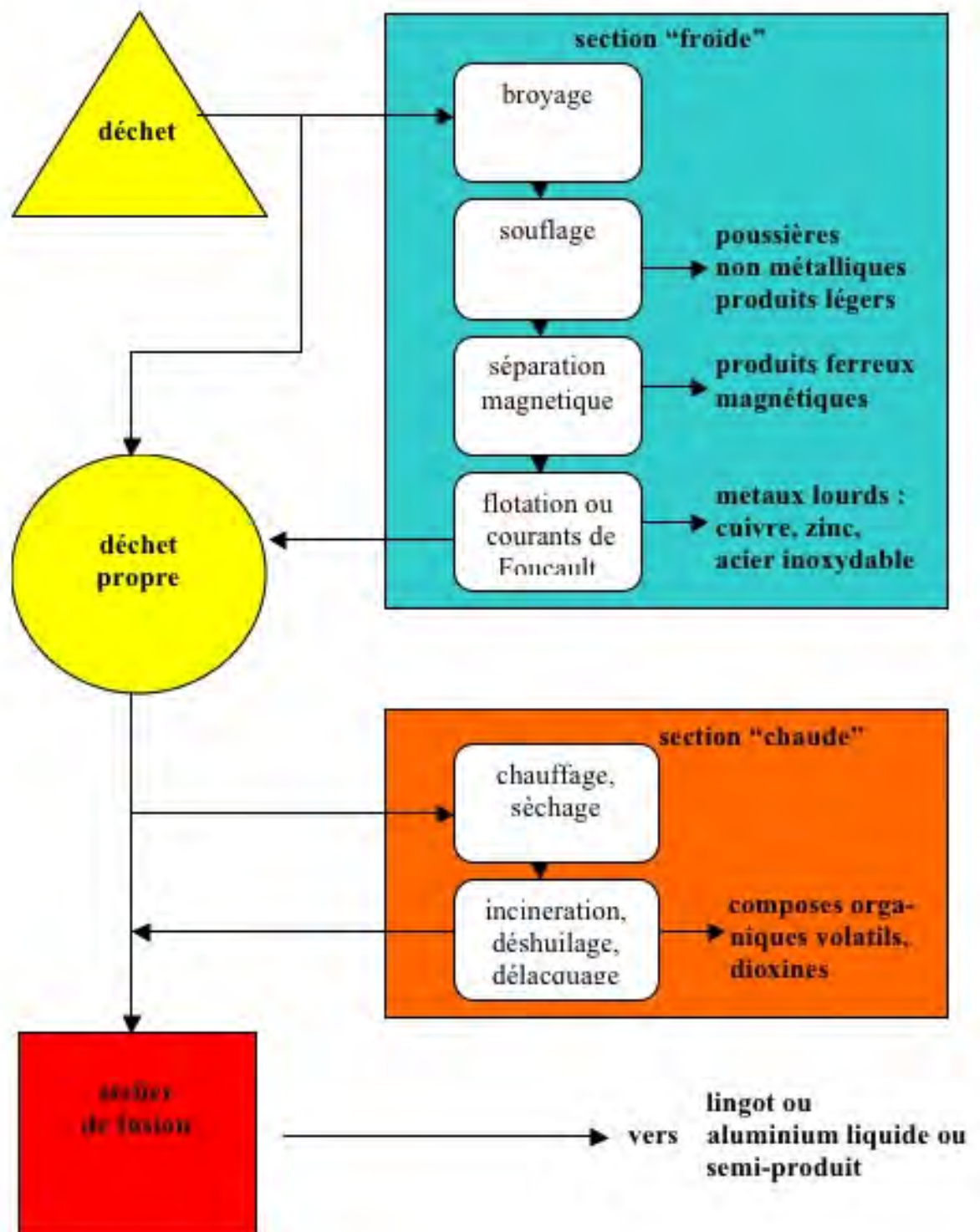
Dans les chapitres précédents, nous avons mis en évidence que la métallurgie du recyclage est beaucoup plus complexe qu'une simple fusion. C'est une véritable métallurgie extractive à partir des déchets, avec quatre étapes successives analogues aux quatre étapes successives de la métallurgie extractive à partir du minerai.

Tableau 8.1 : Correspondance entre les étapes de la métallurgie extractive à partir du minerai et celles de la métallurgie du recyclage à partir des déchets (source C. Gentaz)

étapes	métallurgie extractive à partir du minerai	métallurgie extractive (recyclage) à partir des déchets
1ère étape	extraction et enrichissement du minerai	collecte et tri des déchets d'aluminium
2ème étape	extraction de l'alumine (procédé BAYER)	extraction de l'aluminium des déchets par prétraitements
3ème étape	extraction de l'aluminium (procédé HALL HEROULT)	extraction de l'aluminium des déchets par fusion
4ème étape	purification, mise au titre avant solidification	purification, mise au titre avant solidification

Nous avons représenté (figure 8.2) le schéma d'une usine type de recyclage mettant en évidence ces étapes de la métallurgie extractive.

Figure 8.2 : Schéma d'une usine moderne de recyclage des déchets d'aluminium (source C. Gentaz)



La première étape, c'est un parc de réception et stockage des déchets collectés et pré-triés.

Pour les déchets neufs, collecte et tri sont des opérations simples le plus souvent confondues. La collecte, beaucoup plus complexe pour les vieux déchets puisqu'il s'agit de passer d'un état dispersé à un état concentré, est suivie d'un tri et on distinguera le cas des déchets mélangés de ceux non mélangés. Pour ces derniers, la collecte est sélective et, comme pour les déchets neufs, confondue avec le tri. Pour les déchets mélangés, juste après la collecte, on a un tri grossier ou pré-tri qui sépare dans la mesure du possible le déchet d'aluminium des autres déchets et peut aller jusqu'à faire un premier classement par catégorie de déchets d'aluminium, par exemple par volume entre massif et fin, etc.

Sur le parc des matières premières, les déchets sont classés par catégorie (nature, forme, composition, etc.), éventuellement par alliage, et stockés de plus en plus souvent à l'abri des intempéries (une surface couverte, un hangar) pour éviter les reprises d'humidité. Ils sont ensuite repris, pesés, mélangés en fonction de la nuance d'alliage recherchée et entrent alors dans la chaîne de prétraitement.

La deuxième étape (la figure 8.3 donne, en anglais, les détails des prétraitements des véhicules automobiles hors d'usage), c'est un atelier de prétraitement des déchets avec deux sections, la première à froid, la seconde à chaud. L'unité de prétraitement à froid repose sur des procédés exclusivement physiques et comprend successivement :

- un broyage
- un soufflage où on sépare les produits légers, poussières de toute nature et matériaux légers tels le papier, le plastique
- un champ magnétique où on sépare les matériaux magnétiques, donc le fer et ses alliages à l'exclusion des aciers inoxydables austénitiques
- un dispositif de séparation des matériaux métalliques non magnétiques, le cuivre, le zinc, les aciers inoxydables austénitiques et deux techniques sont disponibles. La plus ancienne, très utilisée en métallurgie extractive à partir des minerais, la flottation par liqueur dense repose sur la différence des densités des matériaux. L'aluminium, plus léger, se concentre à la surface de la liqueur alors que les matériaux lourds se déposent au fond. La liqueur dense, le plus souvent une suspension de fines de ferro-silicium à 15% de silicium dans de l'eau, a une densité fixée par la quantité de ferro-silicium et bien supérieure à celle de l'eau. L'autre technique est fondée sur l'action d'un champ magnétique (courants de Foucault ou eddy currents). Avec une efficacité comparable, une mise en œuvre

plus simple et l'énorme avantage de donner un déchet traité sec (la flottation donne un déchet traité humide), cette technique s'impose.

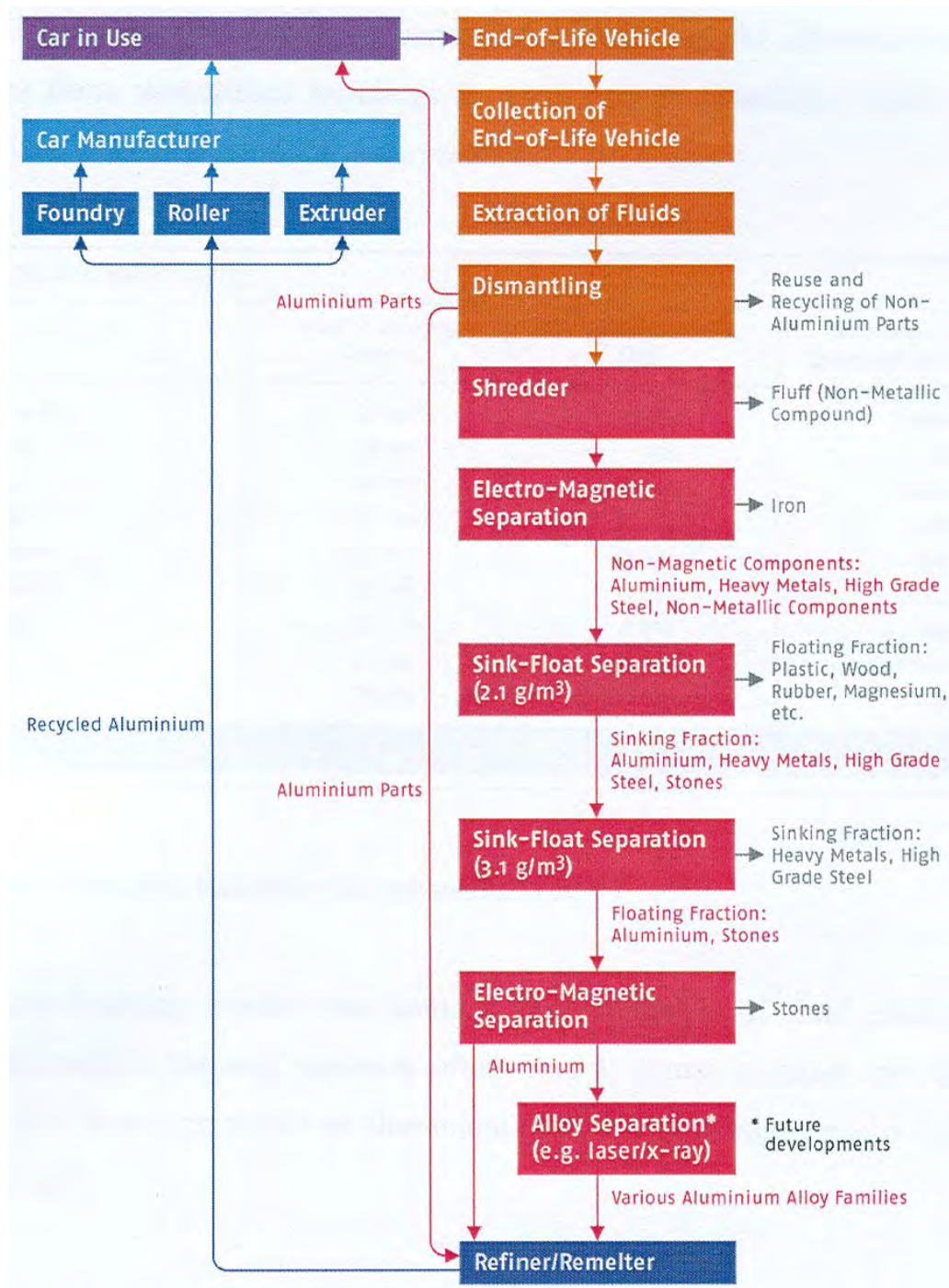
Après ces prétraitements, les déchets contiennent toujours des traces d'humidité et sont le plus souvent contaminés par des produits organiques (huiles, vernis, etc.).

L'unité de prétraitement à chaud, jusqu'à environ 400° C, de nature chimique, est représentée par un four à flamme dans lequel circule le déchet à contre courant des gaz chauds. Au fur et à mesure de l'échauffement progressif du déchet, on a d'abord le séchage avec le départ de l'eau, puis la combustion étagée des produits organiques, déshuilage (deoiling) et départ des huiles, enfin des vernis et laques (delacquering).

Les déchets sortent secs et chauds

A l'issue de ces prétraitements, le déchet est apte à une fusion efficace avec des pertes de matière et des consommations d'énergie les plus faibles possibles et la composition recherchée de l'aluminium recyclé.

Figure 8.3 : Prétraitement à froid d'une automobile en fin de vie (OEA: The Global Aluminium Recycling Committee, Aluminium Recycling : a Cornerstone of Sustainable Development, 2004, page 20)



La troisième étape, c'est l'atelier de fusion, conduite entre 700 et 800° C, dans lequel nous incluons le traitement des crasses de recyclage.

Suivant la qualité et la quantité des déchets à fondre, les outils de fusion sont les suivants :

8.3.1. Fours électriques

C'est surtout un four à induction, sans noyau ou à bassin : il convient très bien aux petits et moyens tonnages (jusqu'à 10 tonnes pour le four sans noyau et 20 tonnes pour le four à bassin) et aux déchets faiblement oxydés, donc les déchets internes et de transformation. Le chauffage est plus homogène et moins turbulent, il n'y a pas de gaz de combustion, le recours aux sels est limité. Pour toutes ces raisons, qualité des déchets, conditions opératoires propres à la fusion électrique, les pertes au feu sont faibles et comprises entre 3 et 5%.

On utilise aussi le four à résistance, surtout réservé au maintien en température après la fusion.

8.3.2. Four réverbère

Chauffé au gaz ou au fuel, il convient parfaitement aux gros tonnages, jusqu'à 100 tonnes, de vieux déchets prétraités et peut accepter des déchets de fine granulométrie. C'est l'outil de fusion de base de l'industrie du recyclage de l'aluminium avec de bons rendements malgré une efficacité thermique médiocre. En raison des conditions opératoires propres à ce type de four (gaz de combustion, bain turbulent) et aussi de la qualité des déchets, les pertes au feu sont comprises entre 5 et 8%.

8.3.3. Four rotatif à axe fixe ou oscillant

Chauffé au gaz ou au fuel, cet outil convient à tous les types de déchet et est souvent utilisé pour fondre des déchets fortement oxydés dont les crasses blanches. La capacité peut aller jusqu'à 50 tonnes. Les avantages sont : un bon rendement thermique, l'absence de formation de crasses, une bonne élimination du magnésium, et les inconvénients, l'utilisation de quantités importantes de sels et donc la création de crasses salées finales qu'il faudra traiter. Grâce aux effets favorables des sels (homogénéisation thermique, protection vis-à-vis de l'air et des gaz de combustion), les pertes au feu sont seulement comprises entre 2 et 3%.

Tous les fours de dernière génération ont bénéficié d'améliorations importantes en matière de rendement énergétique, de vitesse de fusion et d'oxydation. On mentionnera aussi l'innovation technique représentée par la fusion au four électrique à arc / plasma des déchets de boîte boisson (voir tableau 8.6).

La quatrième étape, ce sont les traitements de purification par dégazage à l'état liquide, à une température d'environ 730° C, complétés éventuellement par filtration juste avant la solidification et la mise au titre par addition. Ces traitements sont

conduits dans un four de maintien, électrique, à induction ou à résistance, ou à gaz, soit dans un four à gaz combinant deux creusets communicants, l'un pour la fusion, l'autre pour le maintien.

L'alliage est alors coulé soit en lingot, soit en semi-produit, billette, brame, etc. Les alliages de fonderie, lorsque l'usine destinataire n'est pas trop éloignée, sont livrés à l'état liquide, en poche isotherme, par transport routier.

8.4. Les bilans de la métallurgie extractive par fusion

8.4.1. Le bilan matière

Toutes les étapes de la métallurgie extractive du recyclage sont caractérisées par un bilan matière avec des pertes de matière, donc un rendement.

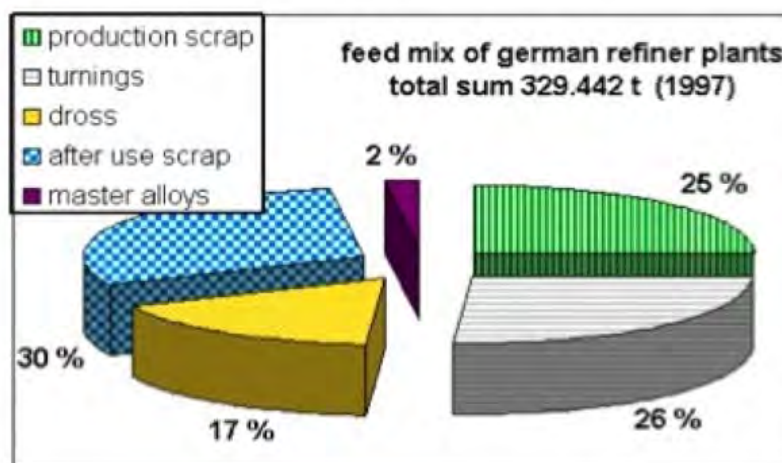
Celui de la première étape (collecte et tri), difficile à quantifier en raison de sa nature peu industrielle (voir chapitre 5) est certainement proche de 100% d'aluminium. Celui des étapes de prétraitements et de fusion est en principe plus facile à connaître en raison justement de sa nature industrielle. Le prétraitement à froid génère surtout des particules plus ou moins fines qui se retrouvent dans les poussières. C'est une perte mécanique, la perte chimique par oxydation de l'aluminium étant alors négligeable. Dans le prétraitement à chaud, c'est une perte chimique par oxydation de l'aluminium contenu dans les poussières formées dans le prétraitement à froid si elles n'ont pas été enlevées. La perte mécanique par abrasion est par contre négligeable.

Enfin, pendant la fusion on a les deux pertes, celle chimique par oxydation (les pertes irréversibles), et celle mécanique par entraînement d'aluminium par l'alumine, les crasses (les pertes réversibles).

Dans la pratique industrielle, la dispersion des rendements se révèle énorme tout en s'expliquant fort bien par le nombre de paramètres à prendre en compte, souvent interagissant les uns sur les autres, le premier étant pour commencer la composition de la charge fondue.

Chaque bilan matière est un cas unique et faute de traiter un très grand nombre de cas, on est ramené à des bilans dont la valeur est spécifique du cas et ne peut prétendre à quelque représentativité que ce soit. Le diagramme ci-après illustre parfaitement la difficulté à faire un bilan matière.

Figure 8.4 : Composition type de la charge fondue par les affineurs en Allemagne en 1997^(238,252)



Nous notons que l'industrie allemande de l'affinage, très active dans la fusion des vieux déchets, utilise un mélange type composé pour 30% de vieux déchets et 70% de déchets neufs se répartissant entre déchets de transformation, 25%, crasses, 17%, tournures, 26%, ces deux derniers, soit 43%, avec une qualité plus proche de celle des vieux déchets.

Comme l'essentiel du rendement est fait par la fusion, nous avons choisi de calculer son bilan matière en utilisant un modèle simple donnant la teneur en alumine à la sortie du four, les pertes au feu et les quantités de crasses pour les trois qualités de déchets, neufs et internes, neufs et de transformation et vieux, avec une distinction entre ceux prétraités avant fusion et ceux qui ne le sont pas. Les données introduites dans ce modèle correspondent pour les déchets neufs, internes, aux retours des produits de fonderie, pour les déchets neufs de transformation et les vieux déchets aux boîtes boissons après usage. On a reporté dans le tableau ci-après les résultats des calculs et on a fait figurer en regard les domaines de variation des valeurs industrielles. On constate une bonne concordance des valeurs calculées avec les résultats industriels qui se situent entre les deux cas extrêmes suivants :

- la coulée directe en semi-produits de l'aluminium sorti de la cuve d'électrolyse : dans ces meilleures conditions, les pertes au feu sont de 1,3 – 1,5%.
- la fusion de vieux déchets de boîtes de boisson sans aucun prétraitement : dans ces pires conditions rencontrées lors des premiers essais, les pertes au feu sont de plus de 15% (lors d'essais de fusion de déchets d'ébarbage – les aspérités éliminés par meulage - imparfaitement déshuilés, on a noté 25% de pertes).

Tableau 8.2 : Pertes au feu (%) et taux de crasses (%) usuels pour quelques types de déchets : valeurs industrielles et valeurs calculées (source C. Gentaz)

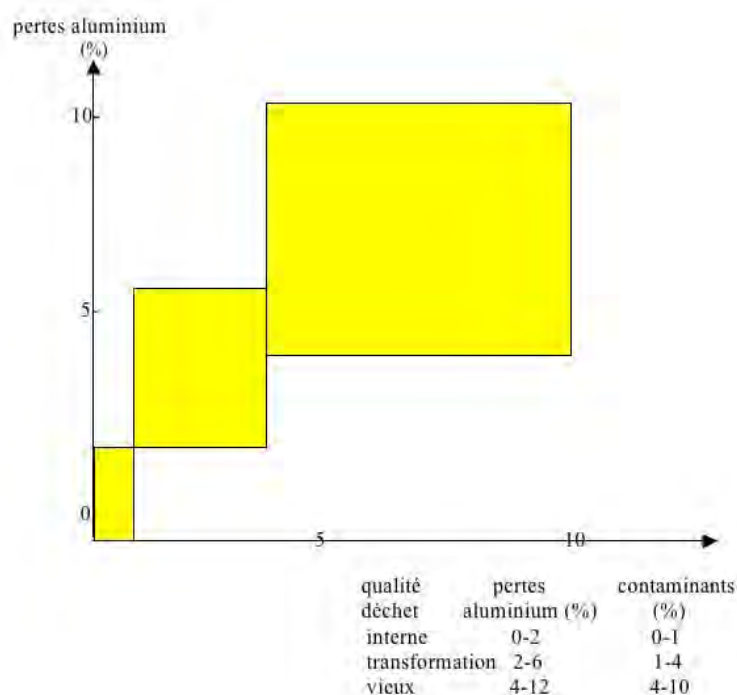
types de déchets / composants du déchet	référence : aluminium sortie cellule électrolyse	déchet neuf, interne : retour de fonderie	boîte boisson		
			déchet neuf, transforma- tion, prétraité	vieux déchet, prétraité	vieux déchet, non prétraité
<u>A l'entrée du four de fusion :</u>					
Al2O3 (%)	0	0,1	0,3	0,3	0
H2O (%)	0	0	0	0,1	1
magnésium (%)	0	0	1	1	1
verniss, laques (%)	0	0	1	0,1	3
total composants volatils (%)	0	0	2	1,2	5
<u>A la sortie du four de fusion :</u>					
Al2O3 total (%)	0,03	0,3	0,7	0,7	3,3
pertes au feu (%)	0,15	1,7	4,0	4,1	18,9
crasses (%)	0,2	2,1	5,0	5,1	23,7
<u>valeurs industrielles :</u>					
pertes au feu (%)	0,07 - 0,15	1 - 3	1 - 6	2 - 8	8
taux de crasses (%)	0,1 - 0,2	1,5 – 3	1,5 - 8	3 – 10	> 10

Ce tableau met clairement en évidence que la qualité du déchet n'est pas faite par sa seule teneur en aluminium, tant s'en faut. Une teneur élevée, si elle est associée à des teneurs élevées des composants volatils, correspondra à un recyclage avec un rendement médiocre, tant matière qu'énergie, et des émissions importantes de produits polluants (CO₂, dioxines, crasses salées, etc.).

Les spécifications suivantes appliquées par un affineur pour de vieux déchets illustrent parfaitement ce constat : H₂O < 2%, autres contaminants < 2%, métaux lourds < 0,2% et fer < 0,2%.

Nous avons représenté dans la figure ci-après les pertes totales d'aluminium (le complément à 100 est le rendement d'aluminium) en fonction des contaminants contenus dans le déchet et donc de la qualité et du type de déchet.

Figure 8.5 (aussi figure 7.4) : Les pertes totales, irréversibles et réversibles, d'aluminium en fonction de la qualité du déchet (source C. Gentaz)



8.4.2. Le bilan énergie

L'énergie consommée dans la première étape de collecte et de tri est de l'énergie de transport et de manutention, celle de la section froide de l'étape de prétraitement, de l'énergie de manutention et de l'énergie électrique pour actionner les machines (broyage, tamisage, aspiration des poussières, etc.). Sans être rigoureusement négligeables, elles restent peu importantes en regard de celles des étapes « chaudes » et ce sont celles-là que nous allons analyser.

La consommation théorique d'énergie : calculée à partir des données thermodynamiques, on donne dans le tableau ci-après la consommation d'énergie pour chauffer, fondre et porter à la température de 727° C une tonne d'aluminium.

On vérifie bien que l'aluminium est favorisé par sa plus basse température de fusion.

Tableau 8.3 : Consommation d'énergie théorique pour fondre une tonne d'aluminium et une tonne de fer (source C. Gentaz)

consommation d'énergie pour	Aluminium			Fer		
	MJ/t	kWh/t	%	MJ/t	kWh/t	%
chauffer de la température ambiante à la température de fusion	662,4	184	59	972,0	270	75
fondre au point de fusion	388,8	108	35	259,2	72	20
surchauffer jusqu'à 1.000° K (727° C)	72,0	20	6			
1.873° K (1.600° C)				64,8	18	5
consommation totale d'énergie	1.123,2	312		1.296,0	360	
	(1,12 GJ/t)	(3,12 GJ/t)	100	(1,30 GJ/t)	(3,60 GJ/t)	100

La consommation pratique d'énergie : en l'absence d'un échantillon homogène de fours de recyclage, nous avons eu recours à celui des fours de fusion de l'industrie de la fonderie d'aluminium. A partir de données industrielles récentes d'une cinquantaine de fours de fusion, une trentaine de fours à gaz de la dernière génération (préchauffage de la charge métallique, préchauffage et enrichissement en oxygène de l'air des brûleurs), une vingtaine de fours électriques à induction, nous avons établi une référence (bench mark). Les données, - type d'alliage, à 9% de silicium, température, 730° C, quantité et qualité de la charge le plus souvent composée pour 50% de lingot et pour 50% de retours, déchets neufs internes de bonne qualité, conditions d'exploitation et pertes au feu, environ 1,7% - sont homogènes et présentent l'avantage d'une dispersion très faible. Les résultats obtenus mettent à égalité les deux énergies, gaz et électricité, avec un rendement de conversion thermique / électrique de 36%, lorsqu'on préchauffe la charge par les gaz de four.

- Four à gaz sans préchauffage de la charge : 3,24 GJ/t (900 kWh/t PCI /t d'aluminium coulé)

- Four à gaz avec préchauffage de la charge : 2,27 GJ/t (630 kWh/t PCI / t d'aluminium coulé)
- Four à induction sans préchauffage de la charge : 2,16 GJ/t (600 kWh/t électrique / t d'aluminium coulé)

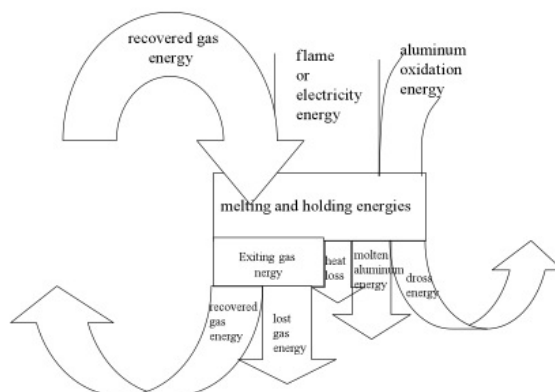
Le maintien et les traitements en poche avant la coulée ont une consommation d'énergie d'environ 0,36 GJ/t (100 kWh /t) d'aluminium.

Le bilan énergie dépend des conditions massiques et énergétiques et est encore plus variable que le bilan matière puisqu'il le prend en compte. Plus il y a de pertes d'aluminium par oxydation, plus ces pertes libèrent de l'énergie et vont améliorer le bilan énergie. A nouveau, comme chaque bilan énergie est un cas unique, nous avons choisi d'appliquer la même méthodologie que pour le bilan matière, donc de créer une référence avec les déchets neufs, internes et, à partir de celle-ci, de calculer le bilan énergie des autres déchets.

Tableau 8.4 : Flux énergétiques entrant et sortant, bilan énergie pour quelques types de déchets (GJ/t d'aluminium coulé) (source C. Gentaz)

quelques types de déchets / item	déchet neuf, interne, référence	déchet neuf de transfor- mation	vieux déchet prétraité	vieux déchet non prétraité
flux dans le four				
matière :				
pertes au feu, PF	1,7%	4,0%	4,1%	18,9%
mise au mille de déchet à 100% Al	1.017 kg	1.042 kg	1.043 kg	1.233 kg
quantité d'aluminium oxydé, 10% PF	1,7 kg	4 kg	4,1 kg	18,9 kg
énergie :				
fusion à 730° C, 2,27 GJ/t	2,31	2,37	2,37	2,80
maintien à 730° C, 0,36 GJ/t	0,36	0,36	0,36	0,36
oxydation de l'aluminium, 31,3 GJ/t	0,05	0,13	0,13	0,59
total énergie entrant	2,72	2,86	2,86	3,75
flux sortant du four				
matière :				
quantité de crasses (80% aluminium, 20% alumine), 1,18 PF	20 kg	47 kg	48 kg	223 kg
énergie :				
aluminium coulé, 1,12 GJ/t	1,12	1,12	1,12	1,12
crasses juste à la coulée, 1,6 GJ/t	0,03	0,08	0,08	0,36
pertes électriques 3% énergie fusion	0,07	0,07	0,07	0,08
pertes thermiques, 7% énergie fusion	0,15	0,16	0,16	0,20
gaz	1,37	1,43	1,43	1,99
total énergie sortant hors gaz	1,37	1,43	1,42	1,76
total énergie sortant, gaz inclus	2,72	2,86	2,86	3,75

Figure 8.6 : Aluminium scrap melting Sankey diagram (diagramme Sankey de fusion des déchets d'aluminium) (source C. Gentaz)



Nous notons de suite que le bilan énergie ainsi calculé, autour de 3 GJ/t d'aluminium coulé, est presque trois fois plus faible que la réalité. Par exemple, en 2003, elle était de 8 GJ/t, avec l'objectif d'arriver en dessous de 7 GJ/t (rapport 2004 de la fédération britannique des industries du recyclage, ALFED) ⁽²⁹⁹⁾.

Nous devons aussi reconnaître que notre calcul est critiquable à plusieurs égards. D'abord nous ne disposons pas de données fiables des consommations d'énergie dans la fusion des déchets neufs de transformation non plus que des vieux déchets. Ensuite nous avons encore moins de données sur l'énergie contenue dans les gaz sortant du four.

Aussi, dans les exemples consacrés aux déchets prétraités, nous avons volontairement omis de prendre en compte la consommation d'énergie des prétraitements à froid, environ 0,5 GJ/t, et à chaud, entre 0,5 et 1 GJ/t d'aluminium (1% d'eau c'est 0,035 GJ). Enfin, nous avons simplifié le calcul avec pour référence un déchet constitué par 100% d'aluminium.

Malgré toutes ces simplifications, le résultat du calcul confirme bien les rôles de la teneur en aluminium du déchet, des performances du four et des conditions d'exploitation telles un temps entre deux coulées (tap-to-tap) le plus faible possible et des pertes au feu les plus faibles possibles. Au total, il faut ajouter entre 2 et 4 GJ/t au 3 GJ/t, ce qui ramène à l'objectif précité, apparemment modeste, de 7 GJ/t d'aluminium.

Nous avons retenu une consommation d'énergie du recyclage, de la collecte à la coulée de l'aluminium, entre 5 et 10 GJ/t, avec une valeur moyenne d'aujourd'hui de 7,5 GJ/t.

Commentaires sur la valorisation énergétique des emballages d'aluminium contenus dans les ordures ménagères par incinération.

On voit souvent écrit que, lorsqu'il n'y a pas de possibilité de recycler le déchet d'aluminium, la valorisation énergétique de l'énergie contenue doit être considérée. Cet argument est le plus souvent invoqué dans le cas des emballages d'aluminium qui représentent environ 0,5% des ordures ménagères. Lorsqu'elles sont incinérées à la température d'environ 800-1000° C, l'énergie dégagée est récupérée et utilisée pour le chauffage urbain ou la production d'électricité et les déchets solides produits, les mâchefers, sont soit valorisés, soit mis en décharge.

Pratiquement, ce sont seulement quelques pourcents des déchets d'aluminium qui sont concernés par l'oxydation d'abord fixée par la géométrie du déchet (chapitre 6, tableau 6.3). L'énergie libérée sera très faible malgré la forte exothermicité de la réaction d'oxydation de l'aluminium en alumine (31 GJ/t d'aluminium).

La valorisation de l'aluminium contenu dans les mâchefers commence par une séparation par courants de Foucault puis par fusion. Outre le fait qu'on a moins de 2% d'aluminium dans les mâchefers, il s'agira surtout d'emballages en partie oxydés. Avec une teneur en alumine de plus de 1%, leurs conditions de fusion sont médiocres à mauvaises.

Au bilan, techniquement et économiquement, - on verra dans le chapitre 9 que les conditions de fusion vont de pair avec les conditions économiques -, nous considérons que l'incinération des emballages d'aluminium est une proposition de valorisation à condamner sans appel.

8.4.3. Le bilan environnemental

8.4.3.1. Le bilan hors crasses

Les émissions du recyclage sont faibles, parfaitement gérables et concernent principalement les étapes industrielles de la chaîne, les prétraitements et la fusion, car celles de la collecte et du tri, en dehors de leurs consommations d'énergie, sont faibles.

Ces émissions sont les poussières créées au tri, dans les manutentions, et à la fusion, - et, avec des teneurs en aluminium comprises entre 10 et 40%, elles sont recyclées -. Ce sont aussi les gaz de prétraitement pouvant contenir des composés organiques volatils, des dérivés chlorés, en particulier des dioxines, et de fusion, contenant du CO₂, éventuellement aussi des dioxines, mais les fluorocarbones sont absents. Ces gaz sont incinérés à plus de 700° C, traités, dépoussiérés et les gaz à effet de serre émis dans l'atmosphère sont uniquement du CO₂ créé par la

consommation d'énergie et la destruction des laques et vernis, malheureusement de plus en plus fréquemment utilisés dans les applications de l'aluminium, principalement l'emballage et la construction. Nous considérons que 1% de vernis / laque conduit à la formation d'environ 30 kg de CO₂ par tonne d'aluminium recyclé. Une boîte boisson contient environ 3% de vernis / laque et son recyclage, principalement dans l'étape de délaquage, produira environ une centaine de kg de CO₂. Hors énergie, les quantités de CO₂ sont donc de l'ordre de quelques dizaines de kilogrammes par tonne d'aluminium recyclé.

La chaîne de recyclage est parfaitement respectueuse de l'environnement.

8.4.3.2. Le bilan avec crasses

Il y a une vingtaine d'années, l'atteinte environnementale de l'industrie du recyclage de l'aluminium a été violemment critiquée. Cela a commencé en Suisse avec les écologistes de GREENPEACE et leur demande de fermeture de l'usine de Niederglatt, dans la banlieue de Zurich, de la société REFONDA ⁽³⁴²⁾, la société de recyclage d'ALUSUISSE. Pêles-mêles, étaient reprochées des pratiques incorrectes sur le « commerce » des déchets dangereux, des dispositions techniques insuffisantes de contrôle des émissions, - on avait détecté la présence de dioxines dans les gaz et dans les terrains autour de l'usine - , et d'autres déchets dangereux, incluant des métaux lourds, les crasses. Il est vrai qu'à la fin des années 1980, la prise de conscience de la responsabilité environnementale de l'industrie n'était pas encore la règle. Il est vrai aussi que l'émission de dioxines, créées par la présence de produits organochlorés avec le déchet, soit revêtu soit mal trié, venait juste d'être reconnue et que les prétraitements avant la fusion, quand ils existaient, n'avaient pas les performances d'aujourd'hui.

Les déchets dangereux visés étaient les crasses ou scories salées, le produit final du seul, à l'époque, procédé de récupération de l'aluminium contenu dans les crasses, le four tournant à bain de sels. L'atteinte environnementale, c'était la pollution des nappes phréatiques par les crasses salées. Avec une production de 35.000 t/an d'aluminium recyclé, l'usine produisait environ 4.500 t/an de crasses salées mises en décharge sans précaution, un comportement jugé inadmissible, même si, au même moment, le Rhin voisin était pollué par des millions de tonnes de sels produits et déversés par les entreprises riveraines, surtout celles d'exploitation des mines de potasse.

REMETAL, en Espagne, a connu une mésaventure semblable. Au bénéfice, depuis les années 1970, d'un accord avec les pêcheurs de sardines de Bilbao, le sel de conservation des sardines était réutilisé pour traiter les crasses d'aluminium. Les

scories salées finales étaient ensuite reprises par les pêcheurs qui les déversaient en pleine mer lors de la campagne de pêche suivante. Là, c'est l'administration espagnole qui interdit le rejet en mer, au motif qu'elle venait de refuser à un autre affineur la mise en décharge de ses scories salées qui avaient été classées déchets industriels.

AFFIMET, société d'affinage de PECHINEY, s'était vu, pour la même raison, refusée le déversement de ses scories salées au large de la baie de Seine.

Pour en terminer avec les bizarreries administratives, nous citerons cette société norvégienne de traitement des scories salées. Après broyage et simple lavage à l'eau pour récupérer les globules d'aluminium contenus, la saumure finale était rejetée dans un fjord. Le procédé était évidemment très économique et sa consécration fut l'oscar écologique norvégien car la salinité du fjord augmentait et améliorait la qualité du milieu pour les saumons.

Le fait demeure néanmoins : toute l'industrie de l'aluminium, électrolyse, fonderie et recyclage, produit des crasses et on estime que l'industrie du recyclage est responsable d'environ 80% des quantités produites.

Une grande usine d'électrolyse, avec 300.000 t/an d'aluminium, produit 6.000 t/an de crasses blanches. Seuls des parcs et des zones électro-intensives, le Québec au Canada, le Guyana au Venezuela, en produisent plus de 15.000 t/an.

Une grande fonderie de pièces automobiles, avec une capacité de 60.000 à 80.000 t/an de pièces, produit moins de 2.000 t/an de crasses blanches. Une grande usine de recyclage a une capacité de 80.000 t/an et, avec un taux de crasses blanches de 10%, en produit 8.000 t/an.

Les quantités de crasses blanches par lieu de production sont donc faibles et leur valorisation a été rarement faite sur le lieu même de leur production. Seules quelques usines d'électrolyse avaient leur atelier de traitement et la crasse blanche appauvrie après traitement était vendue à un affineur. Pratiquement, toutes les crasses sont traitées par les affineurs.

Les quantités de crasses ne sont pas toujours connues, et la quantité d'aluminium contenu, théoriquement récupérable, très variable, est seulement estimée. Le calcul par les pertes au feu est encore plus imprécis. Enfin, comme on l'a vu, on en est encore aujourd'hui à estimer les quantités de déchets produites et recyclées.

Avec toutes ces réserves, nous estimons aujourd'hui à environ 1 million de tonnes/an les pertes au feu mondiales dont 300.000 t/an d'aluminium sont perdues en alumine. L'enjeu, c'est donc une quantité de 700.000 t/an d'aluminium théoriquement

récupérable et c'est l'activité de l'affinage qui est entièrement responsable de cette récupération. A la fin des années 1980, au moment des critiques faites à l'industrie du recyclage, interdire le traitement des crasses, c'était condamner l'affinage et c'est pourquoi, nous avons décidé de développer ci-après cet épisode dramatique de l'histoire du recyclage de l'aluminium.

Les procédés suivants ont été proposés et commercialisés :

Les procédés mécaniques

L'aluminium est séparé mécaniquement de l'alumine. S'adressant aux seules crasses blanches, on a des procédés à froid et des procédés à chaud, exploités bien avant la crise des crasses salées.

Dans les procédés à froid, la crasse est broyée et les morceaux d'aluminium séparés par tamisage. Le rendement est d'environ 50% et la crasse broyée, contenant encore beaucoup trop d'aluminium, environ 35%, doit être traitée dans un four tournant à bain de sels.

Dans les procédés à chaud, on traite une crasse chauffée au dessus de la température de fusion de l'aluminium, 660° C et l'aluminium est extrait liquide par pressage ou par centrifugation. Malgré un rendement élevé, environ 70%, les crasses contiennent encore après traitement environ 25% d'aluminium. C'est une crasse blanche pauvre qui doit alors être traitée au four à bain de sels, ce qui fait dire que les deux techniques sont complémentaires et indissociables. Adapté à de faibles quantités de crasses, de 2.000 à 3.000 t/an, avec une presse ou une centrifugeuse chauffée conduisant à un montant d'investissement d'environ 400 US\$/t de crasse, avec des conditions de mise en œuvre difficiles, ce type de procédé (COMPAL de PECHINEY, « THE PRESS » de ALTEK⁽³³⁶⁾) est aujourd'hui abandonné.

Les procédés thermiques

L'objectif visé est un procédé en une étape, n'utilisant pas de sels, respectueux de l'environnement, capable de remplacer le four tournant à bain de sels. On sépare l'aluminium de l'alumine en portant le mélange à température suffisamment élevée pour modifier les propriétés physico-chimiques, viscosité, tension de surface, etc. Cet effet thermique est complété par une action mécanique et c'est celle du four tournant du type de ceux utilisés dans le traitement en bain de sels. S'adressant exclusivement aux crasses blanches, ce sont des procédés commercialisés au début des années 1990, une réponse de l'industrie de l'aluminium aux critiques émises contre le recyclage. Ces développements ont surtout été faits par l'industrie nord-américaine, la plus concernée par le recyclage des boîtes boissons, grand générateur de crasses.

Tous ces procédés, très semblables, diffèrent seulement par la façon d'apporter l'énergie : un arc plasma et sa variante un arc non transféré dans l'air ou l'azote, un arc électrique entre deux électrodes de graphite dans l'air, une flamme oxy-gaz, voire l'induction et la résistance.

Convenant pour des capacités annuelles de plusieurs dizaines de milliers de tonnes, le rendement de récupération de l'aluminium est élevé, environ 90%, et le produit final est de l'alumine avec des quantités importantes de nitrure d'aluminium, entre 10 et 30% qui réagiront avec l'eau et l'humidité et donneront de l'ammoniac, NH_3 . Ce produit instable est interdit de décharge et on a recherché d'une part à remplacer l'azote par l'argon, mais beaucoup plus cher, d'autre part à valoriser ce mélange alumine/nitrure d'aluminium comme composant des ciments, des réfractaires, etc.

Tableau 8.5 : Caractéristiques techniques des procédés thermiques de traitement des crasses (source C. Gentaz)

Procédé	principe	état de développement	gaz	rendement aluminium
ALCAN/PEC (324,325,326,327,328,329)	four tournant à plasma non transféré	commercial; 1 MW, 15.000 t/an	a) air b) azote	a) 94% b) 97%
LTEE / HYDROQUEBEC (DROSCAR) (330,331,332,333)	four tournant à arc électrique entre deux électrodes de graphite	pilote 850 KW, 8.000 t/an	Air	94%
HOOGOSENS ⁽³⁴⁰⁾	four tournant à flamme oxy-gaz	pilote	Air	n.d.
MINTEK	four à arc plasma à courant continu et électrode creuse	pilote	Air	n.d.
EDF/ ALUSUISSE (334,335)	four tournant à plasma non transféré	pilote 100 KW	azote + argon	90%
EPRI / CMP/ APE (337)	four tournant à arc électrique entre deux électrodes de graphite	laboratoire	Air	n.d.

Tableau 8.6 : Caractéristiques (par tonne de crasse) des procédés pilotes et commerciaux ¹ (source C. Gentaz)

procédé	capacité (t/an)	montant investi (MUS\$)	montant investi (US\$/t)	main d'œuvre (homme)	teneur en aluminium des crasses	gaz (Nm ³ /t)	électri- cité (kWh/t)	produit final (t/t)
ALCAN	15.000	13	870	16	67%	30-40 air 30-40 azote	260 b) 840	0,38 (Noval)
LTEE	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	50%	pas de gaz	375	0,52
EDF	15.000	4 (furnace alone)	260	16	75%	12 argon 17 azote	580	0,32 (90% Al ₂ O ₃ , 8% Al)

¹ On a proposé d'utiliser ces fours pouvant fonctionner en atmosphère inerte à la fusion des boîtes boisson qui donne des quantités très importantes de crasses. Des consommations d'énergie électrique comprises entre 600 et 800 KWh/t d'aluminium produit ont été obtenues et un coût de fusion d'environ 150 US\$/t a été annoncé.

Les procédés physico-chimiques

Le procédé de référence, exploité depuis plusieurs dizaines d'années, est le four tournant à bain de sels (rotary molten salt furnace) dont les crasses salées finales ont été à l'origine du scandale. S'adressant aux déchets fortement oxydés et aux plus oxydés d'entre eux, toutes les crasses, blanches, asséchées et noires, ce procédé est fondé sur un traitement combinant plusieurs effets. D'abord thermique et le four est chauffé au gaz ou au fuel, ensuite mécanique et le four est tournant autour d'un axe horizontal, et enfin physico-chimique, c'est l'action des sels. On utilise un mélange eutectique (avec le plus bas point de fusion) de chlorures de sodium et de potassium, la température de travail étant comprise entre 750 et 850° C. L'effet des sels diminue pendant le traitement avec l'augmentation de la quantité d'alumine, corollaire de l'abaissement de la quantité d'aluminium dans les crasses. Aux termes d'une gestion très complexe des crasses qui peuvent être traitées plusieurs fois pour en récupérer le maximum d'aluminium, on aboutit aux fameuses crasses salées (salt-slag). C'est un mélange mécanique de sels épuisés, plus de 50%, sans pratiquement plus d'action sur les crasses, d'alumine, environ 40%, d'autres oxydes inertes et moins de 10% d'aluminium,

Il est interdit de mettre ce produit en décharge car tous les sels contenus sont solubles dans l'eau, s'infiltreront dans les sols et rejoindront les nappes phréatiques. Les résidus solides, alumine, aluminium, resteront superficiellement dans les sols.

Capable de capacités annuelles jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de tonnes, ce procédé a un rendement élevé d'extraction de l'aluminium, environ 80%. On considère que, en moyenne, par tonne de crasses blanches contenant 50% d'aluminium et 50% de composés inertes, principalement de l'alumine, on consomme 0,65 t de sels, entre 3,6 et 5,5 GJ d'énergie, et on produit 0,4 t d'aluminium et 1,3 t de crasses salées.

Ces valeurs sont peu différentes de celles calculées empiriquement par les affineurs pour lesquels la consommation de sels est de 1,2 à 1,5 fois la quantité d'alumine présente dans la crasse à traiter : une crasse contenant 50% d'aluminium et 50% de produits inertes consommera un tiers de sels pour deux tiers de crasses et produira deux tiers de crasses salées pour un tiers d'aluminium. Alors que dans le monde on récupère annuellement environ 600.000 tonnes d'aluminium sur les 700.000 tonnes contenues dans les crasses, on produit 1,6 million de tonnes de crasses salées.

Qu'a fait l'industrie de l'aluminium devant cette menace mortelle pesant sur l'activité d'affinage et la touchant de plein fouet puisque c'était surtout le marché de la boîte boisson qui était condamné à disparaître ? Simultanément, trois voies ont été explorées.

D'abord, à performances égales de rendement d'extraction d'aluminium, réduire la consommation de sels. Les promoteurs, SCEPTER aux U.S.A. et REMETAL en Espagne, revendiquaient une baisse spectaculaire de la consommation de sels, entre cinq à dix fois, grâce à un effet mécanique plus efficace. Le produit final était toujours une crasse salée mais aucun résultat n'a été publié.

Ensuite, on a la voie des procédés à haute température, décrits plus haut.

Enfin, la dernière voie, radicalement différente, c'est recycler les crasses salées ^(343,344). En fait, alors que des années plus tôt le respect de l'environnement n'était pas de mise, on avait vu le développement de quelques procédés justifiés par l'économie possible. Le rendement financier ne devait pas être à la hauteur des espérances et les développements envisagés avaient été différés. La menace pesant sur l'avenir d'un secteur entier de l'industrie de l'aluminium a fait rouvrir immédiatement les dossiers.

Le principe est celui de l'hydrométallurgie. Les crasses sont traitées par l'eau, les chlorures alcalins se concentrent dans une saumure, tous les composés hydrolysables, aluminium et nitrure d'aluminium, sont décomposés et donnent de

l'alumine et des gaz, de l'hydrogène et de l'ammoniac, qui sont captés et brûlés. On sépare les solides, un produit inerte, riche en alumine, admis en décharge et on extrait des sels réutilisables à partir de la saumure.

La mise en œuvre de toutes ces opérations est connue au même titre que le coût élevé de l'entretien des installations, conséquence de la corrosion créée par la saumure. Plusieurs installations ont été mises en service en Europe, avec des capacités comprises entre 20.000 et 100.000 t/an et aujourd'hui toutes les crasses salées y sont recyclées. D'après les informations communiquées à cette époque par METALLGESELLSCHAFT, une usine avec une capacité de 100.000 t/an coûtait 60 millions US\$ et employait 75 personnes. Par tonne de crasses salées, la consommation d'énergie est de 2 GJ et on produit 0,5 t de sels, soit un rendement d'environ 80%, et des déchets ultimes et inertes, environ 0,5 t.

8.5. Le bilan global de la métallurgie extractive du recyclage de l'aluminium par fusion:

Nous avons résumé sous forme de tableau les bilans matière, énergie et environnement complétés par les données de main d'œuvre et d'investissement pour chacun des trois déchets, neufs, internes et de transformation, et vieux.

Tableau 8.7 : bilans matière, énergie, environnemental et données économiques de la métallurgie extractive du recyclage de l'aluminium par fusion suivant les catégories de déchet (source C. Gentaz)

donnée technico-économique (par tonne d'aluminium produit)	déchet neuf interne	déchet neuf transformation	vieux déchet
bilan matière :			
pertes au feu brutes, PF (%)	2	4	8
mise au mille brute de déchet (kg)	1.020	1.040	1.080
pertes au feu nettes (%) (44% PF après récupération de l'aluminium des crasses)	0,88	1,76	3,52
mise au mille nette (kg)	1.009	1.018	1.036
taux de crasses (%)	2,5	5	10
quantité de crasses (kg)	25	50	100
quantité de flux (kg)	2	3	4
quantité de sels brute (kg)	16	32	64
quantité de sels nette (kg) (après recyclage des crasses salées)	3,2	6,4	12,8
quantité de crasses salées (kg)	32	64	128
quantité de produits inertes après recyclage des crasses salées (kg)	13	26	52
bilan énergie :			
recyclage déchets (GJ)	5	7,5	10
recyclage crasses salées (GJ/t crasses salées)	2	2	2
montant investissement :			
recyclage déchets (US\$)	400	500	600
recyclage crasses salées (US\$/t de crasses salées)	600	600	600
main d'œuvre :			
recyclage déchets (h)	4	5	6
recyclage crasses salées (h/t de crasses salées)	1,2	1,2	1,2

Tous ces bilans, surtout le bilan environnemental avec les solutions apportées aux pollutions par les crasses salées et les dioxines, ont enregistré des progrès importants depuis 1990. L'action engagée en Suisse a conduit ALUSUISSE (voir note p 201) à fermer l'usine d'affinage de REFONDA, jugée non rentable, et dans le

monde, en Amérique du Nord et en Europe, à interdire la mise en décharge des crasses salées.

L'Europe légiférait et en 1995, leur rejet était définitivement interdit et leur traitement obligatoire. Les « majors » se sont peu impliqués et c'est à l'initiative de l'industrie chimique qu'ont été développés les procédés de recyclage des crasses salées, un bel exemple d'écologie industrielle appliquée. C'est la solution européenne aux crasses salées.

En Amérique du Nord, Canada et U.S.A., à la même époque, se mettait aussi en place une législation interdisant la mise en décharge des crasses salées, classées déchets dangereux (hazardous wastes). L'industrie de l'aluminium, avec l'aide de l'administration fédérale, prenait le problème à bras le corps car il fallait absolument des solutions techniques performantes au traitement des crasses produites en quantités importantes par le recyclage des boîtes boissons. Les procédés à haute température décrits dans le tableau 8.5, ont été mis au point, des installations construites. C'est la solution nord-américaine aux crasses salées.

Note sur REFONDA / ALUSUISSE⁽³⁴²⁾

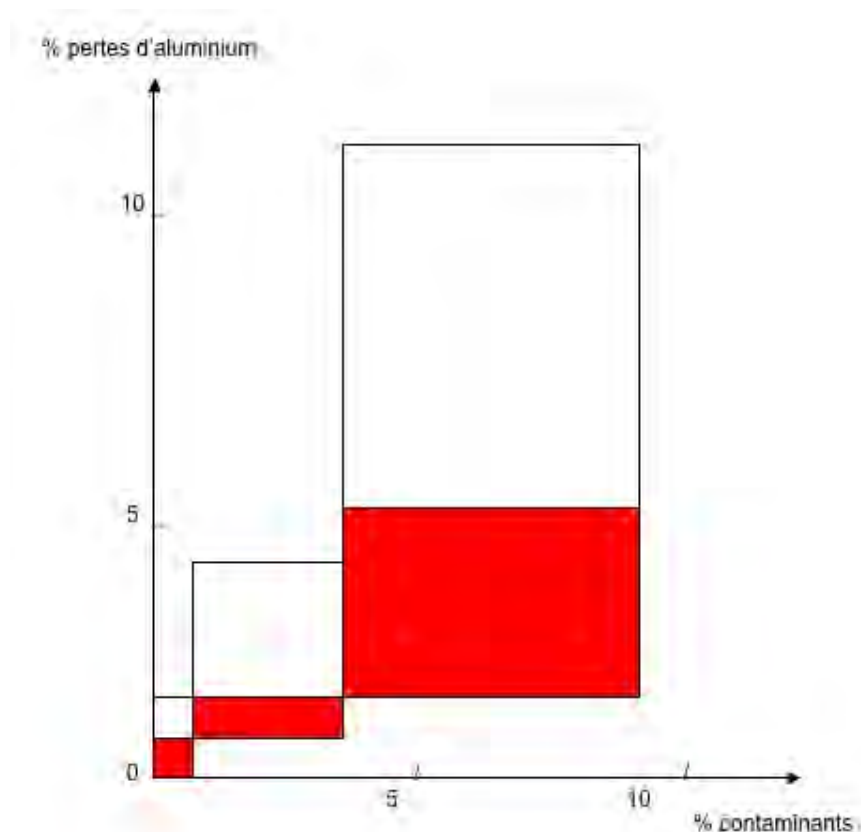
La décision d'ALUSUISSE d'arrêter son activité dans le recyclage est bien celle d'un « major » de l'industrie de l'aluminium. Son métier, ses préoccupations, sa stratégie sont très et donc trop éloignés du recyclage.

Enfin quelques mots sur les suites et fins de la décision d'ALUSUISSE. Quelques mois plus tard, alors que REFONDA est déjà fermée, une nouvelle polémique se déchaîne à propos des dizaines de milliers de tonnes de crasses salées stockées au Portugal : le traitement y étant moins cher qu'en Allemagne, ALUSUISSE avait choisi de les envoyer au Portugal pour y être traitées. Malheureusement, si l'industriel portugais avait bien été payé, il avait « oublié » de traiter les crasses salées. Une nouvelle campagne de presse s'est alors déchainée, mettant les gouvernements dans l'embarras. Finalement, les gouvernements portugais, suisse et ALUSUISSE ont payé l'envoi et le traitement de 30.000 t de crasses salées en Allemagne, en France et en Norvège. Le prix alors payé a été de 240 F/t de crasses salées !

Nous avons représenté dans la figure ci-après le bilan total net des pertes d'aluminium enregistrées par le recyclage (les valeurs-types ont été reprises dans le tableau 8.7).

Figure 8.7 : Les pertes d'aluminium (en %), brutes et nettes (après traitement des crasses) en fonction de la qualité du déchet (source C. Gentaz)

qualité du déchet	pertes totales brutes (%) (réversible et irréversible)	pertes totales nettes (%)	contaminants (%)
Interne	0 – 2	0 – 0,9	0 – 1
transformation	2 – 4	0,9 – 1,8	1 – 4
Vieux	4 - 12	1,8 – 5,5	4 – 10



8.6. Bibliographie

(271) Monographies techniques des sociétés Affimet, Compiègne, France (Péchiney), Metallwerke Refonda AG (Alusuisse), Niederglatt, Zürich, Suisse, Vanalp, Meyzieu, France

Le recyclage sans fusion

(272) Lazzaro G. The recycling of aluminium scraps by direct, continuous conversion into extruded products. EEC project, contract MA1R-0002-C, 1990

(273) Quatremer Robert et Song Baoyun. Recyclage des copeaux d'alliage d'aluminium 7075 par déformation à chaud. Matériaux et Techniques, 269-277, Mai-Juin 1986

(274) Source European Aluminium Association

Le recyclage avec fusion

(275) Sjöden Olaf and Lehman Anders. Developments in electromagnetic stirring for aluminium furnaces. 7th international aluminium recycling congress, München, Deutschland, 17-18 March 2003

(276) Marcks Von Wurtemberg L. Lightweight materials for automotive applications. Iron & Steel Maker, 11-21, August 1994

Les procédés par fusion électrique

Fusion par résistance

(277) Dossier EDF : four électrique de fusion et de maintien d'aluminium haute pureté, société ALCAN TOYO Europe, 1990

(278) Documentations techniques de constructeurs de fours : Thermco, Lagurthel

Fusion par induction

(279) Dossier EDF : four électrique de grande capacité pour la fusion et le maintien de l'aluminium, LACHENAL Industries, 1993

(280) Journées internationales ABB sur les fours à induction, Fonderie, Fondeur d'aujourd'hui, 24-28, Octobre 1991

(281) Figari J-P. Four à induction à creuset pour la fusion et le maintien de l'aluminium à rendement optimisé. Fonderie, Fondeur d'aujourd'hui, 40-46, Juin-Juillet 1991

(282) Inertage par rideau de gaz de la fusion par induction, Fonderie, Fondeur d'aujourd'hui, 49, Février 1990

Dossiers techniques Electricité de France :

(283) fours électriques de fusion pour l'aluminium, CITROEN, Charleville, 1990

(284) four à induction moyenne fréquence pour la fusion d'aluminium, société Mosellane de Mécanique, 1990

(285) la bonne gestion passe par la compétitivité de l'électricité, MANZONI – BOUCHOT, Fonderie – Fondeur d'aujourd'hui, 3, Novembre 1985

(286) Four à canal fusion UBC (Finnsång Aluminium AB, Suède)

(287) Documentations techniques de constructeurs de fours (ABB, AJAX Magnethermic, Inductothermie, Inductotherm, JUNKER, etc

Les procédés par fusion au gaz

(288) Air Products. Ten years experience with the application of oxy-fuel technology on reverberatory furnaces in the aluminium recycling industry. 7th OEA International Aluminium Recycling Congress, München, Germany, 17/18 march 2003

Dossiers techniques Gaz de France :

(289) usine d'Aluminium Dunkerque, France, 1993

(290) fonderie d'aluminium, RENAULT, usine de Cléon, France, 1993

(291) Métallurgie, énergie gaz naturel, CITROEN, usine de Charleville, France, 1993

- (292) fusion d'aluminium, SFME, usine de Villers la Montagne, France, 1992
- (293) fusion d'aluminium, SIFA, usine d'Orléans, France, 1992
- (294) câbleries de Lens, ALCATEL-ALSTOHM, usine de Lens, France, 1992
- (295) Ferlin T, Carpentier E, Joumas M. Nouvelles techniques gaz pour la fusion des ferreux et des non ferreux. Hommes et Fonderie, 29-33, Mars 1991
- (296) Joumas M. Nouvelle génération de fours à gaz en fusion de non ferreux. Hommes et Fonderie, 27-29, septembre 1988
- (297) Documentation technique de constructeurs de fours : Thermco, AGA, Air Products, Stein Heurtey

Les bilans matière et énergie

- (298) Centre de la technologie de l'énergie de CANMET. Recyclage de l'aluminium à haut rendement énergétique. 2002 (www.nrcan.gc.ca)
- (299) The Aluminium Federation, Alfred. Sustainable development report. 2002 (www.alfed.org.uk)
- (300) European Aluminium Association. Environmental profile report for the European Aluminium Industry, Aluminium for future generation, European Aluminium Association. April 2000
- (301) Masters I. and al. The application of Taguchi methods to the aluminium recycling process. Proceedings of 4th ASM International Conference on the Recycling of Metals, Vienna, Austria, 115-124, 1999
- (302) Jacob S., Garat M., Laslaz G., Meyer P., Guarin P., Adam R. Etat actuel de l'utilisation du sodium, du strontium et de l'antimoine dans les alliages aluminium-silicium moulés. Hommes et Fonderie, 45-54, Octobre 1995
- (303) Péchiney. Emballages et environnement. Direct Magazine (publication interne Péchiney), n°1, 1995
- (304) Affimet : métal brûlant chaud et à l'heure. Revue SPOT des hommes et des idées (publication interne PECHINEY), 35, 14-17, octobre-novembre 1994
- (305) McAvoy B. and McNeish J. The ALCAN decoater process four UBC

decoating. Proceedings of the 2nd International Symposium on the Recycling of Metals and Engineered Materials, edited by van Linden Jan H. L., Stewart Jr Donald. S. and Sahai Yogeshwar, The Minerals, Metals and Materials Society, 203-214, 1990

(306) Le recyclage de l'aluminium. La Technique Moderne 106-110, Mai-Juin 1986

(307) Schaeffer H. et Hartman D. Etude sur la consommation d'énergie primaire des produits. Journée universitaire de l'énergie, Essen, Allemagne, 26-27 septembre 1984

(308) Mazodier J-L. Compétitivité fonte – aluminium dans l'automobile, cas du bloc moteur. Hommes et Fonderie, 27-35, Octobre 1981

Le bilan environnemental

(309) European Aluminium Association, Aluminium for Future Generations : progressing through dialogue. Chapter One and Two. 2003 (www.eaa.net, www.aluminium.org)

(310) Jenkins Robert F. and Robertson King G. UBC recycling complex mass balance. Proceedings of the 4th International Symposium on the Recycling of Metals and Engineered Materials, edited by Stewart D. J., Stephens R. and Daley J.C. The Minerals, Metals and Materials Society, 1.007-1.027, 2000

Proceedings of the third ASM International Conference & Exhibition on The Recycling of Metals, Barcelona, Spain, 11-13 June, 1997

(311) Ayres Robert U. Metals recycling : economic and environmental implications, 5-31

(312) McKinley Michael J. and al. US metals consumption and recycling : an update, 36-45

(313) Moison David L. The myth and reality of the relationship between scrap metal supplies and prices, 49-64

- (314) Rossel H. Recycling of post-consumer aluminium packaging, 95-108
- (315) Aballe Miguel. The impact of implementation of the EU packaging directive on industry and education. A case study : aluminium can recycling in the EU and Spain, 121-128
- (316) Katyal Anil. The challenging pattern of secondary aluminum industry through the millennium, 237-253
- (317) Wolf Sven. Recycling of aluminium and its effect on sustainable development, 255-266
- (318) Gripenberg Henrik, Müllertthann Michael, Jäger Norbert. Aluminium dross and waste recycling with Alurec – three years experience from a new salt-free technology. 421-428

Proceedings of the 2nd International Symposium on the Recycling of Metals and Engineered Materials, edited by van Linden Jan H. L., Stewart Jr Donald. S. and Sahai Yogeshwar, The Minerals, Metals and Materials Society, 1990

- (319) Ho Francis K, and Sahai Yoguesh, Interfacial phenomena in molten aluminum and salts systems, 85-103
- (320) Neff David V. Recent developments in molten metal pumping applications in aluminium recycling, 105-114
- (321) A state of the art UBC recycling INSAMET's Idaho plant, 215-220
- (322) An integrated aluminum scrap delacquering and melting system meeting strong environmental requirements, 237-267
- (323) Kulik G. J. and Daley J. C. Aluminum dross processing in the 90's. 427-437

Le procédé ALCAN

- (324) Bouchard Pierre, Lavoie Serge. Dross cooling and processing in Alcan. (sans reference, 1994 ?)
- (325) Alcan. Noval : mineral products. An ALCAN brochure, 1994

(326) Cartier Engineering and Alcan, Productive Synergie. 26-29, 1993

(327) Lavoie S. and al. Processing of dross in a plasma heated furnace.

122th TMS annual meeting, Denver, Colorado, February 1993

(328) Torching the bad image of dross. Metal producing/nonferrous, 26-28, 1/1991

(329) Lavoie S. and Dube G. A salt-free treatment of aluminium dross using plasma heating. Journal of Metals, JOM, 54-55, February 1991

Le procédé LTEE (HYDROQUEBEC)

(330) Droscar Quaterly Progress Report, n°2, fall 1994, et n° 3, winter 1995

(331) Meunier J., Zimmermann H., Drouet H.G. Aluminium recovery from dross; comparisons of plasma and oil-fired rotary furnace. (private source)

(332) Drouet M. Plasma treatment of aluminium dross. (private source)

(333) Drouet M. Traitement et valorisation des crasses d'aluminium. (private source)

Le programme E.D.F. (Electricité de France) / ALUSUISSE :

(334) Kassabji F. and Weber J-C. Traitement de crasses d'aluminium dans un four à plasma rotatif. Disclosable internal report, AID : E 26 15O, 1993

(335) Kassabji F. and Weber J.C. Aluminium scrap processing in a rotary plasma furnace. Proceedings of the Extraction and processing for the treatment and minimization of wastes. Edited by Hager J., Hansen B., Imrie W., Pusatori J., and Ramachandran V. The Minerals, Metals and Materials society, 687-697, 1993

Autres

(336) ALTEK INTERNATIONAL Incorporated : brochure "The Press" (sans date. 1994 ?)

(337) Kemeny F. and Sosinsky. D. DC plasma-arc process for melting aluminium and processing dross. EPRI, CENTER FOR MATERIALS PRODUCTION

CMP report, n°91-8, September 1991

- (338) Szente R. N. and al. Aluminium can recovery by thermal plasma.

Universidade de Sao Paolo, BRAZIL. Sans date ni référence.

- (339) Aluminium recycling. La Technique Moderne, 105-110, Mai-Juin 1986

- (340) HOOGO VENS GROEP Bulletin 3, volume 13, September 1994

- (341) Dossiers et rapports d'étude TRANSTEC

- (342) L'AFFAIRE REFONDA. Articles parus dans la presse suisse de

langue française dans le Journal de Genève : en 1991, le 24 juillet, les 3 et 4 août, le 31 octobre, en 1992, dans l'Hebdo du 12 mars 1992, dans la Tribune de Genève du 14 mars 1992, des 26 et 27 mars 1994, du 25 mars 1995, dans l'AGEFI du 27 mars 1995, dans le Nouveau Quotidien du 8 mai 1995

Le traitement des crasses salées

- (343) Reynolds Randall R. and Olper Marco. The ENGITEC system for treatment of salt slag from secondary aluminum smelters. Proceedings of the Second International Symposium on recycling of metals and engineered materials, 439-450, 1990

- (344) Documents METALLGESELLSCHAFT / B.U.S (BERZELIUS UMWELT-SERVICE), 1991-1993

- (345) ENGITEC IMPIANTI spa. Aluminium salty slag treatment plant. Metal Bulletin Monthly, 45, April 1991

Chapitre 9. Principaux aspects économiques du recyclage

Avertissement

Nous avons considéré que le déchet et l'aluminium recyclé à partir du déchet contiennent 100% d'aluminium et nous avons utilisé les prix de l'année 2002, juste avant les augmentations importantes des années suivantes.

9.1. La problématique de l'économie du recyclage

Le prix de la matière première, en l'occurrence le déchet, comprend un coût, celui de transformation en un déchet recyclable et une valeur, le prix de l'aluminium contenu dans le déchet. L'opinion générale veut qu'un déchet d'aluminium soit toujours recyclé en raison de sa valeur élevée, ce qui se révèle toujours vrai pour les déchets neufs et parfois faux pour les vieux déchets comme nous l'avons vu avec les taux de collecte. La rentabilité du recyclage se définit par le profit (ou marge) réalisé :

$$\begin{aligned} \text{profit} = & \text{prix de vente du métal recyclé} - \text{prix d'achat du déchet} \\ & - \text{coûts de recyclage (collecte, tri, fusion)} \end{aligned}$$

où les coûts de recyclage sont la somme des coûts de collecte, tri et fusion majorés des frais financiers et des taxes et impôts.

Nous verrons plus loin que l'existence d'une valeur du déchet influe considérablement sur l'activité économique du recyclage, surtout celui des vieux déchets où les trois étapes, collecte, tri et fusion, sont faites par des acteurs économiques souvent indépendants. Celui qui fait la fusion fixe un prix d'achat du déchet qui lui garantit son profit. De même, celui qui collecte fixe un prix du déchet qui prend en compte la valeur de l'aluminium contenu dans le déchet et le coût de la collecte majoré de son profit. Autant le profit de celui qui fait la fusion peut être accessible sans trop d'erreur car il s'agit d'une activité industrielle, autant celui de l'entrepreneur de la collecte est encore difficile à apprécier malgré l'industrialisation en cours. Jusqu'à aujourd'hui, les prix du déchet ont suivi les lois économiques classiques de l'offre et de la demande, avec pour limites l'arrêt généralement temporaire de la collecte, le plus souvent, ou de la fusion. C'est incontestablement là un des grands problèmes de l'industrie du recyclage en général et de l'aluminium en particulier et c'est certainement la première raison pour laquelle l'industrie de l'électrolyse ne s'est pas, jusqu'à aujourd'hui, impliquée dans le recyclage des vieux déchets, l'exception demeurant les boîtes boissons.

Cette problématique esquissée, nous allons considérer successivement les marchés, les prix de l'aluminium et du déchet d'aluminium, les coûts de production et la rentabilité.

9.2. Les prix de l'aluminium

Les mécanismes de formation des prix sont complexes car ils intègrent trois aspects :

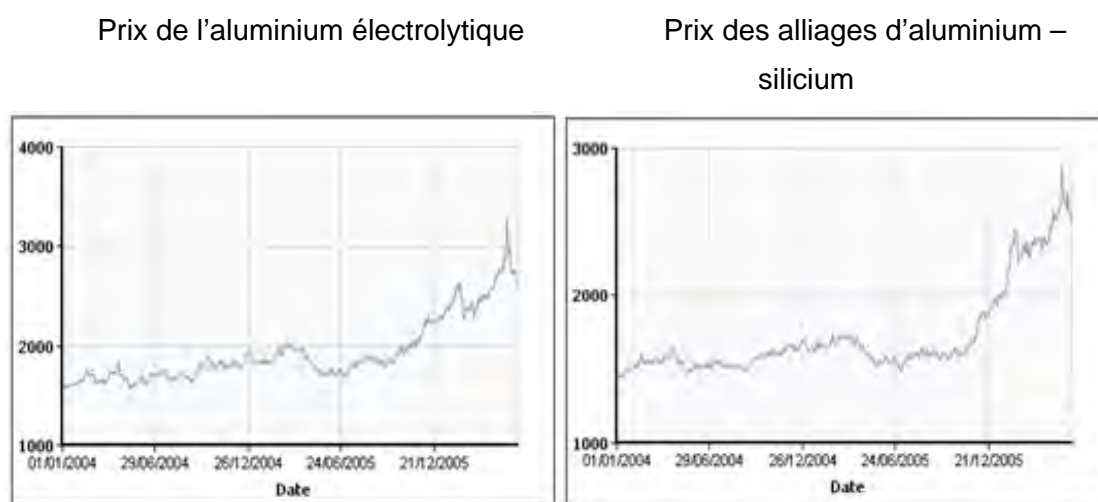
- la valeur intrinsèque : c'est le coût de production (surtout les postes, énergie, matières premières et main d'œuvre), majoré des frais financiers, taxes, impôts et bénéfices, ces derniers rétribuant raisonnablement le capital, c'est-à-dire les actionnaires. C'est en quelque sorte un prix juste ou « équitable » (au sens récent de commerce équitable) assurant la pérennité de l'activité économique.
- la valeur instantanée suivant la loi de l'offre et de la demande.
- l'éventuelle prime/pénalité de qualité par rapport à un produit standard.

Les prix varient et on a deux modes de variation ; l'un conjoncturel, varie dans le court et moyen terme avec la valeur instantanée, l'autre structurel, dans le moyen et le long terme, avec la valeur intrinsèque. On a deux prix de l'aluminium :

Prix de l'aluminium électrolytique : jusque dans les années 1960, le prix était un prix mondial « producteur » convenu entre les principaux producteurs européens, japonais et nord-américains, les majors. Le prix de référence, très stable, était fixé par ALCAN, l'un des majors. L'arrivée des nouveaux producteurs (il leur fallait prendre des marchés) s'est traduite par une très grande instabilité des prix, surtout préjudiciable aux majors car les nouveaux producteurs avaient accès à des ressources, énergie, minerais et main d'œuvre, moins coûteuses. En 1979, pour réduire cette instabilité, le prix « producteur » a disparu au profit d'un prix mondial aligné sur celui fixé par une bourse, le London Metal Exchange, LME. Ce prix est celui d'un métal non allié, sous forme de lingot, appelé primaire (primary) ou électrolytique dont le standard est la qualité A7 à plus de 99,7% d'aluminium. Une prime de qualité est appliquée pour les puretés plus élevées (les qualités 3 fois 9 ou A9 à 99,9%, 4 fois 9 à 99,99% d'aluminium et plus) ou pour les faibles teneurs de certaines impuretés, le fer par exemple. Trente ans plus tard, l'objectif n'a pas été atteint, les variations de prix sont toujours là, plus ou moins 30% autour d'une valeur moyenne historique de 1.500 US\$/t qui est celle du prix « équitable » précité (figures 9.1). Certains, dont nous partageons l'avis, reprochent au LME de favoriser la spéculation des milieux financiers (banques, fonds de pension, négociants internationaux) et remettent régulièrement son existence en cause. Ces variations, surtout conjoncturelles, retraduisent la loi de l'offre et de la demande. Toute variation, même de faible importance, de l'ordre de quelques pourcents, des stocks ou de la

capacité mondiale de production (nouvelle capacité, grève, incendie, catastrophe naturelle, niveau de prix, guerre commerciale) déclenche très rapidement une variation très amplifiée du prix. Ces dernières années, les prix ont fortement augmenté, conjoncturellement en raison du déséquilibre entre l'offre et la demande, celle-ci très supérieure, et aussi structurellement en raison de l'augmentation du prix « équitable » qui a répercuté les hausses structurelles de l'énergie et des matières premières. En juin 2006, le prix record de 3.310 US\$/ t a été atteint.

Figure 9.1 : Prix de l'aluminium au LME (London Metal Exchange), du 01.01.2004 au 30.06.2005 (source London Metal Exchange)



On rappellera que les coûts de production diffèrent beaucoup d'une usine à l'autre. D'après les études mondiales faites sur la compétitivité comparée des usines dans les années 1990, les plus bas coûts de production étaient d'environ 1.100 US\$/T, les plus élevés d'environ 1.900 US\$/T, coûts à comparer avec le prix moyen historique de 1.500 US\$/t.

On notera enfin que l'industrie du recyclage n'a aucune influence sur le prix de l'aluminium électrolytique.

Prix de l'aluminium recyclé : aussi fixé au London Metal Exchange, le prix de l'aluminium recyclé à partir des vieux déchets (avec pour marché principal la fonderie) est celui du lingot d'alliage aluminium-silicium à 9% de silicium. Les prix de l'aluminium recyclé et de l'aluminium électrolytique sont alors liés par la relation simple suivante :

$$\text{prix aluminium recyclé} = 0,91 \times \text{prix aluminium électrolytique} + 0,09 \times \text{prix silicium}$$

Le prix du silicium est celui du silicium métal, contenant plus de 98% de silicium. Il n'est pas fixé au LME et est relativement beaucoup plus stable que le prix de

l'aluminium avec une variation sur la même période entre 1.100 et 1.300 US\$/T (moyenne 1.200 US\$/T). Nous avons reporté dans le tableau 9.1 (et aussi la figure 9.2) l'évolution du prix de l'aluminium recyclé en fonction de celui de l'aluminium électrolytique pour le prix moyen du silicium de 1.200 US\$/t. Les deux prix sont de fait peu différents, l'aluminium électrolytique bénéficiant toujours d'une prime de qualité. On notera que, lorsque l'aluminium recyclé a une teneur en silicium différente, il en est tenu compte au prorata et qu'il est enfin tenu compte de la qualité métallurgique de l'aluminium recyclé, avec prime et pénalité, en particulier pour la teneur en fer.

Tableau 9.1 : Prix de l'aluminium recyclé à 9% de silicium en fonction du prix de l'aluminium électrolytique (US\$/T) (source London Metal Exchange)

aluminium électrolytique	1.000	1.500	2.000	2.500
aluminium recyclé, 9% Si (1.200 US\$/t Si)	1.030	1.485	1.940	2.383

Figure 9.2 : Prix et stocks de l'aluminium recyclé au LME (probablement alliage Al-Si 13%) (source London Metal Exchange)



Cette relation théorique n'est cependant pas respectée lorsque l'offre et la demande de l'un ou l'autre aluminium, l'électrolytique et le recyclé, sont différentes, voir opposées, situation rendue possible car l'aluminium recyclé a un seul marché, celui de l'automobile, qui peut se comporter différemment des autres marchés de l'aluminium. C'est ainsi que le prix du métal recyclé peut être supérieur à celui du

métal électrolytique : en avril 1994, l'aluminium recyclé valait 1.340 US\$/t et l'aluminium électrolytique 1.300 US\$/t.

En plus de la référence aluminium-silicium, on a vu apparaître aux U.S.A un aluminium recyclé à partir des boîtes boissons usagées, qui, s'il n'est pas utilisé dans la fabrication des boîtes boissons, est mis sur le marché sous l'appellation RSI (Recycled Standard Ingot).

9.3. Les coûts du recyclage

Ils comprennent les postes énergie, matières premières, main d'œuvre et les frais financiers du capital investi et sont calculés hors prix d'achat des déchets ou valeur du métal contenu.

9.3.1. Le coût de la collecte

C'est de l'énergie (manutentions et transports), de la main d'œuvre, des frais financiers du capital investi (engins roulants et aires couvertes ou non de stockage). Il n'existe aucune information fiable sur cette activité qui, de l'avis général, est économiquement opaque.

Pour les vieux déchets mélangés, on cite des coûts compris entre 100 et 150 US\$/t d'aluminium contenu (dans le cas de la collecte sélective, le coût, confondu avec le tri, serait d'environ 300 US\$/t) que nous avons comparé avec le prix de la vieille ferraille livrée à la sidérurgie. Celui-ci inclut la valeur du fer contenu et le coût de la collecte qu'on peut alors calculer connaissant la valeur du fer. Encore récemment, le prix de la ferraille était d'environ 100 US\$/t, la valeur du fer contenu d'environ 50 US\$/t, et le coût de la collecte valait donc environ 50 US\$/t. Le coût de la collecte de l'aluminium résulte surévalué d'autant plus qu'elle concerne rarement l'aluminium seul et le plus souvent un mélange de matériaux métalliques où le fer est presque toujours le composant principal. Nous avons retenu une fourchette de coûts entre 50 et 100 US\$/t d'aluminium contenu pour tenir compte des plus faibles quantités collectées.

Pour les déchets neufs, les coûts de collecte sont confondus avec ceux de tri, et nous les avons estimé entre 10 et 30 US\$/t d'aluminium contenu pour les déchets internes et entre 20 et 50 US\$/t pour les déchets neufs de transformation, en raison de la plus grande variété des déchets.

9.3.2. Le coût du tri

C'est de l'énergie de manutention et de tri (moteurs de broyeurs, tamis, ventilateurs, etc.), de la main d'œuvre et des frais financiers du capital investi dans les machines et les bâtiments.

On cite les coûts suivants, ramenés à la tonne d'aluminium contenu : 100 US\$/t en Europe, mais évidemment 15 US\$/t en Chine, en raison de l'effet de la main d'œuvre. Nous avons retenu une fourchette de coûts entre 50 et 100 US\$/t d'aluminium contenu, une fourchette large pour tenir compte de la grande variété des opérations de tri.

9.3.3. Le coût de la fusion

9.3.3.1. Les données technico-économiques

Le montant de l'investissement

Tableau 9.2 : Montants d'investissement en fonction de la capacité du site de recyclage (source C. Gentaz)

capacité (t/an)	investissement (MUS\$)	investissement spécifique (US\$/ t de capacité)
90.000 t/an (PECHINEY, HYDRO ALUMINIUM)	33	370
20.000 t/an (PECHINEY)	10	500

Nous avons pu vérifier que ces valeurs sont très homogènes avec d'autres d'usines semblables, soit par l'activité de recyclage de déchet, soit par les équipements techniques. Nous avons retenu environ 600 US\$/t de capacité en raison de la mise en conformité environnementale avec la législation, en particulier le traitement des dioxines éventuellement contenues dans les rejets gazeux. Ce montant de l'investissement est à comparer avec celui de la métallurgie extractive de 10.000 US\$/t soit 6% (et de 4.000 US\$/t pour l'électrolyse seule, soit 15%).

La main d'œuvre

Pour un refondeur, traitant des déchets neufs, et un affineur traitant un seul type de vieux déchets, et pour des capacités comprises entre 20.000 et 70.000 t/an, nous avons relevé entre 2 et 3 heures/t d'aluminium. Un affineur traitant des mélanges de vieux déchets dans des installations très techniques, pour le même domaine de capacité, mettra en œuvre 5heures/t d'aluminium.

Données techniques de la fusion

Nous avons reporté dans le tableau 9.3 toutes les données nécessaires au calcul du coût de production : consommations de matières, d'énergie, de main d'œuvre et de

capital (voir chapitre 8, tableau 8.7) par type de déchet, interne, de transformation et vieux.

Tableau 9.3 : Données technico-économiques de la fusion par type de déchet d'aluminium (source C. Gentaz)

donnée technico-économique	déchet neuf interne	déchet neuf de transformation	vieux déchet
bilan matière (par tonne d'aluminium produit) :			
pertes au feu brutes, PF	2	4	8
mise au mille brute de déchet (kg)	1.020	1.040	1.080
pertes au feu nettes (%) (44% PF après récupération de l'aluminium des crasses)	0,88	1,76	3,52
mise au mille nette	1.009	1.018	1.036
taux de crasses (%)	2,5	5	10
quantité de crasses (kg)	25	50	100
quantité de flux (kg)	2	3	4
quantité de sels brute (kg)	16	32	64
quantité de sels nette (kg) (après recyclage des crasses salées)	3,2	6,4	12,8
quantité de crasses salées (kg)	32	64	128
quantité de produits inertes après recyclage des crasses salées (kg)	13	26	52
bilan énergie :			
recyclage déchets (GJ/t aluminium)	5	7,5	10
recyclage crasses salées (GJ/t de crasses salées)	2	2	2
montant investissement :			
recyclage déchets (US\$/t d'aluminium)	400	500	600
recyclage crasses salées (US\$/t de crasses salées)	600	600	600
main d'œuvre :			
recyclage déchets (h/t d'aluminium)	4	5	6
recyclage crasses salées (h/t de crasses salées)	1,2	1,2	1,2

9.3.3.2. Le coût environnemental

Nous avons traité le cas le plus général, celui d'une usine d'affinage dans laquelle les crasses blanches sont traitées sur place (dans une usine de refusion, les crasses blanches sont vendues en l'état sans traitement) et les crasses salées sous-traitées. Le coût environnemental direct de la fusion est représenté par les traitements de l'air et de l'eau et c'est surtout une consommation d'énergie, le plus souvent électrique (moteurs de pompe, ventilateur) qui peut représenter jusqu'à 20% et plus de la consommation totale d'énergie. Nous avons pris une valeur typique de 10%. C'est aussi de la main d'œuvre, incluse dans la main d'œuvre totale tant de production que d'entretien, des produits consommables (filtre, produits de traitement, etc.) et des frais financiers du capital investi, tous inclus dans les postes énergie, main d'œuvre et frais financiers de la fusion.

Le coût environnemental indirect de la fusion, c'est le traitement des crasses salées confié à des centres spécialisés qui facturent leurs prestations hors crédit, compensation en argent ou livraison physique, représenté par les sels. Cette forme de facturation est dite du droit de péage (« pay toll »), Nous avons reconstruit ce coût environnemental en isolant tous les postes directs et indirects.

Tableau 9.4 : Coût environnemental par tonne de crasses blanches (source C. Gentaz)

Poste	prix unitaire US\$/unité	quantité	prix (US\$)
transport, préparation	20/t	1	20
mise en décharge déchet inerte	100/t	0,5 t	50
énergie	5 GJ/t	2,5 GJ	12
main d'œuvre	25/h	1,5 h	38
frais financiers ¹	0,08/t	700 US\$	56
total avant taxes, bénéfice			176
prix facturé à l'affineur			200

¹ capital amorti sur 20 ans pour un taux d'intérêt de 5%.

Ce coût est confirmé par les données suivantes auxquelles nous avons pu avoir accès : en 1990, la société de recyclage, REFONDA, d'ALUSUISSE payait 130 CHF/t de déchet leur traitement au Portugal. En 1993, le prix facturé par une société

allemande était de 120 US\$/t de crasses salées, soit 156 US\$/t de crasses blanches. Enfin, en 1995, les gouvernements portugais et suisse ainsi que ALUSUISSE payait 230 CHF/t de déchet leur traitement en Allemagne, en France et en Norvège.

9.3.3.3. Le coût de la fusion

Nous avons reconstruit le coût de la fusion chez un recycleur de capacité 70.000 t/an.

Tableau 9.5 : Coût de la fusion en US\$/t pour une usine de recyclage de capacité 70.000 t/an suivant le type de déchet d'aluminium (source C. Gentaz)

poste	prix unitaire US\$/unité	déchet neuf, interne		déchet neuf, de transformation		vieux déchet	
		quantité	coût	quantité	coût	quantité	Coût
matières : flux sels nets	70/t	2 kg	0,14	3 kg	0,21	4 kg	0,28
	140/t	3,2 kg	0,45	6,4 kg	0,90	12,8 kg	1,79
énergie	5/GJ	5 GJ	25	7,5 GJ	37,5	10 GJ	50
main d'œuvre	25/h	4 h	100	5	125	6 h	150
frais financiers ¹	0,08/t	600 US\$	48	600 US\$	48	600 US\$	48
sous-total			173,5		211,6		250,7
environnement	200/t	25 kg	5	50 kg	10	100 kg	20
total arrondi			180		220		270

¹ capital amorti sur 20 ans pour un taux d'intérêt de 5%

9.3.4. Le coût global du recyclage

Somme des coûts de la collecte, du tri et de la fusion, nous l'avons établi comme suit en fonction de la qualité du déchet (tableau 9.6).

Tableau 9.6 : Coût (US\$/t) du recyclage par étape du recyclage et par type de déchet d'aluminium (source C. Gentaz)

coûts	déchet neuf, interne	déchet neuf, de transformation	vieux déchet
collecte	10 – 30	20 – 50	50 – 100
tri	inclus dans collecte	inclus dans collecte	50 – 100
fusion	180	220	270
total	190 – 210 (200)	240 – 270 (255)	370 – 470 (420)

Le coût global du recyclage d'environ 200 US\$/t est celui d'un refondeur. Il passe à environ 420 US\$/t pour l'affineur. L'écart du simple au double est dû, à égalité, aux coûts plus élevés de la collecte et du tri, + 130 US\$/t au total, et de la fusion, + 110 US\$/t. C'est la traduction logique de la difficulté croissante du recyclage des vieux déchets.

L'effet de la capacité n'a pas été introduit et on retiendra que le coût de la fusion d'une usine de plus faible capacité sera plus élevé pour les mêmes déchets et les mêmes traitements, augmentant d'autant le coût du recyclage alors que ceux de la collecte et du tri sont à peu près constants. Le cas des très faibles capacités (chapitre 6) est à part avec des coûts de recyclage plus bas, mais il s'agit ni des mêmes déchets, ni des mêmes traitements.

9.4. Le prix des déchets et la rentabilité (définie par le profit ou marge) du recyclage de l'aluminium

9.4.1. Méthodologie

Le prix de l'aluminium recyclé est fixé et aligné sur le prix de l'aluminium électrolytique dont il diffère peu (voir tableau 9.1 et figures 9.1). Le profit, donné par la relation générale instantanée,

$$\text{profit} = \text{prix de vente du métal recyclé} - \text{prix d'achat du déchet} \times \text{mise au mille} \\ - \text{prix du recyclage (collecte, tri, fusion)}$$

est défini par le prix d'achat du déchet et le prix du recyclage.

- le prix du recyclage : c'est la somme des coûts de toutes les étapes du recyclage, collecte, tri et fusion majorés des taxes, impôts et bénéfices. La technicité de ce prix est grande car elle est fixée par la qualité du déchet : concentration en déchet d'aluminium dans les déchets collectés, teneur en aluminium du déchet d'aluminium, teneurs en éléments indésirables, eau, fer, plastiques, etc.
- le prix d'achat du déchet : la situation est complexe avec trois prix de déchet, celui du déchet brut, juste collecté, celui du déchet collecté et pré-trié, celui enfin du déchet collecté, trié juste à l'entrée de l'atelier de fusion.

Pratiquement, nous avons retenu

- de remplacer le prix du recyclage par le coût de la fusion plus proche de la réalité que ceux de la collecte et du tri seulement estimés.

- d'utiliser le prix d'achat du déchet livré à l'industriel de la fusion car ce prix, incluant les coûts de collecte et tri ainsi que les bénéfices, taxes et impôts associés, est publié.

Nous avons alors calculé un profit brut de la fusion (sans déduction des taxes et impôts) en valeur absolue et en pourcentage du prix de l'aluminium recyclé. Les valeurs calculées sont seulement représentatives de l'économie du recyclage dans un pays, jamais d'une société. En effet, elles valent pour une fusion faite dans des installations modernes, de grande capacité, 70.000 t/an (pour la capacité moyenne d'environ 20.000 t/an en Europe, le coût de la fusion sera alors augmenté de plus de 100 US\$/t), avec de bonnes performances techniques (voir tableau 9.5). Cette méthodologie a été appliquée à trois pays, l'Allemagne, l'Italie et le Japon (voir annexes pour le détail des données en fin de chapitre) sur trois années, 1999, 2000 et 2001, juste avant les changements structuraux des prix de l'énergie, puis des matières premières. Ces pays ont en commun d'être de gros producteurs d'automobile et de présenter une industrie de l'aluminium très semblable par des activités de transformation et de recyclage très développées et très différente par l'activité de production d'aluminium électrolytique et le flux des déchets d'aluminium.

Tableau 9.7 : Productions (milliers de tonnes) d'aluminium électrolytique, d'aluminium recyclé (hors recyclage captif), de produits de fonderie en Allemagne (A), en Italie (I) et au Japon (J) dans les années 1999, 2000 et 2001⁽³⁵¹⁾

productions (milliers de tonnes)	1999			2000			2001		
	A	I	J	A	I	J	A	I	J
d'aluminium électrolytique	633,8	186,5	10,9	643,5	189,2	6,5	651,6	187,4	6,6
d'aluminium recyclé	515,1	501,8	858,1	572,3	596,9	909,8	620,3	578,3	913,1
de la fonderie d'aluminium	597,8	623	1098,1	645,6	730	1204,2	644,1	751	1131,9

- * l'Allemagne : important producteur d'aluminium électrolytique et d'aluminium recyclé, est aussi un exportateur net de déchets d'aluminium
- * l'Italie : petit producteur d'aluminium électrolytique et producteur important d'aluminium recyclé, est aussi un importateur net de déchets d'aluminium.
- * le Japon : sans production d'aluminium électrolytique et producteur important d'aluminium recyclé, il importe aluminium électrolytique et déchets d'aluminium.

L'absence d'homogénéité des prix publiés, en particulier des déchets, (ils concernent des alliages et des déchets différents) permet seulement d'utiliser qualitativement les résultats obtenus pour interpréter et comprendre les réalités économiques.

Pour chaque pays, nous avons calculé le profit brut dégagé par la fusion. Comme nous ne disposons pas du prix du déchet de transformation, nous avons seulement traité les cas des vieux déchets et des déchets neufs internes, ce dernier cas peu différent de celui des déchets de transformation.

9.4.2. Résultats

Ils sont reportés dans les tableaux suivants :

Tableau 9.8 : Rentabilité brute de la fusion des déchets neufs (découpe d'aluminium pur, aluminium recyclé à 99,7%, profit brut en US\$/t et en % du prix de vente de l'aluminium recyclé) en Allemagne (A), Italie (I) et Japon (J), en 1999, 2000 et 2001 (source C. Gentaz)

Item	1999			2000			2001		
	A	I	J	A	I	J	A	I	J
prix d'achat unitaire du déchet (US\$/t)	1.399	970	1.224	1.552	1.169	1.373	1.494	1.177	1.286
prix de vente de l'aluminium recyclé (US\$/t)	1.355	1.652	1.568	1.535	1.879	1.786	1.451	1.737	1.699
profit brut (US\$/t)	(176)	493	153	(211)	520	221	(236)	369	221
profit brut / prix de vente de l'aluminium recyclé (%)	(13,0)	29,8	9,8	(13,7)	27,7	12,3	(16,3)	21,2	13,0

Tableau 9.9 : Rentabilité brute de la fusion des vieux déchets (fonte d'aluminium, aluminium recyclé en alliage aluminium silicium à 13% de silicium, profit brut en US\$/t et % du prix de vente de l'aluminium recyclé) en Allemagne, Italie et Japon, en 1999, 2000 et 2001 (source C. Gentaz)

Item	1999			2000			2001		
	A	I	J	A	I	J	A	I	J
prix d'achat unitaire du déchet (US\$/t)	955	906	993	1.127	992	1.075	1.043	976	952
prix de vente de l'aluminium recyclé (US\$/t)	1.629	1.673	1.625	1.651	1.772	1.690	1.666	1.808	1.472
profit brut (US\$/t)	359	464	326	213	474	306	315	527	216
profit brut / prix de vente de l'aluminium recyclé (%)	22,0	27,7	20,1	12,9	26,7	18,1	18,9	29,1	14,7

Tableau 9.10 : Valeurs moyennes de la rentabilité brute avec entre parenthèses l'écart type, tous pays et années confondues (source C. Gentaz)

Item	déchet neuf	vieux déchet
prix du déchet (US\$/t Al)	1.294 (181)	1.002 (68)
prix de vente de l'aluminium recyclé (US\$/t Al)	1.629 (167) qualité 99,7%	1.665 (95) qualité Al – Si à 13% Si
profit brut (US\$/t Al)	150 (295)	355 (111)
profit brut rapporté au prix de vente de l'aluminium recyclé (%)	7,9 (18)	21,1 (6)

Ces tableaux nous permettent de confirmer que :

- les prix de l'aluminium électrolytique et de l'aluminium recyclé sont pratiquement les mêmes

- l'instabilité du prix de l'aluminium électrolytique est presque deux fois plus grande que celle du prix de l'aluminium recyclé

et de vérifier que

- les prix du déchet sont très différents suivant sa qualité. Celui du déchet neuf suit celui de l'aluminium électrolytique dont il partage l'instabilité et, en bonne partie, la valeur élevée (80% du prix de l'aluminium électrolytique dans l'exemple de la découpe d'aluminium pur). Le vieux déchet suit le prix de l'aluminium recyclé (environ 60% de celui-ci) dont il partage aussi l'instabilité.
- la rentabilité varie plus ou moins fortement suivant le type de déchets, neuf et vieux, vérifiant économiquement l'existence de deux recyclages séparés.

Pour les déchets neufs mis sur le marché, le prix rendu usine de fusion est seulement fixé par la valeur de l'aluminium contenu, aligné sur celui de l'aluminium électrolytique, car les prix de la collecte et du tri sont négligeables, moins de 10%. Au prorata de la teneur en aluminium, il est pondéré par la qualité (granulométrie, composition, humidité, revêtement) et, pour 100% d'aluminium contenu, il se situe entre 70 et 80% du prix du lingot d'aluminium électrolytique dont il suivra les variations. Les décotes pour qualité sont croissantes, des déchets internes aux déchets de transformation, et retraduisent les coûts supplémentaires de prétraitement et de fusion, les décotes les plus importantes étant constatées pour les copeaux et poudres d'usinage surtout huileuses et les crasses. La rentabilité est faible et instable car elle dépend des prix de l'aluminium recyclé et du déchet neuf d'aluminium. Pour l'essentiel des déchets neufs, ceux qui ne vont pas sur le marché, les prix sont des prix de cession, internes lorsqu'il s'agit de centres de profit différents de la même entreprise, externes lorsqu'il s'agit de deux entreprises liées par contrat. Ainsi les déchets du transformateur sont repris par le fournisseur de semi-produits qui facture seulement un prix de recyclage incluant le prix des pertes d'aluminium, sa marge d'opérateur du recyclage (principe du « pay toll ») ainsi que les coûts logistiques (collecte, transport). C'est pourquoi nombre d'opérateurs indépendants, les refondeurs, ont choisi cette formule du travail à façon qui a au moins le mérite de les mettre à l'abri des variations de prix.

Pour les vieux déchets, le prix rendu usine de fusion est fixé par la valeur de l'aluminium contenu majoré des prix de la collecte et du tri. Ce prix est aligné le plus souvent sur celui de l'alliage aluminium-silicium à 13% de silicium, mais il pourrait l'être indifféremment sur celui de l'aluminium électrolytique. Au prorata de la teneur en aluminium, il est pondéré par la qualité (granulométrie, composition, humidité, revêtement) et, pour 100% d'aluminium contenu, il vaut environ 60% du prix de

l'alliage aluminium-silicium. Il suit les variations de prix de l'alliage aluminium-silicium, bien moindres que celles du prix de l'aluminium électrolytique, donc un avantage.

Nous donnons ci-après quelques prix auxquels nous avons eu accès de déchets collectés et triés aux U.S.A. : le déchet massif automobile, un bloc moteur, un carter, vaut 1.000 US\$/t et le même déchet broyé vaut entre 200 et 300 US\$/t. Suivant une autre source, le prix des boîtes boissons hors d'usage sur le marché était d'environ 1.200 US\$/t en 2000. Par contre, suivant une autre source nord-américaine, en 1993, le collecteur recevait environ 500 +/- 50 US\$/t et sa marge était de 270 +/- 50 US\$/t.

La rentabilité reste toujours médiocre, même si elle est moins sujette à des variations importantes. Elle rend compte des inquiétudes des affineurs de tous les pays sur leur avenir.

9.5. Bilans et interrogations économiques à propos de l'industrie du recyclage

9.5.1. Bilans économiques comparés des filières déchet et minerais

Le prix de l'aluminium est le même quelle que soit la filière et d'un strict point de vue économique, les profits et les coûts de production devraient être peu différents. Nous avons donc comparé les coûts de production de l'électrolyse de l'alumine et de la fusion des déchets, pour le prix historique de l'aluminium de 1.500 US\$/T.

Tableau 9.11 : Coûts de production de l'électrolyse de l'alumine et de la fusion des déchets et marges brutes comparées en US\$/t d'aluminium des deux filières (source C. Gentaz)

poste	électrolyse de l'alumine (capacité de 300.000 t/an)			fusion de vieux déchets (capacité de 70.000 t/an)		
	quantité spécifique /t d'aluminium	prix unitaire (US\$)	coût (US\$)	quantité spécifique /t d'aluminium	prix unitaire (US\$)	Coût (US\$)
matières premières	2,0 t alumine 0,6 t carbone total	200 /t 150/t	400 90 490	1,036 t déchets total	900 (60% de 1.500 US\$)	932 932
énergie	16 MWh	20 /MWh	320	10 GJ	5/GJ	50
main d'œuvre	2 h	25 /h	50	6 h	25 /h	150
environnement	10% énergie	20 /MWh	30			20
frais financiers ⁽¹⁾	4.000 US\$	X 0,08	320	600 US\$	x 0,08	48
sous-total			1.210			1.200
marge (profit) brute			290 (19%)			300 (20%)
total (prix de vente de l'aluminium))			1.500			1.500

⁽¹⁾ capital amorti sur 20 ans pour un taux d'intérêt de 5%.

Les deux filières ont bien des coûts de production et des marges comparables, mais présentent une structure de coûts très différente. Tous les avantages de la filière déchet, énergie, environnement et capital, sont confirmés économiquement, et on notera que :

- l'énorme avantage de la très faible consommation d'énergie du recyclage, devient juste un avantage quand on l'exprime en unités économiques. La fusion requiert, en unités physiques, environ 6%, de l'énergie consommée dans l'électrolyse et seulement, en unités économiques, environ 16%. En effet, l'électrolyse est un procédé électro-intensif caractérisé par une consommation

pratiquement constante tout au long de l'année, alors que le recyclage n'est pas un procédé électro-intensif lorsqu'il utilise l'électricité, caractérisé par une consommation discontinue et variable. Les prix de l'électricité et aussi de l'énergie en général correspondent à ces façons de consommer, de base pour l'électrolyse, de pointe pour le recyclage. L'électrolyse paye entre 5 et 25 US\$/MWh, - 20 US\$ dans la comparaison, une valeur plutôt médiocre -, alors que la fusion paye entre 30 et 60 US\$/MWh, - dans la comparaison, on a pris 50 US\$ -.

- l'avantage environnemental n'existe pas en l'absence de chiffrage économique des atteintes à l'environnement (CO₂, fluorocarbone).

- l'avantage important du montant de l'investissement est maintenu.

- le poste main d'œuvre est défavorable à l'économie du recyclage en raison des faibles capacités des usines.

Cette structure du prix de l'aluminium est conforme à la réalité industrielle. Par exemple, d'après ALCAN, le prix du déchet et du silicium représente 80% du prix de vente. La « marge » vaut donc 20% et doit couvrir coût de recyclage, frais financiers et profit. Toujours d'après ALCAN, 45% de la marge, soit 9% du prix de vente, est consacré à la protection de l'environnement, traitement des gaz et des crasses salées. A priori, cela paraît très élevé et il faudrait connaître les postes pris en compte dans l'environnement. Dans ce travail, le coût environnemental est seulement celui du traitement des crasses blanches, parfaitement isolé puisque sous-traité, et les autres postes, énergie, main d'œuvre, frais financiers sont inclus dans le coût de la fusion.

L'économie du recyclage est capable de rémunérer tous ses acteurs même si la rentabilité de la dernière étape, la fusion, est par trop variable. Une conclusion s'impose : une usine d'électrolyse moderne, disposant d'un contrat favorable de fourniture d'électricité, dégagera toujours un profit, quelque soit le prix de vente de l'aluminium alors que l'usine moderne de recyclage, dans des conditions similaires, présentera une rentabilité aléatoire, sans garantie de profit. C'est ce qui a incontestablement découragé jusqu'à aujourd'hui les producteurs d'aluminium d'investir dans l'industrie du recyclage.

9.5.2. Structures de l'économie du recyclage et parallèle avec l'acier

Il nous a paru intéressant de poursuivre la comparaison avec l'acier avec les structures de l'économie du recyclage. Nous donnons dans le tableau suivant les grands postes du coût de la fusion et la répartition en pourcentage par rapport au prix du métal recyclé

Tableau 9.12 : Structure du prix du métal recyclé, aluminium et fer (acier), en US\$/t (source C. Gentaz)

poste	acier par fusion au four électrique de vieille ferraille (800.000 t/an)			aluminium par fusion de vieux déchets (70.000 t/an)		
	quantité spécifique /t d'aluminium	prix unitaire (US\$)	coût (US\$/t)	quantité spécifique /t d'aluminium	prix unitaire (US\$)	coût (US\$/t)
matières premières	1,1 t de vieilles ferrailles ,chaux, etc.	100 /t (56% du prix du métal)	110 7	1,036 t de vieux déchets	900 /t (60% du prix du métal)	932
énergie	électricité, 400 kWh charbon électrode	50 /MWh	20	10 GJ	5/GJ	50
main d'œuvre	0,6 h	25 /h	15	6 h	25 /h	150
environnement			4			20 ₍₁₎
frais financiers ₍₂₎	50 US\$/t	x 0,08	4	600 US\$/t	x 0,08	48
sous-total			160			1.200
marge (profit) brute en US\$/t en pourcentage du total			20 (11%)			300 (20%)
total (prix de vente du métal)			180 (acier liquide)			1.500 (l'alumi- nium liquide)

⁽¹⁾ ce poste contient seulement le traitement des crasses salées. Le traitement des gaz de prétraitement et de fusion est inclus dans les postes énergie, main d'œuvre et frais financiers.

⁽²⁾ capital amorti sur 20 ans pour un taux d'intérêt de 5%.

On a une coïncidence et une concordance remarquable de la plupart des grands postes. La coïncidence du ratio prix du déchet par prix du métal recyclé, environ 60%, est remarquable et même troublante puisqu'on constate la même valeur d'environ 60% pour d'autres métaux : la fonte, le silicium, les ferro-alliages.

Les deux recyclages sont techniquement et économiquement comparables. Les différences observées à l'avantage de l'acier, la main d'œuvre et les frais financiers, sont la conséquence de l'effet de taille, celles à l'avantage de l'aluminium concernant l'énergie et aussi la marge.

9.5.3. Les facteurs de rentabilité économique

9.5.3.1. Fusion

Nous avons recensé les facteurs suivants :

la capacité : une faible capacité détériore sensiblement les postes des frais financiers et de main d'œuvre.

la qualité des déchets : les pertes au feu, une excellente mesure de la qualité du déchet, ont un effet indiscutable sur le coût de la fusion comme nous l'avons constaté en calculant la relation linéaire,

coût de fusion (US\$/t d'aluminium recyclé) = 155 + 14,6 pertes au feu (%).

le poste environnement : fixé par la qualité des déchets, il dépend de l'efficacité énergétique et du rendement aluminium de la technologie de la fusion car ceux-ci conduisent à des coûts directs et indirects élevés (traitement des crasses), pouvant représenter environ 10% du coût de la fusion. Nous rappelons que l'avantage environnemental remarquable de la très faible émission de gaz à effet de serre n'entraîne aucun avantage économique dans la situation actuelle.

9.5.3.2. Recyclage

Sa rentabilité est fixée par les prix du déchet d'aluminium et de l'aluminium recyclé, ce dernier fixé par le prix de l'aluminium électrolytique avec lequel il est pratiquement confondu.

Alors que les acteurs de la collecte, du tri, et de la fusion sont souvent indépendants les uns des autres, globalement, l'activité du recyclage est toujours rentable. Par contre la rentabilité de chacun des acteurs, surtout celui de la fusion, n'est pas garantie. Or sa rentabilité est fixée par le prix du déchet, un prix toujours discuté mais jamais concerté entre les acteurs qui, au contraire, auraient plutôt tendance à imposer leurs points de vue. Jusqu'à aujourd'hui, le mode de formation du prix des déchets a eu des conséquences nombreuses et importantes :

- pour éviter des variations importantes de prix de l'aluminium, les délais entre les transactions commerciales du déchet d'aluminium et de l'aluminium recyclé sont courts, moins de trois mois. Les stocks physiques sont faibles et nous rappelons que l'une des fonctions du London Metal Exchange est précisément de maintenir des stocks faibles.

- l'adaptation aux variations du marché est facile pour les opérateurs / négociants de la collecte et du tri, plus difficile pour l'industriel de la fusion justement confronté à une logique industrielle avec des clients, des stocks, etc. Lorsque le prix du déchet est insuffisant pour les opérateurs / négociants de la collecte et du tri, ceux-ci réduisent instantanément leur activité dont la souplesse est fondée sur une main d'œuvre « saisonnière ». Par contre, lorsque le prix du déchet est trop élevé, ou le prix de l'aluminium recyclé trop bas, l'opérateur de la fusion, avec une structure industrielle, une main d'œuvre salariée, des contrats de livraison, peine à réduire rapidement son activité.

On retiendra surtout que l'étape de collecte est une activité tout sauf transparente s'agissant non seulement des quantités collectées, mais aussi des pourvoyeurs de déchets et surtout des prix pratiqués.

- la rentabilité du recyclage commence donc par acheter le déchet au meilleur prix. Ce prix appartient à un monde différent de celui du prix de l'aluminium électrolytique et on comprend les échecs historiques des « majors » dans le recyclage, faute souvent de savoir bien acheter.

- la rentabilité du recyclage fait par le refondeur est assurée, même si, comme on l'a vu, elle est médiocre. En effet, il n'y a pas de collecte et de tri fait par des tiers indépendants, le prix du recyclage est le prix de la fusion hors prix des déchets et de l'aluminium électrolytique.

- la rentabilité du recyclage fait par l'affineur, en principe meilleure que celle du refondeur, est plus aléatoire. Techniquement, c'est le recyclage le plus difficile. Economiquement, il est le plus sensible à des variations de prix sur lesquels l'affineur n'a pratiquement aucune prise d'autant plus que son principal produit, les alliages aluminium-silicium, dépend aujourd'hui d'un marché principal, l'automobile. Comme nous le développons ensuite, le prix du vieux déchet est excessif, qualificatif couramment utilisé par les affineurs qui s'en plaignent. Le risque économique est réel et on comprend encore mieux pourquoi les majors de l'industrie de l'aluminium et les investisseurs sont si peu entrés jusqu'à aujourd'hui dans cette activité.

A l'avenir, les facteurs de changement concerneront :

- pour la fusion : l'augmentation des capacités de traitement. Ce changement est engagé depuis plusieurs années et se poursuivra (chapitre 6, l'industrie du recyclage).

- pour le recyclage : le prix du déchet et l'étape de la collecte.

- * le prix du déchet, ce serait adopter une méthodologie du type de celle qui est en train de se mettre en place pour les ferrailles d'acier. Ce serait aussi et surtout mieux répartir les profits puisque aujourd'hui ils sont incertains pour l'affineur, certains pour les acteurs de la collecte / tri et les négociants.

- * l'étape de la collecte : les changements sont en cours depuis plusieurs années même s'il est difficile encore aujourd'hui de dire ce qui va en résulter. A l'origine de ces changements, on a des comportements écologiques côtoyant d'autres purement commerciaux et des obligations légales.

La mise en place de la collecte sélective par la même industrie, qui, après avoir fabriqué le produit, s'implique dans son recyclage, est une démarche commerciale. Le seul exemple connu aujourd'hui est la boîte boisson. Dans la plupart des pays où elle est commercialisée, des structures appropriées de collecte ont été mises en place. Aux U.S.A., nous avons vu que le lancement commercial de la boîte boisson avait eu lieu en même temps que l'organisation de la collecte. Un peu plus tard, en Europe, en Suisse, ce sont des structures spécialisées qui ont été créées. A l'origine, le principe a été partout le même : intervenir au moment même où la boîte devient déchet en impliquant le consommateur / créateur de déchet dans un geste responsable bénévole ou rémunéré (et de moins en moins rémunéré). De nombreux points de collecte sont mis à disposition dans les lieux les plus fréquentés : écoles, centres commerciaux, cinémas, gares, etc. Ensuite, le ramassage est fait par des professionnels de la collecte.

Aujourd'hui, alors qu'on collecte entre 60 et 70% des boîtes, en Europe, voire entre 80 et 90% en Suisse, le geste responsable bénévole a été complété par une taxe de recyclage de la boîte acquittée par le consommateur à l'achat de la boîte qui ne sera pas toujours collectée (n'est ce pas plutôt une taxe de collecte surévaluée ?). Comme nous avons vu que globalement le recyclage de l'aluminium était économiquement rentable sans qu'il soit besoin d'appliquer une taxe, celle-ci finance donc la commercialisation de la boîte.

En Suisse, c'est bien le cas avec la société IGORA, dont les fondateurs et actionnaires sont des sociétés des industries de l'aluminium et de l'emballage. Elle a pour activités, la promotion, l'organisation et l'encouragement des applications de

l'aluminium dans l'emballage. En 1996, cette taxe était perçue par le producteur de la boîte et se montait à 0,04 US\$ par boîte (1 sou par boîte) ou 2.500 US\$/ tonne métrique d'aluminium alors que l'aluminium électrolytique valait aux environs de 1.500 – 1.600 US\$/ tonne métrique. Elle était reversée ensuite intégralement à IGORA qui rémunérait ses activités à hauteur de 1.000 US\$/t et redistribuait le solde, 1.500 US\$/t aux différents acteurs : collecte, 250 US\$/t, transport, 120 US\$/t, marchand, 810 US\$/t et autres non précisés, 320 US\$/t.

Dix ans plus tard, en 2006, on lit que tout kilogramme de boîtes apporté dans un centre de récupération est toujours payé, 1,30 CHF/kg, soit entre 55 et 70% de l'aluminium électrolytique valant alors entre 1,8 à 2,3 CHF/kg (1.500 à 2.000 US\$/t). Il reste entre 0,5 et 1,0 CHF, une somme suffisante pour couvrir les dépenses de transport et de fusion, environ 0,35 CHF.

La taxe de recyclage a été adoptée par toute l'industrie de l'emballage et nous avons pu comparer celle appliquée à la boîte boisson en acier de même contenance, plus lourde de quelques gammes : elle est inférieure de cinq à dix fois à celle de l'aluminium alors que c'est la même collecte, souvent confondue. Nous confirmons que la taxe n'a plus aucun rapport avec le recyclage et finance une industrie de l'emballage en aluminium qui n'en a pas besoin.

Qu'en sera-t-il pour les autres collectes sélectives ? Seront-elles organisées sur le même modèle que sur celui de la boîte boisson ?

Il est certain que l'industrie de l'aluminium privilégie la collecte sélective car elle fait du vieux déchet un déchet de transformation recyclable dans ses propres installations ou chez le refondeur. C'est le recyclage en boucle fermée (closed loop) du refondeur par opposition à celui en boucle ouverte (open loop) de l'affineur. La généralisation de la collecte sélective aura pour effet de réduire l'importance de l'affineur et surtout de poser alors le problème des marchés du métal recyclé car le recyclage des déchets neufs et des vieux déchets au même endroit conduira à un excès de déchets. Tout l'aluminium recyclé ne pourra être utilisé et devra alimenter d'autres marchés, c'est-à-dire le plus souvent ceux de l'affineur, situation déjà rencontrée avec la collecte sélective de la boîte boisson.

L'obligation légale de recyclage des produits de consommation devenus de vieux déchets se développe de plus en plus, surtout en Europe. Aujourd'hui, le recyclage des véhicules automobiles hors d'usage est obligatoire, demain, ce sera celui des produits d'emballage, des appareils électroménagers, des équipements électroniques, etc. La collecte commence par l'action individuelle du consommateur qui confie le déchet à un premier centre de collecte, le plus souvent lié aux

collectivités locales, une déchetterie par exemple. C'est alors seulement qu'interviennent les professionnels de la collecte et du tri qui, libérés de la première collecte, deviennent des industriels, avec des employés permanents, des moyens de transport et des surfaces de stockage et de tri. Finalement, l'amont de la collecte, à l'origine l'étape la plus coûteuse, devient la moins coûteuse sans que cette diminution ait été répercutée sur le prix global de la collecte. Les bénéfices de l'aval, considérablement augmentés, ont permis la profonde mutation d'une activité qui est en train de passer de l'artisanat familial à la société multinationale, les premières apparues venant du monde de la ferraille, certaines ayant réuni collecte, tri et fusion pour réaliser une optimisation des profits.

9.5.4. Proposition de formation du prix des déchets

Des propositions d'amélioration ont été faites récemment par l'industrie du fer pour atteindre les objectifs fixés et concertés de recyclage dont toutes les étapes doivent être économiquement rentables.

Le prix de l'aluminium contenu dans le déchet, tel que fixé au prorata du prix de l'aluminium électrolytique, doit être corrigé par la qualité. La méthode proposée par l'industrie du fer, plus précise que celle existant actuellement de classements par catégorie, est fondée sur la qualité du déchet, et finalement sa valeur d'usage, qui doit fixer le prix du déchet.

Développée pour la ferraille, elle utilise les trois critères suivants :

- Le critère thermodynamique : Cu, Sn, Mo, Cr, Ni ne peuvent être éliminés par le traitement oxydant classique. On rajoute aussi, pour des raisons environnementales, Zn, Pb, Cd, As, Hg (en effet l'évaporation est très efficace pour éliminer Zn, Pb et Cd). La position retenue est de dire que ce sont de nouveaux éléments d'addition, surtout pas des poisons.
- Le critère chimique : les résiduels sont éliminés par dilution, faute de mieux ; on doit donc ajouter du fer neuf, plus cher.
- Le critère physique : influence des dimensions et de la densité du déchet sur le coût de fusion exprimant le coût réel de production d'acier en comparaison avec une ferraille idéale qui serait du fer pur.

Elle est totalement transposable au prix du déchet d'aluminium

A notre avis, la distinction centenaire entre aluminium électrolytique, dit primaire, et aluminium recyclé, dit secondaire, doit pouvoir disparaître au profit d'un seul prix de l'aluminium corrigé par des qualités différentes, l'une d'entre elles étant évidemment la qualité alliage de moulage.

9.5.5. Conclusions

La rentabilité du recyclage est incontestable, sans aucun interventionnisme. Par contre, la rentabilité de la fusion est incertaine alors que celle de la collecte et du tri est certaine.

Dans ces conditions, le refondeur, indépendant de la collecte, voit sa rentabilité assurée puisque il facture son service déconnecté des prix du déchet et de l'aluminium électrolytique. Indispensable pour l'industrie d'électrolyse et celle de transformation, il en devient un atelier.

La situation de l'affineur est bien différente. Il dépend totalement de la collecte et des négociants par les quantités et les prix des déchets. Il dépend aussi des prix de l'aluminium électrolytique. Entre ces deux prix dont les variations sont souvent importantes, seul le coût de la fusion est fixe. Le profit est donc variable et n'est jamais assuré.

La mise en place de la collecte sélective pour pratiquer un recyclage en boucle fermée a la faveur de l'industrie de l'aluminium. Ses conséquences sont aujourd'hui imprévisibles. Nous ne connaissons pas, - et la littérature est muette sur ce point, - la quantité maximum de vieux déchets admissible dans la boucle fermée. Par contre, nous sommes en mesure d'affirmer que ce n'est pas 100% et nous estimons que, dans le cas de la boîte boisson, c'est environ 50%. Comme on en collecte 60 à 65%, cela signifie que 10 à 15% sont recyclés en dehors de la boucle fermée. Par ailleurs, nous avons vu que les directives européennes exigent qu'au moins 80% des vieux déchets soient recyclés, et ce seront plus de 30% qu'il faudra recycler en dehors de la boucle fermée.

Une mutation formidable du recyclage de l'aluminium est en cours et concerne d'abord l'activité de la collecte, du tri et du négoce.

Les taux de collecte augmenteront et il faudra utiliser les déchets excédentaires, ceux qu'on ne saura pas recycler dans la boucle fermée. C'est le plus grand défi de l'industrie de l'aluminium.

9.6. Bibliographie

- (346) Minster Adam. A grinding hunger for scrap. Far Eastern Economic Review, 26-29, march 25, 2004
- (347) Gerber Jürg. The global dimension of aluminium recycling. 7th International OEA aluminium recycling congress, 17-18 March 2003, München, Deutschland
- (348) Jones Barry. The London Metal Exchange , LME, and its role in the global metals risk management. 7th OEA International Aluminium Recycling Congress, München, Germany, 17/18 march 2003
- (349) Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters. Aluminium Recycling Report 99/01. October 2002
- (350) Le cycle du fer ou le recyclage durable de l'acier. Conférence IRSID – USINOR, 2002, jpbirat@imaginet.fr et jean-pierre.birat@usinor.com
- (351) Aluminium recycling report 99 / 01, Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters, www.oea-alurecycling.org
- (352) Vigeland Pål. Aluminium recycling : the commercial benefits, the technical issues and the sustainability imperative. Metal Bulletin 9th international secondary conference, 7-9 november 2001, Prague, Tchéquie
- (353) Pezet Anne. La décision d'investissement industriel. Le cas de l'aluminium. Ed. Economica, Paris, France. 2000
- (354) Lesclous René. Histoire des sites producteurs d'aluminium, les choix stratégiques de PECHINEY. Les Presses de l'Ecole des Mines (avec le concours de l'Institut pour l'histoire de l'aluminium), 1999
- (355) Aufauvre Dominique. Livre blanc «le recyclage de l'acier dans les emballages ménagers : un exemple d'effort collectif », Technique et Documentation, 1997

Proceedings of the third ASM International Conference & Exhibition on The Recycling of Metals, Barcelona, Spain, 11-13 June, 1997

- (356) Ayres Robert U. Metals recycling : economic and environmental implications. 5-31
- (357) Moison David L. The myth and the reality of the relationship between scrap metal suppliers and prices. 47-64
- (358) Rochelle Christophe. LME and the recycling business.139-172
- (359) Leoz Argüelles Vicente. The competitiveness of the european metals recycling industries. Some key factors and policy considerations.213-236
- (360) Katyal Anil. The changing pattern of secondary aluminium industry through the millennium.237-253
- (361) Gripenberg Henrik, Müllertthann Michael, Jäger Norbert. Aluminium dross and waste recycling with Alurec – three years experience from a new salt-free technology.421-428
- (362) Marks Von Wurtemberg J. Lightweight materials for automotive applications. Iron and Steelmaker, I&SM, 11-21, August 1994
- (363) Lovatt Melanie. US producers see growing primary involvement. Metal Bulletin Monthly, 60-63, March 1992
- (364) Green costs force German smelters into the red. Metal Bulletin Monthly, 65-67, March 1992
- (365) Eliasco E. Le recyclage de l'aluminium. Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement, commission des produits de base, réunion d'examen spéciale sur la bauxite, Genève 13 mai 1991 (United nations Conference on Trade and Development, Committee on Commodities, Ad Hoc review meeting on bauxite, Geneva, 13 May 1991
- (366) Andersson Rolf. Discussion of issues for improved producer-consumer co-operation : recycling of aluminium cans, environmental and economic aspects. United nations Conference on Trade and Development, Committee on Commodities, Ad Hoc review meeting on bauxite, Geneva, 13 May 1991

- (367) Reynolds Randall R. and Olper Marco. The ENGITEC system for treatment of salt slag from secondary aluminum smelters. Proceedings of the Second International Symposium on recycling of metals and engineered materials, edited by van Linden Jan H. L., Stewart Jr Donald. S. and Sahal Yogeshwar, The Minerals, Metals and Materials Society, 439-450, 1990
- (368) Jacky Henri. Aluminium : la nouvelle frontière de l'aval. Marché unique, marché multiple : stratégie européenne des acteurs industriels. Observatoire des Stratégies Industrielles. Ed. Economica. 303-322, 1990
- (369) Le recyclage de l'aluminium. Technique Moderne, 105-110, 1986
- (370) Site www.igora.ch
- (371) Documents internes PECHINEY

9.7. Annexe : Cas de l'Allemagne

Tableau 9.13 : Prix en US ct/lb en Allemagne en 1999, 2000 et 2001 de l'aluminium électrolytique à 99,7% d'aluminium, de l'alliage aluminium silicium (legierung 231), d'un déchet neuf (découpe d'aluminium pur) et d'un vieux déchet (fonte d'aluminium donc un alliage aluminium silicium) ⁽³⁵¹⁾

année	Al 99,7%	Al-Si 13%	Al 99,7%/ Si13%	new scrap	new scrap/Al 99,7%	new scrap/ Si 13%	old scrap	old scrap/Al 99,7%	old scrap/Si 13%
1999	61,45	73,91	0,8314	60,72	0,9881	0,8215	43,34	0,7053	0,5864
	5,79	3,46		5,61			4,67		
2000	69,61	74,91	0,9292	70,40	1,0113	0,9398	51,14	0,7643	0,6827
	5,89	9,20		1,73			1,28		
2001	65,83	75,56	0,8712	67,75	1,0292	0,8966	47,32	0,7188	0,6263
	7,80	4,65		5,41			3,25		
moyen- ne / écart type	65,63	74,79	0,8762	66,29	1,0101	0,8863	47,27	0,7202	0,6320
	4,08	0,83		5,00			3,90		
>US\$/t	1.447	1.649		1.461			1.042		

Tableau 9.14 : Profit (US\$/t d'aluminium recyclé) par catégorie de déchets dans les conditions prévalent en Allemagne sur la période 1999-2001 d'achat du déchet en US\$/t d'aluminium contenu et valeur relative par rapport au prix du lingot d'aluminium électrolytique (source C. Gentaz)

Item (US\$/t)	déchet neuf, interne (découpe d'aluminium pur)			vieux déchet (fonte d'aluminium)		
	1999	2000	2001	1999	2000	2001
prix unitaire d'achat du déchet	1.339	1.552	1.494	955	1.127	1.043
mise au mille nette de déchet (kg/t d'aluminium)	1.009	1.009	1.009	1.036	1.036	1.036
prix du déchet	1.351	1.566	1.507	990	1.168	1.081
prix de vente de l'aluminium recyclé	1.355	1.535	1.451	1.629	1.651	1.666
prix du recyclage	4	(31)	(56)	639	483	585
coût du recyclage	180	180	180	270	270	270
profit du recyclage = prix – coût	(176)	(211)	(236)	359	213	315
profit (en % du prix de vente de l'aluminium)	(13,0)	(13,7)	(16,3)	22,0	12,9	18,9

9.8. Annexe : Cas de l'Italie

Tableau 9.15 : Prix en US ct/lb en Italie en 1999, 2000 et 2001 de l'aluminium électrolytique à 99,7% d'aluminium, de l'alliage aluminium silicium GD AISil 3 Fe, d'un déchet neuf (découpe d'aluminium pur) et d'un vieux déchet (fonte d'aluminium donc un alliage aluminium silicium)⁽³⁵¹⁾

année	Al 99,7%	Al-Si 13%	Al 99,7%/ Si 13%	new scrap	new scrap/Al 99,7%	new scrap/ Si 13%	old scrap	old scrap/Al 99,7%	old scrap/ Si13%
1999	74,93	75,90	0,9872	43,99	0,5871	0,5796	41,11	0,5486	0,5416
	6,03	5,67		3,40			4,67		
2000	85,18	80,40	1,0595	53,02	0,6224	0,6595	44,99	0,5282	0,5596
	3,01	2,40		1,52			1,26		
2001	78,81	75,85	1,0390	53,40	0,6776	0,7040	44,28	0,5619	0,5838
	6,33	5,20		2,50			3,02		
moyen -ne/ écart type	79,64	77,38	1,0292	50,14	0,6296	0,6480	43,46	0,5457	0,5616
	5,18	2,61		5,32			2,07		
>US\$/t	1.756	1.706		1.105			958		

Tableau 9.16 : Profit (US\$/t d'aluminium recyclé) par catégorie de déchets dans les conditions prévalent en Italie sur la période 1999-2001 d'achat du déchet en US\$/t d'aluminium contenu et valeur relative par rapport au prix du lingot d'aluminium électrolytique (source C. Gentaz)

Item (US\$/t)	déchet neuf, interne (découpe d'aluminium pur)			vieux déchet (fonte d'aluminium)		
	1999	2000	2001	1999	2000	2001
prix unitaire d'achat du déchet	970	1.169	1.177	906	992	976
mise au mille nette de déchet (kg/t d'aluminium)	1.009	1.009	1.009	1.036	1.036	1.036
prix du déchet	979	1.179	1.188	939	1.028	1.011
prix de vente de l'aluminium recyclé	1.652	1.879	1.737	1.673	1.772	1.808
prix du recyclage	673	700	549	734	744	797
coût du recyclage	180	180	180	270	270	270
profit du recyclage = prix – coût	493	520	369	464	474	527
profit (en % du prix de vente de l'aluminium)	29,8	27,7	21,2	27,7	26,7	29,1

9.9 Annexe : Cas du JAPON

Tableau 9.17 : Prix en US ct/lb au Japon en 1999, 2000 et 2001 de l'aluminium électrolytique à 99,7% d'aluminium, de l'alliage aluminium silicium AD 12.1, d'un déchet neuf (découpe d'aluminium pur) et d'un vieux déchet (fonte d'aluminium donc un alliage aluminium silicium)⁽³⁵¹⁾

année	Al 99,7 %	Al-Si 13%	Al 99,7%/ Si 13%	new scrap	new scrap/Al 99,7%	new scrap/ Si 13%	old scrap	old scrap/Al 99,7%	old scrap/ Si 13%
1999	71,12	73,71	0,9649	55,51	78,05	75,31	45,04	63,33	61,10
	6,91	7,14		6,11			7,32		
2000	81,03	76,66	1,0570	62,26	76,84	81,22	48,76	60,18	63,61
	4,17	2,29		2,25			2,84		
2001	77,08	66,75	1,1548	58,33	75,67	87,39	43,20	56,05	64,72
	5,87	2,34		1,75			1,90		
moyen- ne / écart type	76,41	72,37	1,0558	58,70	76,82	81,11	45,67	59,77	63,11
	4,99	5,09		3,39			2,83		
>US\$/t	1.685	1.595		1.294			1.007		

Tableau 9.18 : Profit (US\$/t d'aluminium recyclé) par catégorie de déchets dans les conditions prévalent au Japon sur la période 1999-2001 d'achat du déchet en US\$/t d'aluminium contenu et valeur relative par rapport au prix du lingot d'aluminium électrolytique (source C. Gentaz)

Item (US\$/t)	déchet neuf, interne (découpe d'aluminium pur)			vieux déchet (fonte d'aluminium)		
	1999	2000	2001	1999	2000	2001
prix unitaire d'achat du déchet	1.224	1.373	1.286	993	1.075	952
mise au mille nette de déchet (kg/t d'aluminium)	1.009	1.009	1.009	1.036	1.036	1.036
prix du déchet	1.235	1.385	1.298	1.029	1.114	986
prix de vente de l'aluminium recyclé	1.568	1.786	1.699	1.625	1.690	1.472
prix du recyclage	333	401	401	596	576	486
coût du recyclage	180	180	180	270	270	270
profit du recyclage = prix – coût	153	221	221	326	306	216
profit (en % du prix de vente de l'aluminium)	9,8	12,3	13,0	20,1	18,1	14,7

Troisième partie

Conclusions

Chapitre 10. Recyclage : état, bilan et enjeu

Les bénéfices du recyclage de l'aluminium, bien réels et régulièrement rappelés par l'industrie de l'aluminium, sont cependant contredits par l'importance des quantités recyclées.

Aucun ouvrage n'a encore traité du recyclage de l'aluminium.

Les associations professionnelles de l'industrie de l'aluminium lui consacrent une part encore très modeste, mais cependant croissante, de leurs activités, et c'est pourquoi nous avons tenté de présenter le recyclage de l'aluminium sous tous ses aspects économique, politique, sociologique, environnemental, historique, industriel, scientifique, technique. Dans ce dernier chapitre, nous dressons un bilan complet du recyclage, puis nous analysons les enjeux et enfin esquissons les conséquences possibles ou probables pour l'industrie de l'aluminium.

10.1. Les bilans

Toute activité de recyclage est un triptyque : collecte, tri et traitement des déchets pour les transformer finalement en une matière utile, de préférence celle qui a servi à faire le produit, plus tard devenu déchet. Collecte et tri sont des étapes passives qui ne modifient pas la nature du déchet alors que le traitement est l'étape active et, concernant l'aluminium, c'est la fusion.

Avant de dresser les bilans d'abord de la fusion, puis du recyclage, nous allons rappeler le bilan scientifique de l'aluminium.

10.1.1. Le bilan scientifique

La métallurgie physique de l'aluminium est celle d'un bon matériau, léger, inaltérable, avec de bonnes propriétés mécaniques, en particulier une résistance à la fatigue et au fluage acceptables, cependant pour des températures inférieures à 200° C. La dureté est insuffisante. Les produits en aluminium ont donc surtout des applications statiques, très rarement dynamiques (par exemple pièce tournante).

La métallurgie chimique de l'aluminium est celle d'un élément très stable dont l'extraction à partir de ses composés consomme beaucoup d'énergie et dont la purification est très difficile. Il est scientifiquement exclu d'éliminer la plupart des éléments, à commencer par les éléments d'alliage, silicium, cuivre, manganèse, ainsi que l'impureté la plus importante, le fer. Seuls le magnésium et le zinc, les deux autres éléments d'alliages peuvent être partiellement éliminés. Comparé au fer, lui-même confronté aux « big five », les 5 éléments impossibles à éliminer, le cuivre, le

manganèse, l'étain, le nickel et le chrome, l'aluminium est lui confronté aux « big twenty », une image pour illustrer qu'avec 20 éléments impossibles à éliminer, on ne pourra jamais obtenir un aluminium de qualité électrolytique à partir des déchets (qui sont le plus souvent des alliages d'aluminium).

On retient aussi que :

- l'aluminium a une très forte propension à s'oxyder, surtout à l'état liquide et on a des pertes d'aluminium transformé en alumine. Ce sont des pertes irréversibles dans le procédé de fusion.
- l'aluminium liquide forme avec l'alumine précitée un mélange stable, les crasses, qui flotte à la surface du bain d'aluminium. L'aluminium entraîné dans ces crasses est une nouvelle perte d'aluminium, cependant réversible puisque, resté aluminium, cet aluminium peut être récupéré.
- l'aluminium liquide s'enrichit inévitablement en impuretés, puisque celles-ci restent et que de l'aluminium disparaît dans les crasses, à la fois comme oxyde d'aluminium et aluminium entraîné.

Ce bilan particulièrement défavorable est à l'origine d'une industrie du recyclage de l'aluminium très différente de celles des autres métaux. Elle repose sur le tri par déchet d'aluminium avant la fusion, sur les meilleures conditions opératoires limitant l'oxydation de l'aluminium et sur la récupération la plus complète possible de l'aluminium entraîné dans les crasses. Enfin, comme tous les recyclages métalliques, elle a recours à la dilution, celle-ci étant alors assurée par de l'aluminium électrolytique, des déchets neufs d'aluminium ou du silicium.

Nous allons maintenant dresser le bilan de la fusion, puis du recyclage, pour chacune des catégories de déchet, déchet neuf interne, déchet neuf de transformation et vieux déchet.

10.1.2. Les bilans de la fusion

Par fusion, nous entendons l'ensemble des ateliers de prétraitement à froid et à chaud, de fusion, de purification, de mise au titre jusqu'à l'aluminium liquide ou sous forme de lingot et de récupération de l'aluminium contenu dans les crasses.

10.1.2.1. Le bilan matière

La mise au mille nette d'aluminium, après récupération de l'aluminium contenu dans les crasses, est très faible et son inverse, le rendement net d'aluminium est très élevé, entre 95 et 99%.

10.1.2.2. Le bilan énergie

La quantité nette d'énergie, incluant le recyclage des crasses, est comprise entre 5 et 10 GJ/t d'aluminium.

10.1.2.3. Le bilan environnemental

L'impact environnemental, très faible, est représenté par le déchet inerte du traitement des crasses salées, déchet mis en décharge s'il ne trouve pas de valorisation sur place, et les émissions de CO₂. Hors énergie, ces dernières sont de l'ordre de quelques dizaines de kilogrammes par tonne d'aluminium recyclé et sont produites par la combustion des vernis, laques, huiles, etc. Toujours hors énergie, c'est plus de dix fois moins de CO₂ que la filière minerai et, de plus, il n'y a aucun composé fluoré.

A contre-pied d'un bilan scientifique décourageant, le bilan technique est plutôt satisfaisant, remplaçant les performances de la fusion des déchets d'aluminium dans la moyenne de celles des procédés équivalents de traitement des déchets métalliques.

10.1.3. Les bilans du recyclage

On inclut, dans les bilans de la fusion, les données des étapes de collecte et de tri.

10.1.3.1. Le bilan matière

A partir de la correspondance des étapes des filières déchet et minerai (tableau 10.1), nous avons comparé les rendements matière simples et combinés de chaque étape pour chaque filière (tableau 10.2).

Tableau 10.1 (aussi tableau 8.1) : Correspondance entre les étapes de la métallurgie extractive à partir du minerai et celles de la métallurgie du recyclage à partir des déchets (source C. Gentaz)

étapes	métallurgie extractive à partir du minerai	métallurgie extractive (recyclage) à partir des déchets
1 ^{ère} étape	extraction et enrichissement du minerai	collecte et tri des déchets d'aluminium
2 ^{ème} étape	extraction de l'alumine (procédé BAYER)	extraction de l'aluminium des déchets par prétraitements
3 ^{ème} étape	extraction de l'aluminium (procédé HALL HEROULT)	extraction de l'aluminium des déchets par fusion
4 ^{ème} étape	purification, mise au titre avant solidification	purification, mise au titre avant solidification

Le rendement global est d'environ 70% pour la filière minerais, c'est-à-dire que 70% de l'aluminium contenu dans le minerai se retrouve dans le métal.

Pour la filière déchet, le rendement global est égal à 0,87 fois le rendement de la collecte, ce dernier désignant la quantité collectée divisée par la quantité entrant comme déchet. Il faut donc un rendement de la collecte d'au moins 80% pour égaler le rendement de la filière minerais, ce qui est demandé par la législation européenne qui se met en place. C'est une valeur largement dépassée pour les déchets neufs, très rarement atteinte pour les vieux déchets.

Tableau 10.2 : Rendements matières des étapes des filières déchet et minerais (source C. Gentaz)

étapes et rendements	minerais ou déchet	1er enrichissement	2 ^{ème} enrichissement	extraction du métal
filière minerais	extraction minière	concentration mécanique	procédé BAYER	procédé HALL HEROULT
rendement matière par tonne d'aluminium	6,4 t extraites à 90% (5,8 t à 40% Al ₂ O ₃ ou 21,2% Al)	90% (4,2 t à 50% Al ₂ O ₃ ou 26,5% Al)	95% (2 t à 99% Al ₂ O ₃ ou 52,4% Al)	95% (1 t à 99,7% Al)
filière déchet	collecte et pré-tri	concentration mécanique	concentration physico-chimique	Fusion
rendement matière par tonne d'aluminium	collecte = 10 à 95% (1,25 t à 88% Al)	95% (1,16 t à 92% Al)	95% (1,05 t à 97% Al)	96,5% (1 t à 98% Al)

10.1.3.2. Le bilan énergie

Les consommations d'énergie de la collecte et du tri sont très faibles et on conserve celles de la fusion.

On utilise souvent, pour illustrer l'intérêt de la filière déchet, le ratio de la quantité d'énergie consommée par la filière déchet divisée par la quantité d'énergie consommée par la filière minerais. Ce ratio, toujours calculé pour l'aluminium liquide, dépend de la référence utilisée pour l'aluminium, liquide, semi-produit ou produit fini.

En effet, la transformation de l'aluminium liquide en semi-produit consomme typiquement 15 GJ/t pour les produits extrudés et 11 GJ/t pour les produits laminés, valeurs pouvant varier suivant le type de semi-produit. Quant à la fabrication du produit fini à partir du semi-produit, on a typiquement environ 20 GJ/t, valeur aussi très variable d'un produit à l'autre.

Nous calculons que la consommation d'énergie du recyclage vaut environ 5% de celle de la métallurgie extractive lorsque la référence est l'aluminium liquide. C'est la valeur couramment citée dans la littérature qui omet souvent de préciser la référence.

Lorsque la référence est le produit fini, elle est à priori d'environ 20% et, en pratique par l'effet des mises au mille, surtout de la transformation de l'aluminium en semi-produit, elle est plutôt d'environ 15%, un avantage toujours énorme du recyclage sur la métallurgie extractive.

Tableau 10.3 : Consommation d'énergie des filières déchet et minerais (source C. Gentaz)

étape et produit	énergie via minerais (GJ / tonne)		énergie via déchet (GJ / tonne)		ratio (%) énergies voie déchet / voie minerais
	par étape	cumulée	par étape	cumulée	
aluminium liquide	175 – 220	175 – 220	5 – 10	5 – 10	3 – 6 (4)
semi-produit	10 – 30	185 – 250	10 – 30	15 – 40	8 – 18 (13)
produit fini	10 – 30	195 – 280	10 – 30	25 – 70	13 – 25 (20)

10.1.3.3. Le bilan environnemental

La collecte et le tri ne changent pas le bilan environnemental de la fusion.

10.1.4. Les autres bilans du recyclage et les catégories des déchets

Les bilans précités ont été établis sur la base des déchets en général, toutes catégories confondues. Nous allons montrer maintenant les effets des catégories de déchet sur les bilans qualité et économique.

10.1.4.1. Les différences entre déchets neufs et vieux déchets

Nous avons résumé les caractéristiques des déchets (tableau 10.4),

Tableau 10.4 : Les caractéristiques des déchets d'aluminium (source C. Gentaz)

famille de déchets	neuf		vieux
origine (étape du cycle de vie)	de l'aluminium liquide aux semi-produits à froid	des semi-produits à froid aux produits finis	à partir des produits en fin de vie
appellation courante	interne	transformation	vieux
qualité	bonne en général, moyenne pour les meulures, sciures et les crasses	variable, avec souvent la présence d'autres produits (matériau, vernis, laque, peinture, huile, eau)	très variable dépendant de l'importance et de la nature du mélange à la collecte
quantité	proportionnelle à la quantité de semi-produits à froid, avec un ratio moyen d'environ 60% par tonne de semi-produit	proportionnelle à la quantité de produits finis, avec un ratio entre 5 et 30%, (croissant des extrudés et moulés aux laminés)	dépend de la consommation antérieure (durée de vie des produits), de la demande, du prix, de la collecte, de la législation
délai entre passage à l'état de déchet et collecte	journée	jours	jours à semaines
longueur du chemin de collecte	très court	court	long à très long
taux de collecte	100% aux pertes près	100% aux pertes près	entre 0 à 100%, dépendant du produit, de son poids, de sa dissémination, de l'organisation
délai entre collecte et fusion	Jours – semaines	semaines – mois	semaines – mois
venue sur le marché	non car fusion sur place. Seule la qualité inférieure entre sur le marché	en partie pour la qualité supérieure car le plus souvent cession directe à des sociétés équipées pour la fusion. oui pour les autres qualités	presque tout sauf rachat par sociétés impliquées dans la chaîne du produit (boîte boisson, câble électrique, etc.) et équipées pour la fusion.
évolution des quantités spécifiques	stable à décroissante (technologie de fabrication des semi-produits, augmentation des capacités)	stable à décroissante (conception des produits finis et leur technologie de fabrication)	croissante
évolution des qualités	stable	stable	à la hausse (collecte et tri plus efficace)

Ensuite, nous avons mis en regard ci-dessous les différences les plus importantes entre les catégories de déchets.

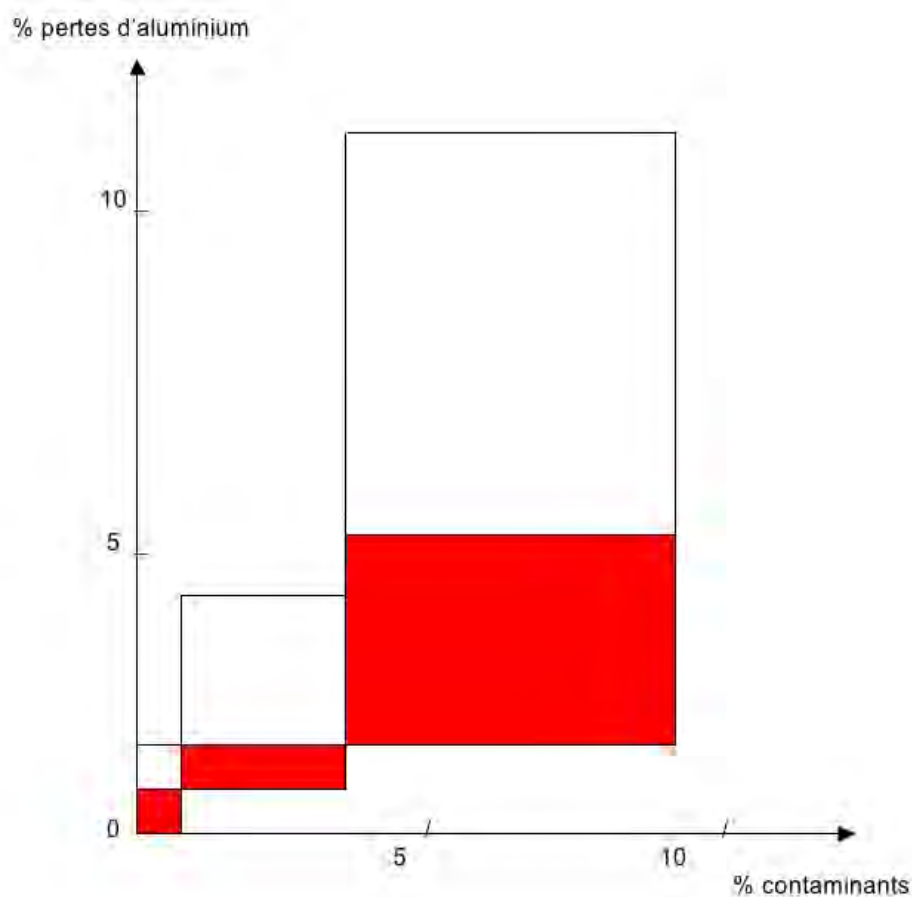
déchet neuf (interne et de transformation)	vieux déchet
Apparu dans la chaîne de fabrication de l'aluminium liquide au produit fini, sa qualité est bonne.	Il apparaît lorsque le produit perd sa fonction définitivement et est jeté. Très souvent complexe, sa qualité est très variable, de bonne à mauvaise.
Il est collecté et trié par alliage à la source par le producteur. Ces opérations sont simples.	Dispersé dans l'espace (ménage, industrie, service public), l'organisation et l'efficacité de sa collecte sont très variables. Il est amené dans des centres de stockage et de pré-tri. Ces opérations, bien que simples, font appel à une main d'œuvre nombreuse.
C'est très rarement qu'il va sur le marché commercial. Seulement lorsqu'il y en a trop et habituellement ceux de qualité médiocre : crasses, copeaux, tout ce qui est produit à l'usinage.	Tous vont sur le marché, la collecte faisant partie de l'organisation du marché.
Le délai entre la collecte et la fusion est très court, de quelques jours à quelques semaines.	Le délai entre la collecte et la fusion est court, de quelques semaines à quelques mois.
Les quantités en jeu sont importantes et sont directement proportionnelles à l'aluminium consommé pour faire des semi-produits et des produits.	Les quantités en jeu sont importantes et dépendent de beaucoup de facteurs : la consommation locale du produit, sa durée de vie, sa nature, etc.
Il est fondu soit sur place, soit chez un tiers impliqué dans la chaîne, soit chez un opérateur indépendant (le refondeur).	Il est fondu chez un opérateur indépendant (l'affineur).
L'aluminium obtenu retourne dans la chaîne de fabrication de l'aluminium liquide au produit fini. C'est le recyclage en boucle fermée.	L'aluminium a plusieurs débouchés (recyclage en boucle ouverte). Le plus important, après avoir été allié au silicium, c'est la fabrication de pièces moulées par l'industrie de la fonderie. On a aussi la fabrication de produits de désoxydation de l'acier. Enfin, assez récemment, dans certaines conditions, on a vu se développer le retour dans la chaîne de fabrication de l'aluminium liquide au produit fini (recyclage en boucle fermée).
Avec des caractéristiques différentes d'origine, de qualité, de collecte, de quantité, de marché, les seuls points communs sont l'activité économique, - le recyclage de l'aluminium -, la technique, - la fusion -, et le recyclage en boucle fermée pour les déchets neufs et ceux vieux collectés sélectivement.	

10.1.4.2. Le bilan qualité :

Le diagramme (figure 10.1) illustre de façon simplifiée la réalité de la qualité du déchet puisque, à l'intérieur d'une même catégorie de déchet, le domaine de variation des pertes d'aluminium est énorme. Il montre aussi l'efficacité technique de la fusion puisque les pertes nettes, après traitement des crasses, représentent la moitié des pertes brutes.

Figure 10.1 (aussi figure 8.7) : Les pertes totales d'aluminium (en %), brutes et nettes (après traitement des crasses) en fonction de la qualité du déchet (source C. Gentaz)

qualité du déchet	pertes totales brutes (%) (réversible et irréversible)	pertes totales nettes (%)	contaminants (%)
interne	0 – 2	0 – 0,9	0 – 1
transformation	2 – 4	0,9 – 1,8	1 – 4
vieux	4 – 12	1,8 – 5,5	4 – 10



10.1.4.3. Le bilan économique de la fusion :

Tableau 10.5 : résumé des caractéristiques de la fusion par catégorie de déchet après récupération de l'aluminium contenu dans les crasses (source C. Gentaz)

bilans	déchet neuf interne	déchet neuf de transformation	vieux déchet
bilan matière :			
pertes au feu nettes (%)	0,88	1,76	3,52
mise au mille nette (kg/t d'aluminium)	1.009	1.018	1.036
ou rendement aluminium (%)	99,1%	98,2%	96,5%
bilan énergie :			
recyclage déchets (GJ/t d'aluminium)	5	7,5	10
recyclage crasses salées (GJ/t de crasses salées)	0,8	0,8	0,8
énergie totale (GJ/t d'aluminium)	5,03	7,55	10,1

bilan environnemental (hors énergie) :			
quantité de crasses (kg/t d'aluminium)	25	50	100
quantité de crasses salées (kg/t d'aluminium)	32	64	128
bilan économique et montant de l'investissement (US\$)			
de la fusion des déchets (/t d'aluminium)	400	500	600
du recyclage des crasses salées (/t de crasses salées)	600	600	600
bilan économique et main d'œuvre			
- du recyclage des déchets (h/t d'aluminium)	4	5	6
- du recyclage des crasses salées (h/t de crasses salées)	1,2	1,2	1,2
bilan économique : coût de fusion hors prix du déchet (US\$/t d'aluminium)	180	220	270

A partir de ce bilan économique de la fusion établi pour une capacité de production d'aluminium recyclé de 70.000 t/an, nous notons que :

- Le montant de l'investissement est très faible comparativement à celui de la production de l'aluminium par électrolyse de l'alumine, environ dix fois moins. Il est par contre élevé comparativement à celui d'installations semblables de recyclage d'autres métaux.
- La main d'œuvre est plutôt importante.
- Le coût de fusion dépend fortement de la catégorie de déchet et est plutôt élevé comparativement à celui d'installations semblables de recyclage d'autres métaux.

10.1.4.4. Le bilan économique du recyclage :

Il revêt plusieurs aspects, tous liés : le prix d'achat du déchet, le prix de vente de l'aluminium recyclé, le coût global et enfin la rentabilité du recyclage.

Le prix d'achat des déchets

Pour les déchets neufs, internes et de transformation, traités par les refondeurs, en raison des délais courts entre création du déchet et fusion, il n'y a généralement pas

de variation notable des prix d'achat du déchet et de vente de l'aluminium recyclé. Les chemins de collecte et de tri sont courts et leurs coûts, faibles, sont inclus dans les coûts du transformateur.

Les vieux déchets, au contraire des déchets neufs, présentent des différences importantes suivant le mode de collecte, sélectif (recyclage en boucle fermée) ou non sélectif (recyclage en boucle ouverte), car correspondant aujourd'hui à des marchés différents. Seule la fusion est la même.

Pratiquement, c'est le prix d'achat qui fait l'essentiel de la rentabilité de l'affineur. Il intègre la valeur vénale de l'aluminium contenu, valeur référée à la cotation du jour de l'aluminium électrolytique, et la rémunération de la collecte et du tri.

Au départ, le produit devient déchet. Sans qu'il y ait collecte ni tri, on a déjà des différences dues à la quantité d'aluminium contenue dans le déchet et à la dissémination du déchet. Plus le déchet contient une quantité importante d'aluminium, plus il est concentré, plus il est facile à fondre, plus il est facile à collecter et à trier, plus sa valeur vénale sera grande. Les déchets de câbles à haute tension sont obtenus collectés et triés au démontage des lignes (comme souvent dans les démontages industriels, la valeur vénale paye le démontage). Par contre, des déchets du type poignée de porte, boîte boisson, ont une valeur vénale nulle.

Ensuite, on a la rémunération de la collecte et du tri. La collecte débute toujours par un acte individuel, cependant avec des différences importantes suivant qu'il est libre et bénévole, qu'il est payant via une taxe payée à l'achat du produit, qu'il est contraint et bénévole, qu'il est rémunéré.

On retiendra que l'acte à la base de la collecte est le plus souvent un acte gratuit non rémunéré et que la valeur vénale du déchet est nulle sauf lorsqu'il y a rémunération de l'acte. Le déchet acquiert définitivement un prix lorsque plusieurs déchets identiques sont réunis, c'est-à-dire au moment où l'acte individuel cède la place à une activité industrielle et commerciale. La collecte se résume alors à un stockage de plus en plus grand, à un pré-tri grossier et devient négoce.

Le ferrailleur d'antan rémunérait le propriétaire qui lui remettait le déchet. Aujourd'hui, le propriétaire apporte le déchet sans recevoir de rémunération aucune, et le plus souvent ce n'est pas à un ferrailleur, c'est à un centre de collecte et de pré-tri, la déchetterie, financé par l'impôt.

Le ferrailleur a disparu et est devenu un industriel de la récupération. Celui-ci reçoit une matière première gratuite, le déchet, et négocie ensuite le déchet pré-trié avec l'industrie de la fusion. Le prix du déchet est alors fixé sur la base du prix de l'aluminium électrolytique du jour, au prorata de l'aluminium contenu, et du prix de

revient du recyclage. Dit d'autre façon, le ferrailleur fait, comme autrefois, son affaire du prix de la collecte, du tri et de la valeur de l'aluminium. Le prix fait ne respecte plus la structure économique, sauf à augmenter de façon gigantesque son profit.

Le prix de vente de l'aluminium recyclé

Il est aligné sur le cours de l'aluminium électrolytique avec des primes/pénalités par rapport à une qualité de référence au moment de la vente. Des variations importantes sont possibles pour l'aluminium recyclé de la série 4000 dont le marché principal est celui de l'automobile.

Le coût global du recyclage

La prise en compte des coûts de collecte et de tri, estimés au chapitre 9, conduit au coût de recyclage suivant :

Tableau 10.6 (aussi tableau 9.6) : Coût du recyclage en fonction de la qualité du déchet (source C. Gentaz)

coûts	déchet neuf, interne	déchet neuf, de transformation	vieux déchet
collecte	10 – 30	20 – 50	50 – 100
tri	inclus dans collecte	inclus dans collecte	50 – 100
fusion	180	220	270
total	190 – 210 (200)	240 – 270 (255)	370 – 470 (420)

Le bilan économique du recyclage

Sur trois années, de 1999 à 2001, pour trois pays, Allemagne, Italie et Japon, nous avons pu quantifier un bilan économique sans doute assez proche de la réalité.

Tableau 10.7 (aussi tableau 9.10) : Valeurs moyennes de la rentabilité brute avec entre parenthèses l'écart type, tous pays et années confondus (source C. Gentaz)

Item	déchet neuf	vieux déchet
prix du déchet (US\$/t Al)	1.294 (181)	1.002 (68)
prix de vente de l'aluminium recyclé (US\$/t Al)	1.629 (167) qualité 99,7%	1.665 (95) qualité Al – Si à 13% Si
profit brut (US\$/t Al)	150 (295)	355 (111)
profit brut rapporté au prix de vente de l'aluminium recyclé (%)	7,9 (18)	21,1 (6)

Le profit brut du refondeur, spécialisé dans la fusion des déchets neufs, est médiocre et très aléatoire, pouvant conduire à une perte. Dans les faits, le refondeur facture sa prestation (pay toll ou droit de péage), au prix de revient majoré du bénéfice sans être jamais propriétaire, et il est ainsi définitivement à l'abri d'éventuelles variations de prix.

Celui de l'affineur, spécialisé dans la fusion des vieux déchets, est meilleur et moins aléatoire, mais il faut parfaitement gérer les prix d'aluminium.

10.1.5. Le bilan de l'écologie industrielle des filières de production de l'aluminium

Nous avons résumé les flux de matières et d'énergie des deux filières comme suit :

Tableau 10.8 : Comparaison des deux filières de production de l'aluminium (valeurs par tonne d'aluminium liquide) (source C. Gentaz)

item par tonne d'aluminium	voie minéral (capacité de 300.000 t/an)	voie déchet (capacité de 80.000 t/an)
énergie totale dont :	175 GJ – 220 GJ	5 GJ - 10 GJ
extraction minière de la bauxite	3 GJ - 5 GJ	
procédé BAYER (alumine)	22 GJ - 30 GJ	
procédé HALL-HEROULT (aluminium)	150 GJ - 185 GJ	
fusion (recyclage déchets)		5 GJ - 10 GJ
total matières premières principales dont :	4,8 t – 6,3 t	1,02 t – 1,32 t
bauxite	4,0 t – 5,0 t	
alumine	1,9 t	
produits carbonés (anode : 0,43 t, cathode : 0,018 t)	0,50 t - 0,55 t	
soude à 50%	0,2 t – 0,4 t	
calcaire pour chaux	0,1 t - 0,2 t	

tri-fluorure d'aluminium, AlF ₃ (exprimé en fluor) déchets neufs et vieux sels et flux	15 kg - 25 kg (7,5 kg – 12,5 kg) 2 kg – 7 kg	1,02 t – 1,25 t 20 kg – 70 kg
total émissions polluantes principales dont : stériles, déblais miniers déchets procédés : alumine (BAYER) : boues rouges base sec) électrolyse (HALL-HEROULT) / recyclage : CO ₂ (hors énergie procédé)* tétrafluorocarbone, CF ₄ (exprimé en fluor) CO ₂ (inclus équivalence CF ₄ , hors énergie procédé) scories inertes de fusion après traitement	6,3 t – 13,1 t 1 t – 3 t 1 t – 3 t 1,7 t - 1,9 t 0,4 kg – 0,8 kg (0,3 kg – 0,6 kg) 4,3 t - 7,1 t	10 kg – 150 kg néant 0 t - 0,1 t néant 0 t - 0,1 t 10 kg - 50 kg
montant total de l'investissement dont : mine procédé BAYER procédé HALL-HEROULT centrale électrique usine de recyclage (traitements et fusion des déchets)	10.000 US\$ 1.000 US\$ 2.500 US\$ 4.500 US\$ 2.000 US\$	600 US\$ 600 US\$

10.1.6. Commentaires et remarques sur les bilans du recyclage

10.1.6.1. Le bilan matière :

Sont concernés le rendement matière global et, indirectement, la production des déchets internes.

Les rendements matières globaux des filières minerais et déchet

Le rendement de la collecte de la filière déchet doit être égal à supérieur à 80%. Ce sont des rendements qu'on atteint systématiquement avec les déchets neufs ainsi qu'avec les vieux déchets dans certaines collectes sélectives, ou lorsqu'il s'agit de déchets importants. Par contre, les petits déchets, ceux typiquement pesant moins de 100 grammes, emballage type tube dentifrice et dosette café, poignée de porte, présentent des taux de collecte bien inférieurs. Associés souvent à des rendements matières de fusion moins bons, on doit s'interroger sur la justification de leur recyclage. Cela concerne aussi la boîte boisson dont les rendements de collecte sont très rarement supérieurs à 80% (c'est le cas en Suisse), et, en moyenne européenne et nord américaine, compris entre 60 et 65%.

La production de déchets internes dans la fabrication des semi-produits

Nous avons mis en évidence la production excessive de déchets internes dans la fabrication des semi-produits. Directement, c'est la productivité de la transformation qui est en cause, et indirectement, ce sont le recyclage et la conformité des produits en aluminium au développement supportable.

Plusieurs raisons ont conduit à cette situation.

D'abord, on a la capacité des usines, point qu'on reprendra dans le paragraphe suivant avec l'effet de capacité sur le bilan économique du recyclage. Pour tous les semi-produits, les capacités moyennes de production sont faibles, insuffisantes, voire très insuffisantes : 10.000 t/an pour un extrudeur (!!), 70.000 t/an pour un lamineur (!), 15.000 t/an pour un fondeur (!!). Par voie de conséquence, les séries fabriquées sont souvent petites. On a aussi l'absence d'intégration verticale vers l'amont, l'usine d'électrolyse, ce qui permettrait de réduire les étapes entre le métal liquide et le semi-produit.

Ensuite, on a des raisons spécifiques aux semi-produits. L'exemple des semi-produits extrudés est très révélateur. Nous avons découvert qu'il existait, il y a 20 ans, 25.000 profilés pour 500 applications ! Grâce aux conditions thermiques modérées de fabrication, on sait faire le produit avec la forme et les propriétés exactement demandées par le client. Cette souplesse technique, et aussi commerciale, a imposé l'aluminium sur ses concurrents mais au détriment de la productivité industrielle avec des séries très petites. Les quantités spécifiques de déchets internes ont alors atteint ces valeurs très élevées d'environ 500 kg/t de profilés. L'industrie des produits extrudés, consciente du danger, a recherché depuis à développer les grandes séries, mais celles-ci sont aujourd'hui encore insuffisantes.

Ce constat vaut pour tous les semi-produits. La satisfaction du client par les qualités techniques et souvent aussi esthétiques a imposé l'aluminium sur les autres matériaux au détriment de la productivité. Le recyclage des déchets internes est devenu une étape importante et permanente de la fabrication des semi-produits, l'efficacité de la technique de recyclage ayant largement contribué à cette intégration. Plus on produit de déchets internes, plus on recycle ! A tel point que les transformateurs d'aluminium en sous-produits en sont venus à confier le recyclage de leurs déchets internes aux refondeurs. C'est si simple !

C'est ainsi que les semi-produits laminés ont conquis les marchés de l'emballage grâce au développement de feuilles très minces. La contrepartie, c'est le recyclage de quantités énormes de déchets internes atteignant jusqu'à 1.000kg par tonne de feuille très mince !

L'absence de données publiées, l'absence de prise en compte dans les indicateurs, en particulier ceux de développement supportable, a permis l'immobilisme de l'industrie des semi-produits. Aujourd'hui, on réalise qu'on ne peut continuer ainsi et le fait qu'un organisme professionnel, l'European Aluminium Association, ait publié ses premières estimations en 2005, est révélateur de cette prise de conscience.

Une dernière conséquence a été évidemment la pénétration lente de procédés performants de transformation dont l'investissement se trouvait injustifié économiquement en raison des séries trop petites.

10.1.6.2. Le bilan économique

Sont concernés le bilan environnemental, la taille des usines et le prix d'achat des déchets.

Le bilan environnemental

Les énormes avantages environnementaux de la filière déchet sur la filière minerais ne sont malheureusement pas répercutés dans le bilan économique.

La capacité des usines de recyclage

L'amélioration des performances techniques, rendement matières et énergie, est spectaculaire lorsqu'on passe de moins de 5.000 t/an à plus de 10.000 t/an et c'est le bénéfice observé aujourd'hui de la fermeture des micro-capacités de 1.000 t/an. Au dessus de 10.000 t/an, les gains restent notables. Quant aux performances économiques, investissement et main d'œuvre, elles s'améliorent considérablement au dessus de 10.000 t/an.

La main d'œuvre d'une usine de capacité 40.000 t/an est de 8 heures par tonne d'aluminium et de 6 heures pour une capacité de 70.000 t/an. Dans le même exemple, le montant de l'investissement pour 70.000 t/an sera 70% de celui pour 40.000 t/an.

Le prix d'achat du déchet

Spécifique du vieux déchet, le prix, rendu usine de fusion, doit couvrir les coûts élevés de collecte et de tri, très variables suivant les déchets. Main d'œuvre et énergie sont les gros postes de ces coûts. On évalue entre 50 et 100 US\$/t d'aluminium contenu le coût de la collecte et autant le coût du tri, soit au total entre 100 et 200 US\$/t. On a vu que le prix du vieux déchet, rendu usine de fusion, valait environ 60% du prix de l'aluminium électrolytique ou de l'alliage aluminium-silicium à 13%. Pour un prix moyen de 1.000 US\$/t, après rémunération des opérations de tri et de collecte, il reste encore 800 US\$/t d'aluminium correspondant à la valeur vénale de l'aluminium contenu.

Deux commentaires s'imposent :

- l'implication de plus en plus fréquente dans la collecte et le tri du citoyen contribuable consommateur n'a pas changé le prix du déchet rendu usine de fusion alors que les coûts correspondant ont diminué. La baisse des coûts est encore plus marquée lorsqu'il y a financement par l'impôt. Pourquoi ?
- qui bénéficie de la valeur vénale de l'aluminium contenu dans le déchet ? Pourquoi ?

Admettre que le système économique est opaque, constatation faite encore récemment par les responsables européens à propos de la directive emballage, entendre l'affineur et le refondeur se plaindre qu'ils couvrent juste leurs coûts de production n'est pas satisfaisant. Seuls les récupérateurs, petits et grands, ne s'expriment pas. Les réponses à ces deux questions devront être guidées par l'intérêt général, c'est-à-dire satisfaire le principe du développement supportable.

Les bilans scientifique et technique (matières, énergie, environnement) du recyclage de l'aluminium sont globalement satisfaisants. S'agissant d'un recyclage à priori difficile, bien plus que l'acier, les bilans sont aussi bons que ceux de l'acier, voir meilleurs. Le bilan économique, satisfaisant pour la partie technique, se révèle très discutable globalement en raison des prix des déchets pratiqués par les acteurs actuels de la collecte.

10.2. Enjeux critiques et développement soutenable

Le bilan global du recyclage de l'aluminium est très contrasté, alliant le meilleur au pire.

Certaines de ses performances techniques sont bonnes à excellentes, surtout en comparaison de celles de la métallurgie extractive à partir du minerai, telles la consommation d'énergie et les atteintes environnementales causées par les produits fluorés, le gaz carbonique et les boues rouges. D'autres sont seulement acceptables, mais encore honorables comparativement à d'autres matériaux et métaux, telles le rendement matière d'un métal peu aisé à recycler, mais pas moins aisé que le fer, et le traitement du principal déchet du recyclage, les crasses, bien maîtrisé mais pénalisant pour l'économie.

Quant aux performances économiques, le montant de l'investissement et la justification économique globale confirment un intérêt incontestable.

Par contre, il y a des aspects inacceptables d'autant plus que tous sont remédiables. C'est le bilan global des déchets, la répartition des bénéfices économique et plus généralement le défaut de clarté de la structure économique.

Le recyclage de l'aluminium, qui n'est bien sûr pas une fin en soi, se révèle médiocre comparativement à celui d'autres matériaux concurrents avec des durées de vie comparables. Les raisons en sont nombreuses, allant de l'absence historique de conditions favorables qui ont manqué jusqu'à hier avec le développement supportable, à l'emprise trop forte de la filière minerai avec une distinction primaire / secondaire abolie seulement en 2003, au succès du développement de l'aluminium et à la facilité de fondre et transformer l'aluminium. Mais il y a un seul responsable, l'industrie de l'aluminium.

Confrontée à son succès, un taux de croissance annuel de 3,6%/an pendant plus d'un siècle et de plus de 8%/an depuis 1950, elle s'est trouvée accaparée par la production à partir du minerai, coûteuse en capital, coûteuse en énergie. Faute des ressources financières et humaines, elle s'est désintéressée du recyclage, en totalité des vieux déchets, en partie des déchets neufs et de la transformation en semi-produits. Dans les deux cas, les conséquences ont été les mêmes : une structure industrielle encore aujourd'hui insuffisante et des capacités d'installation trop faibles. En contrepartie, recyclage et transformation en semi-produits sont capables rapidement de gains de productivité formidables.

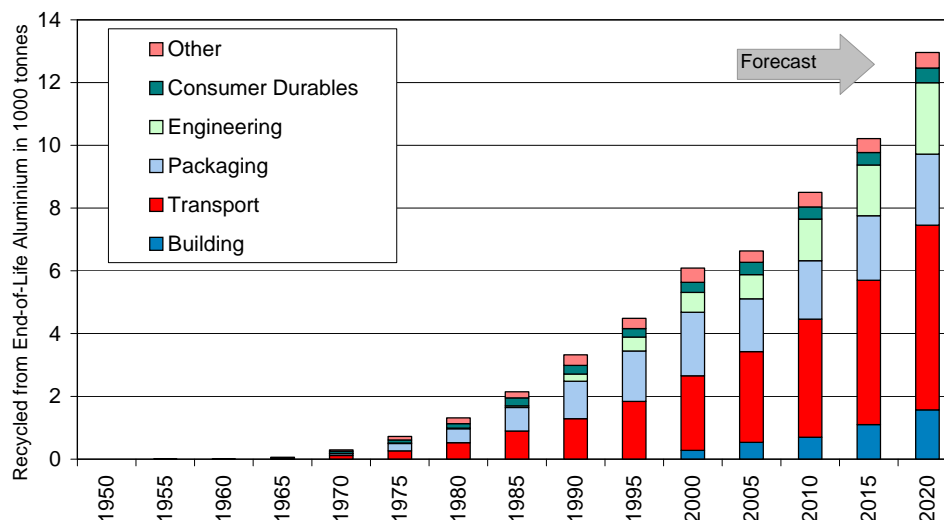
Ces constats sont confirmés par l'absence d'une industrie d'électrolyse intégrée vers l'aval, vers les semi-produits et par la distinction, plus que centenaire, entre aluminium primaire produit par électrolyse à partir du minerai et aluminium secondaire produit par fusion à partir des déchets.

Depuis 10 ans environ, on voit arriver des quantités de plus en plus importantes de vieux déchets. Bien que prévisible, cette avalanche a néanmoins surpris l'industrie de l'aluminium même si celle du recyclage a parfaitement réagi en augmentant sa production et en s'engageant dans un processus de concentration sans précédent.

Aujourd'hui, les grandes sociétés internationales de l'aluminium sont encore accaparées par les récents processus de concentration. Il reste 4 « majors », l'américain ALCOA, l'anglo-australien RIO TINTO (récent reprenneur du canadien ALCAN), le norvégien HYDROALUMINIUM (NORSKHYDRO) et le récent conglomerat russe né de la fusion des activités de RUSAL, SUAL et GLENCORE. Leur politique vis-à-vis du recyclage est encore aujourd'hui plus du domaine de la communication que de l'engagement. L'un prévoit de faire passer la part de l'aluminium recyclé dans sa production de 20% en 2002 à 50% en 2050 alors que cette part inclut tous les déchets, neufs et vieux. L'autre, plus prudent, prévoit seulement d'augmenter la part des vieux déchets dans les déchets qu'il recycle, de 25% en 2002 à 39% en 2040. Un autre réfléchit à l'usine d'aluminium du futur et tous

s'accordent pour reconnaître l'importance croissante des vieux déchets et du recyclage pour l'industrie de l'aluminium.

Figure 10.2 : Aluminium recyclé dans le monde à partir des vieux déchets (M. Bertram)⁽³⁷⁵⁾



L'aluminium satisfait à l'ensemble des critères du développement supportable : durée de vie des produits, dématérialisation partielle des applications, recyclage. Faire de l'aluminium un matériau du développement supportable passe par la satisfaction des enjeux critiques énoncés ci-après.

10.2.1. Diminuer la quantité de déchets internes :

Augmenter la productivité de la fabrication des semi-produits, c'est aussi améliorer la satisfaction des critères de développement supportable, puisque mieux produire des semi-produits, c'est moins consommer de matière et d'énergie, moins polluer.

Cette réduction sera obtenue par l'augmentation des séries, restant à convaincre les clients de l'intérêt économique et des avantages de l'éco-conception, et le développement de procédés continus de fabrication des semi-produits avec des formes plus proches de celles des produits finis, le « near net shape casting » qui est en train de s'imposer en sidérurgie. Pour l'acier, le passage de la brame (épaisseur de 200 mm) à la feuille (épaisseur de 1 mm) s'est fait en multipliant la vitesse de défilement par 200. On sera ainsi passé de 1,4 m/min à 0,4 m/s. C'est moins d'oxydation, moins de déchets neufs, plus de productivité, moins d'énergie totale, tous des enjeux directs pour l'industrie de l'aluminium.

Mais quels sont les enjeux indirects ? Ce sont des éléments de réponse que vont tenter d'apporter les 2 scénarios suivants, basés sur les données mondiales de 2003, où on fait l'hypothèse que les changements se font du jour au lendemain.

Premier scénario : la répartition des flux de déchets (tableau 5.8) devient celle de l'acier.

On laisse inchangée la quantité de déchets de transformation car son ratio à la quantité totale de métal brut est déjà celle de l'acier et la quantité de métal d'électrolyse. On calcule alors les nouvelles quantités de déchets internes et de vieux

Tableau 10.9 : 1er scénario : répartition des flux de déchets (quantités en millions de tonnes) identique à celle de l'acier – D pour déchet, et P pour production (source C. Gentaz)

déchet	référence acier		aluminium actuel		aluminium avec structure acier			
	%D/P	%D/ΣD	quantité	%D/P	%D/P	quantité	variation	%D/ΣD
1) interne	19	36,9	15	28,5	19	9,9	- 5,1	35,5
2) de transformation	10,6	20,6	6,7	12,7	12,7	6,7	- 0,1	23,7
3) neuf = 1) + 2)	29,5	57,5	21,7	41,2	31,7	16,6	- 5,1	59,1
4) vieux	21,9	42,5	6,9	13,1	21,9	11,4	+ 4,5	40,9
5) total = 3) + 4)	51,4	100	28,6	54,3	53,6	28,0	- 0,7	100
6) métal d' électrolyse			24,1	45,7		24,1	0	
7) total = 5) + 6)			52,7	100		52,1	- 0,6	

déchets. Les déchets internes passent de 15 Mt à 9,9 Mt, soit une diminution de 5,1 Mt. La quantité de déchets neufs diminue d'autant. La quantité de vieux déchets augmente de 4,5 Mt, passant de 6,9 Mt à 11,4 Mt. C'est une augmentation énorme de 65%.

D'après les données de l'European Aluminium Association, à la même année, on évalue à 5,9 Mt la quantité d'aluminium non recyclé. Le flux sortant serait au mieux de 12,8 Mt et on devrait en recycler 11,4 Mt, environ 90%, ce qui est impossible. Par contre, d'après nos propres estimations, le flux sortant serait théoriquement de 16 Mt dont on devrait recycler environ 70%, ce qui est réaliste d'après les objectifs de taux de collecte retenus par les sidérurgies mondiales et européennes dont on donne un résumé ci-dessous :

Tableau 10.10 : Objectifs de taux de collecte fixés dans l'Union Européenne par la sidérurgie en 2010 et en 2020 ⁽²¹⁶⁾

application taux de collecte	automobile	emballage	électro- ménager	construction	toutes applications

réalisé (%)	95	48	65	68	environ 70%
visé (%)	98	75	90	80	environ 85%

Ce sont souvent les mêmes applications et l'industrie de l'aluminium fait largement siens les objectifs fixés par la sidérurgie. Avec de tels taux de collecte, on recyclera plus de 70% du flux de déchets sortant et on rappellera l'opinion précédemment citée selon laquelle le flux de vieux déchets peut être instantanément accru de 20%.

Sortant de la bataille d'experts faute de données prouvées, admettant qu'on puisse effectivement augmenter de 4,5 Mt la quantité de vieux déchets et recycler 70% de tous les déchets, on voit de suite que le marché de la fonderie est incapable d'absorber une telle quantité. Il faudra donc obligatoirement organiser des collectes sélectives pour alimenter des boucles fermées de recyclage ou créer de nouveaux marchés pour les produits de fonderie.

Deuxième scénario : on porte le taux de recyclage des vieux déchets à 70% sans changer la structure actuelle.

On augmente la quantité de vieux déchets de 4,5 Mt. La quantité totale, aluminium d'électrolyse et aluminium recyclé, augmente aussi de 4,5 Mt, passant de 52,7 Mt à 57,2 Mt.

Tableau 10.11 : 2ème scénario : répartition inchangée des flux de déchets (quantités en millions de tonnes) sauf la quantité de vieux déchets qui est portée 11,4 Mt – D pour déchet, et P pour production (source C. Gentaz)

déchet	référence acier		aluminium actuel		aluminium actuel avec 70% de recyclage des vieux déchets			
	%D/P	%D/ΣD	quantité	%D/P	%D/P	quantité	variation	%D/ΣD
1) interne	19	36,9	15	28,5	28,5	15	0	35,5
2) de transformation	10,6	20,6	6,7	12,7	12,7	6,7	0	23,7
3) neuf = 1) + 2)	29,5	57,5	21,7	41,2	41,2	21,7	0	59,1
4) vieux	21,9	42,5	6,9	13,1	13,1	11,4	+ 4,5	40,9
5) total = 3) + 4)	51,4	100	28,6	54,3	54,3	33,1	+ 4,5	100
6) métal d'électrolyse			24,1	45,7		24,1	=	

7) total = 5) + 6)			52,7	100		57,2	+ 4,5	
-----------------------	--	--	------	-----	--	------	-------	--

A ventes égales d'aluminium, Il faut donc baisser la production électrolytique de 4,5 Mt, un peu moins de 20% ce qui à priori paraît plausible. Les déchets internes joueront alors pleinement leur rôle d'alternative à l'aluminium électrolytique.

Quant aux autres conséquences de l'augmentation de 4,5 Mt de la quantité de vieux déchets, elles sont les mêmes que dans le scénario précédent, à savoir un marché de la fonderie incapable d'absorber une telle quantité et obligation d'avoir des collectes sélectives alimentant des boucles fermées de recyclage.

10.2.2. Développer les marchés de l'aluminium recyclé à partir des vieux déchets

Augmenter le recyclage des vieux déchets est un objectif à la condition que l'aluminium recyclé trouve de nouveaux débouchés. On peut escompter une croissance encore importante de l'emploi des produits de fonderie en aluminium dans l'automobile mais la consommation de vieux déchets y sera cependant modérée en raison même du succès des pièces de fonderie. En effet les utilisateurs ont entrepris de resserrer les spécifications pour adapter leurs produits aux nouvelles applications alors que la qualité des vieux déchets tout venant s'élargissait dans le même temps et on a du avoir de plus en plus recours à des déchets neufs, voire de l'aluminium d'électrolyse, pour satisfaire la qualité.

Quant aux autres applications des produits de fonderie, elles se développeront sans atteindre cependant les volumes de l'application automobile.

On devra donc développer parallèlement le recyclage en boucle fermée, les applications les plus susceptibles de ce mode de recyclage, étant le bâtiment et l'électroménager. La boucle fermée implique que tout le déchet collecté soit d'abord et uniquement recyclé dans l'application initiale. Or, on a vu précédemment, que, pour la boîte boisson, des raisons techniques limitaient la quantité de vieux déchet recyclé à environ 60% du taux de collecte. Ainsi, lorsque le taux de collecte est de 85%, cela signifie que 25% va dans la fabrication des alliages de fonderie, c'est-à-dire dans la boucle ouverte. Cette limitation technique n'est pas propre au recyclage de la boîte boisson et apparaîtra pour les autres déchets d'autant plus que les taux de collecte doivent et vont tous augmenter.

La seule façon de repousser la limite technique c'est de diminuer la quantité de déchets internes. On va bien au-delà de la seule productivité précédemment citée.

10.2.3. Construire une économie du développement supportable

Le recyclage fonctionne sur un modèle économique classique. Ressortent de ce modèle :

- **augmenter la capacité la capacité moyenne des usines de recyclage** : aujourd'hui elle est de 16.000 t/an. On devrait passer à 33.000 t/an. Augmenter la capacité moyenne par la fermeture des micro-capacités est bien, mais mieux sera la mise en service de grandes capacités de 100.000 t/an en admettant que sont satisfaits l'approvisionnement en déchets et les marchés du métal recyclé.
- **corriger le fonctionnement du LME** : son rôle, réduire les variations de prix, est un échec. Ces variations sont insupportables pour les acteurs du recyclage, l'affineur et le refondeur, comme pour les utilisateurs finaux. Cette correction, c'est supprimer l'anomalie d'un prix des déchets « régi » par un indicateur économique sans aucun rapport avec leur « coût de production et/ou de préparation », à l'origine de la spéculation.
- **parler d'un seul prix de l'aluminium, qu'il soit électrolytique ou recyclé** : c'est ce que fait la sidérurgie qui a toujours parlé d'acier indépendamment de la filière de production, minerais ou déchet, la ferraille. Lorsque l'aluminium recyclé est un alliage aluminium-silicium, son prix devra être différent.

Le modèle économique classique ne fonctionne plus et doit être remplacé par une économie du développement supportable. Au lieu du profit économique classique d'un seul, c'est le profit économique de tous. En quelque sorte, il faut développer un développement supportable équitable, comme il y a un commerce équitable. Cette nouvelle économie du développement supportable se caractérise par les éléments suivants :

- **faire de l'affineur / refondeur un industriel travaillant à façon, et confier à la même entreprise la responsabilité des prix du déchet et le prix de vente de l'aluminium recyclé ;**
- **repenser la propriété du déchet au niveau de l'activité du recyclage et donc le prix d'achat du déchet ;**
- **reconnaître les énormes avantages environnementaux du recyclage pour rendre encore plus évident son intérêt économique.**

10.2.4. Eco-concevoir les produits

Les produits finis doivent être éco-conçus et inclure le recyclage en fin de vie. Il faut évaluer toutes les applications de l'aluminium suivant les critères du développement supportable, critères encore à formuler. Ce doit être l'aboutissement d'un travail

collectif réunissant des représentants de l'industrie de l'aluminium, des industries utilisatrices, des administrations et des citoyens consommateurs.

Nous rappellerons ce qui s'est passé pour l'acier recyclé. D'abord confiné à la production des ronds à béton utilisés dans la construction, ce sont aujourd'hui 80% des applications qui sont indistinctement satisfaites à partir du minerai ou de la ferraille. Seulement 20% sont exclusivement fabriqués à partir du minerai pour des raisons de meilleure qualité des aciers. L'aluminium devrait connaître la même évolution, mais en raison de limitations techniques plus grandes, on devrait atteindre au moins 60% des applications pour lesquelles l'aluminium sera indistinctement obtenu à partir du minerai ou du déchet.

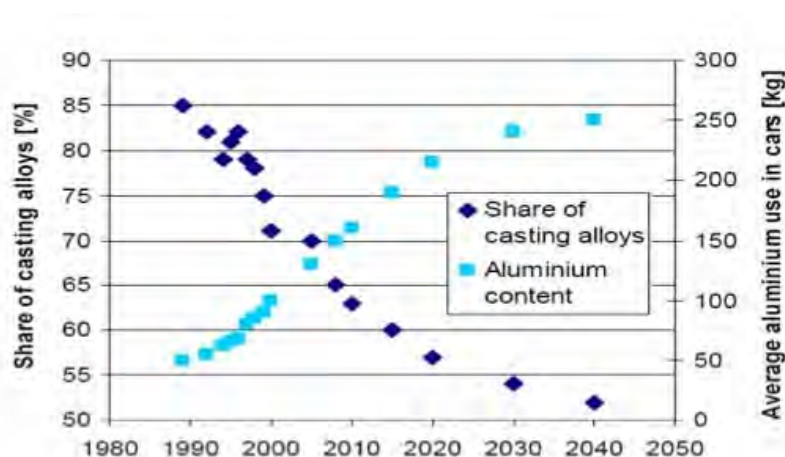
10.2.5. Développer des technologies performantes

- De tri des qualités d'aluminium

Toutes les méthodes en cours de développement sont des méthodes physiques d'analyse rapide associées à une unité de séparation mécanique. Le déchet, énergétiquement excité (laser, autre source à haute énergie, etc.) émet un rayonnement caractéristique de sa composition. Obtenir un tri sélectif performant est le résultat d'un compromis au niveau des dimensions des déchets à trier. Plus ils seront petits, plus la détection sera précise mais plus la séparation mécanique sera lente. A l'inverse, plus ils seront gros, moins la détection sera précise et plus rapide sera la séparation mécanique. Après broyage et tamisage des déchets avant le tri, c'est une coupe granulométrique 20 à 80 mm qui semble le mieux convenir. Les déchets de granulométrie supérieure à 80 mm devront être broyés et tamisés et ceux inférieure à 20 mm rejoindront les déchets difficiles tels les tournures, difficiles car leurs dimensions correspondent à des conditions défavorables pour le recyclage, surtout à la fusion. Enfin, il faut mentionner l'inconvénient présenté par la présence des vernis, laques, peintures qui s'opposent à l'excitation énergétique. Il faut nettoyer les déchets et les premiers résultats ont donné une précision de tri compatible avec un débit de traitement industriel. Une autre approche c'est l'éco-conception des produits et la réduction des quantités de vernis, laques, peintures.

On doit s'attendre à des avancées importantes dans ces procédés difficiles mais absolument nécessaires. C'est le plus grand enjeu pour l'avenir de l'aluminium, car de lui dépend le développement du marché de l'automobile et la production de masse de l'A I V (Aluminium Intensive Vehicle).

Figure 10.3 : Quantité totale d'aluminium et part des alliages de moulage dans l'automobile⁽³⁸⁵⁾



L'allégement de l'automobile, en ayant recours à plus d'aluminium, permet une économie nette d'énergie mais plus d'aluminium dans l'automobile, ce sont des pièces, des parties, toutes dans des alliages autres que les alliages de fonderie, aujourd'hui l'essentiel de l'aluminium utilisé dans l'automobile. L'absence actuelle de technique industrielle de tri entre les alliages est palliée par la croissance des emplois des alliages de fonderie ; celle-ci absorbe sans difficulté les quelques emplois des autres alliages au moment du recyclage de l'automobile arrivée en fin de vie. Par contre, les prévisions de développement massif des emplois de l'aluminium dans l'automobile ne pourront se faire que si on sait séparer les alliages de fonderie des autres. De telles techniques atteindront le stade pré-commercial et leur généralisation industrielle sera subordonnée au surcoût induit : qui le supportera ? On vérifie bien que développement supportable et recyclage sont étroitement liés à l'économie.

- De fusion sans pertes irréversibles d'aluminium

Rien ne s'oppose à fondre les déchets sous une atmosphère sans oxygène ou au moins neutre. Conception du four, type d'énergie de fusion sont des éléments de réponse. Il est certain que la mise au point du tri des alliages d'aluminium entre eux conduira à plus de pertes au moment de la fusion, puisque le déchet sera de plus petite dimension. C'est une raison de plus pour développer des techniques de fusion limitant les pertes irréversibles et donc aussi celles réversibles.

10.2.6. Thèmes d'études identifiés en relation avec le recyclage de l'aluminium

Au cours de cette étude, en plus des difficultés rencontrées dans l'obtention des données, parfois inexistantes, et du constat d'insuffisance voire d'inexistence des méthodologies, nous avons noté nombre de sujets qui, même pour ceux souvent cités, n'avaient jamais été étudiés de façon approfondie. Ces connaissances

indispensables pour pouvoir aborder dans les meilleures conditions les études sur le développement supportable et le recyclage de l'aluminium et en général, ont été classées par domaine.

Le tableau ci-après donne un aperçu de ce qu'il est encore nécessaire de connaître pour mettre en œuvre le développement supportable dans l'industrie de l'aluminium.

Tableau 10.12 : Thèmes d'études identifiés en relation avec le recyclage de l'aluminium

domaine	sujet général	sujet spécifique
technique	production et génération de déchets	<ul style="list-style-type: none"> • dans la production des semi-produits • dans la production de produits finis par emboutissage
	recyclage des déchets	<ul style="list-style-type: none"> • séparation des déchets mélangés et classement par alliage • techniques d'affinage
	produits et éco-conception	<ul style="list-style-type: none"> • toutes les applications et pour commencer l'emballage • effet cumulé des recyclages.

méthodologique	données statistiques	<ul style="list-style-type: none"> • Introduction d'une finalité écologique • classification des déchets
	Indicateurs	rationalisation et harmonisation
	métabolisme industriel	<ul style="list-style-type: none"> • durée de vie des produits • MFA (flux et stocks) • traitement du recyclage dans les cycles de vie
organisationnel	collecte des déchets	<ul style="list-style-type: none"> • étude de cas • aménagement du territoire
	industrie du recyclage	<ul style="list-style-type: none"> • structure • localisation
économique	Prix	<ul style="list-style-type: none"> • formation des prix des déchets • prix et cotations des déchets • mécanismes régulateurs de formation des prix
	Modèle	économie du recyclage
juridique et législatif	Juridique	<ul style="list-style-type: none"> • propriété des déchets • responsabilité et déchets
	Législatif	<ul style="list-style-type: none"> • classification des produits et toxicologie • transport et traitement des déchets
historique	Histoire	du recyclage de l'aluminium
		des acteurs du recyclage de l'aluminium

10.3 Conclusions :

A la mesure du développement supportable, l'aluminium atteint presque la perfection par la durée de vie des produits, conséquence de son inaltérabilité, et par la dématérialisation partielle des produits, synonyme de plus faibles consommations d'énergie d'utilisation, conséquence de sa légèreté. Une exception d'importance demeure cependant l'application dans l'emballage, qui, en plus de n'utiliser aucune des propriétés remarquables de l'aluminium, a une durée de vie particulièrement courte.

Sa métallurgie extractive à partir du minerai présente des inconvénients insupportables, la consommation d'énergie et la pollution.

Alors que l'aluminium est substituable dans toutes ses applications par d'autres matériaux, c'est son recyclage exemplaire ajouté aux mérites de la durée de vie et de la dématérialisation qui peut rendre supportables les inconvénients de la métallurgie extractive.

Techniquement, l'état du recyclage de l'aluminium est en effet satisfaisant. Malgré des conditions difficiles, encore plus difficiles pour les vieux déchets que pour les déchets neufs, d'abord thermodynamiques avec l'oxydation de l'aluminium, ensuite physico-chimiques avec la formation des crasses, les bilans de matière et d'énergie sont comparables à ceux d'autres métaux bénéficiant de conditions beaucoup plus favorables. Ils sont en train de s'améliorer notablement grâce aux expériences acquises, au passage de l'artisanat à l'industrie et au remplacement des vieux outils par les outils modernes récemment développés (tri, prétraitements à froid et à chaud, fusion, traitement des crasses). Dans les prochaines années, ils bénéficieront probablement de progrès importants dans les techniques de tri.

Les impacts environnementaux et énergétiques sont exceptionnellement faibles et permettent au recyclage de compenser, au moins en partie, ceux encore aujourd'hui désastreux de la métallurgie extractive à partir du minerai.

Economiquement, la distinction entre déchets neufs et vieux déchets est plus importante que techniquement. La justification par le profit du recyclage des vieux déchets est aujourd'hui aléatoire alors que celle des déchets neufs est assurée. On a la certitude que les déchets neufs sont tous collectés et recyclés et que les vieux déchets ne sont pas, pour commencer, tous collectés. Dans quelles proportions le sont-ils ? La vérité est qu'on ne le sait pas précisément car aujourd'hui la collecte est le plus souvent une activité volontairement opaque. Ce n'est malheureusement pas particulier à l'aluminium dont le recyclage, comparé à celui des autres métaux, n'est pas le plus mal placé économiquement.

Alors qu'on confond souvent collecte et recyclage, qu'on avance des valeurs invérifiées et invérifiables, le tout supporté par une communication remarquablement faite par l'industrie de l'aluminium, on ne peut être qu'inquiet sur la façon dont le recyclage est devenu le jeu de l'économie. Celle actuelle n'est pas favorable au recyclage et le passage d'un prix réel de producteur à un prix virtuel de financier / négociant, le prix LME, a largement contribué à cette situation. On est incontestablement loin d'une économie du recyclage, l'un des piliers d'une société fondée sur les principes du développement supportable.

Collecte et système économique sont bien les défis spécifiques du recyclage.

« Sociétalement », nous sommes aujourd'hui confrontés à des faits universellement reconnus : des ressources terrestres énergétiques et minérales en voie d'épuisement puisque d'ici 50 à 150 ans elles auront disparu, des pollutions thermiques et chimiques de notre environnement en augmentation, une démographie croissante.

A ces défis, il n'y a pas une réponse mais de nombreuses réponses à mettre toutes en œuvre.

Cette prise de conscience des faits et de la nécessité d'apporter des solutions est déjà apparue dans les années 1960. Mais, c'est bien plus tard, dans les années 1990, que sont prises les premières mesures et c'est pourquoi l'état du développement supportable de l'industrie de l'aluminium apparaît insuffisant à beaucoup d'égards.

Concernant la production à partir du minerai, si on s'est toujours soucié de la consommation d'énergie, force est de reconnaître que la réduction des émissions de fluor et de ses composés est une préoccupation récente. Quant à l'élimination définitive des émissions de CO₂ et de fluor et ses composés, ce n'est toujours pas devenu un programme mondial. Quant aux boues rouges, on n'en parle même plus alors que leur quantité a pratiquement doublé !

Concernant les applications, l'aluminium s'est remarquablement imposé, avec un taux de croissance moyen d'environ 4%/an sur plus de 100 ans, d'abord par ses mérites propres, nombreux et réels, ensuite par son aptitude à satisfaire toutes les demandes alors qu'il est partout substituable. Ce résultat remarquable a été obtenu au détriment

- d'un mauvais bilan matière de la transformation en produits semi-finis : ceux-ci se comptent par milliers de combinaisons de nuance, de forme, de dimension, les séries de production sont très petites et les quantités de déchets de transformation sont énormes, avec un pourcentage par rapport au produit semi-fini plus près de 100% que de 10%.

- du recyclage des vieux déchets, car on a recyclé en priorité tous les déchets neufs de transformation d'autant plus que leurs quantités sont énormes. L'intérêt du recyclage des vieux déchets est alors devenu négligeable pour une industrie de l'aluminium accaparée dans le même temps par les augmentations de capacité d'électrolyse nécessaires pour répondre à la demande croissante.

- d'une prise en compte insuffisante, pendant les années de croissance formidables de 1960 à 1990, de la dimension du développement supportable des produits finis. La boîte boisson en est l'exemple par excellence puisque son développement a bien pris en compte le recyclage du produit en fin de vie et oublié que le très court cycle de vie était en contradiction avec le long à très long cycle de vie de tous les autres produits en aluminium.

Qu'en sera-t-il demain ?

En acceptant que la mise en conformité de l'industrie de l'aluminium avec l'esprit du développement supportable se fera, cela commencera par les produits et donc par la mesure de cette conformité. Il manque encore aujourd'hui les données¹ et une méthodologie universellement reconnue de comparaison des matériaux qui devra être basée sur les flux de matières et d'énergie du minerai et du déchet jusqu'au produit fini, incluant toutes les étapes du recyclage de la collecte à la fusion.

Les conséquences imaginables de l'acceptation de données universellement acceptées utilisées ensuite pour comparer puis concevoir des produits sont les suivantes :

- L'abandon de l'application emballage qui, rappelons-le, représente environ 20% des usages de l'aluminium.

¹ On rappellera l'état lamentable actuel des données statistiques tant nationales que mondiales; soit elles disparaissent pour être commercialement voire politiquement incorrectes et on invoque le plus souvent l'argument de la contrainte financière, soit elles deviennent de plus en plus souvent douteuses pour être au service de la communication à des fins commerciales et donc inutilisables.

- Le développement des applications transport et construction, à la condition pour cette dernière d'avoir mis en place une collecte sélective performante.

- La rationalisation de la production des semi-produits d'aluminium et donc la diminution importante du flux des déchets de transformation. De tels programmes ont déjà été engagés par quelques grandes sociétés.

- Le développement du recyclage des vieux déchets ; toutes les étapes, collecte, tri, fusion, sont concernées, surtout la collecte puisqu'il faut atteindre un taux d'au moins 80% pour que recyclage et électrolyse ait le même bilan matière et c'est bien cette valeur qu'on retrouve dans les dernières directives européennes.

De tels objectifs passent par une concertation au niveau mondial entre l'industrie de l'aluminium, les citoyens, les politiques et doivent être supportés par une nouvelle économie du développement supportable.

Utopie ou réalisme, certaines conditions d'aujourd'hui sont les plus favorables jamais réunies depuis 30 ans avec une surcapacité de production d'aluminium qui durera plusieurs années, une remise en cause des applications par les citoyens et les politiques, l'effondrement d'une économie virtuelle qui a tant desservi le recyclage en général au profit des négociants, spéculateurs, profiteurs du LME, etc. Le contexte restera très difficile, il faudra savoir investir, « mondialiser » réellement des politiques industrielles, créer des emplois, améliorer l'image écologique de l'aluminium en fermant ou modernisant les usines d'électrolyse de 1^{ère} et 2^{ème} génération (par exemple, ALCOA vient juste de décider de moderniser la partie ancienne de son usine de Baie-Comeau au Canada), de fermer celles alimentées en électricité d'origine non renouvelable (charbon).

C'est le moment, maintenant ou jamais⁽³⁷²⁾, pour construire cette société supportable que nous appelons tous car le présent essai va bien au-delà de l'aluminium, tous les produits de notre société sont concernés et une même démarche mettra probablement en évidence d'autres anomalies (par exemple, ne faut-il pas abolir immédiatement les nombreuses réglementations antiéconomiques en vigueur ?), d'autres zones d'ombre, d'autres non-dits, d'autres incohérences qui, résolus, permettront de jeter les bases d'une économie du développement supportable.

10.4. Bibliographie

- (372) Bourg Dominique, Rayssac Gilles-Laurent. Le développement durable Maintenant ou jamais. Sciences et Techniques, N° 95, Découvertes Gallimard, 2006
- (373) Morrison Jim. Can recycling survive in Europe ? Aluminium (Isernhagen, Germany) 81 (6), 551-555, 2005
- (374) OEA. The strategic importance of the EU15 aluminium recycling industry. EAA , OEA, publication, 1st July 2004
- (375) Gerber Jürg. The global dimension of aluminium recycling. The need and our ability to close the loop. 7th OEA International Aluminium Recycling Congress, München, Germany, 17/18 march 2003
- (376) Kirchner Günther. Raw material source aluminium recycling Today and Tomorrow. 7th OEA International Aluminium Recycling Congress, München, Germany, 17/18 march 2003
- (377) Morrison Jim. Trend in the European Aluminium Industry. 7th OEA International Aluminium Recycling Congress, München, Germany, 17/18 march 2003
- (378) The Aluminium Association. Norsk Hydro: R&D said to come at "opportune time" (for recycling. ndla). 2003 (www.aluminium.org)
- (379) European Aluminium Association- Aluminium for Future Generations : progressing through dialogue. Chapter One and Two. 2003 (www.eaa.net, www.aluminium.org)
- (380) Reuter M. A. Automatic sorting, metallurgy and system engineering – Keys to closing the aluminium cycle. 7th international aluminium recycling congress, 17-18 March 2003, München, Deutschland
- (381) Norsk Hydro. A global remelt technology leader. 2002(www.hydro.com)
- (382) The Aluminium Association. Movement grows against recycling. The Denver Post, September 01, 2002 (www.aluminium.org)
- (383) L'aluminium, un matériau idéal pour le recyclage. tirage à part du RECYCLING magazin, 17/2002
- (384) The Aluminium Federation, Alfred. Sustainable development report.

2002 (www.alfed.org.uk)

(385) De Gelas Bernard. Recyclage de l'aluminium dans la filière automobile en Europe. TransAl Lyon, juin 2002

(386) Vigeland Pål. Aluminium recycling : the commercial benefits, the technical issues and the sustainability imperative. Metal Bulletin 9th international secondary conference, 7-9 November 2001, Prague, Tchéquie

(387) Rombach Georg and Friedrich Bernd. Aluminium recycling in Germany – status and potential. Light Metal Age, 66-75, August 2001

(388) Eco-efficiency creating more value with less impact. World Business Council for Sustainable Development, August 2000

(389) Recyclage et valorisation des déchets ménagers, section D. Les métaux non ferreux et section E. L'aluminium. 1998
(www.senat.fr/rap/o98-415/o98-41523.html)

(390) Marstrander Rolf. To-morrow's customer support seen in an industrial ecology perspective. METEF 98, May 27-30, 1998

(391) Ayres Robert U. Metals recycling : economic and environmental implications. Proceedings of the third ASM International Conference & Exhibition on The Recycling of Metals, Barcelona, Spain, 5-31, 11-13 June, 1997

(392) Cael Jean-Philippe. Affinage et recyclage : l'aluminium de deuxième fusion. Réalités Industrielles, Annales des Mines, 38-43, Février 1994

(393) Steel and aluminium energy conservation and technology competitiveness. Act of 1998, fiscal year 1993 annual report, US Department of Energy Metals Initiative Annual Report 1993

(394) Armand Richard. Quatre axes pour la politique de l'environnement. Pêcheiney, Direct Magazine, n° 10, 5-8, Avril 1992

(395) Eliasco E. Le recyclage de l'aluminium. Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement, commission des produits de base, réunion d'examen spéciale sur la bauxite, Genève 13 mai 1991 (United nations Conference on Trade and Development, Committee on Commodities, Ad Hoc review meeting on

bauxite, Geneva).

(396) Sanders R. E., Trageser A. B. and Rollings C. S. Recycling of lightweight aluminum containers : present and future perspectives. Proceedings of Second International Symposium on recycling of metals and engineered materials, edited by van Linden Jan H. L., Stewart Jr Donald. S. and Sahal Yogeshwar, The Minerals, Metals and Materials Society, 187- 201, 1990

CG/ml

Lausanne, Mai 2009