



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org



15251-F

Distr. LIMITEE

ID/WG.470/4

17 juillet 1987

FRANCAIS

Original : ANGLAIS

Organisation des Nations Unies pour le développement industriel

Première Consultation sur l'industrie
des métaux non ferreux

Budapest (Hongrie), 30 novembre-4 décembre 1987

CHOIX TECHNIQUES

DANS

L'INDUSTRIE DE L'ALUMINIUM*

par

György Dobos**

Consultant auprès de l'ONUDI

* Les opinions exprimées dans le présent document, dont l'original n'a pas fait l'objet d'une mise au point rédactionnelle, sont celles de l'auteur et ne reflètent pas nécessairement celles du Secrétariat de l'ONUDI.

** Ancien fonctionnaire de l'ONUDI, Directeur adjoint de la Division des opérations industrielles.

T A B L E D E S M A T I E R E S

	PAGE
A. INTRODUCTION	1
B. CADRE DE L'ETUDE	3
1. L'INDUSTRIE DE L'ALUMINIUM	3
2. CHOIX DE TECHNOLOGIES	3
C. SITUATION ACTUELLE DE L'INDUSTRIE DE L'ALUMINIUM	7
1. BESOINS - APPROVISIONNEMENTS	7
2. CAPACITES	9
3. PRIX	10
4. IMPORTANCE DU COOT DE L'ENERGIE	11
5. RECYCLAGE	11
6. MATERIAUX CONCURRENTS	12
7. PREVISIONS RAISONNAPLES POUR LE FUTUR	13
8. L'ALUMINIUM EST-IL UN METAL ARRIVE A MATURITE ?	14
9. CONCLUSION	16
D. ANALYSE DE LA TECHNOLOGIE DE L'INDUSTRIE DE L'ALUMINIUM	16
1. BAUXITE	16
1.1 Géologie de la bauxite	16
1.2 Extraction de la bauxite	20
2. PRODUCTION D'ALUMINE	23
2.1 Généralités	23
2.2 Le procédé Bayer	24
2.3 Les usines d'alumine	27
2.3.1 Taille, dimension économique	27
2.3.2 Dimension et infrastructure	28
2.3.3 Implantation	32
2.4 Conduite des usines d'alumine	32
2.4.1 Coûts de production	32
2.4.2 Entretien et pièces de rechange	35

	PAGES
2.5 Traitement des bauxites à faible teneur et des matériaux autres que la bauxite	35
2.6 Alumine de qualité non-métallurgique	36
2.7 Sous-produits de la production d'alumine	37
2.8 Résidus (boues rouges)	38
3. ELECTROLYSE D'ALUMINIUM	39
3.1 Généralités	39
3.2 Le procédé Hall-Héroult	39
3.3 Usines d'électrolyse d'aluminium	43
3.3.1 Taille - Dimension économique	43
3.3.2 Dimensions et infrastructure	45
3.3.3 Implantation	46
3.4 Energie pour l'électrolyse	47
3.5 Fonctionnement des usines d'électrolyse d'aluminium	48
3.5.1 Coût de production	48
3.5.2 Entretien et pièces de rechange	49
3.6 Résidus	50
4. FABRICATION DES PRODUITS SEMI-OUVRES	50
4.1 Consommation d'aluminium	50
4.2 Fabrication des produits semi-ouvrés	52
4.2.1 Coulée continue	55
4.2.2 Coulée de billette et de plateaux	56
4.2.3 Coulée en moule	56
4.2.4 Laminage	58
4.2.5 Extrusion (au filage)	59
4.2.6 Forge	60
4.3 Deuxième transformation des produits semi-ouvrés	60
4.3.1 Fabrication des feuilles d'aluminium	61
4.3.2 Finition de surface	61
4.4 Aspect général de l'installation d'usines de produits semi-ouvrés	62
5. FABRICATION DE PIECES FINIES	63

E. PRINCIPALE DIRECTION DES PROGRAMMES DE RECHERCHE	65
1. ALUMINE	
1.1 Le procédé Bayer	65
1.2 Les procédés autres que Bayer	67
2. ALUMINIUM	67
2.1 Le procédé Hall-Hérault	68
2.2 Autres procédés	69
3. FABRICATION DE PRODUITS SEMI-OUVRES	70
3.1 Considérations générales	70
3.1.1 Coulée continue	70
3.1.2 Coulée de billettes et de plateaux	71
3.1.3 Moulage	71
3.1.4 Laminage	72
3.1.5 Extrusion	73
3.1.6 Forge	74
3.1.7 Autres techniques	74
3.1.8 Evolution des alliages ; évolution des micro-structures des produits	74
3.2. Deuxième transformation des produits d'aluminium semi-ouvrés	75
3.2.1 Feuilles d'aluminium	75
3.2.2 Finition de surface	75
F. AUTRES TECHNIQUES PLUS ADAPTEES POUR LES PAYS EN DEVELOPPEMENT	75
1. SOMMAIRE TECHNIQUE	75
2. QUELQUES CONSIDERATIONS ECONOMIQUES	79
3. POSSIBILITES DE COOPERATION NORD-SUD	85
4. COOPERATION ENTRE LES PAYS EN DEVELOPPEMENT	86
5. INSTALLATION D'UNITES DE PRODUCTION DANS LES PVD	88
6. TECHNIQUES UTILISABLES	89
7. MARKETING	89
8. QUELQUES REMARQUES GENERALES	89
9. LE ROLE DE L'ONU	91

	PAGES
G. CONSEILS (RECOMMANDATIONS)	93
1. POUR LES PVD	93
2. POUR LES NATIONS INDUSTRIALISEES	95
3. ONUDI	96
ANNEXES	98
REFERENCES	145

G L O S S A I R E

GENERALITES ET ECONOMIE

- CCA = Comptabilité des coûts courants (BIRD) (8)
CPE = Economies planifiées
GDP = Production Intérieure Brute
GNP = Production Nationale Brute
HCA = Comptabilité des Coûts Historiques
LDC's = Pays les Moins Développés
MEC = Pays à Economie de Marché
mils = 1/1000 USD
R + D = Recherche et Développement
TNC's = Compagnies Multinationales
NU = Nations Unies
ONUUDI = Organisation des Nations Unies pour le développement industriel

UNITES DE MESURES

- Toutes les tonnes sont des tonnes métriques (t).
Toutes les températures sont exprimées en degrés celsius (°C).
A.C. = courant alternatif
g/l = gramme par litre
KA = kilo ampère
Kg/c = kilogramme par tête
KWh = kilowatt heure
MN = mega newton
tpy ou t/y = tonnes par an

A. INTRODUCTION

L'une des principales recommandations de la première réunion du Groupe des Spécialistes des Industries des Métaux Non-ferreux, qui s'est tenue à VIENNE du 18 au 21 mars 1985 (1), demandait de développer des études vers une sélection de technologies portant sur les industries de l'aluminium, du cuivre, du nickel, du zinc, du plomb et de l'étain, qui seraient le mieux adaptées aux PVD dans le but de développer dans ces pays une industrie mieux intégrée et indépendante.

La première recherche serait basée principalement sur les études qui ont été réalisées jusqu'à maintenant, en portant une attention particulière sur les recherches faites en vue de la réduction de la taille des usines.

Partant de là, le rédacteur du projet a reçu mission de l'ONUDI de préparer une étude sur les différentes solutions technologiques pour l'industrie de l'aluminium, en traitant les thèmes suivants :

- a) analyser la situation actuelle des techniques utilisées dans les industries des métaux non ferreux de référence, dans les pays industrialisés et les PVD ;
- b) examiner les principaux programmes de recherche actuellement en cours dans le domaine technique, en donnant leurs objectifs, leurs caractéristiques, leurs résultats, et la date prévisionnelle de leur réalisation. Afin de comprendre facilement où les changements et/ou les choix technologiques sont actuellement en cours de mise en oeuvre et pour discerner clairement de quelles voies techniques parle l'auteur, des schémas concernant l'extraction, le raffinage et les traitements ultérieurs seront développés

- c) sur la base de l'analyse de la situation actuelle et des recherches en cours, déterminer les possibilités de développer de nouveaux choix techniques qui sont plus adaptés aux PVD. Aussi, déterminer les caractéristiques économiques et technique des choix de techniques possibles en s'occupant d'abord de leur principaux avantages et inconvénients pour les PVD.
- d) proposer un programme possible de coopération (Nord/Sud et Sud/Sud) pour mettre en place les techniques adaptées aux industries des métaux non ferreux dans les PVD. La conception de la présente étude correspond aux termes de référence indiqués par le Secrétariat de l'ONUDI. Comme cela a été suggéré, une analyse soignée des études antérieures a été entreprise en portant une attention particulière à celle préparée par la Branche Négociation (1) et la Section des Industries Métallurgiques (2).

Selon les termes de référence, l'objectif principal de cet exercice consiste à déterminer les possibilités de choix de nouvelles techniques qui sont plus adaptées aux PVD, signalant les principaux avantages et inconvénients des options techniques possibles. Dans ce but, un examen des publications traitant de ce sujet a été entrepris pour déterminer les programmes de recherches actuellement réalisées dans le domaine de la technologie de l'Industrie de l'Aluminium, et une estimation provisoire a été faite sur la possibilité de l'application de leurs résultats espérés pour les PVD. Evidemment, les résultats actuels doivent être considérés avec prudence. C'est la conséquence immédiate de la nature de l'oeuvre à entreprendre, mais aussi due au fait que cette analyse est basée uniquement sur les publications traitant de ce sujet et de l'expérience de l'Industrie de l'Aluminium du rédacteur. Toutefois, il peut être espéré que, durant toute la préparation de la réunion consultative, avec la contribution de nos collègues, spécialistes de l'Industrie de l'Aluminium, le nombre de solutions

techniques mieux adaptées aux PVD puisse être considérablement augmenté et qu'en conséquence, les conclusions de la présente étude soient modifiées.

B. CADRE DE L'ETUDE

1. L'INDUSTRIE DE L'ALUMINIUM

La plupart des compagnies intégrées traitant l'aluminium, outre l'extraction minière, les opérations de transformation chimique ou métallurgique du minerai en lingot et semi-ouvré, pratiquent la fabrication à partir du métal de produits variés (boîtes pour boisson, radiateurs pour chauffage domestique, câbles, etc...). L'accroissement de leur part dans le marché de la production aval semble être la politique généralement adoptée par la plupart des producteurs primaires. Si l'on considère les choix technologiques de l'Industrie de l'Aluminium, les mieux adaptés aux PVD, les problèmes relatifs à la transformation du métal ont été examinés avec le plus grand soin parce que, dans la plupart des cas, le métal atteint le consommateur par ce processus. Pour cette raison, les indications seront données concernant la taille viable des procédés de conversion ainsi que la qualité et la quantité nécessaires pour ces technologies. Ils seront estimés aux différents niveaux de consommation d'aluminium par tête qui pourraient être envisagés dans les PVD aux différents niveaux de développement économique. Néanmoins, afin de conserver à cette étude des limites cohérentes et autonomes, dans le cadre de l'Industrie de l'Aluminium, l'extraction de la bauxite, la production d'alumine, d'aluminium et de produits semi-ouvrés seront présentées ci-après.

2. SELECTION DE TECHNOLOGIES

La plupart des procédés et des équipements utilisés pour obtenir l'aluminium à partir de la bauxite correspondent à un niveau

moyen de complexité technique. Il y a relativement peu d'exceptions, par exemple la régulation automatique de quelques procédés techniques, la fabrication de matériaux composites, la mise au point et la fabrication d'alliages hautes-performances (3).

La plupart des pièces principales faisant partie des équipements utilisés dans cette industrie peuvent être fabriquées dans tous les pays possédant une industrie mécanique relativement développée. La recherche et le développement concernant ces équipements sont réalisés dans presque toutes les nations industrielles. Au sujet de la mise en oeuvre pratique dans l'industrie des résultats de la R et D, concernant de nouveaux procédés techniques et de nouveaux types d'équipement, ce sont les grandes compagnies qui ont les meilleures possibilités. Elles seules ont les moyens nécessaires pour créer et mettre en oeuvre, à une échelle industrielle, les innovations majeures, et travailler parallèlement, si c'est opportun, sur plusieurs pistes de R et D. Ceci est particulièrement vrai en ce qui concerne la production d'alumine et d'aluminium, si l'on a présent à l'esprit la taille des unités industrielles modernes. Par conséquent et sans aucun doute, les six grandes multinationales : ALCAN, ALCOA, KAISER, REYNOLDS, ALUSUISSE et PECHINEY, sont, pour l'instant, les chefs de file dans l'Industrie de l'Aluminium. Néanmoins, il faut remarquer que nombre d'autres compagnies opérant dans de nombreux pays, par exemple Allemagne Fédérale, Italie, Japon, USA, URSS, qui ne sont pas rattachées aux multinationales ci-dessus, ont une connaissance technique proche de celle des multinationales soit sur l'ensemble des techniques, soit seulement sur un secteur de l'Industrie de l'Aluminium.; ces compagnies peuvent être retenues comme sources possible de technologie pour l'Industrie de l'Aluminium. Enfin, il faut noter que les technologies de cette industrie peuvent être achetées par l'intermédiaire des grands consultants industriels.

On peut admettre l'opinion du Centre des Nations Unies sur les compagnies multinationales (4), qui dit que dans la plupart des cas, il n'y a pas de difficultés majeures dans l'achat de technique de l'Industrie de l'Aluminium. Toutefois, des exceptions peuvent se produire pour des innovations techniques relativement récentes, encore soumises à des essais ou concernant des nouveaux produits tout à fait spécifiques. En général, on peut dire que le marché des techniques standard de l'aluminium est plutôt un marché d'acheteurs.

L'attention est aussi attirée sur le fait que, dans le prix de l'aluminium métal atteignant le consommateur, il y a trois principales données qui résultent principalement de l'emplacement des usines. Ce sont :

- la qualité de la bauxite ;
- le prix de l'électricité utilisée pour l'électrolyse ;
- les coûts de transport associés à l'ensemble de la chaîne de transformation du minerai en métal.

Le poids de ces trois items (pris individuellement ou collectivement) peut être plus important sur le bénéfice tiré de l'activité que de légères différences dans le niveau technique des usines. Ceci peut être l'une des raisons des résultats relativement bons obtenus sur le marché de l'aluminium par de petites compagnies.

Effectivement, il n'y a pas de méthode universellement utilisée qui permettrait le choix, parmi plusieurs possibilités techniques, celle qui serait la mieux adaptée à n'importe quel cas donné.

La présente étude n'a pas pour but d'essayer de définir des critères sur ce sujet, toutefois, il semble être nécessaire d'expliquer quelques considérations qui reviennent constamment

- sur la question de la "technologie appropriée" (5).

Selon M. BIRITZ (5), une technologie convient quand elle satisfait aux quatre conditions suivantes :

- contraintes et paramètres purement technologiques ;
- les limites posées par l'aptitude et le know how du personnel pour mettre en oeuvre cette technologie ;
- l'adaptation aux besoins économiques avec lesquels il faut opérer ;
- l'adaptation à l'environnement socio-politique.

M. BIRITZ définit aussi les paramètres venant après ceux qui ont été mentionnés ci-dessus, établissant une corrélation entre les procédés techniques : le produit, sa demande ; les matériaux bruts ; le profit ; la main d'oeuvre ; les contraintes sociales et politiques.. Parmi ses recherches, on a relevé les principales questions suivantes :

- 1) une technique peut être adaptée à une seule usine et ne peut pas être transférée directement à une usine identique mais située ailleurs ; des produits peuvent être adaptés à un pays ou même à une sous-région sous réserve que les conditions économiques prédominantes soient similaires. Par exemple, des produits semi-ouvrés de coulée en bande peuvent être utilisés par des PVD pour satisfaire une demande couvrant une large gamme d'utilisation de l'aluminium ;
- 2) les conditions de l'environnement économique dans lequel l'entreprise doit oeuvrer doivent être clairement définies :
 - I) on attend un bénéfice de l'usine ;
 - II) l'usine est subventionnée, au moins pendant une certaine période ;
 - III) l'usine à un objectif social ou toute autre contribution à la nation, avec en conséquence une importance secondaire des bénéfices.

- 3) les technologies industrielles, par exemple chimiques, pétro-chimiques et métallurgiques, ne permettent pratiquement pas de modification si les conditions économiques de base sont à prendre en considération ; la seule variation possible concerne la taille de l'usine.
- 4) pour la survie de l'industrie, la définition de la technologie adaptée est un processus continu et sans fin, que ce soit dans les pays industriels ou les PVD.

On essaiera d'être plus explicite sur ces questions de base quand elles seront en rapport avec les procédés technologiques utilisés dans l'Industrie de l'Aluminium (chapitre D).

Un exposé de la succession des opérations concernant les techniques industrielles de fabrication, établi par M. BIRITZ, est joint pour faciliter les références (annexe 1).

C. LA SITUATION ACTUELLE DE L'INDUSTRIE DE L'ALUMINIUM

1. LA DEMANDE - L'APPROVISIONNEMENT

La consommation mondiale d'aluminium primaire augmente rapidement depuis les années 50 environ. A peu près 2 millions de tonnes d'aluminium primaire ont été produits en 1950, mais, 5 ans plus tard, c'est 3 millions de tonnes et, en 1960, on est passé à 4,5 millions. Le niveau de la production s'est ensuite accru rapidement pour atteindre 10 millions de tonnes en 1970.

Récemment, la tendance a considérablement évolué. L'annexe 2 donne les chiffres significatifs de 1973 à 1983 (6). Quoique la consommation mondiale totale (primaire et secondaire) dépasse

les 20 millions de tonnes en 1983, une part considérable revient au métal secondaire (plus de 25 %) et l'accroissement n'a pas dépassé 3.800 millions de tonnes pendant cette période. Plus de la moitié de cette quantité est représenté, de toute façon, par une consommation supplémentaire de métal secondaire. Ainsi, l'accroissement total du métal primaire est seulement de 1.700 millions de tonnes.

D'après ZORN (7), le taux de croissance de la consommation entre 1970 et 1983 fut de 3 % par an en aluminium primaire. Considérant une plus courte période, l'accroissement représente seulement environ 1,9 % par an dans les pays de marché, pendant la période de 1973 à 1979, et même moins, seulement 0,5 % par an, pendant la période de 1979 à 1985 (BIRD (8)). L'accroissement de la consommation dans les pays à économie planifiée a été quelque peu supérieure, environ 3 % par an. Il en résulte que l'on peut admettre que la dynamique de la croissance antérieure de la consommation est arrêtée et que la tendance actuelle est plutôt très modeste.

Effectivement, la croissance de la consommation d'aluminium est généralement inférieure au taux de croissance annuelle de la production industrielle dans la plupart des pays à économie de marché. Au contraire, la croissance de l'aluminium en utilisation finale est plus grande dans la plupart des PVD que la croissance de la production industrielle.

La production de métal primaire ne suit pas toujours la demande. La consommation de métal primaire a décru au début des années 60, mais la réduction de la production vint plus tard, en conséquence les stocks augmentèrent rapidement pour atteindre le niveau de 3 millions de tonnes. Ceci entraîna une rapide chute des cours. Les puissants intérêts agirent dans le même sens.

La consommation d'aluminium varie beaucoup suivant les régions du globe. La moyenne pour l'ensemble du globe s'établit à 3,5 kg par habitant par an. Trois pays : les USA, le Japon, la RFA consomment plus de 20 kg par habitant par an. Le chiffre significatif pour la plupart des pays développés a été établi récemment entre 9 et 15 kg. Les PVD consomment beaucoup moins. Il y en a quelques-uns qui ont une consommation entre 1 et 3 kg par habitant et par an (par exemple, le Brésil : 2,9 kg par habitant le Mexique : 1,7 kg par habitant) et même les 5 kg par habitant par an sont atteints, par exemple à Hong-Kong et au Venezuela, mais la plupart des PVD consomment moins de 1 kg par habitant par an, parfois en dessous de 0,5 kg par habitant et par an (par exemple, l'Egypte avec 0,9 kg par habitant et par an, l'Inde, avec 0,4 kg, le Ghana, avec 0,5 kg), et l'emploi de l'aluminium par la plupart des pays les moins développés descend en dessous de ce niveau.

2. CAPACITE DE PRODUCTION

Les capacités de production des usines d'alumine utilisées par la métallurgie, des électrolyses et des usines de produits semi-ouvrés sont indiquées dans les annexes 3, 4 et 5, par continent, basées sur les relevés de 1983 et 1984 (KING (9) et (10)). Ces relevés montrent clairement qu'il y a une surcapacité considérable à toutes les phases de la production d'aluminium. La capacité totale des électrolyses est de plus de 18 millions de tonnes par an en 1984, alors que la demande mondiale d'aluminium primaire est d'environ 15 millions de tonnes au même moment. Cette demande nécessiterait moins de 30 millions de tonnes d'alumine de qualité métallurgique alors que la capacité s'élève à près de 40 millions de tonnes en 1984. La capacité de produits semi-ouvrés est aussi excédentaire en 1983.

Un accroissement de ces capacités est prévu pour les prochaines années. Il y a peu de différence dans les diverses prévisions pour les électrolyses (par exemple : entre KING (9) et BIRD (8)) mais il est prévu que la capacité d'électrolyse des pays à économie de marché s'accroîtra d'environ 2 millions de tonnes par an jusqu'en 1991. Les différences entre les estimations de croissance des capacités de production d'alumine sont plus grandes, BIRD (8) s'attend à une petite croissance seulement, tandis que KING (9) estime même une croissance de 3 millions de tonnes par an. Au même moment, pourtant, la possibilité de fermeture d'usines d'électrolyse et d'alumine a été aussi envisagée. Considérant tout ceci, la capacité de production d'électrolyse pourra croître de 1,5 millions de tonnes par an seulement et celle d'alumine pourrait demeurer très modeste. On ne s'attend pas à une forte croissance de la capacité de production des produits semi-ouvrés dans un proche futur (jusqu'en 1987).

3. PRIX

Le prix du métal primaire a augmenté régulièrement, sauf de courtes périodes de récession, jusqu'en 1980. Une forte récession s'en est suivie, entraînant une chute brutale du cours, et depuis, ils restent déprimés. Il y a des usines d'électrolyse qui peuvent à peine couvrir leurs coûts marginaux (variables), sans parler de leurs coûts totaux comprenant les charges de capital. Selon BIRD (8), les coûts marginaux pour la moyenne des fondeurs s'élève à 51,7 cents par livre (1.137,4 US dollars par tonne), et les coûts totaux à 63,4 cents par livre (1.394,8 US dollars par tonne) en 1984. A la même époque, les prix LME (London Metal Exchange) de l'aluminium sont restés sous la barre de 52,7 cents la livre, niveau de juillet 1984 (ils étaient cependant au-dessus de ce chiffre précédemment).

BIRD (8) a établi une courbe des approvisionnements pour 1985 qui indique la capacité d'électrolyse pouvant rester en production avec profit selon les différents niveaux du prix de l'aluminium (annexe 6). Ceci montre clairement la situation. Il est facile de comprendre que les usines d'électrolyse produisant largement au-dessus de leur coût vont réduire leur production. La situation est la même, si ce n'est pire, en ce qui concerne les usines d'alumine.

4. INFLUENCE DU PRIX DE L'ENERGIE

Le prix de l'énergie a augmenté depuis 1973. Les usines d'électrolyse d'aluminium consomment une très grande quantité d'électricité, environ 14.500 KWh de courant alternatif par tonne de métal. Le coût de cette électricité varie, toutefois, de façon considérable suivant les régions du globe. Selon les informations données dans un compte rendu de 1980 de la BANQUE MONDIALE (11), les prix pour les usines d'électrolyse existant alors variaient dans la fourchette de 3 à 26 millions de US dollars pour les moins élevés, et étaient estimés entre 20 et 25 millions pour les nouvelles unités. Ces prix sont aujourd'hui dépassés et ils varient de 8 à 50 millions ou même plus par KWh. Par conséquent, les usines d'électrolyse ont à payer une facture d'électricité qui s'étend depuis environ 116 US dollars à environ 725 US dollars par tonne de métal. Ce qui explique les fermetures, aussi bien que la tendance au redéploiement de cette industrie vers les sources d'énergie bon marché (comme l'a remarqué ZORN, par exemple (7)). Les usines d'aluminium traitant des gisements de bauxite coûteuse et utilisant des techniques non satisfaisantes du point de vue de la dépense d'énergie furent aussi fermées.

5. RECYCLAGE

L'annexe 2 montre que la part du métal secondaire dans la consommation d'aluminium a augmenté de 18 % en 1979 à 25 % en 1983.

Dans quelques pays industrialisés, la part de métal recyclé a été beaucoup plus grande que ne l'indique la moyenne (BIRD(8))

- Italie	41,1 %
- RFA	30,3 %
- Japon	26,4 %
- USA	32,4 %
- GB	26,1 %

Une croissance supplémentaire de la part du métal secondaire dans la consommation d'aluminium doit être envisagée.

6. MATERIAUX CONCURRENTS

La "qualité spécifique" est une caractéristique très souvent utilisée quand on compare des matériaux concurrents. Ceci peut s'exprimer ainsi :

Qualité spécifique : qualité requise pour l'utilisation finale
poids spécifique x prix par unité de poids

La qualité requise peut être l'une des suivantes : limite élastique, résistance à la fatigue, conductibilité, module d'élasticité, etc...

Le matériel le plus adapté à une utilisation donnée peut être déterminé par l'équation ci-dessus, mais seulement si une seule qualité dominante est retenue. L'aluminium est le meilleur si la conductibilité est retenue comme qualité recherchée. C'est pour cette raison que l'aluminium est souvent préféré pour le transport de l'électricité.

L'aluminium, toutefois, possède une remarquable ou au moins très bonne combinaison de qualités qui répondent aux exigences de très nombreuses utilisations.

Comme on l'a montré, l'aluminium est le premier seulement dans une "qualité spécifique", il y a donc de multiples matériaux et métaux rivalisant avec l'aluminium, tels que le cuivre, le bois, l'acier, l'acier spécial haute résistance et enfin les matières plastiques. Les matériaux synthétiques semblent devoir être les concurrents les plus sérieux dans le futur.

Jusqu'à un certain point, l'aluminium secondaire est aussi un concurrent pour le métal primaire. La concurrence à la croissance de la consommation d'aluminium primaire peut provenir d'alliages d'aluminium plus performants. Les réductions de poids des produits finis peuvent être obtenues par l'utilisation d'alliages haute performance d'aluminium et/ou des produits filé de haute qualité. Le prix de tels produits est toutefois plus élevé, mais la fabrication du même produit final nécessite moins de matière (par exemple, une plus grande résistance de 10 % aboutit à 3 à 5 % d'économie de matière, dans le cas d'une structure sans charge mécanique).

7. PREVISIONS RAISONNABLES POUR LE FUTUR

Le court terme apportera une évolution considérable, c'est l'essentiel du message délivré par exemple par BIRD (8). Une très légère augmentation de la consommation peut être envisagée jusqu'en 1990, peut-être 2 % par an et la dépression des prix de l'aluminium peut s'améliorer jusqu'à un certain point. Point n'est besoin de nouvelles capacités de production pour cette période.

Cette situation pourrait changer, cependant, de façon importante après 1990. BIRD (8) prévoit un taux de croissance de la production industrielle pour la période 1990-1993 approchant celui de l'avant-crise pétrolière. Ceci entraînerait une croissance de la consommation d'aluminium. On trouvera les données significatives dans l'annexe 7.

Il y a une différence, toutefois, en ce qui concerne l'aluminium entre les périodes 1964-1973, et 1990-1993. Pendant la période antérieure à la crise pétrolière, le taux de croissance annuel de la consommation d'aluminium était beaucoup plus élevé que celui des autres productions industrielles. Tandis que pendant la période 1990-1993, le taux annuel de croissance de la consommation annuelle d'aluminium est prévu de rester en moyenne légèrement inférieur au taux annuel de la croissance de la production industrielle. Néanmoins, une croissance estimée de 4,2 % par an, dans le monde, indique un futur plus prometteur pour cette industrie.

Cette croissance annuelle signifierait, toutefois, que les capacités de production seraient utilisées à plein en 1993 et qu de nouvelles capacités devraient être construites pour suivre la demande. Ceci ne serait possible, toutefois, que si les prix de l'aluminium et de l'alumine augmentent de façon considérable. Une croissance excessive du prix du métal viendrait entraver le taux de croissance prévu. Cette situation devrait encourager des redéploiements supplémentaires de l'industrie de l'aluminium vers des sites où l'on produit de la bauxite de bonne qualité et où l'on obtient de l'électricité à bon marché. Ces circonstances peuvent représenter, pour les PVD, une chance d'accroître davantage leur part dans les différentes étapes de l'Industrie de l'Aluminium.

8. L'ALUMINIUM EST-IL UN METAL A MATURITE ?

Comparé aux autres métaux utilisés dans la construction, l'aluminium est le plus jeune et il a eu le plus grand taux de croissance dans les dernières décennies. L'aluminium est le seul métal dont le ratio d'utilisation (c'est-à-dire la consommation sur la production totale) est prévu pour croître dans toutes

les catégories de pays en l'an 2000 (12). En ce sens, l'aluminium n'est pas un métal arrivé à maturité. Selon une autre prévision (8), le taux de croissance moyen de consommation mondiale d'aluminium sera inférieur au taux de croissance de l'industrie en général. Toutefois, un taux de croissance de la consommation d'aluminium dépassant la moyenne mondiale peut être atteint dans les PVD. D'où on ne peut pas dire que l'aluminium est un métal arrivé à maturité en ce qui concerne ces pays.

Les techniques utilisées dans l'extraction de la bauxite et la production de l'alumine et de l'aluminium sont bien acquises. Leurs bases théoriques sont bien connues. Les possibilités importantes d'économie de dimension semblent être épuisées. De faibles évolutions régulières concernant particulièrement les économies d'énergie peuvent être prévues. Une percée technique dans les procédés de fabrication est hautement improbable pour le siècle actuel. Toutefois, la commande de la fabrication régulée par ordinateur peut apporter des résultats économiques importants.

Les bases théoriques des techniques mécaniques sont cependant moins nettes, ce sont plutôt des techniques où règne l'empirisme. Le futur pourra apporter des évolutions plus importantes dans les procédés de fabrication des produits semi-ouvrés, la commande des fabrications régulées par ordinateur pourra apporter des économies supplémentaires.

En ce qui concerne les produits et leurs applications, on peut plutôt dire qu'ils ne sont pas encore arrivés à maturité. L'aluminium n'est pas trop jeune et il reste encore des pistes à explorer pour son utilisation la plus économique. Le recyclage

de l'aluminium atteint déjà un niveau très élevé, mais l'utilisation des déchets n'est pas encore réalisée dans bien des domaines d'application. De nouveaux progrès attendus dans les techniques de fabrication, la production de nouveaux alliages et composites doivent renforcer la position de l'aluminium dans la compétition avec les autres matériaux dans les différents domaines d'application.

9. CONCLUSION

La situation de l'industrie de l'aluminium n'est pas brillante aujourd'hui, mais cela peut changer même en tenant compte des prévisions pessimistes. On peut espérer un accroissement important de la consommation, surtout chez les PVD. Les redéploiements futurs de l'industrie de l'aluminium vers les sites où la bauxite est de bonne qualité et l'énergie peu coûteuse, peuvent être espérés après 1990. Ces phénomènes justifient une étude des possibilités de création d'usines supplémentaires d'aluminium dans ces pays. Des solutions techniques probables et appropriées aux besoins de ces pays méritent une attention toute particulière.

D. ANALYSE DE LA TECHNOLOGIE INDUSTRIELLE DE L'ALUMINIUM

1. BAUXITE

1.1 Géologie de la bauxite :

L'aluminium est le métal le plus abondant dans la nature. Il représente environ 8,2 % de l'écorce terrestre. C'est l'élément commun à beaucoup de minerais, où il est normalement associé avec de la silice et de l'oxygène, avec des groupes d'hydrates,

avec le fer, le titane, et le calcium, et, à un degré moindre, avec les divers autres éléments. La bauxite est le minerai le plus important de l'aluminium ; c'est une roche sédimentaire, contenant au moins 50 % d'aluminium, de fer, d'oxyde de titane et d'hydrates, avec une prédominance de l'aluminium.

Le Manuel des Principes et Méthodes pour la Prospection de la Bauxite, rédigé par l'ONUDI, contient une étude de la géologie, de la minéralogie, de la spectographie, et des origines des bauxites ainsi que des méthodes de prospection, y compris les techniques de forage, l'organisation des campagnes de recherche, la préparation des rapports de campagne, et le calcul informatisé des réserves (13).

La bauxite, actuellement la principale source d'aluminium, est considérée comme une petite part seulement des réserves mondiale: Les autres sources possibles de ce métal peuvent être classées ainsi (11) :

- a) les roches ignées, les plus importantes étant l'anortyte, la nephelite, la syenite et la phonolite. Parmi celles-ci, la nephelite et la syenite sont les plus importantes commercialement ;
- b) les roches sédimentaires, telles que l'argile et les schistes. Les argiles à haute teneur d'alumine ont d'importants débouchés dans les céramiques, les réfractaires et les industries chimiques et papetières ;
- c) les roches métamorphiques et métasomatiques, et, parmi celles-ci, l'alunite est la plus prometteuse.

Il est techniquement possible d'obtenir l'aluminium à partir d'autres sources que la bauxite. Mais, actuellement, dans la majorité des cas, c'est le procédé Boyer de traitement de la bauxite qui permet les coûts les plus bas.

Les réserves mondiales identifiées de bauxite sont passées de 9 milliards à environ 50 milliards de tonnes en 10 ans. L'extraction annuelle de bauxite atteint en fait environ 100 millions de tonnes. La croissance impressionnante des réserves de bauxite est due, sans aucun doute, à la mise en oeuvre de méthodes de recherche géologiques modernes. Pour l'évaluation des gisements de bauxite, on pourrait mentionner par exemple l'emploi de senseurs à distance portés par avion (16) ou satellites (17), de même que l'utilisation de statistiques géologiques (18).

Les gisements de bauxite peuvent être classés en deux catégories karstiques et latéritiques. Les bauxites karstiques ont un aspect de grains fins, et sont associées avec de la pierre à chaux et ont tendance à avoir un taux important de fer. Les bauxites latéritiques sont trouvées dans les roches alumino-siliceuses et ont une granulation plus grossière. Les structures des gisements et les impuretés mélangées diffèrent selon ces catégories (11).

Les compositions chimiques et minérales des bauxites peuvent être caractérisées par les données énumérées dans le tableau 1 :

TABLEAU 1		
COMPOSANTS USUELS DES BAUXITES		
Nom	Composition chimique	Composition minérale
Alumine	40-65 %	Gibbsite $Al_2O_3, 3 H_2O$ Boehmite Al_2O_3, H_2O Diaspore Al_2O_3, H_2O
Silice	0,5-10 %	Quartz SiO_2 Kaolin $Al_2O_3, 2SiO_2, 2H_2O$
Oxyde de fer	3-30 %	Hématite Fe_2O_3 Goéthite Fe_2O_3, H_2O
Oxyde de titane	0,5-8 %	Anatase TiO_2 Rutile TiO_2
Eau	10-34 %	dans la gibbsite, boehmite, diaspore, kaolinite, goéthite
Traces d'éléments	Mn, P, V, Cr, Ni, Ga, La, Mg, etc	
Substances organiques		

Eu égard à la technique de sélection, la composition minérale du minerai est de première importance et, en conséquence, à cause de considérations pratiques, les bauxites peuvent être classées en 5 catégories :

- a) trihydrate, avec de la gibbsite comme principal minéral comptant moins de 5 % de monohydrate de la teneur d'alumine du minerai ;
- b) trihydrate contenant du quartz, la même chose que ci-dessus mais avec une importante teneur de silice sous forme inerte ;
- c) trihydrate mélange : avec de la gibbsite comme principal minéral mais avec une teneur de plus de 5 % de monohydrate ;
- d) monohydrate boehmitique, contenant principalement du monohydrate avec une teneur de diaspoire inférieure à 5 % ;
- e) monohydrate mélangé : bauxite boehmitique avec une teneur en diaspoire supérieure à 5 %.

A propos de la répartition quantitative, la plus grande quantité est représentée par les trihydrates. Les bauxites latéritiques qui appartiennent fondamentalement à ces groupes représentent 85 % des réserves mondiales (13). Les bauxites karstiques sont généralement du type monohydrate, quoiqu'elles puissent avoir une teneur considérable de gibbsite. Les bauxites du type trihydrate sont les moins chères à traiter parce qu'elles ne nécessitent que des températures et des pressions plus basses. Parmi les monohydrates, les diaspoires sont les plus difficiles à traiter.

A part les types de bauxites (11), il y a d'autres facteurs importants à considérer pour déterminer la valeur pratique d'un gisement donné. La teneur en alumine du minerai est fondamentalement déterminante de la quantité de bauxite à traiter pour obtenir une quantité donnée d'alumine. La silice réactive est la plus nuisible des impuretés car elle provoque des pertes

d'alumine. La silice inerte n'est pas particulièrement importante. Les autres principales impuretés, telles que les oxydes de fer et de titane, sont pratiquement insolubles pendant la dissolution de la bauxite. Toutefois, des équipements supplémentaires sont nécessaires pour leur séparation mécanique de la liqueur d'alumine. Les impuretés très solubles contenues dans la bauxite, telles que les substances organiques, les carbonates, les chlorures et les sulfates, ont aussi une influence sur les conditions de traitement.

Quand on évalue un gisement de bauxite, outre le type et la qualité du minerai, il faut prendre en compte les coûts des infrastructures nécessaires (11), l'attention est attirée sur la nécessité d'inclure l'évaluation technologique du processus des tests en laboratoire relatifs à la qualité de la bauxite.

L'annexe 8 montre les ressources mondiales en bauxite en fonction de l'état de leur développement (15). L'annexe 9 contient le système approprié de classification des ressources de bauxite (19). Il peut être relevé qu'environ 70 % des ressources sont concentrées dans quatre pays : la Guinée, l'Australie, le Brésil, la Jamaïque.

1.2 Extraction de la bauxite :

La nature des opérations d'extraction dépend de la situation du minerai, s'il est en surface ou s'il nécessite une extraction souterraine. L'extraction à ciel ouvert peut être réalisée en fonction de l'épaisseur, des propriétés physiques de la couche de surface et du niveau de mécanisation disponible. D'une façon générale, l'extraction à ciel ouvert est possible si la couche de surface a des qualités physiques favorables

(par exemple, sèche et sableuse) et si le nombre de filons est inférieur à cinq. La plus grande part de la bauxite produite dans le monde est extraite de mines à ciel ouvert. Les principales phases de ces opérations sont indiquées dans l'annexe 10.

L'extraction nécessite l'enlèvement de la couche de surface au moyen de bulldozers, de dragues et d'excavateurs à larges roues et avec l'emploi d'explosifs dans les terrains durs. La bauxite est extraite par des méthodes semblables et la couche de surface est remise en place pour restaurer la surface de la mine afin de permettre son réemploi agricole ou forestier (11). Si un enrichissement est nécessaire, on utilise généralement des procédés humides pour réduire la teneur en silice et en argile (20).

La plupart des bauxites demandent un broyage pour faciliter le traitement. Le traitement suivant est le séchage, qui peut être réalisé soit sur le site de la mine soit à la raffinerie. Si la bauxite doit être expédiée à une grande distance, elle est généralement desséchée à la mine pour réduire les coûts de transport. Le desséchage est réalisé dans des fours rotatifs à température modérée pour enlever l'humidité (11).

Dans le cas d'opérations à grande échelle et totalement mécanisée 0,4 à 0,7 h de main d'oeuvre sont nécessaires par tonne de bauxite extraite. Des renseignements relatifs aux procédés modernes et au matériel utilisé, par exemple en Australie, sont dans le numéro de novembre 1983 de l'Engineering and Mining Journal (21).

Les coûts d'investissements varient entre de très larges limites. Les principaux facteurs sont la taille du chantier, le nombre de filons, la possibilité de traiter le minerai à la mine (dés-

séchage, enrichissement, triage, etc...), les caractéristiques de l'emplacement, l'infrastructure nécessaire. Une méthodologie pour estimer les coûts en capitaux pour les mines de bauxite en fonction de ces facteurs est expliquée en (11). En conséquence ouvrir, par exemple, une mine de 4 millions de tonnes par an au Brésil coûtera environ 70 dollars US par tonne par an (exprimés en dollars 1980). En Guinée, une mine de la même capacité coûterait seulement 51 dollars US par tonne par an, la différence étant due au nombre de filons.

Concernant les coûts d'opération, les chiffres donnés dans le tableau 2 peuvent être relevés, à titre d'exemple, de la vaste documentation qu'ils reflètent (11) :

TABLEAU 2				
PRIX DE REVIENT ET CHARGES EN CAPITAL DE LA PRODUCTION DE LA BAUXITE				
AN 2000 - PRIX EN DOLLARS US PAR TONNE/AN DE BAUXITE DESSECH				
	Australie	Brésil	Guinée	Jamaïque
Prix de revient	10,20	12,60	10,30	11,00
Charges en capital	4,20	5,80	4,20	4,20
TOTAL	14,40	18,40	14,50	15,20

Les totaux relevés dans le tableau 2 ne donnent seulement qu'un ordre de grandeur des divers coûts suivant les caractéristiques géologiques des gisements. Si l'on veut faire des comparaisons sur l'opportunité d'utiliser telle ou telle bauxite, il faut en outre prendre en considération les éléments suivants :

- la qualité du minerai ;
- les coûts relatifs à la manutention sur le site, les taxes et les transports océaniques éventuels.

Extraction souterraine : dans plusieurs pays, par exemple la France, la Grèce, la Hongrie, la bauxite est aussi extraite de mines souterraines. Si la mécanisation est utilisée sur une grande échelle, les couches de minerai, d'une épaisseur inférieure à 2 mètres, ne sont pas exploitées. Un taux de 1,5 à 4 ouvriers par heure par tonne peut être atteint selon le niveau de mécanisation utilisé. Les investissements nécessaires sont généralement beaucoup plus importants que dans les mines à ciel ouvert. Les conditions géologiques, en particulier la présence d'eau, de charbon et de gaz, peuvent entraîner des complications et des coûts supplémentaires.

Une très grossière estimation des coûts probables d'investissement peut conduire actuellement de 80 à 150 US dollars par tonne par an sans tenir compte de l'investissement rendu nécessaire par un éventuel pompage de l'eau.

2. PRODUCTION D'ALUMINE

2.1 Généralités :

Environ 35 millions de tonnes d'alumine ont été produites dans le monde en 1980 et ce chiffre sera approximativement de 34,5 millions de tonnes en 1984. La production d'alumine de qualité non métallurgique peut être estimée pour 1984 à environ 2,5 millions de tonnes, le chiffre comparable pour les alumines métallurgiques étant de 32 millions de tonnes.

Comme il a été déjà signalé dans la section C, la capacité de production d'alumine de qualité métallurgique s'élève à approximativement 40 millions de tonnes en 1984 (9), chiffre incluant aussi l'alumine provenant de minerais autres que la bauxite. Quoique des capacités de production aient été fermées depuis, il reste une abondante capacité de production. Environ 95 % de toute l'alumine produite provient de la bauxite. La situation ne devrait pas évoluer beaucoup jusqu'à l'an 2000.

2.2 Le procédé Bayer :

La production d'alumine à partir de la bauxite s'effectue presque exclusivement par le procédé Bayer (23). Ce procédé consiste à dissoudre la bauxite enrichie à l'aide d'une solution de soude caustique, à séparer l'aluminate de sodium en résultant des résidus de boues rouges, à décomposer la liqueur d'aluminate, à précipiter et séparer les cristaux de l'hydrate en résultant et à calciner ce produit. En faisant retourner la liqueur précipitée d'aluminate à la dissolution de la bauxite, le cycle de production est bouclé.

On a joint un plan général sous la forme des opérations de ce procédé pour une unité de production importante (annexe 1.1). Il existe deux principales espèces de traitement, selon le type de bauxite :

- le procédé Bayer américain ;
- le procédé Bayer européen.

C'est la bauxite trihydratée qui peut être traitée le plus facilement et la température nécessaire est au maximum de 140 à 145°C. Le traitement de telles bauxites est caractéristique des usines d'alumine d'Amérique et d'Australie. Ces bauxites peuvent être dissoutes par une solution de soude caustique d'environ 120 à

140 g de Na_2O_c par litre. La précipitation est effectuée à une concentration de 90 à 110 g/l de Na_2O_c , l'hydrate d'alumine est séparé. Les gros grains sont transformés en alumine sableuse par la calcination, ayant une composition à l'état gamma relativement élevée.

Le procédé Bayer américain est dit modifié si la bauxite à traiter est du type trihydrate mélangé (gibbsite mêlée à un peu de boehmite). Dans ce cas, la température de dissolution est portée à 240°C avec une moindre concentration de soude caustique (environ 150 g/l de Na_2O_c) (11) (24). La précipitation et la calcination ne sont pas modifiées. Et le produit final est de l'alumine sableuse.

La dissolution des bauxites monohydratées nécessite des températures plus élevées ($220-260^\circ\text{C}$). Les usines européennes utilisent fréquemment ce genre de bauxites. De plus, une haute pression est aussi nécessaire et une solution de soude caustique plus concentrée (180-220 g/l de Na_2O_c) doit être utilisée. La concentration de précipitation est de 130-160 g/l de Na_2O_c . Il n'y a pas de séparation, l'ensemencement est fait avec de grandes quantités de semences, d'où un produit beaucoup plus pur. Cet hydrate est calciné à une température plus élevée. L'alumine obtenue est formée dans une large mesure de particules alfa (alumine farineuse). Les caractéristiques de l'alumine sableuse ou farineuse sont mentionnées dans l'annexe 12.

Toutefois, les techniques des procédés Bayer américain et européen se sont rapprochées récemment. Les utilisateurs de la technique Bayer européenne ont diminué leur dissolution et, dans une certaine mesure, leur concentration de précipitation afin de produire une alumine sableuse. De leur côté, les usines utilisant le procédé Bayer américain ont élevé leur concentration de préci-

pitation jusqu'à un certain point afin d'économiser de l'énergie dans la dissolution. Evidemment, de cette façon, la taille des gros grains (bruts) d'hydrate pourrait être maintenue. Quelques détails supplémentaires seront étudiés dans le chapitre E.

Les températures de dissolution des bauxites diasphoriques sont de 240 à 160°C et même des températures plus élevées seraient avantageuses. Les autoclaves ne sont toutefois pas utilisables aux températures beaucoup plus élevées que 260°C à cause de l'épaisseur des parois rendue nécessaire par l'augmentation de pression due à ces températures. Peut-être que l'emploi de tubes de réaction serait plus économique et mieux adapté, permettant d'atteindre des températures de 300°C (voir chapitre E). On doit utiliser de la chaux lorsque l'on traite de la bauxite diaphorique.

Dans la partie D la./ de ce rapport, on a déjà expliqué quelques idées sur l'influence de la composition de la bauxite, en particulier l'importance des impuretés sur les conditions de raffinage. On doit ajouter deux remarques :

- a) les boues rouges provenant de la bauxite contenant de la goethite ont généralement une faible capacité à se fixer et à épaissir. Les problèmes dus à la présence de goethite peuvent être résolus, toutefois, avec certains additifs introduits dans la dissolution (25).;
- b) l'accumulation d'impuretés solubles dans les bauxites est peu souhaitable parce qu'elle diminue le rendement du traitement (voir chapitre E).

Dans la production d'alumine, la qualité des matériaux et la consommation d'énergie dépendent principalement de la qualité de la bauxite utilisée, de la taille de l'usine, du type d'alumine

produit, du niveau de la technique employée et finalement, des équipements utilisés. Pour donner une idée, la consommation spécifique est indiquée dans le tableau " (33) :

<u>TABLEAU 3</u>	
CONSOMMATION SPECIFIQUE DANS LES USINES D'ALUMINE	
Bauxite (poids sec)	2,0 à 2,5 t/t d'alumine
Soude caustique	0,07 à 0,17 t/t d'alumine
Fuel (pour la production de vapeur et la calcination)	0,28 à 0,38 t/t d'alumine
Electricité	300 à 350 KWh/t d'alumine

Il faut aussi ajouter que 7 à 9 tonnes d'eau par tonne d'alumine produite sont nécessaires et dans certains cas, de la chaux et des produits floculants devront être aussi utilisés.

Dans d'autres cas, il peut être possible de produire de l'électricité par autoproduction. L'électricité ainsi produite peut couvrir les besoins de l'usine (voir aussi 2.3.2.).

2.3 Les usines d'alumine :

2.3.1. Taille, dimension économique :

Dans les années 50, les lignes de production des usines les plus modernes étaient construites pour produire de 120 à 150.000 tonne par an. Dans les usines de production d'alumine récentes, les lignes de production atteignent 300 à 500.000 tonnes par an.

Les capacités des usines atteignent 1 million de tonnes/an et même plus. Ainsi, par exemple, l'usine de Sao Luis, de la Consorc. Alumax au Brésil doit voir sa capacité initiale de 500.000 tonnes par an passer à 1 million de tonnes par an, plus tard. La plupart des usines australiennes ont des capacités de 1 milliard de tonnes par an et même plus. L'usine de Kwinana, d'Alcoa, a une capacité de 1,4 millions de tonnes par an, celle de Pinjarra, toujours d'Alcoa, de 2,5 millions de tonnes par an. La toute récente usine de Queensland Alumina, à Gladstone, a une capacité de 2,440 millions de tonnes par an avec l'objectif d'atteindre 2,740 millions de tonnes par an, etc... (9).

L'annexe 13 (recopiée de (11)) montre l'importance des différents facteurs sur les coûts en capitaux des raffineries d'alumine. L'accroissement de la taille des lignes de production n'aboutit pas seulement à la réduction des coûts d'investissement spécifique mais aussi des coûts de mise en oeuvre pouvant être ainsi réduits en disposant d'unités plus importantes (par exemple, la consommation calorifique et d'électricité aussi bien que les besoins en main d'oeuvre) (23). Le facteur situation (voir annexe 13), varie de 1 pour les pays industrialisés à 1,25 pour les PVD. Les raisons en sont partiellement dans les différences entre les infrastructures d'ensemble existantes.

2.3.2. Dimension et infrastructure :

La production d'alumine nécessite de relativement grandes surfaces, par exemple une capacité de 600.000 tonnes par an nécessite un terrain de 80 à 100 hectares (terrain clos seulement), plus un espace pour les réservoirs à boues rouges qui pourrait être 2 à 4 fois plus grand selon les conditions données (23).

Les principales installations hors site et infrastructures nécessaires pour une usine d'alumine sont :

- a) un port ;
- b) l'approvisionnement en électricité ;
- c) l'approvisionnement en eau ;
- d) les réservoirs à boues rouges ;
- e) la base vie ;
- f) les chemins de fer, les routes.

NOTA a :

Pour produire une tonne d'alumine, 3,5 à 4 tonnes de minerai sont à manipuler. C'est l'une des raisons pour lesquelles les usines d'alumine sont souvent situées aussi près que possible des ports de mer. Les coûts d'installation d'un port varient selon les conditions locales. Pour une usine de 600.000 tonnes par an, le coût de la construction du port était estimé en 1978 entre 10 et 20 millions de dollars US (23).

NOTA b :

Plusieurs possibilités existent pour l'approvisionnement calorifique et d'électricité des usines d'alumine. Elles dépendent des techniques utilisées et des conditions offertes par la localisation de l'usine :

- i) un réseau de distribution électrique convenable existe sur le site : dans ces cas là, -en se basant sur des considérations économiques, il y a le choix entre 2 possibilités :
 - acheter son électricité et produire sa vapeur :
la totalité du besoin de l'usine en électricité est couverte par le réseau de distribution. Une chaufferie est installée dans l'usine pour fournir la vapeur à la pression correspondant à la technique de dissolution. La vapeur basse pression est fournie par un détendeur.
 - autoproduction :
une centrale électrique est installée dans l'emprise de l'usine pour fournir l'électricité par l'utilisation de

contre pression. Cette variante rend possible l'utilisation de la chaleur de la vapeur produite dans la chaudière d'une part pour actionner la turbine, d'autre part comme source de chaleur pour le traitement basse température. L'avantage de la production d'énergie par turbine à contre pression dépend entièrement du besoin de l'usine en chaleur basse température.

Dans le cas de la technique de dissolution à basse température, la plus grande part de la puissance électrique requise peut être produite par autoproduction. Dans ce but, une pression convenable de la chaudière doit être choisie et une turbine à extraction et à contre pression est installée. Le réseau de distribution électrique n'est utilisé que dans le cas de l'équilibrage des variations possibles de charge et dans les cas d'urgence.

- ii) Il n'y a pas de réseau de distribution électrique fiable sur le site : dans ce cas, il faut construire une centrale électrique autonome en prévoyant les options techniques expliquées ci-dessus. Naturellement, cette partie de la demande d'électricité de l'usine d'aluminium qui ne peut pas être fournie par autoproduction et les capacités de réserve nécessaires demandent la construction d'une centrale électrique appropriée par condensation.

En relation avec les coûts d'investissement d'une centrale électrique, il faut signaler que ces coûts varient grandement selon la solution technique adoptée. Dans le cas d'une centrale (autonome) associée à une usine de 300.000 tonnes par an utilisant la technique haute pression, les coûts de la dissolution à haute température s'élevaient par exemple à 17 % de l'investissement total au début des années 70.

NOTA c :

La consommation d'eau pour l'usage industriel d'une usine d'alumine est généralement de 7 à 9 m³/t d'alumine, plus l'eau potable pour l'usine et la base vie.

NOTA d :

Du point de vue de la protection de l'environnement, c'est le réservoir à boues rouges qui est l'élément le plus sérieux d'une usine d'alumine. La quantité de boues rouges produite équivaut ou même dépasse celle d'alumine. Dans certaines usines, on se contente de les rejeter à la mer, mais aujourd'hui, ceci est de plus en plus interdit. Un grand soin doit être pris dans l'emploi de réservoirs à boues rouges afin qu'il n'y ait pas de fuites permettant aux éléments des boues rouges d'atteindre le sol. Par ailleurs, les réservoirs ne doivent pas être trop éloignés de l'usine afin de ne pas augmenter les frais de pompage des boues. D'où la possibilité d'une évacuation bon marché des boues doit aussi compter dans le choix du site de l'usine.

NOTA e :

Afin d'assurer un fonctionnement sans perturbation, la base vie doit être bâtie près de l'usine, même s'il existe des villages plus importants dans le voisinage de l'usine. Souvent des villages entiers et neufs doivent être créés, comprenant, outre les logements des écoles, des installations pédagogiques et distractives, hôpital ou infirmerie, et autres services.

NOTA f :

Si l'usine d'alumine ne peut pas être implantée au bord de la mer, un raccordement ferroviaire peut être nécessaire. Dans tous les cas, l'usine d'alumine devrait être raccordée au système routier intérieur.

2.3.3. Site :

Les usines d'alumine étaient la première partie d'un complexe intégré allant de l'extraction de la bauxite aux usines d'électrolyse d'aluminium. La croissance de la demande de métal pourrait, toutefois, ne pas être suivie par la croissance des usines intégrées. D'où soit la bauxite doit être importée (principalement des PVD) et/soit l'alumine a été produite sur le site des mines et a été transportée vers les usines d'électrolyse. La tendance la plus récente est d'avoir des complexes allant des mines à l'électrolyse (par exemple, au Brésil, au Venezuela et en Australie).

A côté de ces aspects importants, les facteurs les plus importants dans le choix des sites sont (23) :

- la proximité de ports, de voies d'eau, de chemins de fer et de routes. (La quantité de minerai à transporter -en ne prenant pas en compte les boues rouges- atteint 3,5 à 4 fois celui de la production de l'usine) ;
- une solution satisfaisante, indépendante des saisons, pour l'approvisionnement en eau industrielle et potable ;
- une possibilité d'éliminer à bon compte les boues rouges et autres déchets ;
- les conditions météorologiques et la nature du sol ;
- la possibilité de réaliser l'infrastructure nécessaire ;
- la localisation du marché pour l'aluminium produit (cette question sera étudiée en détail au chapitre F).

2.4. Fonctionnement des usines d'alumine :

2.4.1. Coûts de production :

Si l'on considère les chiffres donnés dans le tableau 3, les coûts de production d'une tonne d'alumine étaient estimés à

147 US dollars en 1978 (23). Ce chiffre comprenait 57,6 US dollars pour le coût de la bauxite par tonne d'alumine (ou 24 US dollars par tonne de bauxite), en remarquant que, dans le cas où l'usine d'alumine dispose de sa propre mine de bauxite à ciel ouvert et que seulement le coût net de l'extraction est pris en compte, les coûts de production pourraient être considérablement réduits. La soude caustique est prise en compte pour 150 US dollars par tonne et le fuel pour 65 US dollars par tonne.

En raison du fait que les prix (spécialement pour le fuel) sont beaucoup plus élevés aujourd'hui, les coûts de production d'alumine ont considérablement augmenté. On verra dans l'annexe 14 les coûts de production des 10 plus anciennes et des 6 plus récentes usines, ces coûts comprennent les coûts variables et ceux en capital des années 80 (26). Une analyse de ces données montre que les coûts variables les plus faibles se trouvent en Australie (124-126 US dollars par tonne) et qu'il y a des usines où les coûts variables seuls dépassent 200 US dollars par tonne. BIRD (8) fait référence à une étude des coûts de production d'alumine et des prix contractuels rendus disponible par James F. KING. Selon BIRD, KING répartit toutes les usines d'électrolyse de 1 à 5 pour les fourchettes de prix (voir tableau 4).

très basse	au-dessous de 175 US dollars par tonne livrée			
basse	de 175 à 199 US dollars	"	"	"
moyenne	de 200 à 224 US dollars	"	"	"
haute	de 225 à 249 US dollars	"	"	"
très haute	au-dessus de 250 US dollars	"	"	"

A la mi-1984, voir plus loin, le coût CIF moyen pondéré d'alumine livrée aux compagnies d'aluminium était de 204 US dollars par tonne. A la même époque, les prix du marché spot de l'alumine étaient beaucoup plus bas (150 US dollars) ou même en dessous de ce chiffre en 1985.

Un document plus récent montre clairement qu'il n'y a pas de coût défini pour la production d'alumine. Les composantes du coût comptant pour la production de l'alumine varient d'une usine à l'autre, ils pouvaient varier de 60 US dollars (le minimum) à 313 US dollars (le maximum) par tonne d'alumine. Ceci donne un coût moyen de 186,5 US dollars par tonne d'alumine, ce qui est, par coïncidence, très près de la moyenne pondérée de 204 US dollars donnée ci-dessus. Les charges en capital, variant entre 70 et 190 US dollars par tonne d'alumine, viennent s'ajouter à cela.

Les coûts estimés de production d'alumine pour l'an 2000 sont expliqués au paragraphe II. Par conséquent, le coût total de production (y compris les charges en capital) exprimé en US dollars 1980 sur la base FOB, sera compris entre 292 US dollars et 378 US dollars sur les sites choisis selon les bauxites traitées et les sites. Le plus bas est alloué au traitement local de la bauxite brésilienne, le plus élevé au traitement de minerai diasporique grec.

Les coûts de transport de l'alumine, si elle n'est pas traitée sur place, doivent être ajoutés. Ces coûts varient de 6 US dollars par tonne d'alumine entre la Jamaïque et la côte Est des Etats-Unis à 43 US dollars par tonne d'alumine pour l'alumine australienne rendue en Europe de l'Ouest.

Bien que les prix de traitement sur place des bauxites australiennes et brésiliennes soient très voisins, si elle est expédiée sur la côte Est des Etats-Unis, la brésilienne sera beaucoup moins chère (309 US dollars par tonne contre 335 US dollars par tonne).

2.4.2. Entretien - Pièces de rechange :

Dans la plupart des cas, les travaux d'entretien seront exécutés par le personnel de l'usine, quoiqu'il y ait toujours la possibilité dans les pays industrialisés d'engager une société de service pour ce travail ou pour une partie. Toutefois, dans les PVD, l'usine aura la charge de tout l'entretien dans la plupart des cas. Pour être capable de le faire, il faut installer des ateliers adéquats dans l'usine et prévoir le personnel d'entretien.

Les coûts d'entretien et de matériel s'élèvent à environ 8 à 9 % des coûts d'alumine auto-approvisionnée selon un standard US prix d'aluminium/coût de la maintenance pour l'année 1984 (28). Le coût réel de 19,1 US dollars doit être coupé en parties égales entre le coût de l'entretien et celui du matériel et frais divers.

En ce qui concerne les usines installées dans les PVD, un stock de pièces de rechange représentant environ 3 % de la valeur totale de l'investissement en matériel, semble être une bonne approche.

2.5 Traitement des bauxites pauvres et des matériaux autres que la bauxite :

Il y a plusieurs méthodes de traitement des bauxites pauvres et des matériaux autres que la bauxite (29). Parmi les procédés possibles, on doit faire mention de la technique de concrétion des procédés combinés, du procédé par la "nephétine" et l'"alunite", car ils sont utilisés industriellement. Une brève description de

ces procédés est donnée dans l'annexe 15. De plus, le procédé par chlorure est étudié, sous certains aspects, dans le chapitre E

2.6 Alumine de qualité non-métallurgique :

L'expression alumine non-métallurgique ou spéciale recouvre une gamme de produits alumineux variés ayant des caractéristiques spéciales (pureté, forme et taille des grains, etc...) qui sont utilisés pour des applications variées/ Leur prix est supérieur à celui de l'alumine de qualité métallurgique. Le facteur d'augmentation du prix évolue entre 2 et 100. Plus la valeur du produit augmente, plus la demande décroît.

La capacité de production de ces aluminés spéciales peut être estimée à environ 3 millions de tonnes par an, pour le monde entier. Pour la plus grande part de ces installations produisant ces aluminés spéciales, le prix n'est pas plus élevé que 2 ou 3 fois celui de l'alumine métallurgique. Elles sont utilisées, par exemple, comme abrasifs, céramiques et réfractaires. La plupart d'entre elles peuvent être obtenues par l'utilisation du procédé Bayer, avec certaines modifications (30) :

- diminution des impuretés, principalement le sodium, en modifiant la précipitation du procédé Bayer (utilisant la précipitation chaude). La proportion de Na_2O contenue peut être réduite à 0,2 %. Si l'on a besoin de chiffre plus bas, un lavage partiel après semi-estimation peut être utilisé ;
- réglage de la répartition alfa-gamma et la surface spécifique des grains par calcination ;
- triage ou miniaturisation pour obtenir les tailles de particules voulues.

Les problèmes relatifs aux applications et à la production de ces aluminés de haute valeur sont en dehors du champ de la présente étude.

2.7 Sous-produits de la fabrication de l'aluminium :

Il y a deux principaux sous-produits de la fabrication de l'alumine : le vanadium et le gallium. Une séparation est possible, comme il est montré ci-dessous (24, 30) :

une grande partie du Va_2O_5 contenu dans les bauxites dissoutes pendant la dissolution et s'enrichit dans le circuit du processus liquide. Les sels riches en Va_2O_5 sont séparés par cristallisation de la liqueur utilisée soit avant soit après évaporation.

Dans le cas où l'on utiliserait le procédé par la chaux, dans la dissolution, la récupération du Va contenu est possible, mais seulement en petite quantité, quoiqu'il y ait une possibilité de récupérer le vanadium après une concentration de la liqueur utilisée à 200 g/l. Mais il est indiqué de séparer d'abord un sel de soude à basse teneur de Va_2O_5 et de refroidir la liqueur ne contenant plus de soude pour ajuster ses teneurs en Pb, Va et Fl au taux convenable et séparer les cristaux à teneur élevée en Va de la liqueur. Les sels de Va séparés sont généralement transformés en Va_2O_5 contenant des produits d'une pureté variable ou en ferrovandium. La plupart des procédés de fabrication de Va_2O_5 peuvent être caractérisés par les étapes de production suivantes :

- enrichissement (généralement par cristallisation fractionnée) ;
- dissolution du cristal et production d'une solution de vanadate
- purification de la solution de vanadate par différents moyens (24)

Les polyvanadates peuvent être transformés en Va_2O_5 lamellaire par un procédé à multiples étapes. En pratique, l'unique source de Ga est l'alumine. L'économie de production de Gallium dépend de la production de Ga issu de la production de bauxite, c'est-à-dire de la teneur de Ga dans la solution, de la pureté de la liqueur et de la technologie utilisée pour la séparation. L'extraction est effectuée à partir de la concentration de la liqueur utilisée

(liqueur forte). Sa purification est nécessaire pour obtenir un bon rendement dans la séparation du métal.

Pour la séparation du Ga, on utilise les technologies de cémentation par le mercure et l'aluminium. Cette dernière est préférée pour la protection de l'environnement. Le procédé utilisant le mercure donne actuellement des pertes de moins d'1 kg de Hg pour 1 kg de Ga, à cause de cela, il pourrait redevenir compétitif.

2.8 Rejets (boues rouges) :

Le seul rejet important de la production d'alumine est ce que l'on appelle les boues rouges. Leur composition chimique et minérale dépend pour l'essentiel de la qualité de la bauxite et de la technologie de traitement. Les principaux composants évoluent généralement dans les fourchettes données dans le tableau 5 (31) :

TABLEAU 5	
PRINCIPAUX COMPOSANTS DES BOUES ROUGES	
	en % (sur boues sèches)
Fe ₂ O ₃	30 à 60
Al ₂ O ₃	5 à 20
SiO ₂	1 à 20
Na ₂ O	1 à 10
CaO	2 à 8

Les principaux composants de la partie liquide accompagnant le reliquat sont la soude caustique et les cendres de soude (0,5 à 8 g/l de la concentration totale de Na₂O et quelque 0,5 à 8 g/l de Al₂O₃).

L'attention a déjà été attirée au paragraphe 2.3.2. sur l'importance d'une destruction de ces résidus, respectueuse de l'environnement. Les boues rouges restent un résidu et leur utilisation n'a pas encore trouvé de solution. Il existe des possibilités prometteuses (31) mais aucune n'a reçu d'application à l'échelle industrielle. La récupération du sodium et de l'alumine contenus dans les boues rouges ne résoudra qu'une partie du problème. La récupération du fer qu'elles contiennent est faisable mais a perdu son importance pour des raisons économiques. Il peut être utilisé comme additif dans la production de fer et pour remplacer les concrétions de pyrite dans la production de ciment. Toutefois, les quantités utilisées restent insignifiantes. Leur utilisation pour l'amélioration des sols, la construction des routes, etc..., sont aussi peu importantes. Leur emploi pour la production de céramique lourdes doit être une méthode prometteuse pour employer de grandes quantités de boues rouges et résoudre en même temps les besoins croissants de l'industrie du bâtiment.

3. ELECTROLYSE DE L'ALUMINIUM

3.1 Généralités :

La production mondiale d'aluminium primaire atteignait presque 16 millions de tonnes en 1984 ; à cela s'ajoutent plus de 5 millions de tonnes d'aluminium secondaire.

La capacité de production d'aluminium primaire s'élevait à environ 18,5 millions de tonnes en 1984, d'où un excédent de capacité de production de 2,5 millions de tonnes qui était inutilisé.

3.2. Le procédé Hall-Héroult :

Le seul procédé utilisé à l'échelle industrielle pour la production d'aluminium primaire est le procédé Hall-Héroult vieux de

100 ans. Le principe de ce procédé consiste en électrolyse de Al_2O_3 (alumine) dans du Na_3AlF_6 fondu à $960^\circ C$ dans des cuves de 50 à 230 KAmperes avec des anodes de charbon consommable, dans un bain d'aluminium comme cathode. La cuve d'électrolyse est l'unité de base d'une usine d'électrolyse d'aluminium. En ce qui concerne la structure de l'anode, deux types ont été développés pour les cuves : les anodes continues (Söderberg) et les anodes précuites. Les anodes continues sont des barres horizontales ou verticales. Les cuves à anode horizontale, type Söderberg, sont dans une zone principale fermée avec une extraction de la cellule efficace et locale, mais il est difficile de les utiliser avec des ampérages supérieurs à 100 KAmperes. Le type ancien n'est plus utilisé mais quelque 1/6e des installations mondiales de production d'aluminium utilisaient en 1978 ces anodes. Leur part va décroissant.

Les cuves à anodes Söderberg verticales peuvent être partiellement fermées et ainsi l'efficacité du dégagement de gaz de la cuve n'est que de 60 à 80 % seulement (23). Quelque 1/3 des installations étaient équipées de telles cuves en 1978, mais cette proportion décroît aussi, malgré le développement considérable qui a été réalisé, dans les années 70, de ce type de cuve (ampérage s'élevant jusqu'à 160 KA, permettant une productivité élevée).

L'un des avantages des anodes Söderberg est qu'il n'y a pas besoin d'ateliers séparés pour cuire les anodes, par conséquent, les coûts d'investissement sont moindres pour des capacités plus petites. Les récents exigences et règlements concernant la protection de l'environnement et des lieux de travail peuvent être résolus avec ce type de cuve ; toutefois, seulement si l'on a prévu une forte ventilation du hall d'électrolyse et un balayage complet des gaz.

Effectivement, dans au moins la moitié des installations de production d'aluminium du monde, on utilise des cuves avec des anodes précuites. Les cuves existent en deux variantes : ouverture latérale ou centrale. Les cuves à ouverture latérale avaient à l'origine leur zone de traitement à ciel ouvert, plus tard, elle fut recouverte par des couvercles, mais il fallait relever ces couvercles pour charger l'alumine. Cette dernière opération avait l'inconvénient de polluer très fortement le hall de production avec les gaz de la cuve, du coup, il fallait installer un balayage supplémentaire des gaz.

Les bassins à ouverture centrale sont considérés comme les plus modernes. Ils opèrent avec une zone de travail relativement bien close qui est ouverte seulement en partie et rarement. Le chargement d'alumine est effectué automatiquement en position de fermeture. L'évacuation des gaz contenus dans la cuve est efficace, ainsi il n'y a pas besoin de prévoir le filtrage des gaz vers l'extérieur. Les anodes sont fabriquées à partir de coke de pétrole et de brai. La fabrication de la pâte pour les anodes Söderberg est semblable à celle des anodes précuites, mais, dans le cas des anodes précuites, il faut ajouter le passage à la press et la cuisson. Le schéma du déroulement de la production des deux se trouve en annexe 16.

La pollution de l'environnement est un sérieux problème pour les usines d'électrolyse. La pollution est provoquée par des composés fluorés. Dans le cas des anodes Söderberg, il y a aussi les composés de distillats de goudron parmi les principaux agents polluants des gaz de cuve et aussi de l'extraction vers l'extérieur. La quantité de dégagement de fluor est de 15 à 18 g par tonne de métal produit, c'est-à-dire une usine d'électrolyse d'une capacité

de 100.000 tonnes par an, pourrait émettre environ 1.500 tonnes par an de fluor polluant s'il n'y avait un filtrage des gaz. La limite supérieure admise de dégagement de fluor dans l'environnement est aujourd'hui de 0,5 à 2 kg par tonne d'aluminium, dans la plupart des pays. Donc, la construction de la cuve et la technique employée devront assurer une récupération convenable et le filtrage des gaz avant leur rejet.

La cuve de type à ouverture centrale et à anode précurée semble être la meilleure solution pour assurer une récupération satisfaisante des gaz. Le filtrage des gaz se faisait précédemment à l'aide de filtres humides, mais ceux-ci étaient onéreux et la récupération du fluor est coûteuse aussi. Récemment, le filtrage sec des gaz a commencé à prévaloir, basé sur l'emploi d'alumine ayant une grande surface active (alumine sableuse) pour absorber le fluor. Après avoir été en contact avec le gaz dans le filtre et avoir absorbé les composés fluorés, l'alumine sableuse est envoyée dans les cuves et est réinjectée dans le processus au niveau des chargeurs, remettant dans le circuit le fluor absorbé.

Les paramètres d'une usine d'électrolyse (exprimés en besoin en matériels principaux et électricité par tonne de métal) sont donnés pour 1978 dans le tableau 6 (23) :

Alumine	1,93 à 1,96 t/tonne de métal
Coke de pétrole	0,44 à 0,47 t/tonne de métal
Goudron	0,11 à 1,12 t/tonne de métal
Composés fluorés	0,025 à 0,03 t/tonne de métal
Electricité	15.000 à 16.000 KWh/tonne de métal

Les nouvelles usines d'électrolyse utilisant les anodes précuites ont toutefois de meilleures caractéristiques (voir tableau 7 (9)) :

PARAMETRES POUR LES USINES D'ELECTROLYSE UTILISANT DES ANODES PRECUTES, NOUVELLEMENT CONSTRUITES	
Alumine	1,925 t/tonne de métal
Coke de pétrole	0,34 t/tonne de métal
Goudron	0,09 t/tonne de métal
Composés fluorés	pas de données
Electricité	13.693 KWh/tonne de métal

Les chiffres extrapolés relatifs à l'amélioration possible de la consommation d'électricité des usines d'électrolyse sont donnés dans l'annexe 17 (11).

3.3 Usines d'électrolyse d'aluminium :

3.3.1. Taille - Dimension économique :

Aujourd'hui, on utilise des cuves de 160 à 230 KAmère. Une cuve de cet ampérage produit 300 à 550 tonnes par an d'aluminium. Les cuves sont en série, le nombre de cuves dans les séries peut varier entre 120 et 240. D'où une ligne de production donne en moyenne entre 50 et 130.000 tonnes par an d'aluminium. En règle générale, pour atteindre la taille critique, il faut construire aujourd'hui des lignes comprenant au minimum deux lignes de cuves. Ce qui donne une capacité minimale de 1.000.000 tonnes/an pour une usine rentable.

Les lignes plus courtes nécessitent pour une même capacité un investissement quelque peu plus important pour l'équipement électrique, mais les conditions de travail sont plus sûres. La tension électrique de la ligne de cuves est plus basse de bout en bout. Plus de deux lignes de cuves avec une capacité de 130.000 tonnes par an chacune peuvent provoquer en revanche des problèmes de pollution pour l'environnement en dépit de la récupération et du filtrage des gaz simplement par leur masse considérable pour une capacité de production dépassant un total de 260 à 300 tonnes par an (23, pp. 31 et 32). Néanmoins, les conditions locales, les considérations financières, l'énergie bon marché, un marché potentiel, justifient finalement le choix de la taille de l'usine. Des usines d'une capacité inférieure à environ 100.000 tonnes par an ne sont pas justifiées, toutefois, dans le cas de l'emploi d'anodes précuites. De telles anodes doivent être fabriquées à l'usine, sinon elles coûtent plus cher, leur transport présente des difficultés et l'utilisation des extrémités résiduelles, représentant 20 à 30 % du poids, ne peut pas être résolu. La capacité critique la plus petite pour des usines utilisant de telles anodes tourne autour de 100.000 tonnes par an.

Comme pour toute installation industrielle, les coûts en capital par unité produite dans une usine d'électrolyse d'aluminium décroissent avec l'augmentation de la taille de l'usine (11). Toutefois, les économies dues à la taille critique sont plutôt limitées, puisque les grandes usines ne diffèrent des petites que par le nombre de lignes de cuves installées. Tenant compte des facteurs d'implantation selon le point 2.3.1. aussi bien que des autres données (11), une usine de 100.000 tonnes par an installée dans un pays industrialisé contenait 3.400 dollars par tonne de capacité de production, tandis qu'une unité de 200.000 tonnes par an coû-

terait 2.900 dollars US par tonne de capacité de production dans les mêmes conditions. Les mêmes valeurs pour une usine lointaine dans un PVD sont les suivantes : 4.100 dollars US par tonne de capacité de production pour une usine de 100.000 tonnes par an et 3.600 dollars US par tonne de capacité de production pour une usine d'une taille double.

3.3.2. Emprise et infrastructure (23) :

Une usine ayant une capacité de 100.000 tonnes par an nécessite une emprise de 30 à 40 hectares plus une réserve en vue d'une extension possible. Elle ne devra pas être implantée à moins de 500 m d'un habitat, même si une protection convenable de l'environnement est assurée.

En ce qui concerne l'infrastructure, les principaux besoins sont les suivants :

- a) moyens de transport ;
- b) électricité ;
- c) eau ;
- d) base vie.

NOTA a :

Les quantités à transporter vers l'usine ou vers l'extérieur demandent environ quatre fois la capacité de l'usine. Soit un chemin de fer et/ou un système routier apte au transport lourd, soit un port de mer est nécessaire. Des installations spéciales sont nécessaires pour décharger l'alumine et les matériaux carbonés.

NOTA b :

Le problème important de l'approvisionnement en électricité a été étudié séparément au paragraphe 3.4.

NOTA c :

Pour le fonctionnement d'une usine industrielle, il faut prévoir 3 à 4.000 m³ d'eau pour 100.000 tonnes de métal par an, même avec une installation de recyclage. L'approvisionnement en eaux potable et sanitaire doit être assuré en supplément.

NOTA d :

La tranquillité du personnel peut aussi avoir des répercussions sur l'infrastructure (logement, transport, etc...).

3.3.3. Emplacement (localisation) :

Les conditions idéales sont réunies quand on a des sources d'énergie bon marché et de bonne bauxite proches l'une de l'autre, quand on dispose d'un marché local pour l'aluminium produit ou quand il peut être transporté par voie de mer, à bon compte, vers le marché acheteur (23). Ces conditions idéales ne sont pas fréquemment dominantes. Dans le passé, les usines étaient plutôt installées, dans les pays industrialisés, à proximité du marché de l'aluminium et dans la mesure du possible, près de sources d'électricité bon marché. La bauxite ou l'aluminium étaient importés. L'accroissement de la demande d'aluminium nécessitait la construction de centrales électriques de plus en plus importantes pour les nouvelles usines et les ressources en énergie bon marché qui découlaient de cette demande n'étaient généralement pas disponibles dans les pays industrialisés. L'accroissement des coûts de transport jouèrent aussi un rôle dans le scénario actuel : l'attention

s'est portée sur l'emplacement de nouveaux centres industriels, sur des sites particulièrement avantageux, ou la recherche d'emplacements d'usines jouissant de prix favorables pour l'énergie et de coûts de transport faibles.

Dans le cas où l'énergie est bon marché, mais où l'alumine ou la bauxite doivent être importées, il y a nécessité pour l'usine à disposer de moyens de transport bon marché. C'est pour cette raison que des usines se sont implantées au bord de mer ou le long de voies navigables. Le coût des transports terrestres peut s'élever à de tels montants qu'une grande partie des avantages de l'énergie à bon marché est perdue.

Les problèmes d'implantation deviennent plus compliqués si l'énergie bon marché est relativement située loin du rivage ou des voies navigables. Dans ces cas-là, outre les coûts de transport de matériaux bruts et de métal produit, ceux de l'énergie doivent être pris en considération pour trouver la solution optimale. Toutefois, dans la plupart des cas, la construction d'une ligne de transport reste encore le meilleur moyen même si cela accroît les coûts d'investissements en infrastructure. Il faut considérer qu'une fois l'électricité amenée au rivage, elle peut être aussi utilisée dans d'autres activités industrielles.

3.4. Electricité pour les usines :

Depuis que l'aluminium est grandement consommateur d'énergie électrique, les producteurs d'aluminium demandent des sources bon marché d'énergie. Dans l'annexe 18, un tableau donne le coût de l'énergie électrique pour les usines d'aluminium (coût à la centrale) en 1980, en dollars US par kilowatt heure (11). Les variations possibles des sources existantes d'énergie à bon marché

sont indiquées aussi bien que les coûts probables d'énergie attendus des nouveaux projets. Les centrales hydroélectriques et à gaz offrent les meilleures possibilités pour la production d'électricité à bon compte : 26 millièmes de dollars US par KWh pour des projets précis à 20 millièmes par KWh pour une centrale hydro très performante ou à gaz et à 30 millièmes pour une centrale hydro peu performante. L'énergie produite par les centrales à charbon ou nucléaires coûte plus cher, par exemple 50 millièmes par KWh, sauf en Australie.

Il existe encore dans le monde des sources d'énergie grandement inexploitées, principalement hydroélectrique ou à gaz. L'Océanie dispose aussi de charbon qui peut être transformé en électricité(1

On trouvera dans l'annexe 19 les sources actuelles et possibles d'électricité bon marché disponibles pour l'électrolyse de l'aluminium. On peut tirer de ce tableau quelques conclusions au sujet de la redistribution future de l'industrie de l'aluminium, déjà citée dans les paragraphes 4 et 7 du chapitre C.

3.5. Fonctionnement des usines d'électrolyse d'aluminium :

3.5.1. Coûts de production :

Les coûts d'alumine, d'électricité et en capitaux sont les plus importants éléments de coût dans l'électrolyse de l'aluminium. (11, 23). En comparant les données de 1978 (23) à celles de 1983 (11), leur importance est toutefois quelque peu différente :

	<u>1978</u> (23)	<u>1983</u> (11)
Alumine	25-30 %	30 %
Electricité	20-25 %	16-30 %
Coûts en capital	25-30 %	16-35 %

BIRD donne des chiffres plus exacts (8) provenant d'études de cas portant sur 3 nouvelles usines. Les résultats de l'un des cas étudiés (Australie) sont reproduits dans l'annexe 20. Les deux autres cas relatifs à deux usines canadienne et brésilienne ont les mêmes paramètres. Il y a de légères différences entre les coûts variables et les coûts totaux :

Coûts en dollars US par tonne d'aluminium			
	<u>Canada</u>	<u>Australie</u>	<u>Brésil</u>
Coût variable 1987	1.456,1	1.506,8	1.373,9
Coût total 1987	1.954,8	2.041,5	2.034,8

Les différences ont pour origine partielle les différences dans le prix de l'électricité et les coûts en capital. Le prix de l'électricité est le plus bas au Brésil (22,1 millièmes), mais les charges en capitaux sont les plus élevées (660,9 dollars US par tonne) ; le Canada a un prix d'électricité légèrement supérieur (22,8 millièmes), mais les charges en capitaux les plus faibles (498,7 dollars US par tonne) ; tandis que le prix de l'électricité est le plus élevé en Australie (28,1 millièmes) avec des charges en capitaux dans le milieu (534,7 dollars US par tonne), cela pour 1987.

L'annexe 21 reflète une prévision des coûts de production pour de nouvelles usines, pour des sites choisis en l'an 2000.

3.5.2. Entretien - Pièces de rechange :

L'annexe 20 donne les coûts des travaux d'entretien et de matériels de rechange.. Etudiant aussi les coûts d'entretien des cas brésilien et canadien, on pourrait dire que les coûts d'entretien représentent environ 5 % des coûts variables.

3.6. Déchets :

Il y a plusieurs sortes de déchets dans une usine. Les extrémités des anodes en forment la quantité la plus grande, environ 20 à 30 % des anodes utilisées. Dans une usine possédant un atelier de fabrication d'anode, celles-ci peuvent être entièrement utilisées.

La garniture des cathodes est faite à partir de matériaux carbonés. Pendant l'utilisation, elle se charge de fluor. La garniture doit être changée tous les cinq ans en moyenne. La quantité de garniture représente pour une cuve moderne de plus de 200 KA environ 30 à 35 tonnes. Ainsi, quelque 1.500 tonnes de déchets doivent être pris en compte par an avec 200 cuves de cette taille. L'extraction du fluor est faite si la quantité est raisonnable, sinon les déchets doivent être déversés dans des bassins étanches.

Le filtrage à sec des gaz contenant du fluor ne produit aucun déchet.

4. PRODUITS SEMI OUVRES

4.1. Consommation d'aluminium :

La consommation d'aluminium est très liée au niveau de développement industriel d'un pays et, à travers lui, au PIB (Produit intérieur brut) par habitant (12). Encore que bien d'autres facteurs puissent être pris en compte pour de telles corrélations (par exemple, les ressources naturelles, les traditions, etc..., du pays), ils peuvent servir de point de départ utile pour une étude analytique ou pour des prévisions.

Ainsi qu'il a été dit plus haut, l'utilisation de l'aluminium peut être grandement influencée par l'apparition de matériaux

nouveaux et/ou de niveaux de prix relatifs de certains d'entre eux en concurrence . Cela est dû à la concurrence de telles sources qui peuvent être décalées dans le temps, avec le PNB ou le PIB corrélés avec la consommation d'aluminium par habitant. Les études analytiques anciennes ont été réalisées à une époque où le taux de croissance de la consommation d'aluminium s'élevait régulièrement et où on tenait peu compte du fait que les rapports établis n'étaient pas entièrement valables pour les pays ayant une très grande ou très faible consommation d'aluminium par habitant (32, 35).

Jusqu'au niveau de l'usine de l'électrolyse, le flot des matières est plus ou moins facile à suivre dans l'optique d'accords à long terme par lesquels les mouvements sont confortés. A partir du niveau des produits semi ouvrés, toutefois, l'imbrication de certaines statistiques (par exemple dans le cas de la fabrication d'aluminium en feuille) ou des méthodes différentes de regroupement des matériaux du point de vue des statistiques, peuvent facilement faire tomber l'analyste dans des pièges.

Pour réaliser une évaluation réaliste de la consommation d'aluminium, il faut prendre en compte aussi tous les produits finis contenant de l'aluminium exportés ou importés ; malheureusement c'est là une tâche pratiquement irréalisable.

Comme il a été montré précédemment, les PVD sont, en règle générale, de faibles consommateurs d'aluminium, leur utilisation d'aluminium restant loin derrière la consommation moyenne mondiale. C'est seulement quand un certain niveau de PNB a été atteint que la consommation d'aluminium montre une tendance à s'élever régulièrement jusqu'à ce qu'un niveau de saturation ait été atteint. La forme de la courbe appelée "en S" valable

pour une année donnée peut être approchée par des considérations théoriques (Annexe 22).

En raison de la diversité dans les différents ampleurs, le PNB (36) corrélé à la consommation d'aluminium par habitant (37, 39) a été, pour 1981, exprimé sous une forme logarithmique comme cela est montré dans l'annexe 23. Pour les chiffres particulièrement élevés (Belgique, Norvège, Hongrie), on peut suivre les produits finis exportés contenant beaucoup d'aluminium. Là où les chiffres apparaissent très bas, il y a une grande chance pour que l'aluminium contenu dans les produits importés ait été omis. L'annexe 23 donne une compilation statistique statique ; toutefois, une extrapolation de la consommation d'aluminium pour n'importe quel pays peut être établie seulement à l'aide d'une enquête des caractéristiques de développement espéré de l'économie nationale. Malgré les dérives, la valeur possible de la corrélation indiquée ci-dessus semble justifier l'affirmation que, vers la fin du siècle actuel, un glissement important se fera dans la consommation d'aluminium en faveur des PVD (12). Un autre auteur arrive à une conclusion semblable, il suggère toutefois beaucoup plus de corrélations à prendre en compte pour prédire la consommation d'aluminium (8

4.2. Premières transformations de l'aluminium :

Contrastant avec la fabrication d'alumine et d'aluminium dans le domaine de la première transformation, une grande variété d'articles peut être produite. Même dans une catégorie d'articles semi-ouvrés (par exemple, des bandes), les techniques actuelles utilisées peuvent être différentes.

En 1983, la consommation mondiale d'aluminium (primaire, secondaire, et utilisation directe des déchets) s'élevait à environ 20,6 millions de tonnes (6). Ce chiffre est presque le même que celui des produits semi-ouvrés (comprenant les pièces coulées).

Si l'on excepte les zones d'économies à planification centralisée, 74 pays disposent d'installations petites ou grandes pour produire des articles semi-ouvrés en 1983 ; leur nombre était supérieur à 1.000, sans compter les petites fonderies de métal léger.

Selon les données disponibles (8) et en excluant les fontes, la capacité mondiale de production d'aluminium semi-ouvré peut être estimée à 21,1 millions de tonnes (40). L'utilisation de la poudre et de la fonderie en prennent 25 %, l'utilisation réelle de cette capacité mondiale peut être estimée à environ 70-75 %. Le chiffre semble être confirmé par plusieurs enquêtes concrètes menées dans ce but.

Selon l'expérience, les projets de production des produits semi-ouvrés sont implantés principalement dans les régions où la demande nationale de produits finis est déjà élevée et où cette demande doit être habituellement couverte par des importations. L'implantation de nouvelles capacités peut aussi permettre dans la plupart des cas d'exporter. Savoir décider où et quand des projets de production semi-ouvrée sont faisables est une question complexe demandant l'étude soignée des différents paramètres associée à la recherche d'un marché suffisant. Cette étude de marché ne doit pas simplement concerner la demande nationale, mais aussi les perspectives d'exportation vers les pays environnants, avec les chances d'exporter, principalement les articles laminés, vers des régions plus éloignées et ainsi approvisionner les marchés mondiaux. En considérant ces exportations, il faut aussi prendre en compte les droits de douane et les coûts de transport actuels vers les pays de destination escomptés.

Le problème se complique par le fait que, dans la plupart des pays développés, les articles de qualité commerciale sont fa-

briqués par des pays utilisant des lignes de production à haute performance avec un impact sur les prix en général, et de petites différences de prix en particulier. On trouvera alors, dans l'annexe 24, une liste des prix approchés relatifs pour plusieurs produits, compilés à partir des références disponibles (41, 42). La marge des profits peut être grandement influencée, à côté des coûts de transport, par les droits de douane à l'importation, qui, dans le cas de produits semi-ouvrés, peuvent être relativement élevés, selon le pays de destination. D'un autre côté, des "phase" marges significatives de projets peuvent être obtenus si l'on fournit des articles d'une grande valeur ajoutée, aux normes rigoureuses et, si cela est demandé, à la finition de surface excellente (par exemple, des profilés anodisés fabriqués à partir d'alliage de moyenne solidité) ou bien là où la demande du client en tonnage est plus faible que de coutume pour des articles dont les spécifications sont plus conventionnelles.

Les techniques de base dominant la place et incluant l'éventail des produits à fabriquer sont résumées dans l'annexe 25. Les percées technologiques dans la production des produits semi-ouvrés sont indiqués dans le tableau 8 pour 3 régions développées (43).

	<u>USA</u>	<u>Europe de l'Ouest</u>	<u>Japon</u>
Produits laminés	65,8	54,7	24,1
Produits extrudés étirés	23,4	33,0	57,4
Produits forgés au marteau pilon	1,3	0,6	0,1
Fils et cables	9,5	11,7	8,4

Il faut remarquer que les feuilles et les profilés représentent la plus grande part de la production et que le débit des pièces forgées est relativement faible. On ne doit pas s'attendre à de grands changements dans cet échantillonnage d'ici la fin du siècle.

Suivant les grandes lignes de l'annexe 25, les principales techniques concernées sont brièvement étudiées ci-dessous. Parmi les opérations de transformation et de finition (séparées par une ligne en pointillés dans l'annexe 25), on doit faire mention des deux plus importantes : fabrication des feuilles minces et anodisation (l'annexe contient aussi des renvois à des sous-chapitres).

4.2.1. Coulée continue :

Les avantages de base de ce procédé sont évidents : le métal à l'état liquide est reçu directement du four et il n'y a pas besoin de refondre le lingot. Pour cette raison, ce genre d'installation est généralement placé à proximité du four adéquat ou, du moins, pas trop loin. Dans le cas d'une voie routière appropriée, le transport du métal liquide sur une distance de 500 à 600 km peut être économique mais, étant donné les capacités des installations de coulée continue, ce n'est pas du tout une tâche facile. Une usine de coulée continue à large bande est généralement prévue pour produire des bandes jusqu'à 2.300 mm de large et d'une épaisseur de 4 à 40 millimètres ; sa capacité annuelle courante est de 8 à 12.000 tonnes, bien que quelques unes aient une capacité de 40 tonnes par heure ou plus. Naturellement, il est plus économique de fonctionner avec de plus grandes capacités. En ce qui concerne la coulée continue à bande étroite, elles sont généralement fabriquées en bandes d'une largeur allant de 200 à 300 mm ; leur minimum économique de production faisable est de 2.500 tonnes par an.

L'équipement de coulée continue de fil ébauché est généralement conçu pour des capacités de 10 à 20.000 tonnes par an ; toutefois, certains ont une capacité annuelle de 50.000 tonnes.

4.2.2. Coulée en billettes et en plaques :

Les machines récentes de coulée alimentées par des fours modernes sont capables d'extruder plus de 50 billettes de 150 mm de diamètre. Les plaques de grande taille (par exemple, 450 mm sur 2.000 mm) peuvent être coulées par groupe de 10 simultanément. L'organisation d'un atelier d'une capacité de 10.000 tonnes par an de coulée (42) et de celui d'une taille plus modeste, est décrite respectivement dans les annexes 26 et 27. La création des équipements auxiliaires qui doivent être installés sur la machine de coulée est déterminée par les propriétés de l'approvisionnement aussi bien que par la pureté désirée et les propriétés mécaniques du produit final.

4.2.3. Coulée en moule :

Les coulées en moule d'aluminium sont largement utilisées par les industries du transport, des véhicules, de la construction mécanique et électrique, aussi bien que dans la fabrication d'articles de masse.

Dans la plupart des cas, il s'agit de produits finis prêts à l'emploi, demandant rarement une opération supplémentaire de finition. Quoiqu'en comparaison avec d'autres métaux la matière première peut être chère, ces coulées peuvent être compétitives avec un bon nombre d'articles fabriqués à partir de matériaux d'une autre structure.

La coulée en moule est une dénomination collective recouvrant une variété de techniques différentes de coulées. Parmi celles-

ci, quatre ont une plus grande importance et elles sont comparées dans le tableau 9 en indiquant leurs caractéristiques essentielles, le minimum économique du nombre de pièces qui doit être produit, leur poids habituel, leur résistance mécanique conventionnelle atteinte par la coulée d'un alliage AlSi12 et la pression de ces coulées.

TABLEAU 9				
CARACTERISTIQUES DES PROCÉDES DE COULÉES				
Procédé	Nbre usuel des séries économiques en pièce/an	Poids des coulées en kg/pièce	Résistance à la rupture (alliage AlSi12 de Pa	Résistance à la dureté
Coulée en sable	1 à 5.000	5 à 300	160	Moyenne
Coulée sous pression	100 à 100.000	0,1 à 50	180	Bonne
Coulée à basse pression	500 à 100.000	1 à 50	185	Excellent
Coulée à haute pression	10.000 à 1.000.000	0,01 à 20	200	Acceptabl

Il faut remarquer qu'un atelier de coulée en moule peut être conduit économiquement avec des capacités de production annuelle plus petites que celles d'une usine de produits semi-ouvrés. Dans le cas de coulée au sable de très faibles capacités peuvent même suffire, alors que, pour les différents procédés de coulée sous pression, il faut au moins une capacité annuelle de 1.000 tonnes pour avoir un fonctionnement économique, à cause du temps et des coûts impliqués dans la fabrication d'une matrice.

Naturellement (spécialement dans l'industrie automobile), des capacités atteignant de 10.000 à 50.000 tonnes par an sont installées.

Pour faciliter la coulée, l'aluminium utilisé pour de telles fins contient habituellement de 5 à 15 % de composants autres permettant une assez grande marge de tolérance. Pour cet usage, l'aluminium secondaire convient particulièrement. Le recyclage du métal commence par la collecte des déchets, suivi de leur tri, une manutention préliminaire et une refonte finale par un procédé métallurgique sont nécessaires pour obtenir l'aluminium secondaire. La refonte des déchets est un procédé économisant l'énergie. L'énergie nécessaire pour le traitement des déchets représente environ 5 % de celle nécessaire pour la production de métal primaire (45). La collecte et le tri des déchets demandent un certain savoir faire méthodique. Une installation de fonderie traitant au moins 1.000 tonnes par an de déchets peut être déjà une proposition payante. D'après les faits, l'emploi d'aluminium secondaire croît plus vite que la consommation d'aluminium en général.

4.2.4. Laminage :

Aujourd'hui, quelque 200 usines de laminage à chaud fonctionnent dans le monde. La plupart d'entre elles ont une capacité annuel de 100 à 500.000 tonnes, mais, dans les pays industrialisés, fonctionnent même des installations ayant des capacités bien inférieures. Les usines de laminage à froid sont installées parallèlement avec les usines de laminage à chaud, en règle générale. Toutefois, dans un bon nombre de cas, les produits laminés à chaud, y compris les bandes de coulée continue, sont transportés sur de larges distances vers d'autres destinations pour être laminés à froid.

Ceci explique pourquoi il y a environ 50 % de plus d'usines de laminage à froid dans le monde que d'usines de laminage à chaud. Là où les deux procédés sont présents, la capacité de laminage à froid représente habituellement de 60 à 100 % de celle du laminage à chaud. S'il n'y a que des installations de laminage à chaud, les capacités varient sur une très large échelle. Naturellement, là où la production est faible, les performances techniques (productivité par tête ou par unité dans la région) sont inférieures à celles des usines plus importantes.

4.2.5. Extrusion (filage) :

Par opposition avec le procédé baptisé filage direct, qui était exclusivement pratiqué autrefois, aujourd'hui, le filage indirect est de plus en plus employé, quoique pour encore longtemps le filage direct restera plus largement répandu. Une comparaison entre les deux techniques est donnée dans l'annexe 29. Les avantages du filage indirect, permettant des conditions plus favorables de frottement, sont étudiés, avec des exemples concrets, en (46). Il y a en gros 700 usines pratiquant le filage dans le monde. Leur capacité annuelle installée varie habituellement de 3.000 à 10.000 tonnes, toutefois il existe des usines plus grandes (80.000 à 100.000 tonnes par an), aussi bien que plus petites (500 à 1.000 tonnes par an). La plupart des petites unités installées dans les pays industrialisés sont conçues pour produire des profilés de haute précision.

L'annexe 30 montre un schéma simplifié d'une usine à extrusion. La capacité de chaque presse d'extrusion est directement proportionnelle à la pression qu'elle applique. La production d'articles commerciaux d'un standard moyen s'élève de 200 à 300 tonnes/MN par an ; pour les profilés d'une conception plus

élaborée, le chiffre correspondant est de 150 à 200 tonnes/MW par an. D'où, en implantant une seule presse d'extrusion, on peut installer une capacité annuelle de 1.000 à 3.000 tonnes. Toutefois, mis à part quelques cas exceptionnels, l'exploitation d'une simple presse est inhabituelle.

4.2.6. Forge :

Du fait que les pièces d'aluminium forgé sont relativement chères, produire des pièces de dimensions parfaitement précises nécessite l'emploi de matrices coûteuses. La forge est une technique payante seulement dans le cas de grandes séries. Les principaux clients pour l'aluminium forgé sont les industriels fabricant des avions ou des voitures.

4.3. Retraitement des produits semi-ouvrés :

Une part considérable des produits semi-ouvrés étudiés au paragraphe 4.2. est vendue aux clients, après avoir subi quelques traitements ultérieurs. C'est un trait commun que de telles opérations sont habituellement menées par des équipements divers ayant une productivité relativement grande. Quant au parachèvement que les fabricants d'articles finis ont à réaliser, il est de plus en plus limité à une simple opération, couper à la dimension, percer, etc... aussi bien qu'assembler (en premier lieu, par soudure, des produits semi-ouvrés achetés dans les usines). La technologie de 2e transformation comprend le laminage en feuilles minces, la fabrication de profils formés au galet, les feuilles pour roll-bynd, les tubes à nervures, les tubes soudés, la finition de couleur et de traitements variés de surface. On peut accorder une attention particulière aux techniques de laminage en feuille et aux finitions de surface.

4.3.1. Fabrication des feuilles minces :

Les bandes de 800 à 1.600 mm de large et de 0,2 à 0,5 mm d'épaisseur se prêtent bien au transport en bobines de 4 à 10 tonnes. Aussi, les usines de fabrication de feuilles minces n'ont pas besoin d'être implantées près d'un laminoir à froid.

La fabrication des feuilles minces comporte 2 types d'opérations: le laminage et la finition du produit. Cette dernière a une importance particulière, en ce qu'une partie des commandes demande la livraison en finition argentée naturelle, tandis que la plupart des clients demandent une finition vernie, colorée ou imprimée, ou encore laminée avec d'autres matériaux pour être utilisée dans l'emballage. Il y a aujourd'hui quelque 150 fabricants de feuilles minces dans le monde. Leur capacité annuelle s'étend de 3.000 à 50.000 tonnes quoique l'on trouve des usines de capacité plus petites ou plus grandes.

4.3.2. Finition de surface :

Quand on s'efforce de lutter contre la corrosion ou d'obtenir un effet décoratif, dans le cas de laminés (plats), on ajoute généralement une peinture, un film plastique ou une couche de laque. Dans le cas de surface inégale ou extrudée, on procède souvent par anodisation.

Dans le premier cas, en choisissant une couleur convenable, et dans le second, en déposant par électrolyse sur la surface anodisée un film coloré ou directement obtenu dans le processus d'anodisation (avec ou sans coloration), on atteint ainsi l'effet désiré.

En conséquence de leur fonctionnement continu, les lignes de peinture de larges bandes doivent être conçues pour de grandes capacités de production. (Chaque ligne doit traiter 10.000 tonnes par an ou beaucoup plus). L'installation de ces équipements

est coûteuse et économiquement faisable, seulement si de grandes quantités sont concernées. Déposer un film d'oxyde anodisé est un procédé qui demande du temps. Par suite, à part quelques exceptions, le fonctionnement d'un tel équipement est intermittent, permettant l'implantation économique de petites capacités de production (1.000 à 3.000 tonnes par an).

4.4. Généralités sur l'installation d'usines de produits semi-finis :

Comparée à la fabrication d'alumine et à l'électrolyse d'aluminium, la production d'articles semi-finis demande plus de main d'oeuvre mais considérablement moins d'énergie. En production d'articles semi-finis, la part de coût de matériau brut et l'amortissement du capital investi sont les deux facteurs dominants. Variable suivant la nature du produit, le premier facteur peut représenter jusqu'à 80 % de la valeur brute, cependant dans le cas de produits retraités, il peut descendre bien en dessous de 40 % (annexe 24).

Les données concernant les capacités optimales selon le type de technique concerné sont sujettes à des variations considérables (par exemple, laminage ou forge). Mais, même pour un type principal donné de technique, cela dépend beaucoup des spécifications concrètes qui doivent être suivies (par exemple, la proportion d'aluminium pur, l'épaisseur de la bande, etc...) Les indications concernant les coûts d'investissement en capitaux sans une soigneuse précision sur les produits envisagés, peut seulement fournir une estimation provisoire de la dépense possible qui doit être incluse dans la réalisation du projet. L'annexe 31 reflète les estimations provisoires concernant les coûts d'investissement des cristallisations de fabrication comparés à ceux relatifs aux usines d'électrolyse (34, 47). En considérant, pour une usine de produits semi-finis, la capacité

économiquement minimale faisable, celle-ci peut être relativement petite, l'implication de ces opérations peut démarrer avec des ressources en investissement raisonnablement modestes.

5. FABRICATION D'ARTICLES FINIS

Les fabricants de produits finis sont en contact direct avec les utilisateurs finaux et sont conduits principalement par les marchés. C'est de telles directions où les indications d'une concurrence provenant d'autres matériaux peut être prévisible, tandis qu'une action de marketing efficace obtient un grand succès en se débrouillant avec de telles exigences et en contribuant à davantage de croissance de la consommation d'aluminium.

Le nombre d'articles finis en aluminium ou de ceux contenant des quantités variables d'aluminium peut être maintenant de plusieurs dizaines de milliers. La situation est rendue plus compliquée par le fait que, dans de nombreux cas, un article isolé peut contenir seulement une très faible quantité d'aluminium qui, quoique semblant négligeable pour l'utilisateur final, peut avoir une grande importance du point de vue de l'industrie de l'aluminium (par exemple, c'est le cas de l'industrie automobile).

En améliorant les produits existant et en en développant de nouveaux, on peut obtenir d'utiles indications en préparant des analyses de fonction et de valeur. Leur comparaison peut révéler les attentes du consommateur comme les paramètres désirés sur le plan technique, d'un côté, et la faisabilité économique, de l'autre, pour permettre au producteur de répondre à ces demandes. Ces travaux peuvent aussi fournir des indications utiles dans le choix du matériel (un matériel compétitif ou des alliages d'aluminium).

La vie des produits finis en aluminium est très variable ; toutefois, une moyenne de cinq ans peut être prise pour une estimation raisonnable. D'où la nécessité, de temps en temps, de mettre à jour les modèles ou d'aller de l'avant avec des modèles complètement nouveaux. Cette action permanente de développement et de la technique et du produit a pour résultat de mettre en oeuvre de plus grandes équipes de spécialistes que dans le cas des autres secteurs de l'industrie de l'aluminium. Ces innovations internes peuvent être, si nécessaire, remplacée par l'achat de licences, spécialement dans le cas de l'apparition d'un nouveau produit sur le marché.

Les prix par unité de volume sont sujets à d'amples variations, même là où la plus grande partie d'un article déterminé consiste en structures d'aluminium. La même chose s'applique aussi aux objets de petite taille (par exemple articles) dont la fabrication, en dépit des petites séries concernées, peut être partout économiquement réalisable. Il faut noter que, pour les articles tout en aluminium pour lesquels la fabrication ne nécessite que peu et de relativement simples opérations (par exemple, les articles de ménage), seule une production à grande échelle peut être une affaire payante. Par contradiction, toutefois, là où les salaires sont bas et les ressources pour l'investissement faibles, la fabrication des instruments de cuisine à emboutissage profond peuvent être même en petite série économiquement réalisables.

Les capacités optimales approximatives pour la fabrication à grande échelle de quelques articles finis choisis sont analysée dans l'annexe 32 (47). Ici, aussi, la dépense en capital est rapportée à celle de la construction d'une usine d'électrolyse. D'une comparaison des chiffres correspondants, on peut noter que les coûts d'investissement spécifiques pour une tonne de produits finis peut grandement varier selon le type de produit étudié, et peut aller jusqu'à 5 ou 6 fois le prix du lingot

(par exemple, dans le cas du matériel de cuisine) ou juste une fraction de celui-ci (par exemple, le châssis de fenêtres, des échelles ou d'échaffaudages). Un point, toutefois, est spécialement significatif : les capacités pour une taille raisonnable pour ce type de produits peuvent se trouver dans la fourchette des 500 à 5.000 tonnes par an.

E. PRINCIPALES ORIENTATIONS DES PROGRAMMES DE RECHERCHE

1. ALUMINE

Le Comité Scientifique du Symposium ICSOBA, à TIHANY (48), a estimé qu'une très large part de la production mondiale d'aluminium continuerait à être réalisée, suivant le procédé Bayer, jusqu'à la fin de ce deuxième millénaire. Pour cette raison et dans le cadre des tendances futures, on retiendra principalement ici les perfectionnements apportés à ce procédé.

1.1. Procédé Bayer :

Bien que le procédé Bayer soit utilisé depuis longtemps pour produire l'alumine, il fait l'objet de perfectionnements constants. Ceux-ci furent discutés, lors de différentes réunions ICSOBA et AIME ; le Comité Scientifique de la réunion d'ICSOBA à TIHANY indiqua, comme suit, les principaux axes de perfectionnement (48) :

- développer la technologie des économies d'énergie ;
- accroître le rôles des températures élevées pour dissolution en autoclave ;
- accroître le rendement des équipements ;
- utiliser des procédés totalement automatisés et sous contrôle informatique.

En conséquence de l'accroissement du coût des biens d'équipement, on peut ajouter que les perfectionnements techniques seront de plus en plus la meilleure exploitation des biens d'équipement, afin d'accroître la rentabilité des usines (49). Les principaux points de progrès technique d'une usine d'alumine, fonctionnant sous procédé Bayer, sont résumés dans l'annexe 33. Elle indique les 5 axes principaux de R et D, les cibles et aussi les solutions possibles (basées sur 49). Comme il ressort de cette annexe, les principales lignes de R et D se situent dans les étapes de précipitation et de dissolution en autoclave.

Pour la précipitation, la principale ligne de perfectionnement résulte des efforts qui procurent à la fois les rendements élevés, en lessives, du procédé Bayer européen (70-80 mg/dm³) et les propriétés du produit du procédé américain Bayer, soit une alumine sablonneuse. Dans ce but, la purification de la solution est nécessaire pour enlever les sels de carbonate et les produits organiques, s'ils sont présents. La technologie de précipitation totale est en développement continu pour assurer des rendements de précipitation optimaux avec l'alumine sableuse.

En dissolution, on rencontre deux tendances : dans le cas de bauxites monohydratées, la tendance est à l'accroissement des températures de dissolution. Dans ce but, des autoclaves tubulaires peuvent être aussi utilisés spécialement avec les bauxites hydratées. Le pouvoir de dissolution peut aussi être influencé par l'usage d'additions, si les bauxites utilisées le nécessitent. L'ajustement de la dissolution et de la précipitation et, en outre, la quantité d'eau à évaporer, contribuent à l'optimisation de l'ensemble du procédé par accroissement de la productivité et la diminution des coûts. La réduction des coûts est aussi la raison pour laquelle des essais sont faits pour diminuer la consommation de soude caustique, tandis que

le lavage des boues rouges n'est pas seulement réalisé à cette fin, mais aussi pour obtenir une boue polluant moins l'environnement.

1.2. Procédés différant du procédé Bayer :

L'optimisation des procédés, autres que Bayer, est aussi en cours ; mais ils ne sont que d'importance locale. La plus importante activité est les travaux de R et D pour produire un chlorure d'aluminium. La production de chlorure d'aluminium concerne de nombreuses utilisations. Le produit peut être utilisé, pour lui-même, dans l'industrie chimique (bien que les besoins soient faibles), ou pour produire certaines alumines spéciales, mais il peut aussi servir comme produit intermédiaire pour la production de l'aluminium. Le chlorure d'aluminium peut être produit à partir d'argiles pauvres en fer (procédé Toth) (50) ou de bauxites ou d'alumine gamma (γ) (procédé Alcoa) (52) En partant de boues argileuses, celles-ci sont traitées d'abord au coke, opération suivie d'une chloruration en présence de soufre. Divers chlorures sont produits ; ils sont séparés par distillation. En cas de réaction, alumine gamma, le fuel oil est "craqué" par réaction dans un lit fluidisé ; les particules alumine-coke sont alors chlorurées sur un nouveau lit de réaction fluidisé, à environ 650°C, en présence de NaAlCl_4 (51) La bauxite est d'abord calcinée, puis soumise à un lit fluidisé mais tous les procédés sont plus ou moins en phase pilote.

2. ALUMINIUM

De même que les applications du procédé Bayer font l'objet de recherches d'économie, le procédé Héroult-Hall fait aussi l'objet d'une activité "R et D" continue. En outre, une intense activité est en cours pour le développement d'un procédé de substitution.

2.1. Le procédé Héroult-Hall :

De meilleures économies et la nécessité de satisfaire les prescriptions écologiques font l'objet des activités "R et D". Le volume des cuves a d'abord augmenté mais, au-delà de 200 KA (230-250 KA), les résultats ne sont pas particulièrement remarquables. Ainsi de l'accumulation de perfectionnements divers, tels que section croissante des anodes, amélioration de la composition de l'électrolyse, des températures plus basses, contrôle informatique des cellules, leur conception, leur durée, contrôle d'émission et des effets magnétiques, il résulte une plus faible consommation d'énergie, mais on n'attend pas beaucoup d'économie d'énergie au dessous de 12.100 KWh/t de métal (52). Les activités de R et D, pour quelques unes des modifications majeures, sont cependant en cours. Elles sont situées dans le domaine :

- du développement des matériaux et concept de nouvelles électrodes ;
- de la modification de la composition de l'électrolyte.

Dans le premier cas, Kaiser a développé une cathode TiB_2 (borure de titane), tandis qu'Alcoa envisage une anode permanente, avec décharge d'oxygène. Le résultat serait, dans les deux cas, la diminution de la puissance consommée. Juger de la valeur de ces efforts serait prématuré.

Dans le cas de la composition de l'électrolyte, une tendance actuelle est l'utilisation des sels de lithium pour réduire la résistivité de l'électrolyte. Les résultats escomptés sont la diminution de la puissance consommée, l'amélioration de l'efficacité du courant, la réduction des émissions de fluorure et la réduction du coût des opérations. Quoiqu'il en soit, les résultats ne sont pas encore parfaitement clairs.

BIRD espère que les perfectionnements graduels du procédé, dans les usines d'électrolyse actuelles, apporteront, en moyenne, une réduction de coût de 0,5 % par an.

2.2. Autres procédés :

Divers autres procédés ont été inventoriés ; deux d'entre eux doivent retenir l'attention :

- le procédé de chloruration ;
- la réduction carbothermique directe.

Le procédé de chloruration d'Alcoa (procédé de fusion Alcoa ou ASP), consiste à faire l'électrolyse du chlorure d'aluminium $AlCl_3$, pour le transformer en chlorure double de sodium et de lithium $LiCl NaCl$, fondu à $700^{\circ}C$, avec un faisceau de multicellules bipolaires d'électrodes et anodes de graphite non consommables (voir à ce sujet E - 1.2.).

Bien que l'énergie électrique consommée soit inférieure avec l'ASP qu'avec le procédé Héroult-Hall, les dépenses totales sont seulement légèrement inférieures si l'on considère aussi la production de chlorure, mais les risques du procédé semblent plus élevés. Une amélioration du procédé de chloruration et une diminution des coûts pourraient rendre, cependant, ce procédé plus attractif. Les usines pilotes ont été fermées (51).

La réduction carbothermique directe d'argiles, pauvres en fer, pour obtenir un alliage aluminium-silicium, est réalisable et même possible. Le procédé Kuwahara consiste à fabriquer des briquettes de minerai d'aluminium (bauxite ou argile avec addition d'alumine, obtenue par le procédé Bayer) et de coke, puis de les réduire en un alliage Al-Si-Fe-Ti par réaction combinant la combustion et la chaleur d'un arc électrique à $2.000^{\circ}C$; en extrayant alors l'aluminium par action d'un bain

de plomb (solvant) suivie d'une distillation sous vide de la phase riche en aluminium. Le coût a été estimé à US dollars 1.000 par tonne. L'usine d'alumine de Mitsui a été construite en tant que grande usine pilote. Mais les expériences auraient été récemment arrêtées.

3. PRODUITS SEMI-OUVRES (OU DEMI-PRODUITS)

3.1. Considérations générales :

Les technologies de base propres à la fabrication des demi-produits (coulée semi-continue, coulée continue, laminage, filage, étirage, forgeage, fonderie sous pression), se sont développées depuis plusieurs décennies ; mais leur rendement et les standards de fabrication se sont améliorés, parallèlement. Un progrès plus récent est la production relativement à grande échelle de pièces frittées, bien qu'en ce domaine les technologies de base soient les mêmes que celles appliquées aux autres métaux et alliages, et cela depuis un long temps. En se référant à la littérature "ad hoc" et en suivant les lignes générales du chapitre précédent, les tendances de développement des principales technologies prises l'une après l'autre sont résumées ci-après :

3.1.1. Coulée continue :

Dans les récentes années, la part principale, en coulée continue, est réalisée par des équipements désignés comme suit : Propezi, en Italie, SCR (South Wire continuous Rod) aux USA, SECIM en France et autres procédés utilisés en URSS. La caractéristique spécifique des développements récents est l'accroissement de la productivité (par augmentation des diamètres des bobines). Pour la coulée continue des bandes larges ou étroites on a particulièrement cherché à améliorer la qualité et à ac-

croître le nombre des alliages. pouvant se prêter à cette technique.

3.1.2. Coulée des billettes et plateaux :

La technologie pratique de la coulée des billettes et plateaux est déterminante pour obtenir la qualité des demi-produits. Pour les opérations préalables, l'utilisation du filtrage est devenue très répandue. La description de l'équipement et de sa mise en oeuvre figure à l'annexe 34. Le dessin et l'introduction de filtres plus récents et de plus grande performance peuvent être envisagés dans un futur proche (53).

Pour la coulée semi-continue, l'emploi de moules avec incorporation de garnitures isolantes représente une nouveauté, tendant à se répandre rapidement. Le but principal est la dissipation contrôlée de la chaleur, ce par quoi on accroît le niveau de qualité des billettes et plateaux. Procédé et équipement correspondants sont décrits dans l'annexe 35.

Ces procédés de coulée semi-continue ont été mis sous contrôle informatique par divers producteurs (exemple : Alcoa) ; par application de paramètres optimaux, les billettes et plateaux de larges dimensions et homogénéisés sont alors d'excellente qualité. Les technologies avancées de coulée permettent, dans à peu près 90 % des cas, d'économiser de l'énergie et de traiter les alliages à haute résistance mécanique, difficiles à couler.

3.1.3. Coulée en moule :

La tendance, en ce domaine, est de réduire l'épaisseur. Ceci est particulièrement vrai pour la coulée sous-pression. De plus en plus, les machines à couler sous pression sont équipées d'un système permettant de faire le vide, avec soufflage interne d'oxygène au bénéfice constant de la matière coulée. Les essais

réalisés pour contrôler la proportion de grenailles métalliques ont donné de bons résultats. On utilise de plus en plus des robots dans les fonderies récentes, améliorant à la fois la productivité et la qualité des pièces de fonderie.

Un nouveau procédé consiste en une extrusion du métal liquide que l'on solidifie sous une pression élevée (fonderie par compression, ou "rheocasting") (57,58). KAISER Al. Co. a développé un procédé pour couler certains alliages sensibles aux criques. Ce procédé se caractérise par des renflements dans le moule, éliminant l'eau de refroidissement des billettes et plateaux, zones critiques, où la température n'est que de 320°C.

Selon un procédé développé par BRITISH Al. Co., pour la coulée des plateaux, la position d'éléments d'isolation thermique est variable à l'intérieur du moule, ce qui facilite l'automatisation du procédé (d'où son nom : moule profond à refroidissement variable) ("VCDP system").

Des moules électro-magnétiques sont utilisés pour les alliages à haute résistance mécanique, difficiles à couler. Grâce à cette méthode, le sciage des extrémités et le meulage de la surface des plateaux et billettes n'est plus nécessaires ; les temps d'homogénéisation peuvent également être réduits (56).

3.1.4. Laminage :

Les recherches récentes ont visé à accroître la production, améliorer la qualité et en assurer la constance. Il en résulte que le contrôle électronique du laminage augmente et que les installations anciennes sont mises au rebut, conduisant à la réduction du personnel. On assiste à la tendance prononcée de

spécifications de plus en plus complexes (haute caractéristique de résistance mécanique, réduction des tolérances).

3.1.5. Extrusion ou filage :

On ne peut rapporter aucune nouveauté sensationnelle en ce domaine ; cependant, dans quelques opérations particulières, rompant avec les pratiques traditionnelles, des progrès considérables ont été réalisés, spécialement pour les techniques de contrôle. Il existe des demandes de profils filés à caractéristique de résistance mécanique accrue, avec des épaisseurs de paroi réduites. Un pourcentage important de profils filés sont livrés avec finition de surface. Le filage direct devrait garder sa position dominante, à moyen terme ; toutefois, on prend en considération les meilleures caractéristiques de friction du filage inverse en dépit d'une conception plus complexe des presses. A court terme, l'extrusion de petites pièces par le procédé "conform" (technique du filage à froid) peut avoir de belles perspectives (59,60). C'est une technologie économique, qui offre l'avantage que, par l'utilisation d'une force de friction courante, le procédé d'extrusion peut devenir continu. Ainsi, en partant de coupes transversales de faible section, on peut fabriquer des profils ou des formes à mince paroi. On trouvera le croquis du procédé à l'annexe 36. Ce procédé est compatible avec la production de barreaux, par extrusion continue de poudre.

De plus, pour améliorer la productivité et le rendement, le contrôle électronique du procédé par extrusion est d'une grande importance, en conférant au produit des caractéristiques réparties de façon homogène, de telle sorte que, sous d'autres conditions de mise en oeuvre, un état d'équilibre puisse être obtenu ou non à long terme.

3.1.6. Forgeage :

En raison de la demande relativement modeste des pièces forgées, le développement technique en ce domaine n'est pas très spectaculaire. Les technologies actuelles permettent d'obtenir, autant que possible, des formes et dimensions prêtes à l'usage (note du traducteur : forgeage de précision).

3.1.7. Autres technologies (produits frittés) :

Une des plus fondamentales technologies de la fabrication de masse - spécialement dans le cas de formes complexes - est la métallurgie des poudres. Dans le cas de l'aluminium, elle a été introduite à l'échelle industrielle dans la dernière décennie, spécialement dans les pays ayant une forte production de voitures de tourisme. Les développements futurs seront davantage en relation avec la recherche d'obtention de propriétés qui ne peuvent résulter des technologies traditionnelles (dénomination "pseudo-alliages", matériaux composites).

3.1.8. Développement des alliages, développement de la micro-structure des produits :

Les technologies de mise en oeuvre et le comportement des éléments alliés détermine, d'une manière relative, la micro-structure d'un produit et, de ce fait, ses propriétés réelles. Des solutions technologiques nouvelles en fonderie et la filtration à la coulée, une combinaison correcte de mise en forme et traitements thermiques, ont considérablement amélioré les propriétés du produit final, les rapprochant, au plus près, de l'attente des demandeurs. Dans la voie de ces efforts laborieux et des résultats satisfaisants, le concept du "sur mesure" des produits manufacturés est proche d'être réalisé.

La combinaison efficace de traitements thermiques et de mise en forme (traitements thermomécaniques) permet, non seulement d'économiser de l'énergie, mais encore conduit à une micro-structure, dont les propriétés sont supérieures à celles des produits courants. Un nouvel axe est celui d'alliages Al-Li-X où X est un élément d'addition. Il est maintenant largement utilisé dans la technologie aéronautique et spatiale.

3.2. Dérivés des semi-produits :

3.2.1. Feuilles minces :

On tend à réduire l'épaisseur des feuilles minces et à introduire des méthodes automatiques de contrôle et de test, d'épaisseur. Des efforts particuliers ont été faits pour augmenter les vitesses de laminage, ce qui conduit à un développement technique plus avancé dans la conception du matériel et sa technologie, lié à la modification des propriétés du matériau brut.

3.2.2. Finition de surface :

La tendance des demandes implique des aspects de surface plus décoratifs, liés à la résistance des films et des revêtements. Aussi on rivalise d'une plus grande productivité, dans le cadre des règlements concernant la protection de l'environnement.

F. CHOIX DE TECHNOLOGIES MIEUX ADAPTEES AUX PAYS EN DEVELOPPEMENT

1. RESUME TECHNIQUE

Les chapitres "R et D" ont montré que l'extraction des bauxites leur raffinage en alumine et la production du métal par électrolyse sont des technologies bien établies. En dépit d'un progrès constant des procédés, des changements fondamentaux ne sont pas

escomptés avant la fin du siècle. Les ressources en bauxite, actuellement connues, ne limiteront pas la croissance de l'industrie de l'aluminium (48). L'usage des méthodes modernes de prospection lointaine peut faciliter l'identification de nouveaux gisements de minerai, particulièrement dans les pays en développement. Néanmoins, la transformation en aluminium des matériaux, à basse teneur en bauxite ou sans bauxite, peut avoir une importance locale, car certains pays peuvent vouloir protéger les minerais bruts existants (48).

L'aspect énergétique domine à la fois la production de l'aluminium et sa consommation, en fixant la tendance de développement (48). Ceci, joint à une meilleure exploitation du capital investi -en raison de leur coût croissant- font la promotion du développement des procédés Bayer et Héroult-Hall. A part les facteurs climatiques, il n'existe pas de limitation technique à utiliser ces procédés, n'importe où, dans leur forme actuelle ou améliorée, sous réserve que les usines choisies puissent être exploitées et entretenues dans un pays donné, parce que lors de la conception de l'usine, il aura été fait un choix raisonnable d'automatisation et de mécanisation et que le personnel aura subi une formation appropriée.

En raison de la protection de l'environnement, venant de plus en plus au premier plan, les nouvelles usines d'électrolyse d'aluminium sont équipées d'anode utilisant le procédé d'alumine sablonneux. C'est la raison pour laquelle les nouvelles usines se trouvent près de sites de fabrication de ce type d'alumine et quelques usines plus anciennes -s'il n'y a pas de production à partir d'alumine sablonneux - sont modifiées pour produire ce type d'alumine. Les pays en développement disposent principalement de bauxite de type trihydrate ; la

production d'alumine sablonneux ne cause aucun problème avec ce type de matériau brut. Le développement de la fabrication des demi-produits apparaît plus dynamique. Les méthodes de base sont bien connues depuis des décades ; aussi, l'efficacité de ces procédés et la fabrication de produits dont les paramètres de qualité augmentent, se placent constamment au premier plan des récents perfectionnements. Le succès de l'aluminium, face à la compétition des autres matériaux, dépend de l'amélioration constante des propriétés des demi-produits afin de satisfaire un plus grand nombre d'exigences d'utilisation. Cet objectif et une production plus économique sont les principales tendances de développement en ce domaine. Aussi, lors de l'implantation d'une usine, le tableau correct du "product-mix" (gamme de produits) est d'une extrême importance.

La taille des unités joue un rôle important pour les économies de production. Comme il est fait mention au chapitre D, la taille d'une usine d'alumine peut croître de 120 à 150.000 tonnes par an à une capacité de 300 à 500.000 tonnes par an. La capacité des usines peut même atteindre ou dépasser 1 million de tonnes par an. D'un autre côté, les fonderies sont maintenant bâties pour des productions de 100 à 300.000 tonnes par an, la capacité actuelle dépendant de la production par ligne.

La taille des usines d'alumine et des usines d'électrolyse mentionnées ci-dessus, ne coïncide pas toujours. Du fait que 1,95 tonnes d'alumine sont nécessaires pour produire 1 tonne de métal, une usine d'alumine de 600.000 tonnes par an permettra d'assurer la production de 300.000 tonnes par an d'aluminium, en absorbant la totalité de l'alumine produite. Il est souvent impossible -pour diverses raisons : manque d'énergie électrique, ou de moyens financiers- de construire un tel

complexe sur un même site. Dans de tels cas, une usine d'alumine doit avoir plus d'un client pour absorber sa production, une usine d'électrolyse proche et le ou les autres distantes. Dans d'autres cas, des solutions de compromis peuvent être envisagées et la rentabilité de l'usine intégrée sera le facteur primordial de la décision d'investissement.

Une solution à plus long terme est de ne construire qu'une ligne de l'usine d'alumine, en en prévoyant l'accroissement. C'est un point important d'avoir un consommateur d'alumine avant de décider de la construction d'une usine, parce que, en fonction de sa qualité, l'alumine peut n'être utilisée que par un type d'électrolyse pour transformation en aluminium. Les réserves de bauxite jouent aussi un rôle important pour décider de la dimension d'une usine d'alumine. Une capacité nouvelle de 600.000 tonnes par an devra avoir une réserve d'au moins 50/60 millions de tonnes de bauxite, permettant ainsi une durée d'activité de l'ordre de 30 ans. La dimension des lignes de fabrication de demi-produits est une question encore plus complexe. Il existe des demi-produits dont le transport ne se justifie que dans un rayon limité. Heureusement, ces demi-produits peuvent être fabriqués dans des usines de faible dimension. Il en est ainsi pour les produits filés, où des usines produisant 1 à 3.000 tonnes par an peuvent être économiquement viables. Par ailleurs, les produits laminés peuvent être transportés à de longues distances, mais le seuil d'une production économique est beaucoup plus élevé. Des fonderies peuvent être de plus petite dimension, même des unités de 10.000 tonnes par an peuvent être viables. Quoi qu'il en soit, de telles lignes de production doivent opérer en liaison avec une usine d'électrolyse et l'éventail des demi-produits réalisés avec ce type d'équipement est plus étroit qu'avec celui des laminoirs cou-

rants ; la fabrication de produits en aluminium richement allié n'est pas possible. La dimension de laminoirs économiques -indépendants d'une usine d'électrolyse- est beaucoup plus importante -au moins 40.000 tonnes par an ; plus grande est la capacité, plus élevée l'économie. Les usines de laminage à froid peuvent être de plus faibles dimensions que celles de laminage à chaud. Mais c'est l'idéal d'avoir les deux types (à chaud, à froid) sur le même site ; autrement, on doit approvisionner en ébauches l'usine de laminage à froid, mais c'est aussi une pratique courante d'alimenter les usines de laminage à froid, en bobines (coils). Pour l'estimation des dimensions des autres usines de semi-produits, se reporter au chapitre D.4.

La majorité des usines de laminage se trouvent au centre de la consommation, approvisionnant des zones relativement étendues. Pour des raisons de transport, les usines de filage sont proches des consommateurs. L'implantation des usines fabriquant des produits finis dépend du type de produits et de la technologie utilisée. Marketing spécial et promotion peuvent être appliqués pour les produits ayant une dominante aluminium. La fabrication de fils et câbles, les usines produisant des batteries de cuisine et autres ustensiles ménagers, les emballages et certains produits pour l'industrie du bâtiment, sont des cas typiques. L'implantation de telles usines ne dépend, dans la majorité des cas, que du marché, des prix nationaux du produit et de la technologie choisie, tandis que la production locale des autres produits finis est dans une large mesure fonction du niveau général de développement de la région considérée.

2. QUELQUES CONSIDERATIONS ECONOMIQUES

Il a déjà été mentionné au chapitre C qu'il existe, dans cette industrie, des tendances à la réimplantation. Les raisons en

sont nombreuses. Quand la demande d'aluminium ne pouvait plus être satisfaite à partir des bauxites existant dans les pays industrialisés, l'utilisation des ressources en minerai s'amorçait dans les PVD. D'abord, la bauxite fut transportée vers les usines d'alumine existantes, plus tard, des usines d'alumine furent construites au voisinage des mines des PVD. Le pas suivant fut d'implanter une usine intégrée sur le site d'extraction de bauxite, sous réserve que l'on dispose, à cette même place, d'une source d'énergie électrique suffisante. Dans ce cas, le métal est transporté vers les utilisateurs.

De l'analyse de la situation mondiale actuelle de l'industrie de l'aluminium, il ressort que les tendances de réimplantation géographique peuvent se trouver amplifiées, durant la prochaine décennie. Les facteurs suivants justifient cette opinion :

- l'importance des capacités abandonnées en raffinage, fonderie et usines de transformation ;
- l'évolution défavorable de la demande d'aluminium, sur les marchés les plus importants, en dépit de prix actuellement bas ;
- les parts décroissantes des métaux, même autres que celles de l'aluminium, en raison du coût unitaire de la production industrielle résultant de modifications de structure ;
- la forte compétition des autres matériaux, notamment celle du plastique, susceptible d'augmenter du fait de l'évolution des prix du pétrole ;
- le recyclage des déchets et l'utilisation d'alliages à hautes performances, diminuant la demande du métal primaire ;
- en raison des modifications structurales mondiales, un nouveau modèle possible de l'évolution du développement de l'économie des PVD, demandant, peut-être, moins de matériaux avec une répartition s'éloignant fortement des indications tirées des corrélations traditionnelles.

Les phénomènes cités précédemment permettent de conclure que les difficultés présentes de l'industrie de l'aluminium n'ont pas un caractère temporaire mais pourront être observées au moins durant les 5 prochaines années. Cette situation conduit également à la conclusion que les activités de raffinage et d'électrolyse seront implantées sur les sites les plus favorables, dont une part importante se trouve dans les PVD.

L'annexe 37 montre la répartition par continent de l'industrie de l'aluminium pour 1983-1984, avec prévision du futur. On peut aisément observer qu'une proportion considérable de bauxite provient des régions où la transformation de l'alumine en aluminium est relativement faible mais, par exemple, en Amérique Latine, la proportion de bauxite raffinée s'accroît. Une telle tendance ne peut encore être observée en Afrique.

L'annexe 37 prouve clairement que la présente réimplantation de l'industrie de l'aluminium ne concerne que la production de l'alumine et de l'aluminium. Son but est de diminuer les coûts d'énergie et de transport. La première transformation (fabrication des demi-produits) n'est pas concernée actuellement par ce procédé : elle est principalement implantée dans les contrées industrialisées, à proximité des consommateurs. En outre, en dépit de la croissance de la production d'aluminium en Océanie, des projets importants pour la production de demi-produits ne peuvent être actuellement constatés. La production d'alumine et d'aluminium nécessite un capital productif élevé, de l'énergie, du minerai et du matériel ; pour la fabrication de demi-produits, il faut pratiquement un capital, de la main d'oeuvre et du métal. Le prix moyen des produits fabriqués peut atteindre le double de celui du lingot, d'où les possibilités d'un plus grand engagement des contrées industrialisées dans ce procédé méritant une attention particulière.

La consommation d'aluminium est un point critique concernant les possibilités de développement de l'industrie de l'aluminium dans les contrées en développement. Dans le chapitre D.4., il a été déjà mentionné l'existence d'une corrélation entre la consommation d'aluminium et le PNB (Produit National Brut). Cependant, ce n'est pas le seul facteur déterminant et les conclusions tirées de cette corrélation doivent être maniées avec précaution et une certaine flexibilité dans des limites raisonnables. Les sources propres d'aluminium, combinées avec une activité promotionnelle suffisante, peuvent avoir pour résultat une consommation plus importante que celle que l'on pourrait attendre, ce qui demeure encore une vue économique, comme le montrent diverses nations (par exemple, France, Hongrie, Venezuela). Malgré tout, une industrie nationale peut agir d'une façon positive ; il existe des pays comme Hong-Kong et la Corée du Sud, consommant des quantités importantes d'aluminium (3-5 kg par habitant et par an), sans avoir de bauxite. Dans ces pays, des capacités importantes de première transformation ont été récemment implantées. (10). D'un autre côté, la consommation spécifique de l'Inde ou de l'Indonésie avec de larges réserves en bauxite, et en Inde avec une production d'aluminium bien conçue, est très faible, inférieure à 0,5 kg par habitant.

Comme il en a déjà été discuté dans le chapitre C, on envisage une croissance de consommation d'aluminium pour les années 1990-1993 (cf annexe 7). Le taux moyen de croissance annuelle attendu est de 4,2 %, variant avec les économies des marchés nationaux. Le taux de croissance probable est, quoi qu'il en soit, au-dessous de cette valeur moyenne pour les USA et l'Europe, c'est-à-dire dans les régions à plus forte consommation au monde. Le seul pays devant atteindre un taux de développement supérieur à cette valeur moyenne est la France.

De même, on escompte au Japon un taux de croissance supérieur à cette moyenne (4,8 %), ainsi que pour le reste du monde (5,4 %). Ceci signifie que la consommation des pays non industrialisés devrait croître considérablement, sauf probablement moins dans les moins développés. Ce fait peut influencer les tendances de réimplantation. GONZALES-VIGIL cite, dans son étude (12) du rapport annuel d'Alcan Aluminium 1982 : "Les marchés en développement ne peuvent pas être économiquement servis par les usines, de forte production, des marchés murs. La variété multiple des petits ordres, caractéristique d'un PVD, doit être servie par une capacité flexible, susceptible d'ajuster les livraisons aux demandes et de croître par palier successif". On peut de ce fait s'attendre à une activité croissante pour l'implantation d'usines de première transformation dans les PVD, pendant les dix dernières années de ce siècle. Les usines de demi-produits sont établies au voisinage des marchés, néanmoins, il existe un important commerce international pour ces produits (voir annexe 38) (6). Ce phénomène résulte en partie de raisons techniques, en partie de raisons économiques

Les statistiques figurant dans l'annexe 38 indiquent que les valeurs d'exportation mondiale de 15 pays, y compris les plus importants utilisateurs, se sont élevées à 2.990.791 tonnes en 1983 de demi-produits Al et les importations des mêmes pays on atteint 1.716.535 tonnes, la même année. La balance de 574.256 tonnes en faveur des exportations représente des livraisons à des pays industrialisés, mais surtout à des PVD.

La part de demi-produits, incluse dans le commerce international comparée à la consommation mondiale, est très différente pour les pays ci-dessus mentionnés. Cette part relative aux marchés importants -avec une importante consommation et une production de demi-produits (p.e. les USA)- est relativement plus faible

que pour les pays relativement plus petits pour lesquels la participation à la répartition internationale du travail est plus impérative.

L'attention doit être aussi attirée par le fait que la majeure partie du commerce des semi-produits est formée de produits laminés, ce qui confirme que les unités de capacité dominant et que les coûts de transport sont acceptables pour ces produits. La position des PVD dans la production internationale de demi-produits peut être illustrée comme suit :

(i) le tableau 10 contient des indications concernant le commerce des demi-produits aluminium dans les PVD (62) :

TABLEAU 10			
COMMERCE DES DEMI-PRODUITS DANS LES PVD			
Année	Importations (vers les PVD)	Exportations (des PVD)	Balance
1963	101.000 T	2.000 T	- 99.000 T
1970	132.000 T	17.000 T	- 115.000 T
1977	301.000 T	25.000 T	- 276.000 T

Depuis 1977, la valeur des importations pourrait dépasser 400.000 T par an.

L'annexe 39 montre : la capacité des usines de demi-produits, dans des PVD choisis, pour 1983, les capacités possibles pour 1987, aussi bien que la consommation de lingot (métal primaire) en 1981, basée sur (10).

3. EVENTUALITES DANS LE CADRE DE LA COOPERATION NORD-SUD

Les tendances pour la construction de nouveaux complexes dans les régions où bauxite et énergie bon marché sont disponibles, l'accroissement attendu pour la consommation mondiale d'aluminium après 1990 et la part d'accroissement plus importante que la moyenne des PVD, permettent de supposer qu'un développement futur considérable de l'industrie de l'aluminium prendra place dans les PVD. La demande d'aluminium prévue pour les PVD ajoute un nouvel élément à ce tableau : non seulement des raffineries et des usines d'électrolyse, mais aussi une part croissante d'usines de première transformation peuvent être escomptées pour les PVD. Cette tendance mondiale peut être expliquée comme suit, sous une forme différente.

La moindre abondance de bauxite dans les pays industrialisés a été l'une des principales raisons de l'implantation des usines d'alumine dans les PVD. La richesse du minerai brut et le bon marché des ressources énergétiques en Australie et au Brésil ont conduit à l'implantation d'importantes raffineries et usines d'électrolyse dans ces pays et représentent le récent événement dans le développement mondial de l'industrie de l'aluminium. Il existe aussi d'importantes possibilités, dans d'autres régions, notamment en Afrique, utilisées, jusqu'à maintenant, d'une façon extrêmement limitée, ainsi un développement futur peut être envisagé dans cette zone, pour les dernières années du siècle.

La création des usines de première transformation dans les PVD est plus complexe. La demande d'une consommation croissante dans quelques PVD est déjà résolue par l'implantation d'usines importantes au Brésil, au Mexique ou dans certains pays d'Asie. Il y a aussi une possibilité future pour l'utilisation de la

production des usines opérant déjà, ou à établir, dans les PVD.

Comme mentionné ci-dessus, les statistiques montrent qu'il y a un commerce considérable de demi-produits aluminium parmi les pays industrialisés. Ce commerce est en partie la conséquence d'une répartition raisonnable internationale du travail. La participation de quelques PVD dans ce commerce peut être envisagée dans le futur, spécialement de ceux producteurs de métal et également importants consommateurs d'aluminium. On peut concevoir que dans des cas choisis, les demi-produits fabriqués dans ces pays pourraient être vendus non seulement pour satisfaire les besoins locaux ou ceux éventuels des régions limitrophes, mais encore partiellement ceux des pays industrialisés ou ceux d'autres régions.

Dans ce contexte, l'attention peut être attirée vers la possibilité de transfert d'usines existantes et de première transformation vers les PVD. Spécialement, des équipements modernes de plus faible capacité que ceux adaptés à une grande nation industrialisée, pourraient couvrir les besoins locaux et même fabriquer des produits semi-ouvrés pour l'exportation.

La reprise partielle du capital d'entreprises, opérant dans les pays industrialisés, peut être envisagée, dans certains cas, pour les contrées en développement. Des exemples pour ce type de coopération Nord-Sud sont cités au paragraphe 6.3. L'étude relative à la création d'usine convenant le mieux aux besoins des PVD, dont les livraisons sur les marchés sous-régionaux, régionaux et inter-régionaux, sera présentée au point F.5.

4. COOPERATION PARMIS LES PVD

Les ressources en bauxite ne sont qu'un des impératifs pour construire une industrie d'aluminium, partiellement ou pleine-

ment intégrée, dans une contrée donnée. Les facteurs justificatifs peuvent être : la disponibilité d'énergie électrique bon marché, la population nationale et les besoins futurs d'aluminium. Les pays ayant un marché possible, intérieur et à l'exportation, de 100.000 tonnes par an peuvent se permettre d'envisager de développer une industrie de l'aluminium intégrée si l'on dispose à la fois de ressources de bauxite et d'énergie bon marché. Les autres peuvent, tout d'abord, prendre une part dans la répartition internationale du travail, en recherchant une participation appropriée.

Une coopération sous-régionale, régionale et même inter-régionale entre les PVD peut être envisagée parmi les possibilités d'objectifs de création d'une importante industrie de l'aluminium dans les PVD. Cela a été rarement le cas jusqu'à maintenant. Quelques essais ont été tentés pour une telle coopération par exemple le cas JAVEMEX entre la Jamaïque, le Venezuela et le Mexique, qui fut converti plus tard en une coopération bilatérale Mexique-Jamaïque ; dans ce cadre, la Jamaïque aurait produit l'alumine ; le Mexique était supposé produire le métal à partir de cette alumine ; ou, un autre cas : les autorités indiennes montraient également un intérêt dans l'érection d'une usine d'électrolyse au Mozambique, utilisant l'alumine indienne. On ne peut obtenir d'information au sujet de la réalisation de ces idées. On peut trouver quelques autres exemples concernant des relations Sud-Sud à la référence (62), mais on doit noter que ces exemples couvrent plutôt des cas de coopération entre usines appartenant au TNC (multinationales) et construites dans différents pays en développement.

Les initiatives, liées à la production de divers semi-produits dans les PVD, peuvent avoir des bases, même dans le cas d'absence de production de métal dans les régions considérées.

L'augmentation de la demande, dans une région, en produits aluminium, peut conduire à une telle coopération dans le futur. La production d'une large variété de demi-produits implique à la lettre, un marché de dimension considérable qui se trouve rarement dans un pays, comme l'illustre l'exemple des pays industrialisés.

5. ETABLISSEMENT DES USINES DE PRODUCTION DANS LES PVD

En envisageant l'implantation d'usines de première transformation dans les PVD, les options suivantes, ou leurs combinaisons, apparaissent possibles (41, 42) :

- satisfaire la demande de semi-produits d'une industrie, fabriquant déjà des produits finis, par l'emploi partiel ou total de produits nationaux semi-manufacturés, afin de remplacer autant que possible les produits importés. Cet objectif peut être réalisé pour des investissements relativement modestes ; les usines implantées pratiquent alors normalement les opérations finales de fabrication à partir d'ébauches importées (par exemple, des bobines laminées à chaud, etc..)
- installation d'usines pour produire des bandes et fils machines en recevant du métal liquide d'une fonderie déjà existante, ou à ériger, dans le voisinage et, par suite bénéficier des économies d'énergie ;
- installation d'une usine de première transformation d'un complexe intégré, indépendante de l'endroit où la fonderie est implantée.

Par comparaison, chacune des approches précédentes ont leurs mérites et leurs inconvénients. Ceux-ci sont plus amplement énumérés sous les références (41, 42).

6. VALIDITE DE LA TECHNOLOGIE

La plupart des technologies décrites sont utilisées. On peut rencontrer des exceptions pour de récents développements, n'ayant pas encore fait leur preuve pour des opérations sur de larges échelles. Il n'y a donc par suite aucun facteur de limitation pour implanter une usine dans un PVD, à condition que la technologie choisie ait été correctement ajustée aux matériaux bruts, disponibles et aux conditions locales.

7. MARKETING

Cette question ne fait pas partie de la présente étude. Mais en raison de son importance, il est fait référence au document (62), exposant cette question en détail.

8. QUELQUES REMARQUES GENERALES

8.1.

Une certaine corrélation entre le PIB et la consommation d'aluminium a été établie. En raison du fait que la révolution technique actuelle apporte des éléments nouveaux dans la structure entière de cette industrie, il est fort probable que cette corrélation devra être révisée. Il serait préférable de faire reposer les tendances de la consommation future d'aluminium sur une base plus approfondie, comme BIRD a essayé de le faire (8). On devra considérer non seulement le modèle total du développement de l'économie, mais encore réaliser une analyse des domaines variés des applications futures du métal.

8.2.

La production des demi-produits aluminium et des produits finis nécessite peu d'énergie et pratiquement pas d'addition de matières premières. Il doit être pris en compte que pour ces fabrications, la main d'oeuvre par rapport au coût d'investissement est meilleur marché que dans l'hypothèse de l'implantation d'usines d'alumine ou d'électrolyse.

8.3.

Les usines de fabrication de produits finis, dont l'implantation a été basée sur un marketing approprié, dans la plupart des cas, accroissent la consommation d'aluminium de la région. Cela résulte de l'intégration amont de l'industrie de l'aluminium, d'abord à la fabrication locale de demi-produits et peut être ultérieurement à la production nationale de métal ou à son importation avec un accord de coopération.

8.4.

L'accès à l'information, propre à la profession, à l'acquisition de connaissances techniques, sont des facteurs importants pour le développement de l'industrie de l'aluminium dans les PVD. On doit retenir plus particulièrement les possibilités suivantes :

- diffusion de l'information technique et commerciale, soit notices, périodiques, brochures, catalogues, etc... ;
- visites d'experts des PVD aux instituts d'aluminium, aux entreprises, participation aux congrès internationaux, UN, AIME, ICSOBA, etc... ;
- rencontres d'experts avec des participants des PVD .

- participation à des stages ou des groupes de stages organisés pour des spécialistes venant des PVD ;
- création de centres R et D dans les PVD ;
- création de centres d'information dans les pays désirant promouvoir le développement de l'usage de l'aluminium dans divers domaines d'application.

9. LE ROLE DE L'ONUUDI (2)

Depuis sa création, l'ONUUDI a toujours fait beaucoup d'efforts pour développer l'industrie de l'aluminium dans les PVD. L'ONUUDI agit à la demande des gouvernements grâce à un programme d'assistance technique. Les activités opérationnelles sont soutenues par l'organisation des symposiums, des séminaires, les rencontres d'exportateurs, les ateliers et la préparation des études, notes et autres documents. Deux des activités de l'ONUUDI dans le domaine de l'aluminium méritent une attention spéciale :

- promotion des capacités R et D (Chine, Inde, Jamaïque, Yougoslavie) ;
- assistance pour l'établissement et l'exploitation d'unités industrielles (Chine, Irak, Indonésie, Mozambique).

En ce qui concerne les activités concernant l'ONUUDI, on peut citer :

- atelier sur les cas d'étude de la construction d'usine d'électrolyse dans les PVD ;
- organisation des programmes du groupe de formation sur la production de l'alumine ;

- réalisation d'études répartissant les usines de demi-produits et l'utilisation de l'aluminium dans les PVD.

La convocation des "Premières Assises" dans l'industrie des métaux non ferreux représente un important jalon dans les activités de l'ONUDI dans le domaine de l'aluminium : il doit en être tenu compte dorénavant dans les programmes de cette organisation.

Par rapport aux activités d'exploitation, il apparaît que la contribution possible de l'ONUDI serait particulièrement appréciée dans les domaines suivants :

- évaluation quantitative, contrôle de laboratoire de l'aluminium brut et autres produits ;
- expertise pour une exploitation efficace et la modernisation des unités existantes ;
- planification et établissement d'unités "R et D" et d'usines nouvelles ;
- création de services d'assistance pour les clients.

Suivant l'opinion de l'auteur de ce rapport, la conséquence de la rencontre "Premières Assises" ("First Consultation") impliquera un accroissement considérable des activités de l'ONUDI, principalement afin de révéler des possibilités ultérieures du développement de l'industrie de l'aluminium dans les PVD en coopération avec des zones géographiques étroites, régionales et inter-régionales. Il apparaît souhaitable que l'on porte une attention particulière au développement des usines de demi-produits et de produits finis dans les PVD.

Les études orientées, aussi bien que les rencontres de groupes d'experts, devront être également envisagées dans le but d'identifier les possibilités de conception et de fabrication d'équi-

pements pour produits semi-ouvrés, mieux adaptés aux conditions caractéristiques des PVD. Le perfectionnement de la connaissance de corrélation entre la consommation d'aluminium et le niveau général de développement d'un pays donné peut être aussi un important sujet pour les activités soutenues par l'ONUDI.

G. RECOMMANDATIONS

1. LES PVD peuvent exprimer des souhaits et les sociétés ayant des exploitations dans ces pays sont invitées à envisager les points suivants :

1.1.

en raison de la tendance de l'industrie de l'aluminium à la réimplantation, poursuivre l'exploration des bauxites en utilisant des méthodes récentes, particulièrement pour les gisements convenablement situés et éventuellement proches des ressources énergétiques bon marché.

1.2.

seulement sous réserve, la fabrication locale à partir de miner-is, no.. bauxites, ou des bauxites bas-titre ;

1.3.

dans l'hypothèse de ressources énergétiques bon marché, l'implantation d'usine d'électrolyse, même en dehors de ressources en bauxites ;

1.4.

suivre les perfectionnements des procédés Bayer et Héroult-Hall car ils prévaudront dans l'industrie de l'aluminium jusqu'à la fin de ce siècle ;

1.5.

en raison de la structure spéciale de l'alumine aussi bien que de celle des marchés d'aluminium et la taille des usines compétitives, explorer -si approprié- toutes les possibilités de coopération locale, régionale et inter-régionale, raisonnablement envisageables dans des conditions franches et équitable pour création des objectifs ci-dessous considérés. Chaque fois, des études de faisabilité et de marketing sont nécessaires pour prendre une décision ;

1.6.

si possible, examiner les possibilités des marchés locaux, sous-régionaux, régionaux, inter-régionaux, lorsque l'on examine les problèmes liés à l'établissement d'usines de première transformation. Cette action, même basée sur du métal importé, est souvent profitable. Une implantation d'une production de produits finis peut conduire progressivement, dans un pays dépourvu d'usines de demi-produits, à une demande telle qu'elle implique la construction d'usines de première transformation ;

1.7.

les possibilités technologiques d'un développement progressif des demi-produits, particulièrement la dimension nécessaire des usines de laminage et filage, en fonction des procédés adaptés ;

1.8.

l'implantation d'usines de fabrication de demi-produits avec un équipement de seconde main de haute qualité. Cette solution présente de plus l'avantage que les accords prévoient, le plus souvent, des transferts de technologie ;

1.9.

la création d'instituts de R et D propres à l'aluminium et de services d'information pour les clients.

2.

Les pays industriellement développés peuvent souhaiter ce qui suit et les sociétés opérant dans ces contrées doivent l'examiner :

2.1.

établir dans les PVD de nouvelles usines d'aluminium ou, en remplaçant pour différentes raisons celles qui existent éventuellement, faire une analyse objective des coûts de production escomptés, en se basant sur les avantages mutuels dont ceux financiers ;

2.2.

revoir, avec une particulière attention, dans le cadre des accords de coopération, les possibilités d'impliquer les entreprises travaillant dans les PVD, en fournissant les demi-produits aluminium à partir des pays industrialisés ;

2.3.

afin d'assurer l'information des PVD dans le domaine R et D, des services d'information et de perfectionnement de nouvelles technologies dans l'industrie de l'aluminium qui pourraient être utiles pour ces contrées en sélectionnant les options réalistes possibles ;

2.4.

recevoir des stagiaires des PVD en particulier, en relation avec les différents problèmes des applications de l'aluminium ;

3. L'ONUDI DOIT SOUHAITER EXAMINER LES POINTS SUIVANTS

3.1.

accroître ses activités opérationnelles à la demande des autorités des PVD ;

3.2.

renforcer ses activités d'appui par la préparation d'études orientées vers l'action et l'organisation de rencontres de groupes d'experts concernant les importants propos suivants :

- réviser les possibilités de coopération sous-régionale, régionale et inter-régionale dans l'établissement des objectifs d'une industrie d'aluminium nouvelle à l'implantation particulièrement adaptée dans ce but ;
- identifier les possibilités de coopération parmi les différents pays pour la fourniture de demi-produits aluminium et produits finis dans différentes régions ;
- envisager des modalités de projet et de fabrication d'équipement mieux adaptés aux contrées en développement ;
- orienter les recherches pour établir une corrélation plus structurée entre la consommation d'aluminium et le niveau de développement total d'une économie nationale donnée.

Cette étude avait pour support des considérations techniques et des considérations économiques larges. Les suggestions proposées (chapitre G) ont été rédigées sur cette base. En établissant les recommandations de la rencontre "Consultation", d'autres points importants doivent être considérés : structure actuelle internationale de l'industrie, coûts des transports, problèmes financiers, contributions, charges et autres aspects commerciaux, dont ceux discutés dans le document (62), et particulièrement les différences dans l'économie des PVD.

Les membres de la branche "Négociation" et des autres unités du secrétariat ont apporté un précieux concours pour nous guider et nous documenter. L'auteur a vivement apprécié l'aide de ses collègues.

ANNEXE I

CONCEPTION D'UNE MÉTHODOLOGIE POUR DÉFINIR
UNE TECHNOLOGIE APPROPRIÉE

EXTRAIT DE BIRITZ (5)

Sous forme simplifiée, les considérations définissant les technologies de fabrication industrielle convenables seront les suivantes :

- a) définir le produit en termes techniques ; s'il y a plus d'un produit, les identifier et décrire chacun d'eux ;
- b) définir les marchés pour chaque variété de produit en concernant plusieurs (1), les niveaux de prix raisonnable et établir un ordre de "préférences initiales" entre les divers produits. Il faut également prendre en compte l'adequation du produit à l'aspect social ;
- c) identifier et dresser la liste de tous les procédés technologiques pour fabriquer le produit ;
- d) identifier ceux des procédés à choisir paraissant les plus avantageux, par rapport à la disponibilité du matériau brut (i), à l'investissement en capital (ii), à l'utilisation de la MO (iii) à la facilité de mise en oeuvre et d'entretien, etc...
- e) définir les paramètres économiques exacts pour l'usine (soit la profitabilité escomptée, les subventions disponibles, etc...) ;

(1) Note du traducteur : segmentation

- f) déterminer toutes les contraintes socio-politiques impératives à envisager (soit l'emplacement de l'usine, les heures de travail, les problèmes d'environnement, etc...) et estimer l'incidence des coûts en résultant ;
- g) déterminer la capacité de la main d'oeuvre pour le fonctionnement de l'usine et son niveau de qualification ;
- h) revoir les possibilités variées des procédés à la lumière du matériau brut disponible, des contraintes économiques, socio-politiques et humaines et choisir un ou plusieurs procédés montrant la promesse la plus grande pour les exigences les plus faibles ;
- i) répartir les procédés sélectionnés en phases individuelles et déterminer ceux qui peuvent être modifiés pour des investissements minimaux et des coûts de mise en oeuvre, comprenant l'utilisation maximale de M.O. si cela est souhaitable ;
- j) définir la dimension maximale pour obtenir les taux de production prévus, dans le contexte de l'étude de faisabilité, détaillée et nécessaire ;
- k) finalement, cette étude de faisabilité devra clairement identifier toutes les clés des besoins supposés et des données contrôlées (exemple : entraînement du personnel pour faire travailler l'usine avec succès après sa construction).

ANNEXE 2

=====

CONSOMMATION D'ALUMINIUM (1973-1983), EN MILLIERS DE TONNES

1. Consommation mondiale totale (primaire + secondaire)

	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
Monde moins PEC (1)	13.787	13.901	11.065	13.958	14.463	15.334	16.141	15.572	15.117	14.861	16.355
Pays PEC	3.020	3.550	3.500	3.750	3.900	4.100	4.175	4.135	4.115	4.180	4.245
TOTAL	16.809	17.451	14.565	17.708	18.363	19.434	20.316	19.707	19.232	19.041	20.600

2. Consommation d'aluminium primaire

Monde moins PEC	11.189	11.269	8.619	11.095	11.366	12.027	12.618	11.969	11.318	10.948	12.124
Pays PEC	2.578	2.763	2.840	3.024	3.175	3.316	3.374	3.321	3.301	3.336	3.342
TOTAL	13.767	14.059	11.459	14.119	14.541	15.343	15.992	15.290	14.619	14.284	15.466

3. Consommation d'aluminium de deuxième fusion

Monde moins PEC	2.598	2.705	2.446	2.863	3.097	3.307	3.523	3.603	3.799	3.913	4.231
Pays PEC	444	687	660	726	725	784	801	814	814	844	903
TOTAL	3.042	3.392	3.105	3.589	3.822	4.091	4.324	4.417	4.613	4.757	5.134

NOTE : La consommation d'aluminium primaire mondiale moins les pays PEC est approximativement de 12.450 milliers de tonnes

REFERENCE : (6)

(1) Pays PEC = pays à planification économique centralisée.

ANNEXE 3

CAPACITÉS DES USINES D'ALUMINE POUR PRODUITS MÉTALLURGIQUES
PAR CONTINENT EN 1984 (UNITÉ : 1.000 TONNES)

Europe, y compris Yougoslavie et Turquie, mais à l'exclusion des pays PEC (1)	6.445
Europe (pays PEC)	6.755
Amérique du Nord	7.105
Amérique Latine	6.070
Océanie	9.110
Est-Asie (pays PEC exceptés)	2.772
Pays d'Asie PEC	920
Proche-Orient	-
Afrique	700
	<hr/>
TOTAL	39.877

Références : (9)
(révisé partiellement)

(1) PEC : pays à planification économique centralisée.

ANNEXE 4

CAPACITÉS D'ÉLECTROLYSE PAR CONTINENT
EN 1984 (UNITÉ : 1.000 TONNES)

-3-3-3-

Europe, y compris Yougoslavie et Turquie mais pays PEC exclus	4.008
Europe (pays PEC)	3.735
Amérique du Nord	5.933
Amérique Latine	1.059
Océanie	847
Est-Asie (sauf pays PEC)	1.292
Pays d'Asie PEC	569
Proche-Orient	377
Afrique	622
	<hr/>
TOTAL	18.432

Références : (9)
(partiellement révisé)

PEC = pays à planification économique centralisée.

ANNEXE 5

CAPACITÉ DE PRODUCTION DES DEMI-PRODUITS ALUMINIUM
PAR CONTINENT EN 1983 EN MILLIERS DE TONNES

Europe (y compris la Yougoslavie et la Turquie, mais pays PEC exclus)	5.103,5
Europe (pays PEC)	environ 3.500,- *
Amérique du Nord	7.910,5
Amérique Latine	653,5
Océanie	322,5
Est asiatique (pays PEC exclus)	2.667,6
Pays PEC d'Asie	environ 570,- *
Proche-Orient	160,6
Afrique	239,9
<hr/>	
TOTAL	21.127,9

NOTES : * estimation.

- seules les opérations initiales de la première transformation ont été prises en considération, soit le laminage à chaud, (mais non le laminage à froid et la fabrication de feuilles minces) : le filage et le fil machine (mais non la capacité de fabrication de fils). Ne comprend pas les capacités de fonderie.

REFERENCES : (10) (partiellement révisées, (40).

COURBE DE LA FOURNITURE D'ALUMINIUM - 1985

Valeur de la capacité que doit atteindre la production à laque niveau du prix de l'aluminium pour être rentable

prix 1985, en cent par livre

demande pour un prix d'au moins 65 cents

Niveau de la production d'aluminium en 1985

milliers de tonnes

105

95

85

75

65

55

45

35

0

2000

4000

6000

8000

10000

12000

14000

16000

ANNEXE 6

Extrait de (8)

ANNEXE 7

TAUX DE CROISSANCE ANNUELLE ESCOMPTEE
1990-1993

	<u>production industrielle</u>	<u>consommation d'aluminium</u>
USA	4,6 %	4,0 %
Japon	5,8 %	4,8 %
France	4,8 %	4,8 %
RFA	3,8 %	3,1 %
Italie	4,8 %	3,8 %
Royaume-Uni	3,4 %	- 0,2 %
Autres Europe *	4,1 %	3,8 %
Total Europe *	4,1 %	3,4 %
Reste du monde *	aucun chiffre	5,4 %
Monde *	4,6 %	4,2 %

NOTE : * pays à économie de marché seulement

Références : (8).

ANNEXE 8

RESSOURCES EN BAUXITES, CLASSÉES SUIVANT LEUR ÉTAT DE DÉVELOPPEMENT

Contrée/Continent	Ressources identifiées				Ressources non découvertes	
	Développées		Non développées		TOTAL	Hypothétique Spéculatif
	Réserves minières	Minerais potentiels	Réserves	Minerais potentiels		
Australie	1.215	2.175	10.30	1.980	6.400	
Guinée	1.210	250	3.345	13.990	18.795	
Cameroun	-	-	680	1.320	2.000	
Autres Afrique	50	-	720	1.885	2.655	
Afrique	1.260	250	4.745	17.195	23.450	
Brsil	620	-	850	3.030	4.500	} >50.000
Jamaïque	1.800	-	-	600	2.400	
Surinam	200	-	200	1.570	2.970	
Guyane	90	250	-	820	1.160	
Autres Amérique	65	5	295	2.325	2.690	
Amérique	2.775	255	1.345	8.345	12.720	
Inde	50	-	1.070	1.495	2.615	
Indonésie	40	40	500	500	1.080	
Autre Afrique	35	5	160	790	990	
Asie	125	45	1.730	2.785	4.685	
Europe	805	345	-	325	1.475	
Monde Occidental	6.180	3.070	8.850	30.630	48.730	
Pays à commerce d'Etat		non réparti			1.960	
Monde total					50.690	>50.000

Référence : (15).

ANNEXE 9

SYSTÈME DE CLASSIFICATION DES RESSOURCES EN BAUXITE

RESSOURCES

Exploitées		Non exploitées	
Réserves minières	Minerais potentiels	Réserves	Minerais potentiels

Définitions

Ressources : concentration sur ou à l'intérieur de l'écorce terrestre telle que l'exploration économique est couramment ou potentiellement exploitable. Ressources = réserves + minerais potentiels.

Ressources exploitées : gisements de bauxite par zone couramment en exploitation.

Ressources non exploitées : gisements de bauxite connues par zones de bauxite, pour lesquelles une exploitation économique pourrait être escomptée dans l'avenir.

Réserves : part des ressources pour laquelle la bauxite est couramment et économiquement exploitée dans les conditions présentes, y compris coût, qualité, quantité, preuve et technologie géologiques (catégorie : réserves minières de ressources exploitées) ou bien dont l'exploitation économique sera exploitée dans le futur (catégorie : réserves de ressources non exploitées).

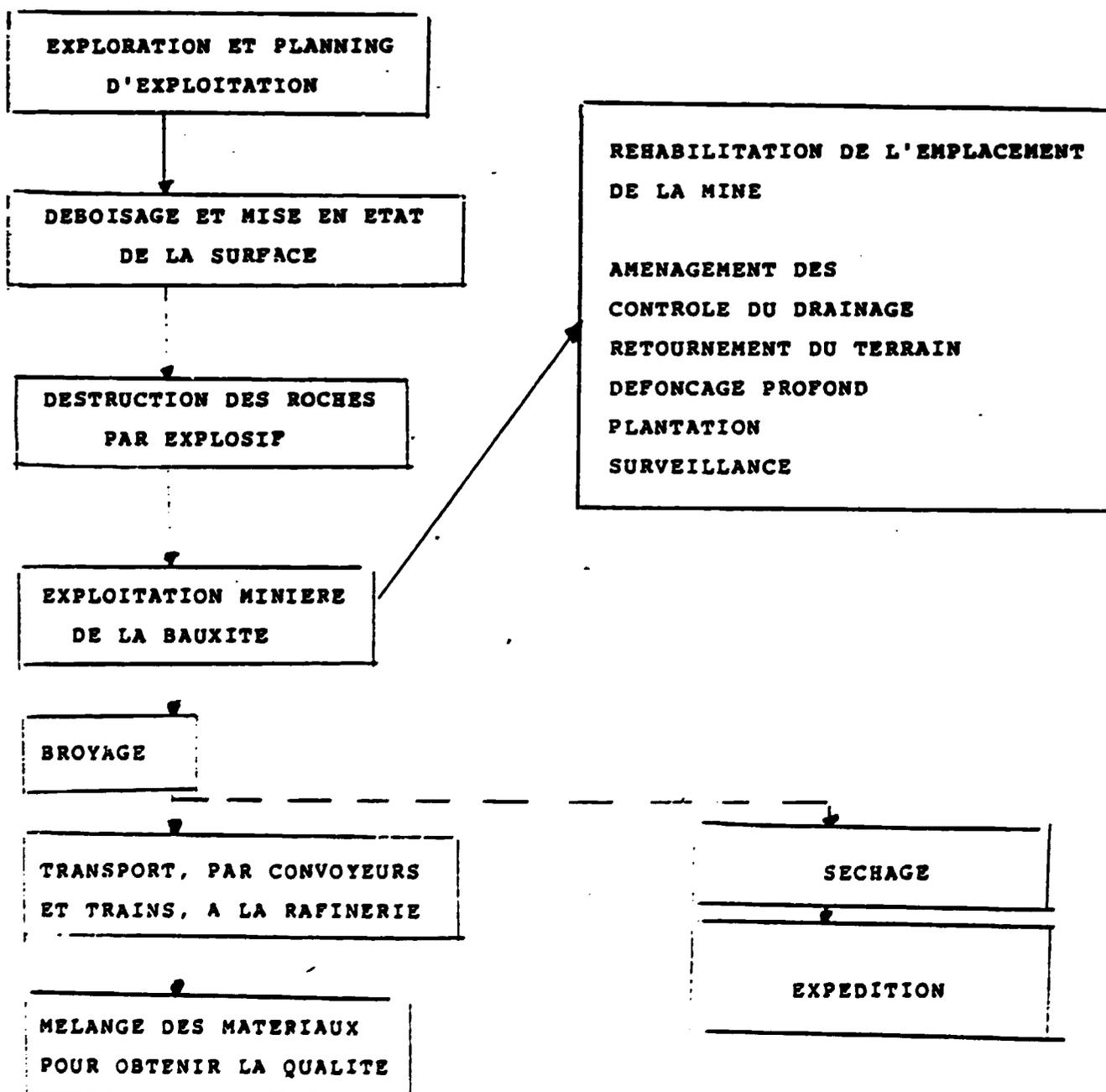
.../...

Minerais potentiels : cette part des ressources dans la prolongation des gisements connus, insuffisamment explorés à ce jour et pour lesquels les quantités estimées sont largement basées sur une connaissance étendue (catégorie : minerais potentiels des ressources exploitées) ou part des ressources sous-économiques pouvant devenir des réserves dans l'hypothèse d'une modification des conditions économiques ou à la suite d'exploitation futures (catégorie : minerais potentiels non exploités).

ANNEXE 10

PRINCIPALES PHASES D'EXPLORATION MINIÈRE
DE LA BAUXITE, DE LA PHASE D'EXPLORATION À
LA PHASE D'AFFINAGE

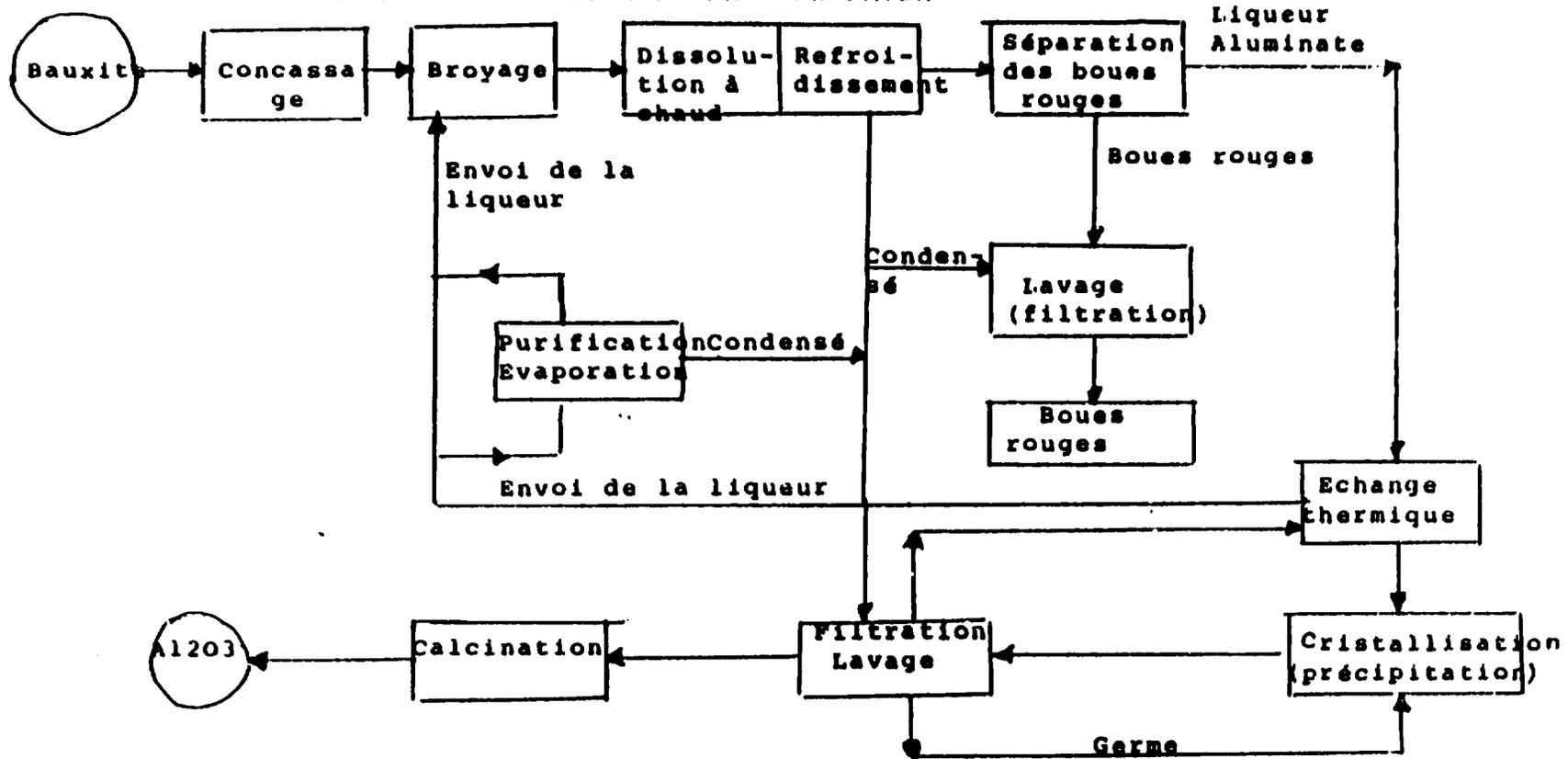
(D'APRÈS DOCUMENTATION ALCOA-AUSTRALIE)



ANNEXE 11

=====

UNITÉS D'OPÉRATION DU PROCÉDÉ BAYER



ANNEXE 12

CARACTÉRISTIQUES DE L'ALUMINE, TYPES "FARINE" OU "SABLEUX"

	Alumine sableux	Alumine farineux
Pourcentage de répartition du grain :		
+ 150 μm	< 5	-
75-150 μm	60	10
45-75 μm	25	40
- 45 μm	< 10	50
Surface spécifique		
m ² /g	> 30	5-10
Pourcentage (%) d'Al ₂ O ₃ alpha contenu	< 30	50-70
Angle d'équilibre en degré	$\approx 30^\circ$	40-50°
LOI en %	≈ 1	$\approx 0,5$

ANNEXE 13

VALEUR DU CAPITAL POUR DES RAFINERIES D'ALUMINIUM
(EN US DOLLARS 1980)

Coût du capital total, y compris l'infrastructure et les facteurs locatifs.

Dimension de la raffinerie

(millions de tonnes/an)

0 - 2,0
2,0 - n x 2
n x 2

Coût du capital

(millions US dollars)

fl cpx (330 + 720 x dimension)
flx cpx (885 x dimension)
flx cpx (1.062 x dimension)

où cp = coefficient du procédé

Procédé

Bayer (USA)
A. Bayer modifié
Bayer (Europe)
Soda-Sinter

Coefficient du procédé

1,0
1,06
1,12
1,30

fl = facteur d'implantation d'après tableau 13

n = déséconomie de coefficient d'échelle entre 2 et 5 en fonction du site (Déséconomie = prise en compte des conséquences négatives du développement industriel dans les calculs d'investissement)

Sources : Woods, D. "Financial Decision Making in the Process Industry, Prentice Hall, New Jersey, 1975.

World Bank Consultant

Extrait de (11).

ANNEXE 14

=====

COÛTS DE PRODUCTION DE QUELQUES USINES D'ALUMINE
(US DOLLARS/TONNE D'ALUMINE)

	Capacité mT/an	Bauxite	Autres matériaux	Energie	Salaires, etc	Total des valeurs variables	Frais de capital	Total
A. USINES ANCIENNES								
AOA Pinjara Australie	2.600	26,3	13,7	56,9	39,6	136,1	41,2	177,3
Gove, Australie	1.200	25,1	14,8	54,0	36,9	130,7	49,6	180,3
VAM Lünen, RFA	430	82,1	5,6	43,8	37,7	169,2	17,4	186,6
PUK Gardanne, France	710	82,0	9,6	46,0	37,9	175,5	17,5	193,0
Alcoa Pt.C., USA	1.320	80,2	5,1	50,1	42,9	178,3	17,3	195,6
Friguia, Guinée	630	26,7	8,9	92,7	47,8	176,1	39,6	215,7
Alox Stade, RFA	650	73,6	12,1	46,7	40,0	172,4	43,8	216,2
Jamalco, Jamaïque	495	77,0	8,6	73,3	44,3	203,1	41,5	244,6
Eurallumina, Italie	720	80,9	16,6	67,9	45,1	210,4	48,8	259,2
K. BatonRouge, USA	930	100,5	10,6	66,7	56,5	234,3	41,2	275,5
B. NOUVELLES USINES								
Worsley, Australie	1.000	30,8	13,9	44,0	35,8	124,4	135,8	260,2
Interalum., Venezuela	1.000	77,7	11,4	17,5	47,2	153,8	131,3	285,1
Alum Esp., Espagne	800	84,0	6,3	47,0	33,0	170,7	130,5	301,2
NALCO s, Inde	800	39,5	18,0	72,1	33,9	163,5	175,6	339,1
Aunghinish, Irlande	800	86,9	5,6	50,0	39,3	181,8	179,5	361,3
Alumar, Brésil	500	79,7	15,9	53,0	41,4	189,8	172,6	362,4

Note : * valeurs escomptées seulement

Référence : (26)

ANNEXE 15

DESCRIPTION DE QUELQUES PROCÉDÉS NON BAYER

1. PROCÉDE PAR CONCRETION

Au cours du procédé par concrétion, la bauxite ou d'autres matériaux ferritiques-aluminium sont mélangés à de la soude et à de la chaux et par traitement à 1.350°C, l'alumine contenue est convertie en aluminate de soude, susceptible d'être dissoute dans une solution de soude à faible concentration. Après filtrage de la concrétion, la solution est séparée du résidu insoluble et du silicate. La solution épurée est traitée au gaz carbonique CO₂. Les cristaux d'hydrate d'aluminium sont lavés et calcinés, tandis que la solution de soude est recyclée pour nouvel usage.

2. PROCÉDE COMBINÉ

- a) Le procédé parallèlement combiné est utilisé lorsque la bauxite peut être séparée en deux lots de minerai, contenant des pourcentages différents de silice. La bauxite à haute teneur en silice est mise sous forme de concrétions par le procédé soude-chaux et la solution ainsi obtenue est ajoutée après filtrage à la liqueur d'aluminate du traitement Bayer.
- b) On utilise aussi la combinaison des procédés "Bayer" et "par concrétion". La bauxite est alors traitée d'abord par le procédé Bayer, puis les boues rouges sont mises sous forme de concrétion en vue de régénérer l'alumine contenue.

3. PROCEDE NEPHELINIQUE

Cette technologie utilise l'alumine, la soude, les sels de potasse et le ciment. Le procédé commence en employant des concrétions de chaux, où la chaux, nécessaire pour la formation d'aluminate soluble, est disponible à partir du roc (matériau) utilisé. L'obtention d'alumine et de sel à partir de la concrétion est réalisée par une dissolution en deux phases, suivies par la désilicatisation, la carbonisation, la séparation des hydrates et la calcination. Après carbonisation de la solution, les sels de soude et de potassium sont carbonisés. La boue, contenant du silicate de calcium, est utilisée pour la production du ciment.

4. PROCEDE PAR ALUNITES

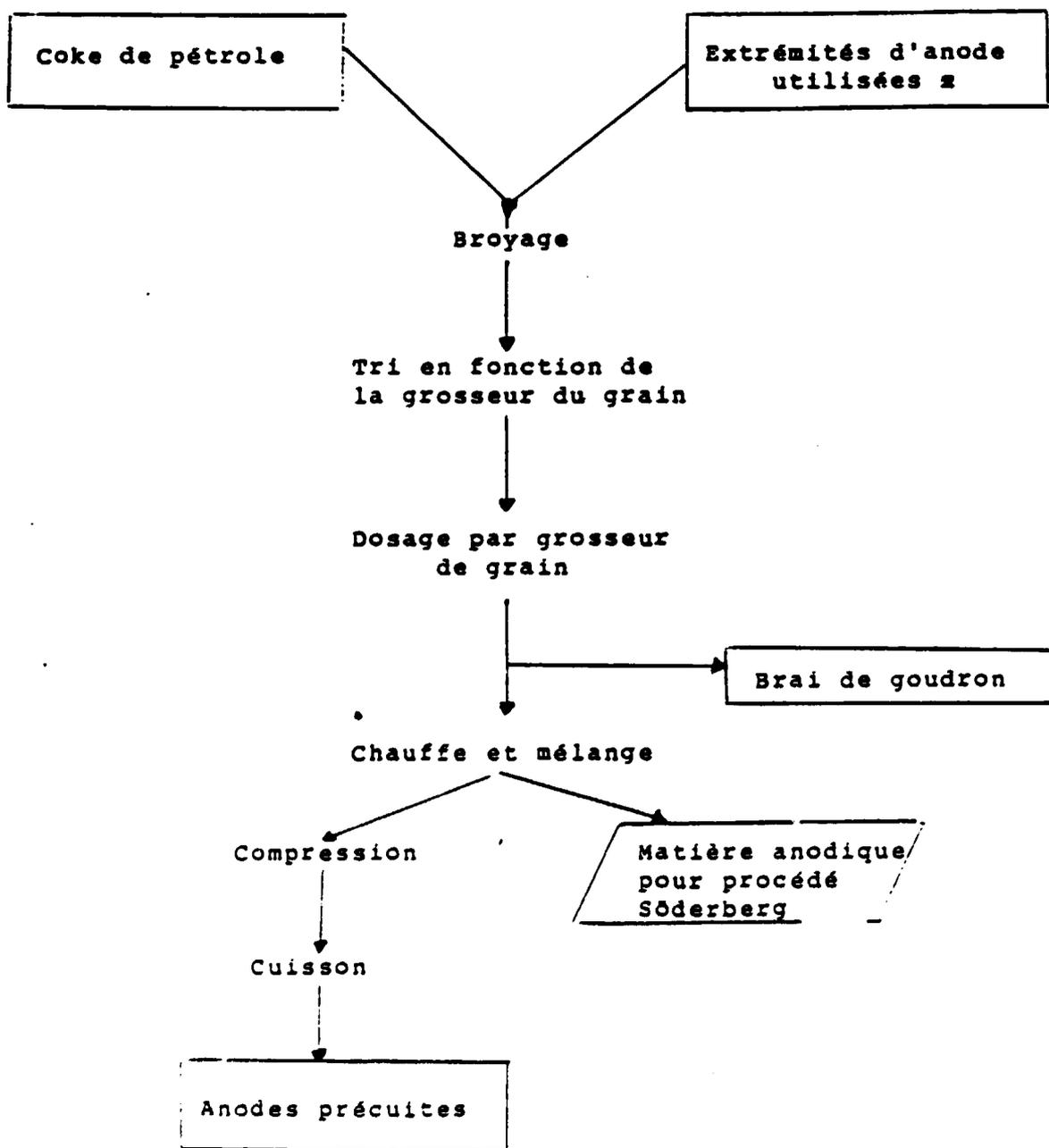
Le minerai est grillé dans deux fours en lit fluidisé. Dans la première phase, on utilise une atmosphère oxydante, tandis que, dans la seconde phase, le sulfate d'aluminium est décomposé par réduction de gaz. Les produits gazeux de la réaction sont utilisés pour produire de l'acide sulphurique, tandis que l'alunite est traité, suivant procédé Bayer modifié, pour obtenir l'alumine et les sulfates.

Au sujet du rendement du procédé, voir (29).

Référence : (29).

ANNEXE 16

SCHÉMA DE LA PRODUCTION D'ANODE



* si cela peut être envisagé

ANNEXE 17

CONSOMMATION DES USINES D'ÉLECTROLYSE
D'ALUMINIUM
(PAR TONNE MÉTRIQUE D'ALUMINIUM)

Systeme "précuit" (électrode)

Alumine, tonne métrique	1,93
Energie, KWh < a	13.500-14.300 (1980) 13.160 (1985) 12.800 (1990) 12.600 (1995-2000)
Main d'oeuvre, heures par ouvrier	8,6
Energie thermique - millions BTU (unité thermique britannique)	4,4
Coke, tonne métrique	0,375
Fluorines, < b kg	30
Brais, tonne métrique	0,10
Autres coûts (entretien, frais généraux)	220

< a Nous prévoyons, comme Anthony BIRD Associés, une augmentation en productivité d'énergie électrique de 0,5 % par an.

< b Cryolite et fluorure d'aluminium.

Sources : Woods, Douglas and James C. BURROWS, "Le marché mondial de la bauxite d'aluminium", Praeger, 1980?

Statistiques de la compagnie

Anthony BIRD Associés, Revue Annuelle d'Aluminium, février 1981.

World Bank Consultant

Extrait de (11).

ANNEXE 18

Extrait de (11)

**COÛT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE POUR LES USINES D'ÉLECTROLYSE
D'ALUMINIUM
(COÛT SUR LES SITES DE PRODUCTION)
(US DOLLARS 1980 KWH)**

Pays	Faible coût réel	Faible coût possible pour de nou- velles usines	Coût plus élevé (charbon ou nucléaire)
USA Ouest	0,02 (b)	-	0,05
USA Est	0,024	-	0,05
Canada Ouest	0,004	0,03	0,05
Canada Est	0,004	0,03	0,05
Jamaïque	-	-	0,05
Amérique Centrale/Caraïbes	-	0,02	0,05
Guyane	-	0,02 (c)	0,05
Surinam	0,0045 (d)	0,03	0,05
Brésil	0,02	0,02	0,05
Argentine	0,008	0,03	0,05
Venezuela	0,026 (e)	0,03	0,05
Europe de l'Ouest	0,020	-	0,05
Europe de l'Est	0,02	-	0,05
URSS asiatique	0,02	0,02	0,05
Océanie	0,12	0,02	0,05
Asie	-	0,02	0,05
Corée/Taiwan	-	0,02	0,05
Chine	0,02	0,02	0,05
Japon	0,02	-	0,05
Inde	0,02	0,03	0,05
Reste de l'Asie	0,02	0,03	0,05
Moyen-Orient	0,003	0,02	0,05
Afrique du Nord	0,02	0,02	0,05
Ghana/autres Afrique occ.	0,0048 (g)	0,02	0,05
Guinée	-	0,02	0,05
Zaire	-	0,006 (h)	0,05
Reste de l'Afrique orient.	-	-	0,05
Afrique du Sud	0,02	-	0,05

a) Voir Banque Mondiale : "Energie dans les pays en développement", août 1980, p. 41 ; voir aussi Murray Lester, "Regard sur l'énergie dans l'industrie de l'aluminium", Light Metal Age, Juin 1980, p. 24. Le coût du capital d'une usine électrique au charbon est d'environ US dollars 12600/KW ; considérant un taux bénéficiaire de 10-15 % et en divisant par 7.000 kwh/kw la part du capital, l'élément de coût d'une centrale au charbon sera de l'ordre de US dollar 0,02/KWh à 0,03/KWh. Si l'on ajoute le coût du charbon, on obtient un coût total de l'ordre de US dollar 0,03 KWh à 0,06 KWh, dépendant des coûts d'extraction du charbon, de sa qualité et des frais de transport.

- b) Bureau of Mines, US Department of the Interior, "Minerals and Materials - A monthly survey", juillet 1981, Washington D.C., page 2.
- c) IBA Review, Septembre 1977, p. 8, indique de 5-6 à 10 mils/KWh
- d) Suivant l'accord de Brokopondo entre le gouvernement du Surinam et Suralco
- e) Metal Bulletin, 17 février 1981, p. 15.
- f) Metal Weeks, 19 janvier 1981, mentionne que l'énergie de la rivière Asshan coûtera US dollar 0,012/KWh.
- g) Ghana : US dollars 0,0048/KWh ; Cameroun : US dollars 0,01/KWh.
- h) Projet devant utiliser l'électricité d'une usine électrique existante.

Source :

Voir les remarques précédentes. L'électricité produite à partir de gas brûlés coûterait US dollar 0,02 KWh, l'hydro-électricité à partir des sources des fleuves en amont : US dollar 0,02/KWh, et à partir de l'aval (à plus faible hauteur) : US dollar 0,03/KWh.

ANNEXE 19

Extrait de (11)

**FOURNITURES D'ÉLECTRICITÉ DISPONIBLES POUR LES USINES D'ÉLECTROLYSE
D'ALUMINIUM (GWATT.HEURES PAR AN)**

	a) Courant à faible coût	Nouveau b) Faible coût
USA Ouest	23.500	-
USA Est	21.300	-
Canada Ouest	3.700	13.100
Canada Est	11.700	3.000 (e)
Jamaïque	-	-
Amérique Central/Caraïbes	300	9.600
Guyane	-	1.700
Surinam	890	440
Brésil	3.800	26.200
Argentine	1.900	26.800
Venezuela	5.500	13.800
Europe de l'Ouest	37.900	-
Europe de l'Est	32.700	-
URSS asiatique	14.700	4.800
Océanie	7.200	29.600
Asie	-	15.700
Corée/Taiwan	-	-
Chine	5.531	1.730
Japon	3.900	-
Inde	2.850	16.200
Reste de l'Asie	850 (c)	4.200
Moyen-Orient	4.100	78.900
Afrique du Nord	1.800	9.900
Ghana/Autres Afrique occ.	3.600	39.600
Guinée	-	5.600
Zaire	-	2.400 (d)
Reste de l'Afrique orient.	-	-
Afrique du Sud	1.100	-

a) D'après l'estimation faite par le Bureau des Mines, du Département de l'Intérieur américain, "Usines d'aluminium primaire, Monde", Washington DC, 1981. Le rapport donne les sources d'énergie électrique pour chaque usine d'aluminium. L'énergie de faible coût est considérée comme générée seulement par des sources hydroélectriques, charbon et gaz naturel pour les pays exportateurs de pétrole. L'énergie électrique utile était estimée comme la capacité de l'usine (milliers tonnes métriques) X 0,95 (rendement x 14,3 G watt heure par 1.000 tonnes métriques (G = giga = 10⁹ wat

- b) Les tableaux précédents correspondant à 10 % du nouveau potentiel hydroénergétique, 25 % du gaz brûlé, plus 15.000 G watts heures provenant du charbon australien (voir tableau 4).
- c) Turquie.
- d) Seule énergie couramment disponible.
- e) Energie considérée utilisable par les usines d'électrolyse d'aluminium.

Source : voir note a)

ANNEXE 20

AUSTRALASIE

ÉTUDE D'UNE NOUVELLE USINE

AUSTRALIE

SITUATION

DATES :	1987...	PROCÉDE électrode préculée
ENERGIE	Charbon	SOURCE SUR LES COÛTS D'ENERGIE ESTIMATION
ALUMINE	tranche à faible coût	

MATERIAU	QUANTITE	PRIX	COÛT 1985	COÛT 1987	COÛT 1989	COÛT 1991	COÛT 1993
ALUMINE	1,925			585,2	629,5	659	671,3
COÛT DE PETROLE	0,34			49,2	53,8	58,7	64,1
COÛT AI	0,09			32,8	32,8	32,8	32,8
AUTRES MATERIAUX				144,6	144,6	144,6	144,6
COÛT TRAVAIL PRODUCTIF	4,1			54,6	57,3	60,2	63,3
COÛT TRAVAIL D'ENTRETIEN	1,9			25,4	26,7	28	29,5
COÛT ELECTRICITE	13693			385,1	408	429,8	450,5
COÛT MATERIAUX POUR ENTRETIEN				41,3	4,13	20,65	37,17
COÛT SERVICES ET ADMINISTRATION	1,4			22,5	23,6	24,8	26,1
COÛT SERVICES NECESSAIRES DU TRAVAIL				51,2	53,8	56,5	59,4
COÛT RAISONNABLE				82,6	82,6	82,6	82,6
COÛT ROULEMENT				32,3	33,2	35	36,4
TOTAL DES COÛTS VARIABLES				1.506,8	1.550	1.632,7	1.697,7
COÛT CAPITAL D'EXPLOITATION (capitaux circulant contrôlés CCA)				490,8	490,8	490,8	490,8
TOTAL DES COÛTS (capitaux circulant contrôlés CCA)				1.997,6	2.040,8	2.123,5	2.188,5
COÛT MUNERATION DU CAPITAL (capitaux circulant hypothétiques HCA)				534,7	458,2	392,4	336
TOTAL DES COÛTS (capitaux circulant hypothétiques HCA)				2.041,5	2.008,2	2.025,1	2.033,7
Pour mémoire							
COÛT DE L'ALUMINIUM			182,6	304	327	342,3	348,7
COÛT USINE ELECTRIQUE (milliers kWh)			18,3	28,1	29,8	31,4	32,9
COÛT DE MAIN D'OEUVRE (dollars/h)			8,27				
TOTAL MAIN D'OEUVRE par TONNE			7,4				
PORCENTAGE DE LA DETTE ASSUMÉE			51,5				
COÛT CAPITAL INVESTI							

4.545,7 dollars par tonne fabriquée

ANNEXE 21

Extrait de (11)

=====
 COÛT DE PRODUCTION D'ALUMINIUM SUR DES SITES CHOISIS, POUR L'ANNÉE 2000 (NOUVELLES USINES)
 (US DOLLARS 1980/TONNE MÉTRIQUE)

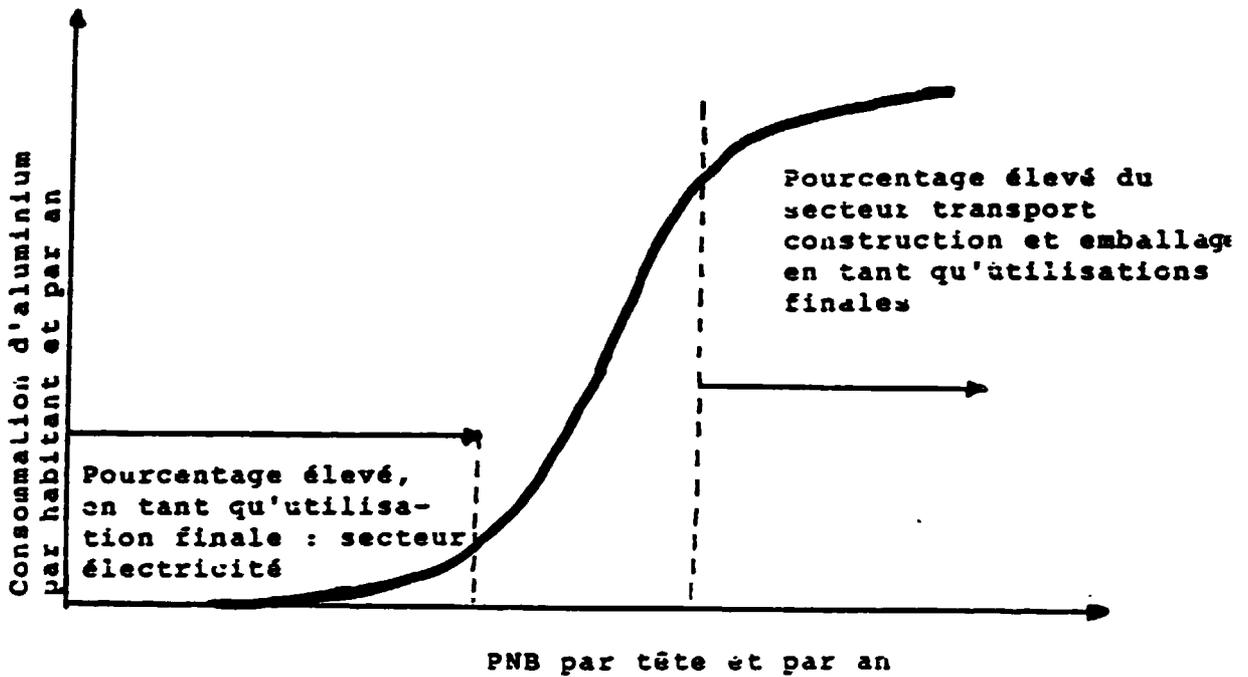
	USA	CANADA	BRESIL	EUROPE DE L'OUEST	AUSTRALIE	MOYEN-ORIENT	JAPON
Alumine	620	620	575	670	560	580	600
Energie	630	400	270	630	270	270	630
Main d'oeuvre	95	95	50	95	95	95	95
Energie thermique	33	33	33	33	33	33	33
Coke	252	252	252	252	252	252	252
Fluorures	25	25	25	25	25	25	25
Brai	25	25	25	25	25	25	25
Autres	220	220	220	220	220	220	220
Capital							
Charges (a)	360	360	410	360	390	440	390
Total (US dol/TM)	2.260	2.030	1.860	2.310	1.870	1.940	2.270
Total (US dol/livre)	1,02	0,92	0,84	1,05	0,85	0,88	1,03

a) pour une usine produisant 200.000 T/an

Source : Tableaux 18 à 23 ; coût alumine d'après tableau 17.

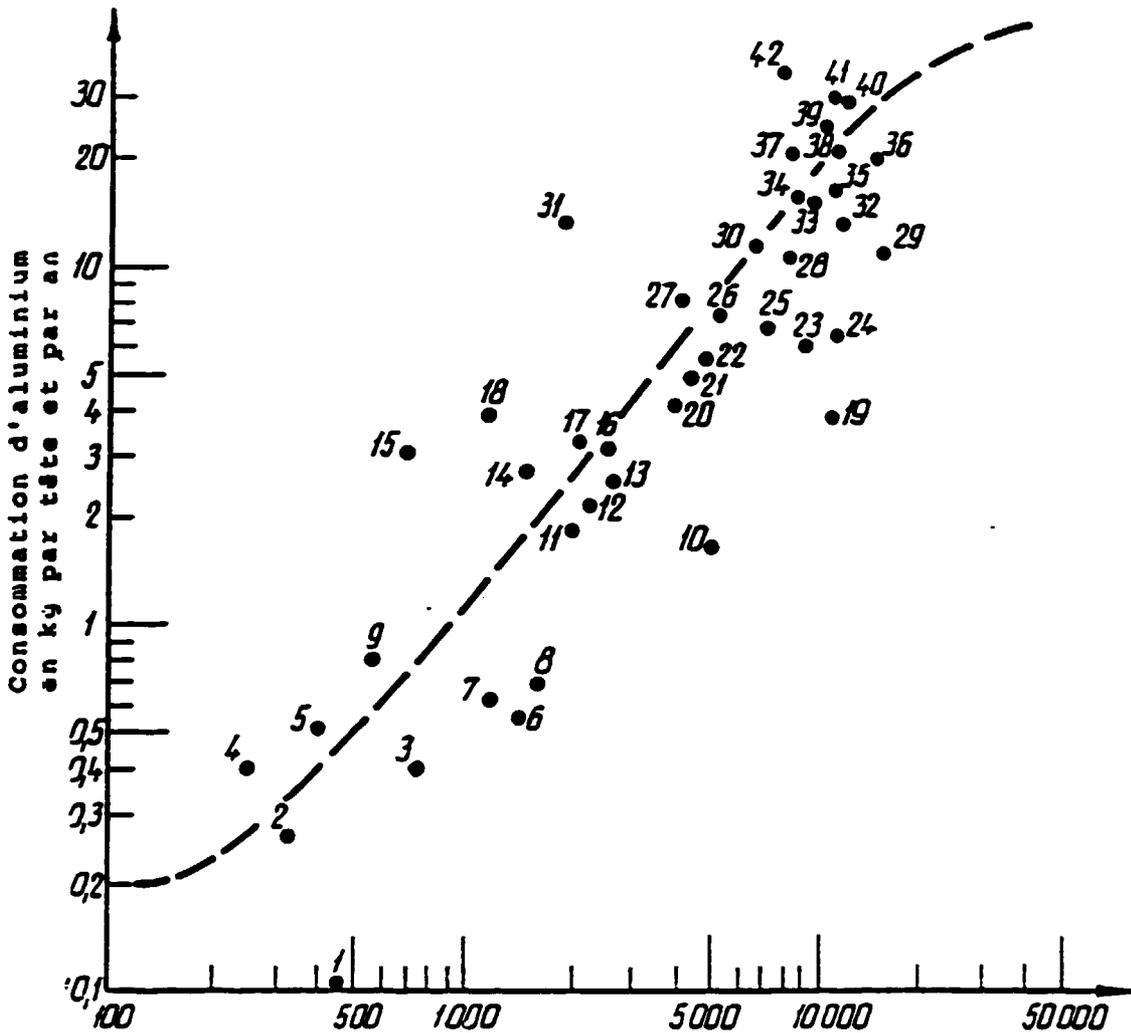
ANNEXE 22

DIAGRAMME SIMPLIFIÉ DE CONSOMMATION D'ALUMINIUM
EN FONCTION DU PNB



ANNEXE 23

CONSOMMATION D'ALUMINIUM EN FONCTION DU GNP (VALABLE POUR 1981)



GNP par tête et par an en US dollars

- | | | |
|--------------------|----------------------|---------------|
| 1. Indonésie | 15. Taïwan | 29. Suède |
| 2. Pakistan | 16. Argentine | 30. Italie |
| 3. Philippines | 17. Brésil | 31. Hongrie |
| 4. Inde | 18. Cameroun | 32. France |
| 5. Ghana | 19. Danemark | 33. Australie |
| 6. Turquie | 20. Venezuela | 34. Autriche |
| 7. Colombie | 21. Hong Kong | 35. Canada |
| 8. Malaisie | 22. Israël | 36. Suisse |
| 9. Egypte | 23. Finlande | 37. Japon |
| 10. Irlande | 24. Pays-Bas | 38. RFA |
| 11. Mexique | 25. Nouvelle Zélande | 39. Belgique |
| 12. Portugal | 26. Espagne | 40. Norvège |
| 13. Afrique du Sud | 27. Grèce | 41. USA |
| 14. Corée du Sud | 28. Royaume-Uni | 42. Bahreïn |

ANNEXE 24

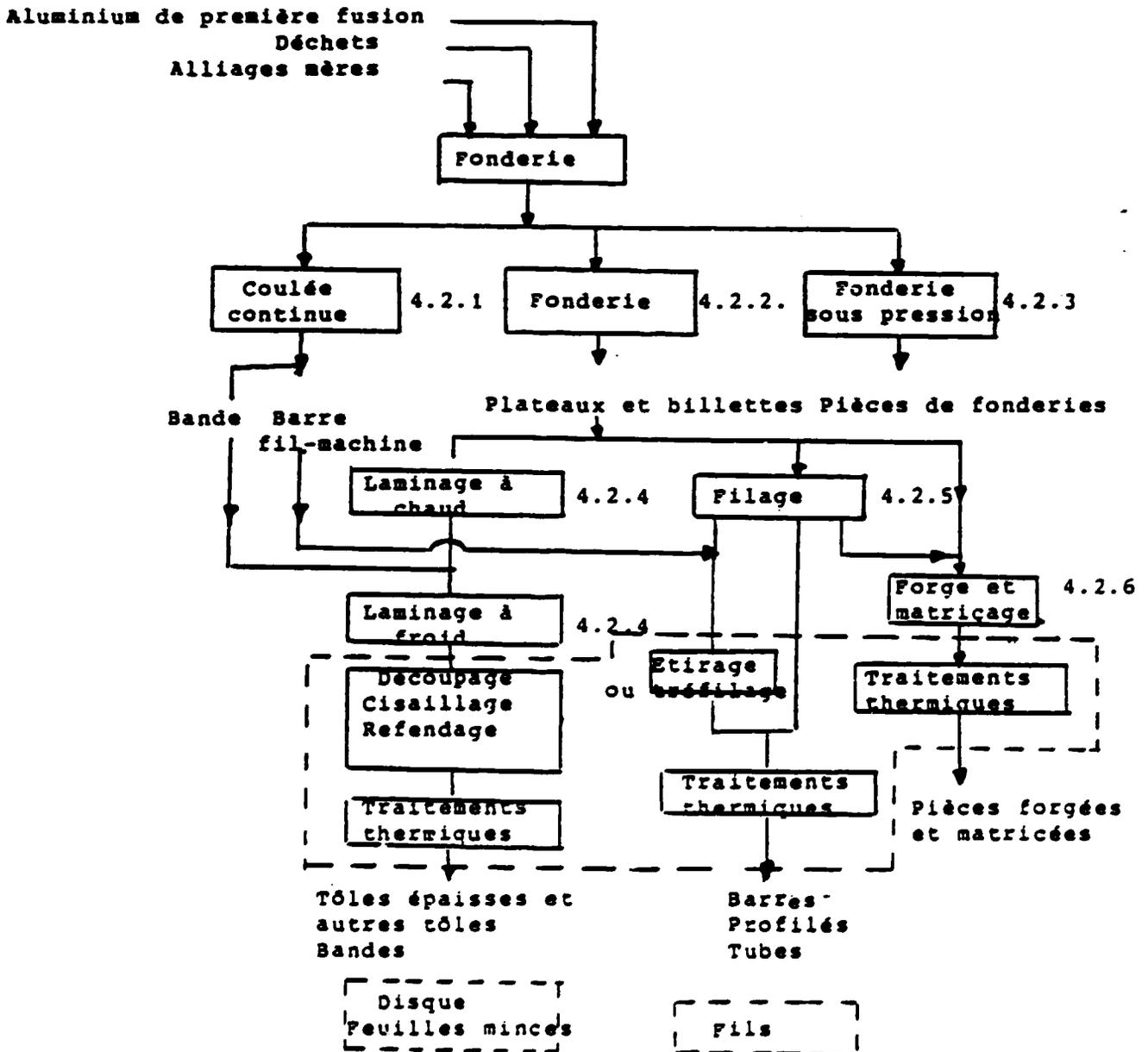
PRIX COMPARÉS DE DIFFÉRENTS DEMI-PRODUITS

<u>PRODUIT</u>	<u>COEFFICIENT</u>
Lingot	100 ‰
Fil ébauche obtenu par coulée continue	115 ‰
Bobines obtenues par coulée continue	120/125 ‰
Bandes enroulées de 1,5 à 0,7 mm d'épaisseur en aluminium non allié ou faiblement allié	130 ‰
Bande mince de qualité courante	140 ‰
Bande mince de qualité spéciale (coef. minimal)	150 ‰
Feuilles minces de qualité courante	180 ‰
Feuilles minces transformées	210/250 ‰
Profils filés, alliages bas titre	180/220 ‰
Profils filés, alliages bas titre anodisés	220/250 ‰

Référence : (41). (42)

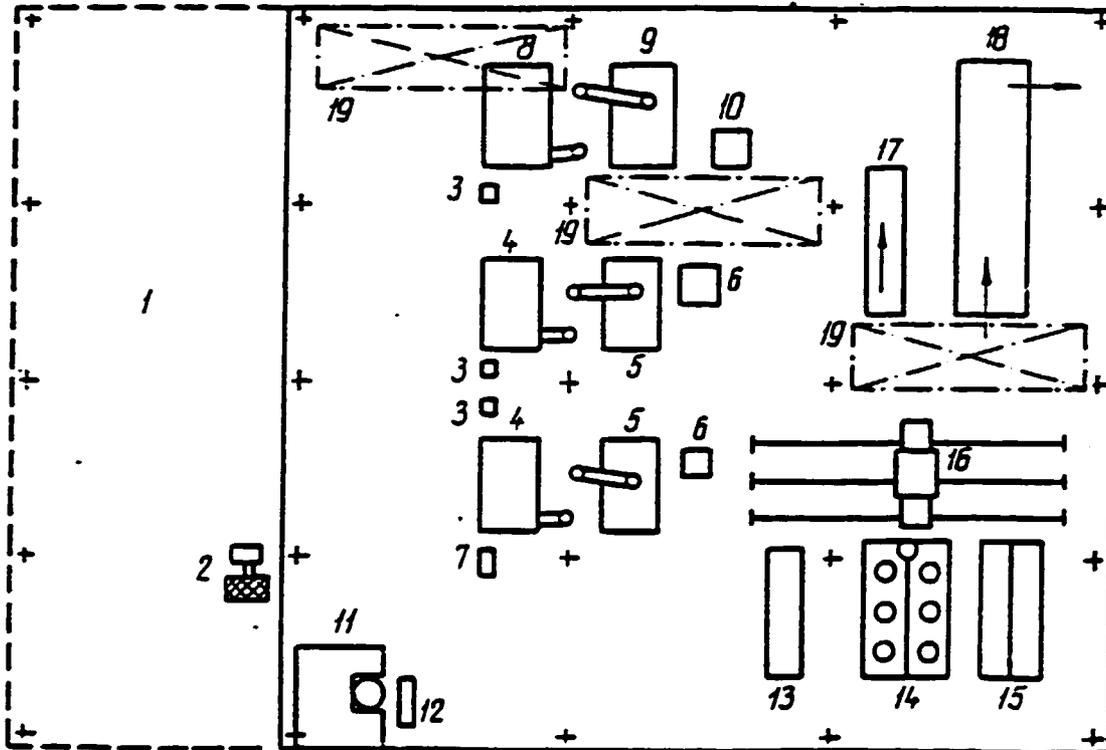
ANNEXE 25

PRINCIPALES TECHNIQUES DE FABRICATION DE LA PREMIÈRE TRANSFORMATION
ET PRODUITS OBTENUS



ANNEXE 26

FINITION TRADITIONNELLE DE PLATEAU ET BILLETTE ÉQUIPÉE DE MACHINES
À COULÉE VERTICALE (CAPACITÉ SUPÉRIEURE À 1.000 T/AN)

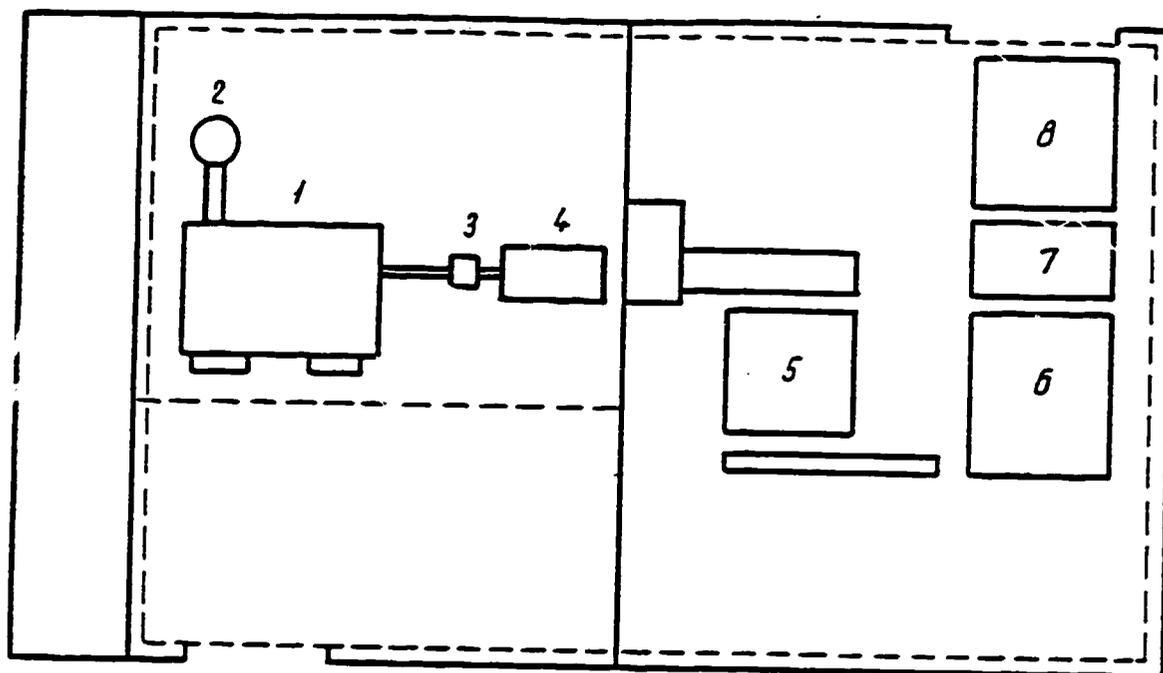


- | | |
|--|--|
| 1. Surface de stockage couverte pour les lopins (matériau de base) | 10. Machine de coulée |
| 2. Plateforme électronique de pesée | 11. Four par induction (production d'alliages mères) |
| 3. Séparateur de déchets | 12. Chaîne de coulée des lingots |
| 4. Four de coulée | 13. Aire de préparation des charge |
| 5. Four de coulée | 14. Four d'homogénéisation |
| 6. Machine de coulée | 15. Four d'homogénéisation |
| 7. Equipement de préchauffage | 16. Banc de poussée |
| 8. Four de fusion | 17. Fraisage des billettes |
| 9. Four de coulée | 18. Sciage des billettes |
| | 19. Pont rouiant |

Référence : (42)

ANNEXE 27

ATELIER DE COULÉE AVEC MACHINES DE COULÉE HORIZONTALE
DES BILLETES (CAPACITÉ ENVIRON 5.000 T/AN)



1. Four de fonderie et de coulée
2. Récupération
3. Filtrage
4. Machine de coulée horizontale des billettes

5. Lieu de stockage intermédiaire
6. Four d'homogénéisation en continu
7. Aire de refroidissement des billettes
8. Palette de chargement des billettes

Référence : (44)

ANNEXE 28

RÉSUMÉ DE QUELQUES CARACTÉRISTIQUES D'USINES DE LAMINAGE

Type d'usine	Production annuelle par ouvrier en T	Production annuel par m ² de surface bâtie, en T
Usine de dimension petite ou moyenne, à large product mix. Production annuelle de 30.000 à 120.000 T	60 - 80	0,9 - 1,5

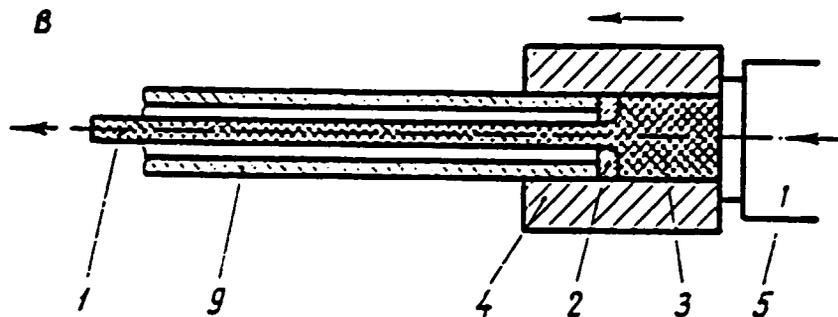
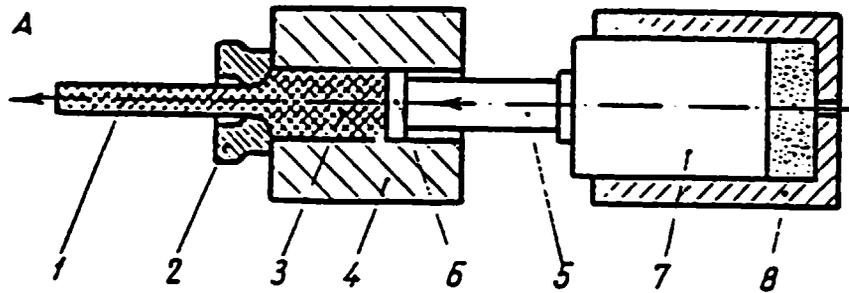
Importante usine de laminage, à ligne de laminage à chaud à plusieurs cages. Production annuelle 120.000 à 180.000 T	120 - 180	1,3 - 1,8

Usine de laminage spécifique, à product mix étroit, à lignes de lami- noirs en tandem. Production annuelle de 150.000 à 300.000 T	240 - 300	1,6 - 2,5

Référence : [42]

ANNEXE 29

DIAGRAMME SYNTHÉTIQUE DE FILAGE DIRECT (A) OU INVERSE (B)

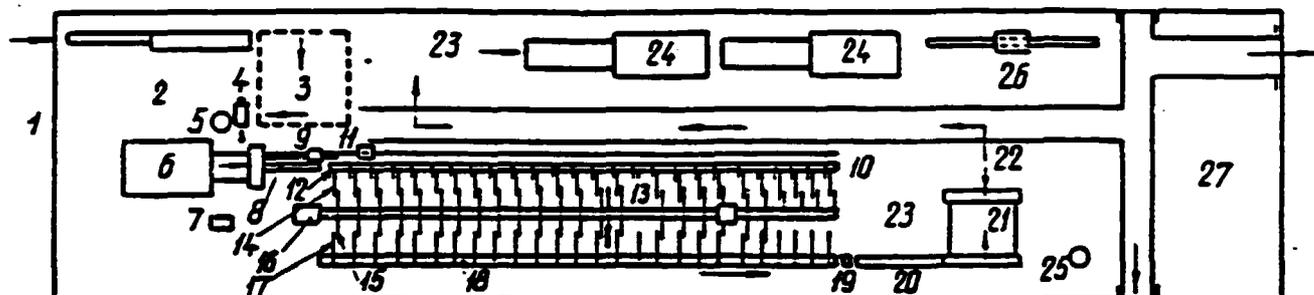


- 1. Produit
- 2. Filière
- 3. Bâillette
- 4. Conteneur
- 5. Piston
- 6. Disque presseur
- 7.
- 8. Cylindre de travail
- 9. Fourreau de sortie

Référence : (46)

ANNEXE 30

SCHEMA D'EQUIPEMENT D'UN ATELIER D'EXTRUSION



1. Ratielier en pente pour le stockage des billettes, stockage des billettes et billettes coupées à longueurs
2. Fourneau pour préchauffage des billettes, à chauffage au gaz ou mazout
- 2a Fourneau de chauffage par induction
3. Chambre d'homogénéisation
4. Cisailage à chaud des billettes
5. Refroidissement par eau des billettes
6. Presse de filage
7. Fourneau de réchauffage des filières
8. Table d'alimentation
9. Scie de découpage à chaud
10. Table de travail
11. Pousseur
12. Système de transfert à la table de refroidissement
13. Table de refroidissement
14. Convoyeur de transfert de la table de refroidissement
15. Convoyeur de transfert au banc de dressage
16. Dressage
17. Convoyeur de transfert à la table de mise à longueur
18. Table de sciage
19. Découpe (scie)
20. Table de mise à longueur
21. Table d'inspection
22. Pallétisation
23. Stock des produits avant traitement thermique
24. Four de maturation
25. Machine à tréfiler
26. Machine de profilage à galet
27. Stockage des produits avant anodisation

ANNEXE 31

**COÛT DES CAPACITÉ IMPLANTÉES POUR PRODUIRE LES MÊMES TONNAGES
DE PRODUITS SEMI-OUVRÉS ET DE PRODUITS FINIS, EN PRENANT
POUR BASE DE COMPARAISON L'ÉLECTROLYSE (INDICE 100)**

TYPE D'USINE OU D'OPERATION	POURCENTAGE
Usine d'électrolyse	100
Affinage des déchets	10
Première transformation :	
Fil obtenu par coulée continue	25
Bande obtenue par coulée continue	30
Laminage à froid (y compris laminage de bandes obtenues par coulée continue et feuilles minces)	170
Usine d'extrusion (étirage compris)	140
Usine de matriçage	310
Fonderie sous pression	220
Usine de première transformation, produits parachevés (1)	
Disques	1
Tubes soudés	10
Tôles ondulées	80
Laquage en continu	35
Anodisation de profilés	35

Références : (34) (37)

(1) Note du traducteur : Ajouter à ces produits le coût des produits capables : bandes pour disques tubes soudés laquage, tôles ondulées ; profilés pour l'anodisation.

ANNEXE 32

**DIMENSION MINIMALE DE FAISABILITÉ ÉCONOMIQUE DES USINES ET COÛTS
D'INSTALLATION (INDEX D'UNE USINE D'ÉLECTROLYSE : 100)**

USINE	Métal travaillé en %	Coûts investi en cents
Usine d'électrolyse d'aluminium	100	100
Usine de produits finis		
Matériel de cuisine	0,1	0,6
Boîtes de conserve	2,25	7,2
Bouteilles de gaz liquide	2,0	3,6
Casques	0,4	1
Radiateurs	0,75	1,1
Réverbères	1,22	1,8
Fils conducteurs non isolés	4,4	0,9
Cables isolés	10	6
Conteneurs et tanks	1,2	2
Tubes souples et aérosols	5	6,5
Panneaux sandwiches (bâtiment)	0,7	0,6
Portails, petites constructions	1,0	0,4
Fenêtre, échelle, échaffaudage	0,8	0,2

Référence : (47)

ANNEXE 33

Extrait de (49)

POINTS PRINCIPAUX D'AMÉLIORATION TECHNIQUE DE PRODUCTION D'ALUMINE

PRINCIPAUX AXES R et D	CIBLES	SOLUTIONS POSSIBLES
1. Amélioration de l'efficacité de la précipitation en accroissant la concentration en Na_2O_j des lessives	Atteindre un bon rendement de la précipitation pour fixer les qualités requises pour l'alumine	Purification de la solution ; - éliminer les sels carbonatés de leurs contenus en Na_2O , par . évaporation cristallisante ; . sodification dans la ligne de lavage ; . sodification complexe. - éliminer les produits organiques par ; . alimentation des sels de magnésium ; . évaporation de l'eau de lavage hydratée, et séparation des oxaliques ; . modification chimique par chauffage des lessives et/ou du sel . oxydation humide. Développement de la technologie ; . agglomération ; . répartition des produits hydratés ; . germination polyétage ; . refroidissement lors de la précipitation.
2. Accroissement de la température de dissolution pour traiter les bauxites monohydratées	Améliorer la cinétique, pour atteindre le champ théorique de réduction d'énergie, afin d'obtenir des boues rouges facilement manipulables	En autoclave à 240-250°C En conduites de dissolution de 260-280°C.

PRINCIPAUX AXES R et D	CIBLES	SOLUTIONS ENVISAGEABLES
3. Accroissement de l'efficacité des lignes existantes de dissolution	Repousser les limites de l'équipement en accroissant la température et en modifiant la technique	Additions à la technologie
4. Technologie énergétique, accroissement du capital investi, optimisation du procédé	Réduire les coûts de production pour accroître le rendement de l'usine	Croiser les paramètres de dissolution et de précipitation et la quantité d'eau à évaporer
5. Réduire la consommation de soude caustique	Réduire les pertes chimiques et celles qui s'y rattachent	<ul style="list-style-type: none"> - sodification du sel carbonaté - sodification des boues rouges - traitement hydrothermique (haute température) des boues rouges et des bauxites pauvres - modernisation du lavage des boues rouges : <ul style="list-style-type: none"> . modification des . filtres à haute efficacité . flocculants récents.

ANNEXE 34

SOCIÉTÉS PRODUISANT LES ÉQUIPEMENTS DE FILTRAGE EN CONTINU
DE L'ALUMINIUM

NOM COMMERCIAL	DESIGNATION DU PROCÉDE	SOCIETE	REFERENCE
S N I F	Procédé à gaz inerte avec tuyères rotatives flottantes	Union Carbide Co.	(64)
A L P U R	-	Péchiney	(65)
M I N T	-	Consolidated Aluminium Corporation	(66)
T A C	Traitement de l'aluminium en creuset	Alcan Smelters and Chemicals Ltd.	(67) (68)

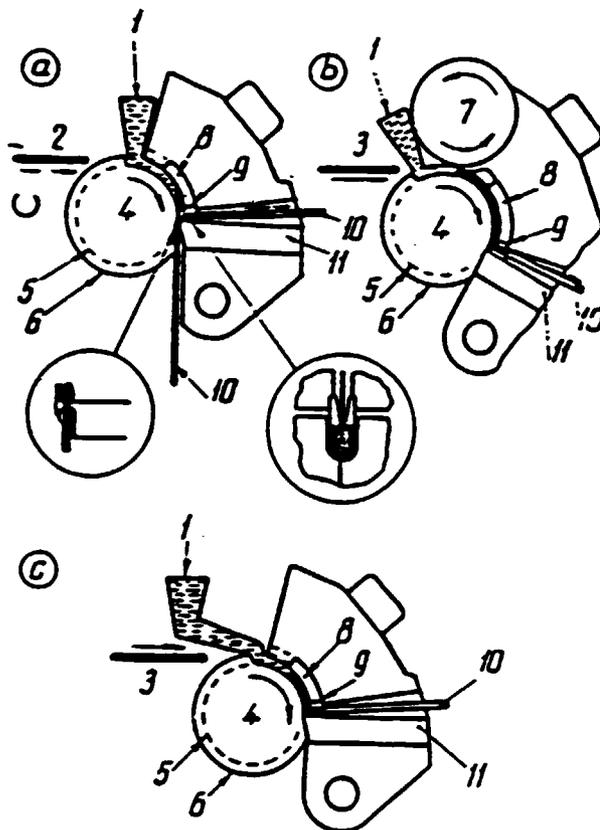
ANNEXE 35

SOCIÉTÉ PRODUISANT DES PRODUITS D'ALUMINIUM PAR COULÉE SEMI-CONTINUE

NOM COMMERCIAL	DESIGNATION DU PROCÉDE	SOCIÉTÉ	REFERENCES
L F R T	Réservoir à niveau d'alimenta- tion (Level feed reservoir top)	Kaiser Aluminium	(69)
	New Hot Top	Showa Aluminium Industries	(70)
	Maxi coulée	Wagstaff Co.	(71)
E M C	Coulée électromagnétique	Swiss Aluminium Ltd.	(72)

ANNEXE 36

SYSTÈMES OPÉRATIONNELS D'UNE MACHINE D'EXTRUSION "CONFORM"

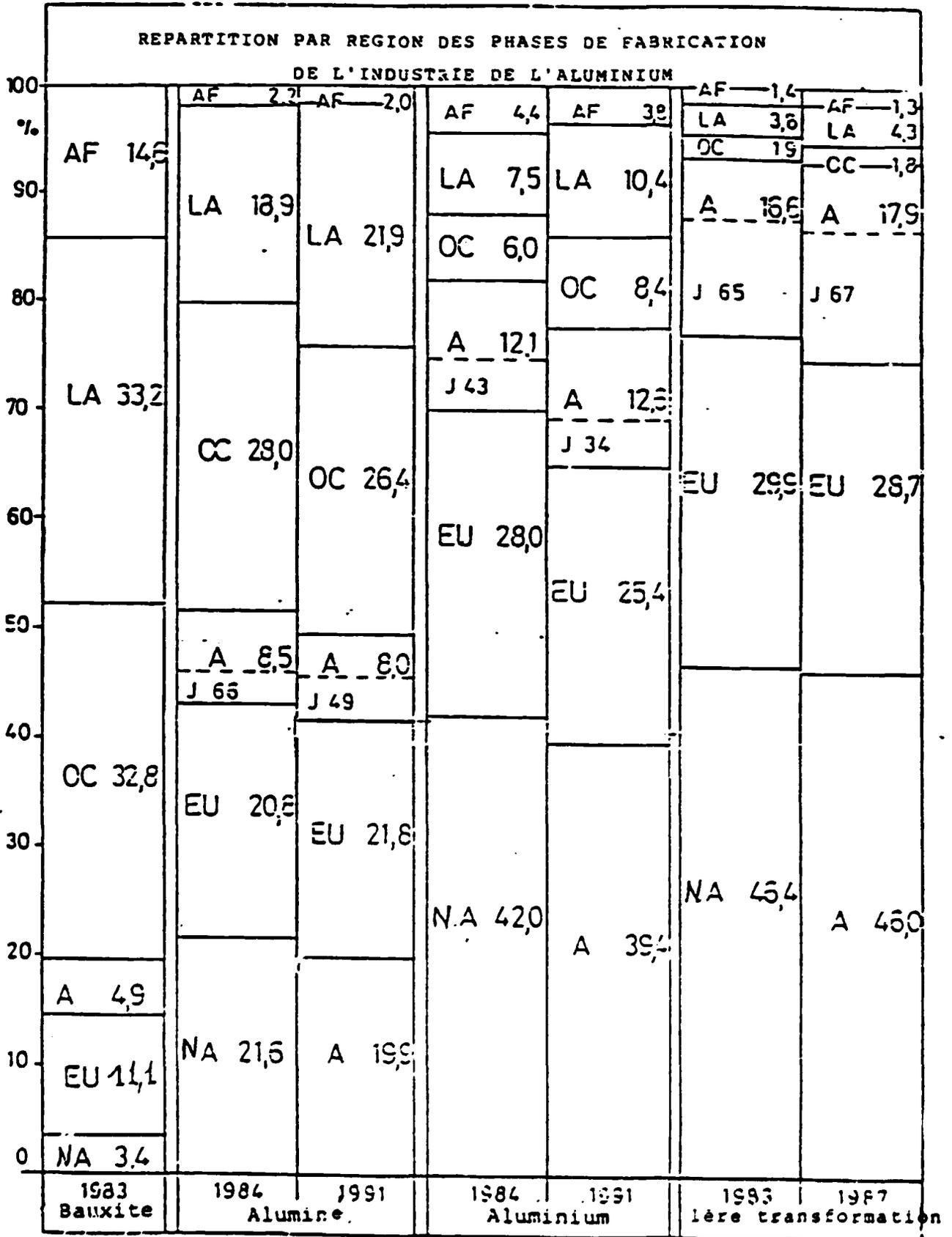


- a) alimentation par gravité.
- b) précompactage de l'alimentation
- c) alimentation tangentielle

- 1. alimentation propre
- 2. préformation de l'alimentation en métal solide
- 3. alimentation en métal solide
- 4. roue d'extrusion
- 5. rainure sur enyrenage
- 6. circonférence de la roue
- 7. rouleau commandé pour assister l'alimentation
- 8. segment de serrage
- 9. matrice
- 10. produit
- 11. contrefort

Référence : (59) (60)

ANNEXE 37



EU : Europe NA : Amérique du Nord A : Asie J : Japon *
 OC : Océanie LA : Amérique latine AF: Afrique

* pourcentage à l'intérieur de l'Asie

ANNEXE 38

COMMERCE DES DEMI-PRODUITS EN 1983
(* TOTAL SANS "AUTRES")

IMPORTATIONS

Pays	Barres et profilés	Laminés	Feuilles minces	Poudres	Tubes	Cables	Autres	TOTAL
	T	T	T	T	T	T	T	T
RFA	85.496	144.836	28.145	8.975	18.168	144	54.378	283.75
Belg-Lux	25.319	42.595	18.712	1.186	2.091	299	0	90.20
France	57.816	85.909	53.687	1.729	13.371	1.910	0	214.42
R.U.	52.540	150.882	30.701	0	0	0	20.772	234.12
Italie	26.684	68.204	13.017	705	3.762	491	14.196	112.86
Pays-Bas	36.582	53.870	12.420	392	1.055	1	32.221	104.38
Norvège	4.930	0	2.529	0	1.119	930	8.585	9.50
Autriche	13.170	30.918	0	0	3.844	0	13.295	47.93
Suède	7.649	57.340	11.783	487	2.585	0	0	79.84
Suisse	11.989	27.560	8.338	254	5.018	0	15.302	68.46
Espagne	0	14.940	5.381	193	953	5.316	6.959	26.78
Japon	11.952	19.807	1.696	3.200	98	39	0	36.79
USA	0	252.911	13.010	3.762	0	0	4.309	269.68
Canada	5.845	109.800	666	1.623	1.430	1.459	1.185	120.82
Australie	2.064	1.145	3.268	369	0	0	746	6.86
TOTAL	342.056	1.060.716	203.353	22.877	53.494	10.655	(171.948)	1708.45

EXPORTATIONS

RFA	72.477	296.609	97.307	7.379	18.762	2.200	86.929	471.74
Belg-Lux	76.101	153.390	21.489	0	14.748	3.644	0	268.77
France	72.079	199.711	31.669	4.242	8.283	9.160	0	325.14
R.U.	18.673	53.089	14.182	5.054	2.471	9.483	15.423	102.95
Italie	33.075	57.741	20.386	504	5.274	243	67.894	117.28
Pays-Bas	36.584	53.870	12.420	46	1.055	2.275	31.795	106.25
Norvège	10.841	57.202	0	0	1.909	0	6.862	70.01
Autriche	14.629	62.683	0	0	2.430	0	30.098	84.74
Suède	6.719	24.376	9.966	1.681	3.178	5.724	0	55.64
Suisse	13.596	30.521	34.546	77	5.322	0	19.505	163.56
Espagne	0	7.799	1.878	256	2.057	16.085	9.601	28.07
Japon	7.513	154.435	29.818	285	2.688	25.840	0	220.57
USA	13.672	143.319	17.369	1.937	0	18.768	8.255	194.66
Canada	0	45.365	1.443	0	0	0	0	46.80
Australie	0	59.906	0	0	0	0	0	59.90
TOTAL	375.359	1.400.016	292.673	21.521	73.237	96.828	(276.362)	2279.13

BILAN

Pays	Barres et profilés	Laminés	Feuilles minces	Poudres	Tubes	Cables	Autres	TOTALx
	T	T	T	T	T	T	T	T
RFA	-13.019	151.779	69.162	-1.396	594	2.062	32.551	20.898
Belg.-Lux	58.782	110.795	2.777	-1.186	12.657	2.745	0	17.857
France	14.263	113.802	-22.018	2.513	-5.088	7.230	0	11.072
R.U.	-33.867	-97.793	-16.519	5.054	2.471	9.483	-3.349	-13.117
Italie	6.391	-10.463	7.369	- 141	1.512	- 248	53.698	442
Pays-Bas	2	0	0	- 346	0	2.288	- 426	186
Norvège	3.911	57.202	- 2.529	0	850	- 938	-1.723	6.050
Autriche	1.459	31.765	0	0	3.586	0	16.803	3.681
Suède	- 938	-32.964	- 1.817	1.194	593	9.724	0	-2.420
Suisse	1.607	2.961	26.208	- 177	304	0	-1.203	3.510
Espagne	0	- 7.146	- 3.503	63	1.104	10.769	2.642	128
Japon	- 4.439	134.628	28.122	-2.915	2.590	25.801	0	18.378
USA	13.072	-109.592	4.559	-1.825	0	18.768	3.946	-7.501
Canada	- 5.845	-64.435	777	-1.625	-1.430	-1.459	-1.185	-7.401
Australie	-2.084	58.761	- 3.269	- 369	0	0	- 746	5.304
TOTAL	33.303	339.300	89.320	-1.356	19.743	86.173	(104.414)	57.068

ANNEXE 39

PREMIÈRE TRANSFORMATION DANS DES RÉGIONS SÉLECTIONNÉES
EN DÉVELOPPEMENT (EN MILLIERS DE TONNES)

	Capacité de produits semi-fabriqués*		Consommation de lingots d'aluminium primaire
	1983	1987	1981
<u>Amérique latine</u>			
Brésil	281,8	381,8	240,9
Chili	5,-	5,-	3,-
Colombie	35,1	35,1	14,2
Costa Rica	10,-	10,-	5,-
Cuba	5,-	5,-	1,5
Equateur (seulement laminage à froid)	6,-	6,-	2,-
Salvador	4,-	4,-	3,-
Jamaïque	130,-	138,-	99,6
Mexique	3,-	3,-	2,-
Panama	11,-	11,-	10,-
Pérou	13,3	13,3	10,-
Porto Rico	(seulement laminage à froid)		-
Trinidad-Tobago	5,1	5,1	3,-
Uruguay	58,1	63,1	73,6
Venezuela	653,3	766,3	520,3
TOTAL			
<u>Afrique</u>			
Algérie	5,-	8,-	4,-
Angola (feuille mince et fil seulement)			-
Cameroun	35,-	35,-	27,7
Egypte	50,-	50,-	45,-
Ghana (laminage à froid seulement)			-
Côte d'Ivoire	0,5	0,5	0,5
Maroc (laminage à froid seulement)			-
Nigeria	11,-	11,-	9,-
Tanzanie	9,-	9,-	6,-
Zambie (tréfilage, seulement)			-
Zimbabwe	9,3	9,3	8,-
TOTAL	119,8	122,8	101,2

Capacités relatives
à la première transformation

Consommation
de lingots
d'aluminium
primaire

	1983	1987	1981
<u>Asie</u>			
Bahrein	29,-	69,-	17,3
Bengladesh	(laminage à froid seulement)		-
Hong Kong	34,7	40,7	21,6
Inde	352,-	255,7	249,6
Indonésie	7,- (?)	7,- (?)	14,-
Iran	34,- (?)	34,- (?)	30,1
Irak	21,-	21,-	26,4
Israël	26,5	26,5	9,5
Jordanie	6,-	6,-	5,-
Corée du Sud	211,8	211,8	111,6
Koweït	9,6	9,6	8,-
Liban	16,-	16,-	11,7
Malaisie	41,6	41,6	25,-
Philippines	31,6	31,6	17,-
Pakistan	10,8	13,8	6,-
Arabie Saoudite	10,5	10,5	6,-
Singapour	1,6	1,6	1,5
Syrie	5,-	5,-	4,-
Taiwan	70,3	110,3	77,8
Thaïland	52,2	52,2	45,-
Emirats arabes	3,-	3,-	2,-
TOTAL	974,2	1.067,2	689,1

Remarque : x laminage à chaud, extrusion et ébauche pour fil, ont seuls été pris en compte

Référence : (10)

REFERENCES

- [1] Report on the First Expert Group Meeting of Non-ferrous Metals Industries, Vienna 18-21 March 1985 /ID/WG 436/5/
- [2] Balázs, E.T.: Role and Assistance of UNIDO in the Aluminium Industry of Developing Countries. Paper presented to the 2. Arab Aluminium Conference, Cairo 23-26 October 1985.
- [3] Balkay, B.: A technika transzfer szerepe a műszaki-gazdasági fejlődésben. OMIKK Budapest 1985.
- [4] Transnational Corporations in the Bauxite /Aluminium Industry /ST/CTC/20/ New York, 1981.
- [5] Biritz, L.F.: Defining Appropriate Technologies, Unpublished paper
- [6] Metallgesellschaft AG: Metallstatistik 1973-1983 Frankfurt am Main 1984.
- [7] Zorn, S.: Mining and Mineral Processing in developing countries. UNIDO 1985. /ID/WG 436/2/
- [8] Anthony Bird Assoc. /UK/: Aluminium Annual Review - 1985 and Aluminium Analysis No 24 to 26.
- [9] King, F.: World Capacity Report: Primary Aluminium, Alumina and Bauxite. July 1984.
- [10] King, F.: World Capacity Report: Semifabricated Aluminium. Annual Plant-by Plant Review. 1983.
- [11] Brown, M; Dammert, A; Meeraus, A; Stoutjesdijk, A: Worldwide Investment Analysis; The Case of Aluminium, World Bank Staff Working Papers No 603.-1983.
- [12] Gonzales-Vigil, F: New technologies, industrial restructuring and changing patterns of metal consumption. UN. New York, Jan. 1985.

- [13] UNIDO Group Training in Production of Alumina Vol.1. Principles and Methods of Bauxite Prospecting. ALUTERV-FKI Budapest, July 1979.
- [14] de Weisse, G.: Die Entwicklung der Versorgung Europas mit Bauxite, Erzmetall No 11. 1972, pp. 535-539.
- [15] Lotze, J.: The influence of Bauxite Pricing on the Development of Bauxite Resources. Paper presented to the 5th Int. Congress of ICSOBA, Zagreb, Sept 26-28. 1983.
- [16] International Mining, 1985 September p.11
- [17] Henderson, F.G.: Optima, Geological Mapping by Satellites, 1983 Vo.31 No 3 pp 124-139.
- [18] Reymer, Jacquin, Industrie Minerale, Mai 1983, pp 270-276.
- [19] Lotze, J.: Economic Evaluation of World's Bauxite Resources. Proc. of the 4th Int. Congress of ICSOBA, Athens 1978, Vol.1.p 494.
- [20] L'Aluminium, Ingenieurs de Pechiney, Eyrolles. Paris 1964.p.26.
- [21] Engineering Mining Journal 1983 Nov. pp.71-84.
- [22] Ostojic, S.: Bauxite, the dominant aluminium ore. Alumina Production until 2000. Proc. of ICSOBA Symposium, Tihany. (Hungary), Oct. 6-9. 1981. pp 89-100.
- [23] Balázs, E. and Molnár, I: Bauxite-Alumina-Aluminium: Main factors for decision-making on industrial development. UNIDO ID/WG 273/8.- 1978
- [24] UNIDO Group Training in Production of Alumina. Vol.2. Chemical background and technology of processing bauxite to alumina. ALUTERV-FKI. Budapest, 1979.
- [25] Solymár, K; Mátyási, J. and Tóth, B: Magyar goethites bauxitok adalékos feltárása. BKL Kohászat 110 /1977/ pp 219-224.- see also USP-s 3.944.848, 4.026.989, 4.091.071, 4.226.838.

- [26] Selected from the data in an unpublished study of James F. King on trends of the alumina market /1983/.
- [27] Lopez, F.A.: Critical Parameters Affecting the Management and Economics of Alumina Production- UNIDO 446/4 14. Aug. 1985.
- [28] Paine Webber: World Aluminium Dynamics.- New York May 1985.
- [29] Zámbo, J: Bauxite and Alumina Production, Historical retrospection, review of the present situation and prognosis. UNIDO ID/WG 273/9.- 1978.
- [30] Zámbo, J: personal communication
- [31] UNIDO: Study on the disposal and utilization of Bauxite residues /Final Report/. ALUTERV-FKI - Budapest, Oct. 1980.
- [32] Kumar, R.: Status of the semi products aluminium industry in some developing countries. UNIDO draft report 1981.
- [33] Domony, A.: Aluminium fabricating industry and aluminium consumption in the Near East and North Africa, Magyar Aluminium 16. 1979, 7-8. pp 240-243.
- [34] The economic use of aluminium. Development and Transfer of Technology Series No 21. UNIDO 1985., New York
- [35] Bokor, A.; Domony, A; Varga, I.: The economic use of aluminium, UNIDO/ IOD .335 1979.
- [36] 1983 World Bank Atlas, Washington 1983.
- [37] World Metal Statistics, 1985 Oct.
- [38] European Aluminium Statistics, 1984, Aluminium Zentrale
- [39] Hungarian Aluminium Statistics, 1985, Budapest
- [40] Gazda, I: A világ alumíniumipara. /aluminium industry of the World/ ALUTERV-FKI, 1985. Budapest.

- [41] Domony,A; Várhelyi,R: Some considerations on the development of aluminium semiproducts manufacturing industries. The Second Arab Aluminium Conference, Cairo, 1985.
- [42] Domony,A; : Guidelines for processing aluminium semi-fabricated products. UNIDO/I.O.619 1985.
- [43] Bánfy,A: Prognostication of world aluminium production for 1990-1995., Magyar Aluminium 20 /1982/, pp 24-29.
- [44] Hertwich,G: Kompakt-Umschmelzanlage für die kontinuierliche Herstellung von Strangpressbaren aus Kreislaufschnitt und Rohmetall. Aluminium /Düsseldorf/ 60. /1984/ 6 pp 436-439.
- [45] Altenpohl,D: Materials in World Perspective, Springer Verlag, Heidelberg, New York 1980, pp 153-154.
- [46] Zilges,F.J.: Aufbau und Arbeitsweise einer neuen Indirekt-Strang und Rohrpresslinie für Aluminium. Aluminium /Düsseldorf/ 60 /1984/6. pp 424-430
- [47] Varga,I; Fülöp,S: Establishing of aluminium finished product industries in developing countries., Magyar Aluminium 21/1984/ 7-8., pp. 281-286.
- [48] Statements of the Scientific Committee of the Alumina Production until 2000, ICSOBA Symposium held at Tihany /Hungary/ Oct. 1981./unpublished/.
- [49] Zámbo,J: Development trends in the alumina production. Presented at a UNIDO Workshop at Kingston, Jamaica in June 1985.
- [50] USP 4.082.833
- [51] Gardner,H.H-Grjotheim,K.-Welch,B.J: Recent results and expectations for aluminium extraction via $AlCl_3$ electrolysis /Alumina Production until 2000, ICSOBA Symposium at Tihany, Oct 1981./ pp 27-42.

- [52] Brondyke, J: The Aluminium industry in 1982 and outlook for the 80's., J. of Metals, April 1983.
- [53] Apelian, D, Mutharasan, R : Commercially Available Porous Media for Molten Metal Treatment: A property evaluation.- Light Metals 1982., Proceedings of 111th AIME Annual Meeting, Dallas. Feb. 1982. pp 935-968.
- [54] Dassel, J.L, Zinninger, T.C: Sheet ingot casting with inflatable wipers.- Light Metals 1983., Proceedings of 112th AIME Annual Meeting, Atlanta, March 1983. pp. 793-801.
- [55] Wilkins, R.F.T: The variable chill depth mould system. Light Metals 1983. Proceedings of the 112th AIME Annual Meeting, Atlanta, March 1983. pp. 901-930.
- [56] Goodrich, D.G; Dassel, J.L; Shogren, R.M: Kaiser Aluminum. Plant implementation of electromagnetic casting. Light Metals 1982. Proceedings of the 111th AIME Annual Meeting, Dallas, Feb. 1982., pp 781-791
- [57] Weinberg, F: Squeeze Casting Solidification Technology in the Foundry and Cast House /Conf. Proc./ Coventry, England, Sept. 1980., pp. 131-136.
- [58] Duckworth, W.F: The Challenge to the Materials Technologist, 4 /1984/ 6. pp. 924-930.
- [59] Prados, J.A: Conform continuous extrusion process - its contribution to energy conservation. Metals Technology 11 /1984/ p.358.
- [60] Langerweger, J; Maddock: The conform process: a further development in continuous extrusion. Schweizer Maschinenmarkt. 84 /1984/ pp. 37-39.
- [61] Furrer, P: Modern trends in aluminium alloy development. Aluminium /Düsseldorf/ 59 /1983/ pp. 913-916.

- [62] Processing and marketing of bauxite/alumina/aluminium. Areas for international cooperation. UNCTAD 1981. TD/B/C.1/PSC/19.
- [63] Mineral Processing in Developing Countries. UNIDO. ID.253. New York 1980.
- [64] Székely, G.A: An alternative to chlorine fluxing of aluminium: The SNIF process. Proceeding of second International Extrusion Technology Seminar., Atlanta., Nov.1977.
- [65] Hicter, J.M: ALPUR refining process. Light Metals 1983. Proceedings of 112th AIME Annual Meeting Atlanta, March 1983. p.1005.
- [66] Luchinger, J; Willemin, G: MINT - a new system for the on-line treatment of liquid aluminium. Revue d'Aluminium. 510. /1981/ p. 393-395.
- [67] Gariépy, B; Dubé, G; Simoneau, C; Leblanc, G: The TAC process. a proven technology. Journal of Metals 36. /1984/ 11. p. 42-44.
- [68] Dubé, G; Newberry, V.J: TAC - A novel process for the removal of lithium and other alkalies in primary aluminium. Light Metals 1983. Proceedings of 112th AIME Annual Meeting. Atlanta March 1983. p. 991-1003.
- [69] U.S patent 3.381.741
- [70] Sekiguchi, T; Mitamura, R; Fukuda, S: Light Metals 1981. Proceedings of the 110th AIME Annual Meeting. Chicago. Feb.1981. p. 871-883.
- [71] Wagstaff, F.E; Keeler, R: Hot top casting at Reynold's Massena Plant. Light Metal Age 1982. 8. p. 11.
- [72] Satebin, R; Haller, W: Industrial application of electromagnetic casting of aluminium. Light Metal Age 43. /1985/ 7-8. p. 14-16.