



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

15104-F

Série "Mise au point et transfert des techniques"

N° **21**

**L'ÉCONOMIE
DE
L'ALUMINIUM**



L'ÉCONOMIE DE L'ALUMINIUM

Série "Mise au point et transfert des techniques"
Numéro 21

L'ÉCONOMIE DE L'ALUMINIUM



ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR LE DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL
Vienne, 1987

Les opinions exprimées dans le présent document sont celles de l'auteur et ne reflètent pas nécessairement celles du Secrétariat de l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONU/DI).

La reproduction, en tout ou en partie, du texte de la présente publication est autorisée. L'Organisation souhaiterait qu'en pareil cas il soit fait mention de la source et que lui soit communiqué un exemplaire de l'ouvrage où sera reproduit l'extrait cité.

La mention dans le texte de la raison sociale ou des produits d'une société n'implique aucune prise de position en leur faveur de la part de l'ONU/DI.

Préface

Le présent volume de la série *Mise au point et transfert des techniques* s'inspire d'une étude intitulée "The economic use of aluminium" (UNIDO/IOD.335), faite pour la Section des industries métallurgiques de l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI) par A. Boker, A. B. Domony et I. Varga, et expose en grande partie, mais non exclusivement, l'expérience de leur pays, la Hongrie. L'étude explique les facteurs qui influent sur la production et la consommation d'aluminium et les principales raisons qui militent en faveur de l'emploi de ce métal; elle précise comment et dans quelles conditions la consommation d'aluminium augmente dans un pays en développement.

De nombreuses sources internationales de renseignements sur l'aluminium sont indiquées. Des informations complémentaires peuvent être obtenues auprès de la Section de l'information industrielle de l'ONUDI, Centre international de Vienne, A-1400, Vienne (Autriche).

NOTES EXPLICATIVES

Sauf indication contraire, le terme "dollar" s'entend du dollar des Etats-Unis d'Amérique.

Sauf indication contraire, le terme "pound" s'entend de la livre sterling.

La barre transversale (/) entre deux millésimes (par exemple 1980/81), indique un exercice financier

Le trait d'union entre deux millésimes (par exemple 1980-1985), indique qu'il s'agit de la période tout entière, y compris la première et la dernière année mentionnées.

Les signes suivants ont été employés systématiquement dans les tableaux :

Deux points (. .) indiquent, soit que l'on ne possède pas de renseignements, soit que les renseignements en question n'ont pas été fournis séparément.

Deux tirets (--) indiquent que le montant est nul ou négligeable.

Un tiret (—) dans un tableau indique que la rubrique est sans objet.

La somme des montants détaillés ne correspond pas nécessairement au total indiqué, les chiffres ayant été arrondis.

Outre les abréviations, symboles et termes communément usités, les sigles suivants figurent dans le présent rapport :

ACSR Steel-corded aluminium cables = câbles d'aluminium à âme d'acier

CIDA Centre international pour le développement de l'aluminium

OCDE Organisation de coopération et de développement économiques

PIB Produit intérieur brut

PNB Produit national brut

PVC Chlorure de polyvinyle

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Pages</i>
Préface	v
Notes explicatives	vi
Introduction	1
 <i>Chapitres</i>	
I. L'EMPLOI DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION DANS LE MONDE	3
Les matériaux de construction	3
Tendances de la production et de la consommation	3
Prix	17
II. NOUVEAUX EMPLOIS DE L'ALUMINIUM	22
Conditions favorables	22
Autres considérations	27
III. COMMENT DÉVELOPPER L'EMPLOI DE L'ALUMINIUM	32
Organismes consultatifs	32
Recherche et développement	33
Fabrication de nouveaux produits	34
IV. APPLICATIONS DE L'ALUMINIUM	36
Electrotechnique	36
Industrie chimique et industrie alimentaire	45
Echangeurs de chaleur	55
Applications diverses	57
V. FABRICATION DES PRODUITS	68
Normalisation	68
Manuels	69
Réglementation	70
Abstract	73
Extracto	74

Liste des tableaux

	<i>Pages</i>
1. Consommation mondiale de matériaux de construction, 1935-1980	4
2. Indices mondiaux de croissance de la consommation des principaux matériaux de construction	4
3. Consommation d'aluminium en fonction du PIB par habitant	7
4. Taux moyen de croissance annuelle du PNB : prévisions jusqu'à l'an 2000	10

	<i>Pages</i>
5. Consommation mondiale des matériaux métalliques les plus importants par décennie jusqu'à l'an 2000	10
6. Croissance de la consommation mondiale d'aluminium par type d'économie, 1978-2000	11
7. Croissance de la consommation mondiale d'aluminium par groupement économique, 1978-2000	11
8. Prédiction des taux de croissance annuels de la consommation d'aluminium	11
9. PIB et taux de croissance, 1975, 1985 et 2000	12
10. Croissance de la consommation mondiale des principaux métaux primaires d'ici à l'an 2000	12
11. Consommation brute d'aluminium primaire et secondaire, 1970-2000	14
12. Augmentation annuelle moyenne de la consommation brute d'aluminium primaire et secondaire	14
13. Consommation mondiale d'acier, 1970-2000	15
14. Augmentation annuelle moyenne de la consommation d'aluminium	16
15. Part des groupements économiques dans la consommation mondiale d'aluminium, 1970-2000 ..	16
16. Part des groupements économiques dans la consommation mondiale d'aluminium, 1970-2000 ..	16
17. Consommation d'aluminium par secteur industriel en Italie, 1977 et 2000	17
18. Emploi de l'aluminium par secteur dans les pays européens à économie de marché et dans d'autres pays représentatifs	18
19. Prix mondiaux moyens de matériaux représentatifs, 1935-1981	19
20. Comparaison des prix mondiaux de matériaux représentatifs, 1935-1981	19
21. Taux de corrosion de l'aluminium, du cuivre et du zinc dans différentes conditions	26
22. Prix de certains matériaux représentatifs par rapport à leur résistance mécanique	27
23. Energie consommée à chaque étape de la production d'acier, de cuivre et d'aluminium	27
24. Dépenses d'investissement pour un complexe intégré d'aluminium d'une capacité de 100 000 tonnes par an	28
25. Relation entre l'apparition de nouveaux produits et l'accroissement de la consommation d'aluminium dans certains pays représentatifs	35
26. Consommation d'aluminium par l'industrie électrotechnique dans certains pays représentatifs ..	37
27. Résistance et prix de trois câbles à haute tension de matériaux différents et pesant le même poids	38
28. Propriétés des conducteurs communément employés pour les lignes aériennes	38
29. Puissances nominales maximales des courants des lignes aériennes à haute tension	38
30. Emploi du fer-blanc et de l'aluminium pour la fabrication de boîtes métalliques aux Etats-Unis, 1965-1971	49
31. Estimation de l'emploi des boîtes aux Etats-Unis, 1968-1972	49
32. Emploi des boîtes à parois étirées par emboutissage profond aux Etats-Unis, 1973 et 1974	51
33. Propriétés des tubes souples	54
34. Emploi des feuilles dans l'industrie alimentaire	54
35. Pots et petits récipients stérilisables en feuille combinée	55
36. Caractéristiques des métaux employés dans les échangeurs de chaleur	55
37. Taux spécifique de transfert de chaleur d'ailettes faites en différents matériaux	55
38. Estimation des quantités de matériaux entrant dans la construction d'une voiture particulière, 1975, 1980 et 1990	57
39. Répartition des principales techniques de moulage, 1970-1974	58
40. Propriétés de différentes méthodes de moulage	58
41. Quantités d'aluminium employées dans la construction d'une automobile, 1965-1985	59

Liste des figures

	<i>Pages</i>
I. Consommation d'aluminium par habitant dans 29 pays représentatifs en fonction du PIB par habitant, 1976	5
II. Courbes de consommation d'aluminium en fonction du PIB pour les 29 pays, 1937, 1960, 1968 et 1976	6
III. Consommation d'aluminium dans 10 pays représentatifs pendant diverses années	7

	<i>Pages</i>
IV. Consommation de certains matériaux de construction par habitant et en fonction du PIB par habitant pour 29 pays représentatifs, diverses années	8
V. Projections de la consommation mondiale de plusieurs métaux primaires (index relatif)	13
VI. Projections de la consommation de quelques métaux non ferreux primaires	13
VII. Croissance mondiale de l'industrie de l'aluminium de 1940 à 1975 et prévisions de la croissance de 1975 à l'an 2000	20
VIII. Prix des demi-produits en aluminium et de l'acier laminé en France, 1960-1976	24
IX. Adsorption de SO ₂ sur les surfaces métalliques	26
X. Demande d'ustensiles de cuisine en aluminium dans certains pays développés d'Europe	36
XI. Câbles aériens	39
XII. Section transversale d'un câble en aluminium à trois conducteurs neutres	40
XIII. Section transversale d'un câble en aluminium à trois conducteurs neutres valables de 0,6 à 1 kV	40
XIV. Section transversale d'un câble à haute tension	40
XV. Avantages financiers des transformateurs à enroulements en aluminium et en cuivre	42
XVI. Baril à bière avec rangées circulaires de soudures par points et bonde soudée	47
XVII. Chaîne automatique de production pour la fabrication de boîtes par emboutissage profond	51

Introduction

C'est vers les années 30 qu'on a commencé à employer l'aluminium à une échelle industrielle. Pendant la seconde guerre mondiale, la production d'aluminium s'est considérablement accrue, notamment en Amérique du Nord et en Allemagne, pour satisfaire la demande croissante des industries de guerre et en particulier de l'industrie aéronautique. Par ailleurs, la pénurie de certains matériaux stratégiques a conduit à étendre l'emploi de l'aluminium à d'autres secteurs. La construction électrique et la fabrication de véhicules de transport ont été les deux secteurs les plus importants, la chimie et les industries alimentaires venant immédiatement après, bien qu'occupant un rang plus modeste.

Pendant la période de reconstruction qui a suivi la guerre, des stocks importants d'aluminium ont pu être affectés à des fins civiles et l'on a très vite trouvé de nouveaux débouchés tels que la construction de maisons préfabriquées, les constructions navales, l'électrotechnique et l'industrie alimentaire. A partir de 1955, les grands producteurs mondiaux d'aluminium ont mis au point de nouvelles stratégies pour pousser la consommation d'aluminium et trouver de nouveaux marchés pour leur production en pleine expansion. Au cours de cette période, on a trouvé pour l'aluminium de nombreuses applications qui, à la longue, sont apparues intéressantes tant sur le plan technique que sur le plan économique. A cette époque, la position de l'aluminium sur le marché s'est trouvée renforcée parce que l'évolution des prix d'autres matériaux de construction

lui a été favorable, et cette tendance s'est confirmée dans les années qui ont suivi.

Le présent ouvrage rend compte de l'expérience de la Hongrie dans la production d'aluminium, cette expérience pouvant être utile aux pays en développement qui présentent des caractéristiques géographiques et économiques analogues, possèdent des réserves de bauxite abondantes mais n'ont que peu de métaux non ferreux lourds, peu de bois d'œuvre et une gamme limitée de productions sidérurgiques. En général, la création d'une industrie intégrée de l'aluminium dans les pays peu industrialisés suppose l'existence de certains facteurs géophysiques et économiques.

Notre étude expose le rôle des facteurs économiques qui influent sur la croissance de la consommation d'aluminium ainsi que les efforts faits dans les secteurs de la production et de la consommation. On y trouve des exemples des problèmes que pose la conception de modèles, la fabrication de prototypes et la production en série, tant en Hongrie que dans d'autres pays, qui montrent comment on peut tirer le maximum des ressources nationales et du savoir-faire acquis de l'étranger. L'étude traite également de la politique à suivre en matière d'organisation, de formation professionnelle et d'orientation scientifique, éléments indispensables de tout programme visant à pousser la consommation d'aluminium. Les exemples cités ne prétendent nullement être une panacée qui permettrait de résoudre tous les problèmes et il n'existe pas d'archétype immuable auquel il faille se tenir.

I. L'emploi des matériaux de construction dans le monde

Les initiatives prises pour pousser la consommation d'aluminium ont d'abord porté sur la mise au point de nouvelles techniques et l'introduction de nouveaux produits destinés à remplacer les matériaux traditionnels (par exemple, fil d'aluminium pour remplacer le cuivre dans les conducteurs électriques, feuilles et tubes souples d'aluminium pour remplacer l'étain dans les emballages, ustensiles ménagers en aluminium). L'instabilité des prix des métaux non ferreux au cours des quarante dernières années a eu pour effet de mettre l'aluminium en vedette. Il va sans dire que, dans la pratique, les possibilités et les perspectives d'application ont toujours dépendu des conditions locales, et notamment de la possibilité d'accéder aux matières premières ou aux matériaux proprement dits et de la mesure dans laquelle les options politiques et la situation économique générale favorisaient l'aluminium. Plus récemment, un facteur important qui a donné une nouvelle impulsion à l'usage de l'aluminium a été que ce métal présentait, tant pour les fabricants que pour les consommateurs, un rapport coût-efficacité supérieur à celui des autres métaux [1].

Les matériaux de construction

Dans la présente étude, on entend par "matériaux de construction" non seulement les métaux ferreux et non ferreux mais encore les plastiques, le bois et le ciment. En s'appuyant sur une multitude de données relatives à la consommation passée et présente d'aluminium dans le monde on a pu mettre au point un système complexe d'indices technico-économiques qui permettent de prévoir la consommation future d'aluminium pour divers niveaux de développement économique. La présente enquête diffère fondamentalement par sa méthode de celles qu'ont faites d'autres auteurs. Dans les études précédentes, les auteurs avaient tracé des courbes permettant d'établir des corrélations entre chaque usage particulier d'un matériau et le produit intérieur brut (PIB) d'un pays donné; dans la présente étude, on s'est efforcé de synthétiser ces corrélations et de présenter les tendances actuelles de la consommation d'une manière plus unifiée.

Très tôt dans l'histoire de l'industrie de l'aluminium, les spécialistes se sont aperçus que l'aluminium pouvait utilement et économiquement remplacer le cuivre comme conducteur de l'électricité. Peu après, l'étain disparut de la plupart des types d'emballages, ce qui permit à l'industrie de l'aluminium de progresser plus avant. Ce fut ensuite le tour de la chimie et de l'électrotechnique où l'aluminium put remplacer le plomb (pour les réservoirs, les cuves et le blindage des câbles). Dans l'industrie des véhicules de transport, l'aluminium, en raison de sa légèreté, fit bientôt concurrence à la fonte, une réduction du poids des véhicules permettant de faire des économies d'énergie appréciables, considération de première importance vu la crise énergétique que le monde connaît actuellement. Les nouveaux progrès du secteur du bâtiment entraînèrent l'abandon des constructions traditionnelles où le bois, le béton armé et l'acier cédèrent la place à l'aluminium (par exemple pour les châssis des fenêtres ou des portes, les revêtements et les structures porteuses). L'emploi d'éléments de construction en aluminium permet de réduire le temps de montage et les frais d'entretien et de transporter facilement sur de grandes distances des ensembles complets et de les assembler en un minimum de temps sur place (entrepôts frigorifiques par exemple); sa forte résistance aux intempéries a également permis à l'aluminium de supplanter efficacement d'autres matériaux dans de nombreux autres domaines (par exemple bâtiment, véhicules de transport et emballage des aliments); et sa tenue à la corrosion se compare favorablement à celle du fer-blanc ou de l'acier galvanisé. La pénurie de métaux non ferreux lourds comme l'étain et le zinc persistant, il est à prévoir que cette tendance continuera. La présente enquête englobe également les plastiques afin de déterminer les incidences qu'ils pourraient avoir à long terme sur la consommation d'aluminium.

Tendances de la production et de la consommation

Au cours des quarante dernières années, la consommation d'aluminium a connu un taux de croissance élevé, de loin supérieur à celui des

TABLEAU I. CONSOMMATION MONDIALE DE MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION, 1935-1980

(En millions de tonnes)

Matériau	1935	1950	1960	1965	1970	1975	1976	1977	1978	1979	1980
Aluminium (primaire)	0,3	1,5	4,5	6,5	10,2	11,3	13,1	15,0	14,6	15,2	16,0
Cuivre	1,8	3,2	5,0	6,1	7,6	7,5	8,5	9,0	9,2	9,4	9,4
Plomb	1,4	1,8	2,7	3,1	4,0	3,9	4,3	4,9	5,0	5,6	5,3
Etain	0,2	..	..	0,2	0,22	0,23	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24
Zinc	1,4	2,1	3,2	4,1	5,2	5,0	5,8	5,8	6,0	6,5	6,6
Acier	124,0	187,0	343,0	458,0	588,0	646,3	681,8	677,0	..	746	717,0
Plastiques	0,22	1,3	6,87	14,69	30,36	37,0	43,0	..	..	..	..
Bois ^a	..	210,0	337,3	374,3	404,2	423,7	..	441,6	442,0	447,0	..
Ciment	66,2	133,0	314,2	430,5	578,0	702,0	727,0	..	..	711,0	806,0

^aBois d'œuvre en millions de mètres cubes.

matériaux traditionnels (voir tableaux I et 2). Cette croissance a été particulièrement forte pendant la période qui va de 1960 à 1970. Même si, depuis, la hausse des prix du pétrole a entraîné un léger ralentissement, la consommation d'aluminium, quand on la compare à celle des autres matériaux, fait apparaître des taux de croissance extrêmement élevés.

Cette croissance soutenue, sans précédent, est le résultat de très savants travaux de recherche et de développement menés dans le monde entier, qui ont bénéficié d'une coopération étroite entre producteurs et consommateurs quel que soit le système économique ou le degré d'industrialisation des pays considérés.

Une série de calculs a permis d'établir des prévisions de la consommation future d'aluminium à partir des données publiées dans les études antérieures. A cette fin, on a établi une relation entre la consommation des principaux matériaux et le PIB pour certains pays représentatifs ayant atteint des degrés de développement économique différents.

TABLEAU 2. INDICES MONDIAUX DE CROISSANCE DE LA CONSOMMATION DES PRINCIPAUX MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Matériau	1977/1935	1970/1960	1977/1960	1977/1970	1980/1970
Aluminium	50,0	2,2	3,3	1,47	1,56
Cuivre	5,0	1,5	1,8	1,18	1,24
Plomb	3,5	1,5	1,8	1,22	1,32
Etain	1,2	1,0	1,3	1,35	1,09
Zinc	4,1	1,6	1,8	1,11	1,25
Acier	5,5	1,7	2,1	1,14	1,22
Plastiques	195,5 ^a	4,4	6,3 ^b	1,42 ^c	..
Bois	..	1,2	1,3 ^d	1,05 ^e	1,10 ^f
Ciment	11,0 ^a	1,9	2,3 ^b	1,28 ^c	1,39

^a1976/1935^b1976/1960^c1976/1970^d1975/1960^e1975/1970^f1979/1970

Pour les besoins de la présente enquête, on a retenu les pays pour lesquels l'Institut hongrois de planification économique, dans une étude spéciale, avait fait une comparaison du PIB par habitant [2]. C'est le PIB par habitant que l'on a retenu comme indice du développement économique* dans la présente étude, notamment pour permettre de faire des comparaisons en fonction du temps, par rapport aux prix de 1970. Pour rendre les chiffres comparables entre eux, on a converti et corrigé les valeurs du PIB en dollars des Etats-Unis. Les corrections apportées tiennent compte des variations du cours des changes et font intervenir 43 indices mesurés en unités dites naturelles. C'est également l'Institut de planification économique qui a établi cette corrélation [2].

Pour les calculs, on a retenu les données communiquées par 23 pays industrialisés, 8 pays à économie planifiée et 7 pays en développement, à savoir l'Argentine, le Brésil, le Chili, l'Égypte, l'Inde, le Mexique et le Pérou. L'éventail est suffisamment large pour qu'il soit possible d'en tirer des conclusions générales qui pourront profiter à d'autres pays.

Consommation d'aluminium, 1937-1976

Dans la présente enquête, on a classé la consommation d'aluminium conformément à la nomenclature du Centre international pour le développement de l'aluminium que les pays membres de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) ont adoptée en 1973. Les principales rubriques de cette classification sont les suivantes :

Consommation nationale d'aluminium primaire

*On peut également retenir le produit national brut (PNB) par habitant, mais on se heurte alors à des difficultés quand on veut comparer des pays industriels et des pays en développement.

Consommation nationale d'aluminium secondaire

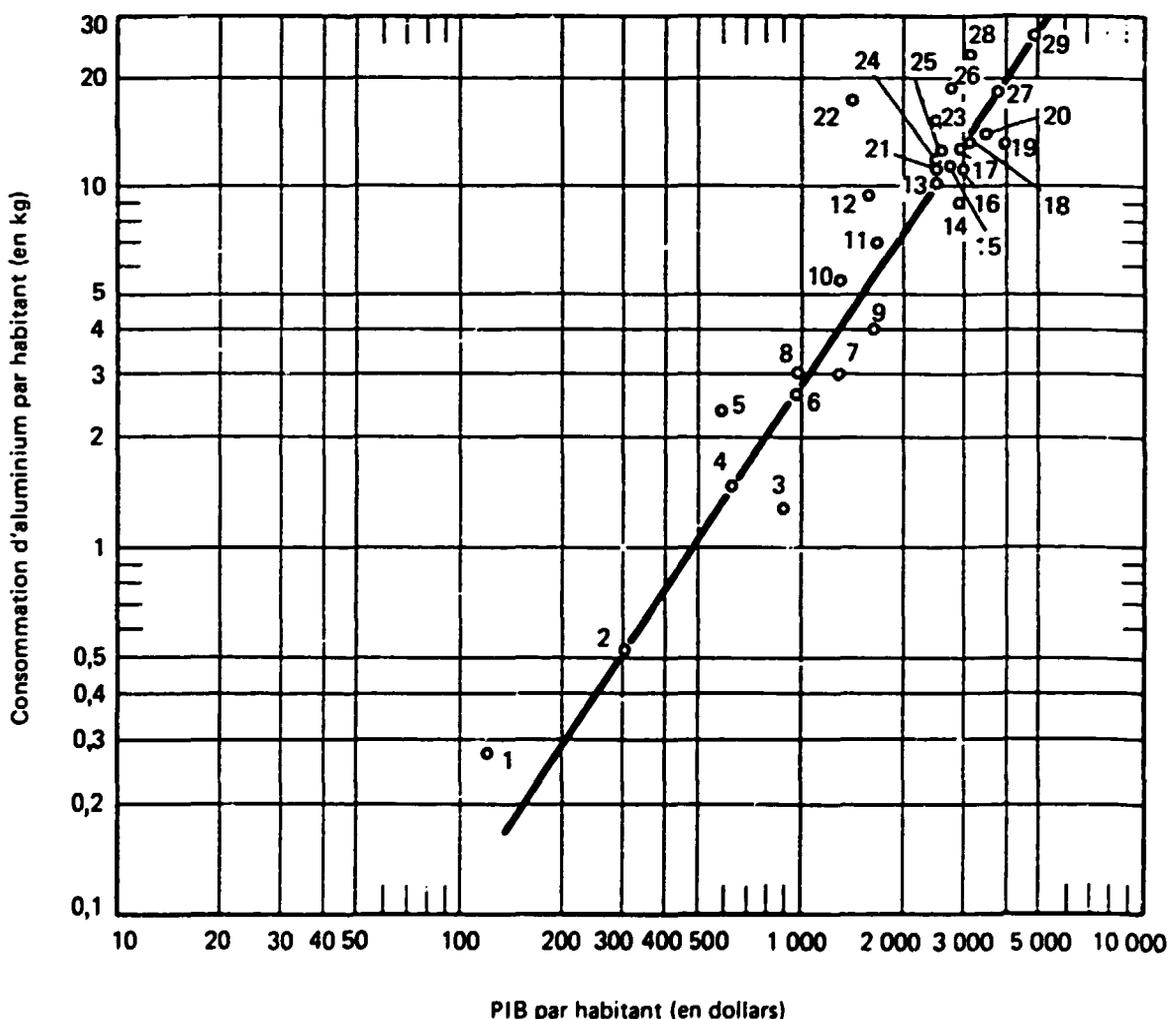
Consommation nationale de demi-produits importés

Il va sans dire que, dans ces rubriques, les exportations de demi produits ne sont pas comprises. Dans les décomptes statistiques plus détaillés, ces exportations sont portées sur une ligne séparée, ce qui permet de connaître directement la consommation nationale d'aluminium. Ces statistiques détaillées n'existent toutefois pas toujours et, en général, les chiffres très complets qui sont publiés comprennent également les exportations

de demi-produits. Pour toutes ces raisons, ces chiffres ont été acceptés tels quels aux fins des tableaux et des figures de la présente étude. Pour incomplètes qu'elles soient, les données retenues n'ont guère d'incidence sur le calcul des tendances: en effet, quand on traite de grandes quantités de données, les petites marges d'erreur se compensent généralement.

Dans la figure 1 on a porté, pour l'année 1976, la consommation d'aluminium par habitant pour 29 pays représentatifs en fonction de leur PIB par habitant. On peut considérer que pour la consommation d'aluminium l'année 1976 a été

Figure 1. Consommation d'aluminium par habitant dans 29 pays représentatifs en fonction du PIB par habitant, 1976



- Légende :
- | | | | |
|------------------|---------------------|----------------|------------------------------------|
| 1 Inde | 9 Irlande | 17 Royaume-Uni | 25 Suisse |
| 2 Egypte | 10 Espagne | 18 Pays-Bas | 26 République fédérale d'Allemagne |
| 3 Portugal | 11 Israël | 19 Canada | 27 Suède |
| 4 Mexique | 12 Italie | 20 Australie | 28 Norvège |
| 5 Brésil | 13 Autriche | 21 France | 29 États-Unis |
| 6 Afrique du Sud | 14 Nouvelle-Zélande | 22 Hongrie | |
| 7 Argentine | 15 Belgique | 23 Japon | |
| 8 Grèce | 16 Danemark | 24 Finlande | |

relativement stable, aucun nouveau débouché absorbant des tonnages importants n'étant apparu cette année-là.

Pour la période qui va de 1937 à 1968, la situation a été toute différente. Dans la figure II, les courbes de consommation en fonction du PIB correspondant à quatre années caractéristiques sont présentées en un seul graphique, ce qui permet de comparer les tendances de la croissance à long terme. Au-delà d'un niveau de développement économique donné, la consommation par habitant a continué d'augmenter à long terme. Par exemple, pour un PIB de 500 dollars par habitant, la consommation d'aluminium est passée de 0,5 kg en 1966 à 1 kg en 1968. Les courbes pour 1968 et 1976 coïncident, ce qui donne à penser que la croissance ne se poursuivra plus sauf si les prix relatifs de l'aluminium baissent considérablement ou si l'on trouve de nouveaux débouchés absorbant de grandes quantités d'aluminium.

La figure III indique la croissance de la consommation d'aluminium dans 10 pays représentatifs. Les lignes relient les points correspondant à chacune des années considérées (1937, 1960, 1968 et 1976). Pour chaque pays, la ligne tend vers la médiane pour 1968 et 1976. On ne peut évidemment s'attendre à une convergence parfaite avec la médiane en raison des fluctuations annuelles des données. Toutefois, l'amplitude des fluctuations s'est nettement atténuée dans le passé et la tendance à la convergence devrait se poursuivre à l'avenir.

Les valeurs numériques correspondant à quelques points de la ligne médiane de la figure III sont données dans le tableau 3 pour montrer que la consommation d'aluminium tend à augmenter beaucoup plus vite que le PIB. La mesure de cette rapidité est donnée par la pente de la ligne de la figure III, appelée coefficient d'élasticité, qui est égal à 1,43.

Figure II. Courbes de consommation d'aluminium en fonction du PIB pour les 29 pays, 1937, 1960, 1968 et 1976

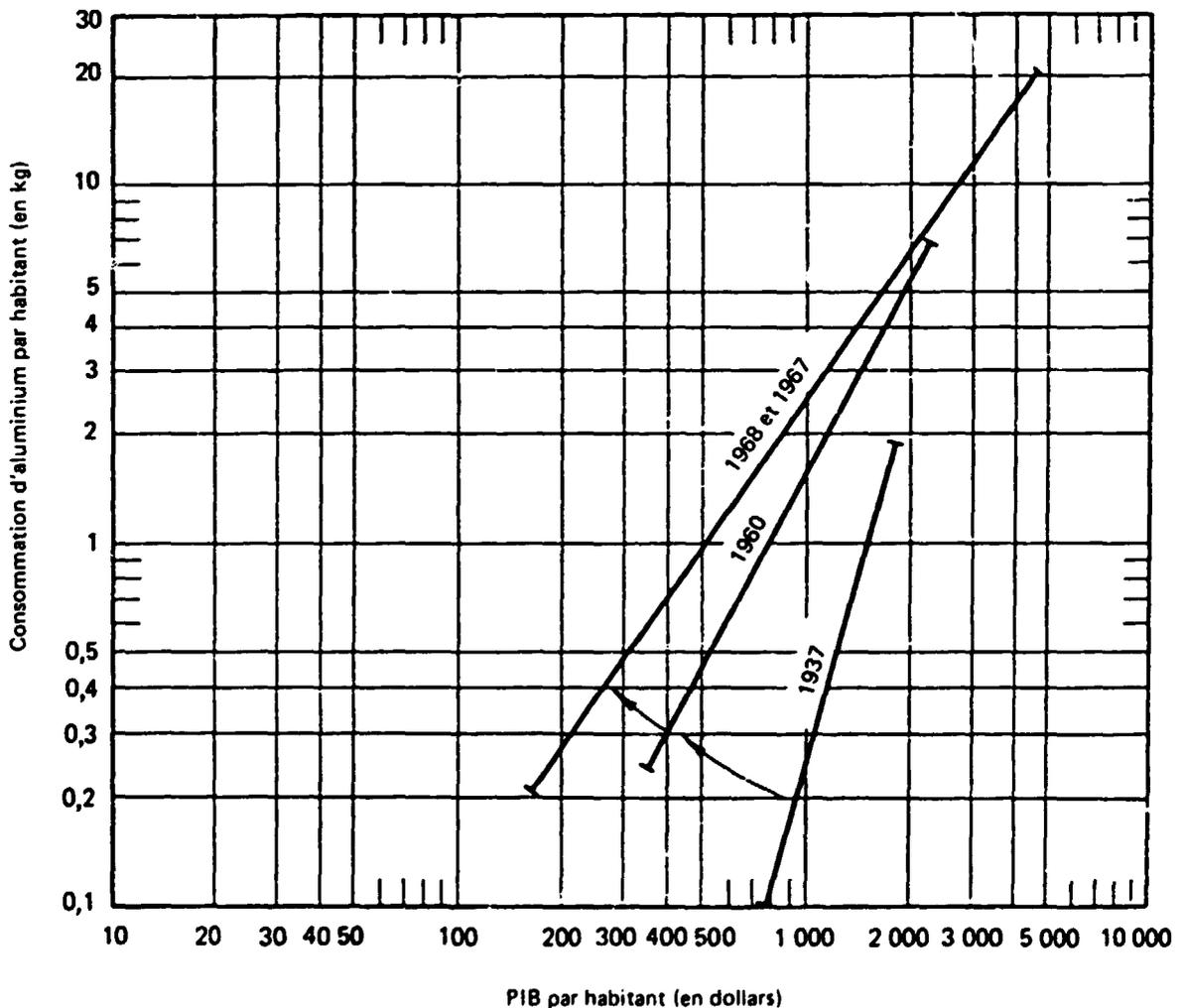


TABLEAU 3. CONSOMMATION D'ALUMINIUM EN FONCTION DU PIB PAR HABITANT

PIB par habitant (en dollars E.-U.)	Consommation d'aluminium (en kg)	
	Par habitant	Par 1 000 dollars de PIB
300	0,50	1,66
500	1,00	2,00
1 000	2,6	2,6
2 000	6,75	3,38
4 000	17,5	4,38

Si donc on connaît les tendances futures du PIB ou du PNB, on peut prévoir les tendances de la consommation d'aluminium. Pour les pays qui, sur le graphique de la figure III, se situent en

dessous de la médiane, il est recommandé de retenir un coefficient d'élasticité plus élevé et pour ceux qui se situent au-dessus, un coefficient moins élevé. Si l'on admet une croissance économique normale, alors, dans l'un et l'autre cas, les positions relatives auront tendance à converger.

Consommation d'autres matériaux de construction

La figure IV donne une comparaison de la consommation par habitant en fonction du PIB pour l'acier, le cuivre, le bois d'œuvre, le ciment et les plastiques dans 29 pays représentatifs et pour diverses années. Chacun de ces matériaux est examiné ci-après.

Figure III. Consommation d'aluminium dans 10 pays représentatifs pendant diverses années (1937, 1960, 1968 et 1976 pour les pays industrialisés et 1960, 1968 et 1976 pour les pays en développement)

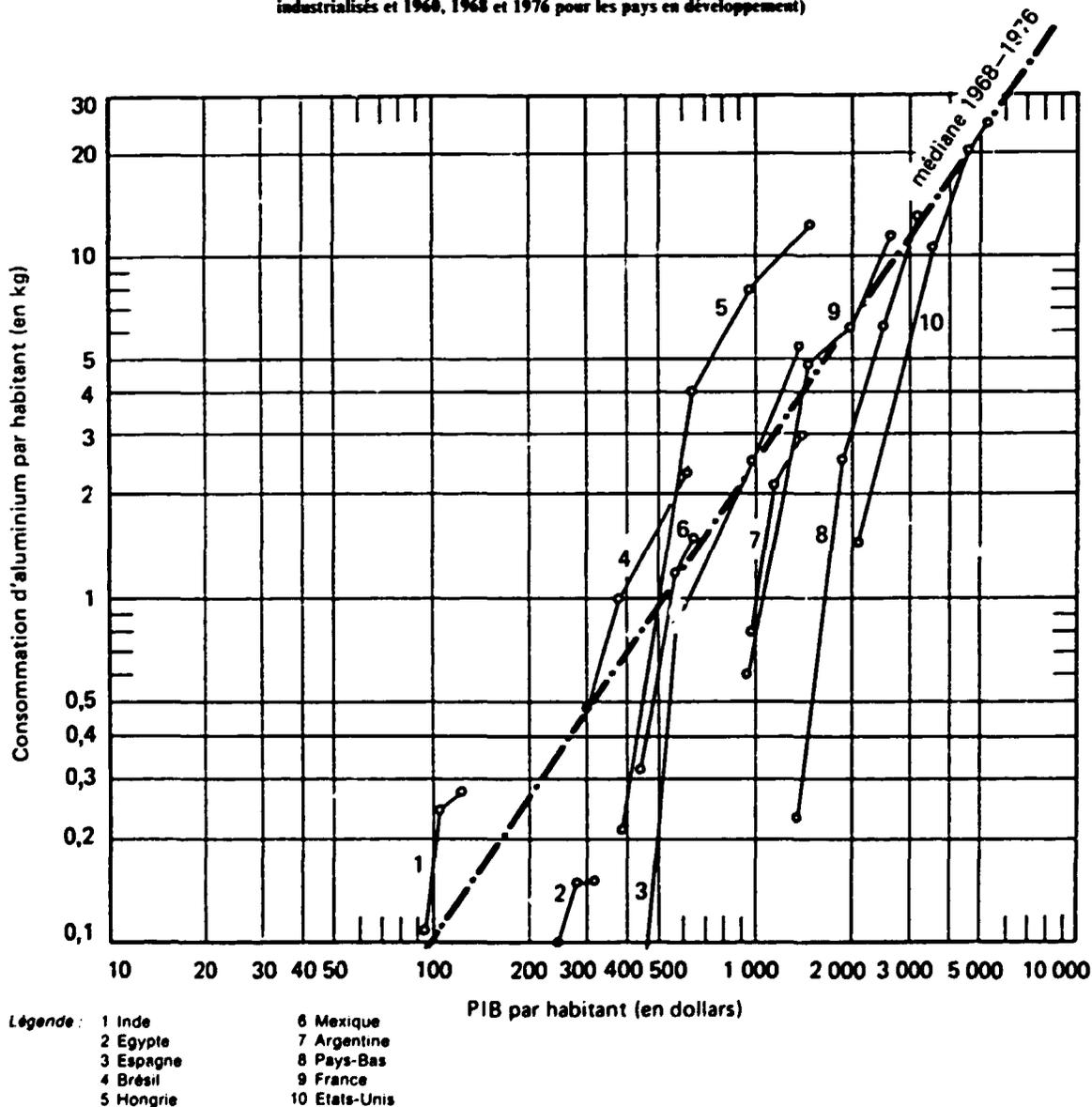
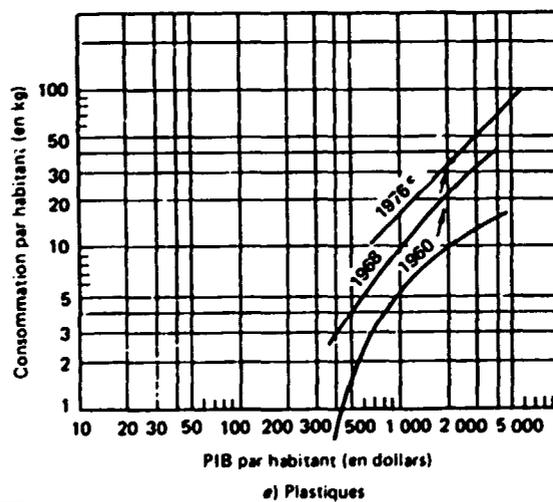
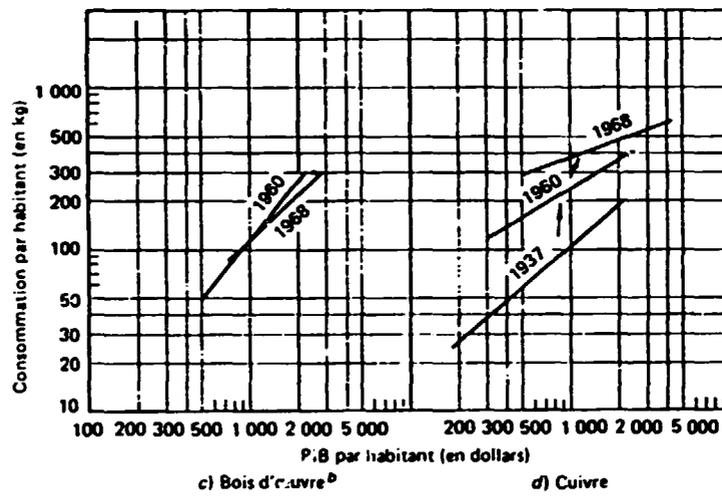
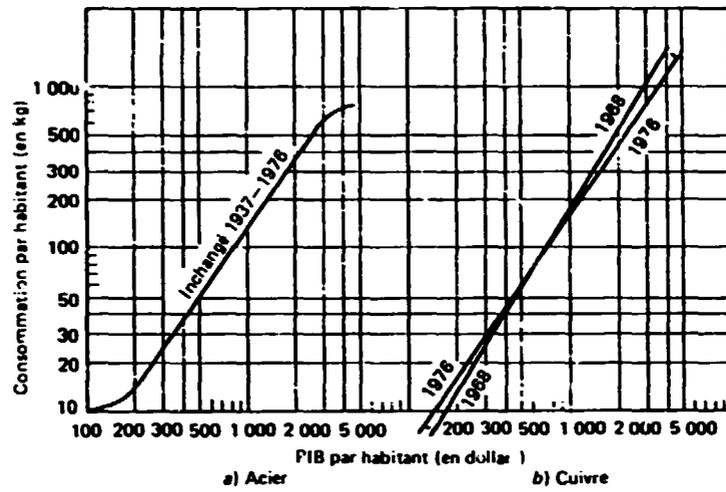


Figure IV. Consommation de certains matériaux de construction par habitant et en fonction du PIB par habitant pour 29 pays représentatifs^a, diverses années



^aVoir légende de la figure 1.

^bA l'exclusion des pays développés.

^cA l'exclusion des pays en développement pour lesquels on n'a aucune donnée.

Acier

Contrairement à l'aluminium, une caractéristique de l'acier est que, à l'échelon international, les tendances générales de la consommation exprimées par la médiane n'ont pas varié depuis 1937 (voir figure IV a). La consommation d'acier tend à se maintenir à un niveau traditionnel, avec un coefficient d'élasticité de 1,5 %, bien que des matériaux nouveaux et compétitifs comme l'aluminium et les plastiques aient fait de profondes percées sur le marché de l'acier. Cette stabilité s'explique évidemment par les volumes importants d'acier que l'on consomme dans les régions où il n'y a guère de possibilités de substitution et par les progrès techniques de l'industrie sidérurgique [3].

Cuivre

On ne possède des données concernant la consommation de cuivre raffiné que pour les années 1968 et 1976 (figure IV b). De 1968 à 1978, la médiane pour la consommation de cuivre est restée pratiquement inchangée autour du chiffre de 620 dollars par habitant. Quand ce chiffre a été dépassé (ce qui est le cas dans tous les pays développés et dans quelques pays en développement), la consommation de cuivre est retombée à 1,5 kg par habitant, soit la même que pour l'acier.

En 1976, pour une consommation de 1 kg de cuivre, la consommation d'aluminium était de 1,4 à 1,8 kg en moyenne dans les pays développés, de 6,2 kg en Hongrie et de 15 kg en Norvège.

Avec une consommation de 2,1 kg par habitant, la Hongrie est un des plus petits consommateurs de cuivre du monde. Cette situation est évidemment due à ce que le pays consomme une quantité d'aluminium très élevée par rapport à son niveau de développement économique. A l'inverse, on a vu des pays ayant atteint un niveau de développement économique analogue consommer quelque 5 kg de cuivre par habitant.

Si le prix de l'aluminium le désavantage dans sa compétition avec l'acier, avec le cuivre la situation est inversée. Pour de nombreux usages, l'aluminium pourrait remplacer le cuivre.

Les possibilités de voir l'aluminium occuper une place plus importante sur le marché du cuivre semblent limitées, en grande partie uniquement pour des considérations d'ordre technique (par exemple, souplesse des fils de bobinage).

Bois d'œuvre

Une moitié du bois consommé dans le monde l'est sous forme de combustible, l'autre moitié étant employée dans l'industrie. Un tiers de cette dernière catégorie est du bois d'œuvre, produit qui nous intéresse ici. On ne possède des données

précises que pour l'Europe, et ce, pour la période de 1950 à 1970.

Autrefois, les pays développés consommaient plus de bois d'œuvre que les pays non développés. Or, de nos jours, la consommation de bois d'œuvre par habitant dans les pays développés n'augmente pas, même si le PIB par habitant s'élève constamment, peut-être du fait qu'autrefois on employait du bois d'œuvre presque exclusivement dans les régions forestières.

Le raccourcissement des médianes et l'inclinaison de leurs gradients dans la figure IV c indique clairement que, dans les pays non développés, la consommation de bois d'œuvre tend à égaler celle des pays développés.

Ciment

Pour le ciment (figure IV d), s'il existait de nombreuses données pour 1937, il n'y en avait que très peu pour 1968 et aucune pour 1976. C'est pourquoi les médianes sont peut-être moins précises que pour les autres matériaux. Pour la période 1937-1968, les médianes ont tendance à atteindre des niveaux de plus en plus élevés et font apparaître des gradients de plus en plus prononcés. Il s'ensuit que la consommation de ciment par habitant en fonction du PIB a une forte tendance à s'élever, son coefficient d'élasticité ayant tendance à tomber, au niveau de 100 dollars par habitant par exemple, de 0,8 en 1937 à 0,3 en 1968.

Plastiques

Pour chaque année, la médiane est supérieure à celle de l'année précédente. La médiane pour 1960 est incurvée (figure IV e). Il n'existe évidemment pas de données pour 1937, époque où l'industrie des plastiques en était encore à ses premiers balbutiements. De même, pour 1976 on ne possède pas de données relatives aux pays en développement.

Les médianes tracées dans la figure IV e à partir des données disponibles indiquent, pour un niveau constant du PIB par habitant, une tendance vers la hausse de la consommation de plastiques, ce qui donne à penser que ce matériau en pleine expansion a de très nombreux usages (situation inverse de celle du bois d'œuvre). L'augmentation de la consommation des plastiques, encore que limitée à certains domaines bien précis (fabrication de câbles, panneaux sandwichs d'isolation thermique, emballages, etc.) concomitante avec celle de l'aluminium dont elle est un corollaire, peut parfois être préjudiciable aux intérêts du marché de l'aluminium, par exemple dans le secteur du bâtiment, dans l'industrie des véhicules de transport et dans la fabrication de certains biens de consommation. De fait, il est souvent difficile de savoir si ces deux

industries sont solidaires ou concurrentes. Cependant, la médiane de l'aluminium ayant une pente moins forte que celle des plastiques, il semble que, dans les pays industrialisés, le marché des plastiques ait de plus en plus tendance à s'étendre au détriment de celui de l'aluminium.

Prévisions

La période qui va de 1950 à 1975 environ a été marquée par une croissance exponentielle de l'économie mondiale. La population mondiale, la production industrielle et la consommation de matières premières ont connu des tendances analogues, de caractère exponentiel (voir tableaux 1 et 2). Parmi les matières premières, l'augmentation de la consommation d'aluminium métallique a été particulièrement spectaculaire, le taux moyen de croissance annuelle pour l'ensemble du monde atteignant 9,7 % entre 1950 et 1970.

La première crise du pétrole de 1973 a eu pour effet d'interrompre la croissance dynamique de l'économie mondiale, justifiant ainsi partiellement les économistes qui avaient préconisé plus de modération. *Limits of growth* (Les limites de la croissance), recueil d'études faites pour le Club de Rome et publié en 1972, est une des publications les mieux connues de cette catégorie. Compte tenu des prévisions du Club de Rome et de l'évolution alarmante de l'économie mondiale, l'Organisation des Nations Unies a chargé Wassily Leontief, économiste lauréat du prix Nobel, d'élaborer un modèle cohérent qui devait jouer un rôle décisif dans un nouvel ordre économique international. Le professeur Leontief et ses collaborateurs ont exposé leurs idées dans une étude très complète intitulée *The future of the World Economy* (L'avenir de l'économie mondiale) [4]. Ils posaient en première hypothèse que la croissance de la population mondiale régresserait progressivement, en particulier dans les pays en développement. Il pourrait en résulter une croissance moins forte de la production industrielle, la consommation de biens par habitant, à l'échelle mondiale, pouvant augmenter à un rythme qui n'entraînerait pas nécessairement l'épuisement prématuré des richesses du globe en matières premières et il serait en outre possible d'éviter la catastrophe mondiale que ne manquerait pas de provoquer la pollution de l'environnement. Une gestion raisonnable des ressources d'énergie et de matières premières, une utilisation meilleure et plus rationnelle de ces ressources et un recyclage intensif des déchets semblaient être des tâches capitales indispensables au développement. C'est compte tenu de ces considérations que les auteurs ont mis au point un modèle subdivisé par régions économiques et permettant de calculer le PIB et les taux de croissance correspondants.

Les calculs de Leontief ont servi de base aux prévisions sectorielles relatives aux années 1978 à 1980 pour les diverses matières premières et les divers matériaux structuraux. Ces prévisions, quand on les compare aux précédentes, font apparaître des taux de développement beaucoup plus modestes pour la période jusqu'à l'an 2000.

Leontief a été bientôt suivi par M. F. Dowding, président de la British Metals Society, qui a établi des prévisions de la consommation remises à jour pour les métaux et autres matériaux structuraux [5]. Ces prévisions ont été étudiées en fonction des valeurs escomptées du produit national brut (PNB) [voir tableaux 4 et 5].

Partant des données du tableau 4, Dowding a établi des prévisions de la consommation pour les principaux matériaux métalliques (tableau 5).

TABLEAU 4. TAUX MOYEN DE CROISSANCE ANNUELLE DU PNB : PRÉVISIONS JUSQU'À L'AN 2000
(En pourcentage)

Groupement économique ou pays	1980-1985	1985-1990	1990-2000
Pays développés à économie de marché (à l'exclusion du Japon)	3,5-3,0	3,4-3,3	3,0-2,5
Pays à économie planifiée	5,0	5,0	4,5
Japon	5,5	5,0	4,5
Pays en développement	7,5-6,0	6,5-5,7	5,5
Total mondial	4,7	4,4	4,2

Source : [5].

TABLEAU 5. CONSOMMATION MONDIALE DES MATÉRIEAUX MÉTALLIQUES LES PLUS IMPORTANTS PAR DÉCENNIE JUSQU'À L'AN 2000
(En millions de tonnes)

Matériau	1971-1980	1981-1990	1991-2000
Acier	6 900,3	10 200	13 800
Aluminium	130,0	218	358
Cuivre	82,5	136	206
Zinc	58,0	79	102
Plomb	48,0	50	61

Source : [5].

La consommation totale brute d'aluminium primaire et secondaire a été calculée en détail et un taux moyen de croissance annuelle de 5 % a été retenu comme vraisemblable (tableau 6).

La ventilation de la consommation d'aluminium par groupement économique a été établie d'après les calculs que Dowding avait faits à l'occasion d'une étude pour le compte de l'ONUDI en 1978 (voir tableaux 7 et 8) [6]. Dans ces

TABLEAU 6. CROISSANCE DE LA CONSOMMATION MONDIALE D'ALUMINIUM PAR TYPE D'ÉCONOMIE, 1978-2000

(En millions de tonnes)

Type d'économie	1978	1985	1990	2000
Economie de marché	15,7	22,0	28,3	46,0
Economie planifiée	4,3	6,0	7,7	12,0
Total	20,0	28,0	36,0	58,0

Source : [5].

TABLEAU 7. CROISSANCE DE LA CONSOMMATION MONDIALE D'ALUMINIUM PAR GROUPEMENT ÉCONOMIQUE, 1978-2000

(En millions de tonnes)

Groupe économique	1978	1985	1990	2000
Pays en développement	1,2	3,0	4,8	10,0
Pays à économie planifiée ^a	4,3	6,0	7,7	12,0
Pays à économie de marché développés	14,5	19,0	23,5	36,0
Total ^b	20,0	28,0	36,0	58,0

Source : [6].

^aY compris la Chine.^bValeur brute, y compris aluminium secondaire.

TABLEAU 8. PRÉVISION DES TAUX DE CROISSANCE ANNUELS DE LA CONSOMMATION D'ALUMINIUM

(En pourcentage)

Groupe économique	1978-1985	1986-1990	1991-2000
Pays en développement	14,0	10,0	8,6
Pays à économie planifiée ^a	4,9	5,1	4,8
Pays à économie de marché développés	3,9	4,5	3,1
Moyenne mondiale	5,0	5,1	5,1

Source : chiffres du tableau 7.

^aY compris la Chine.

calculs, il a été tenu compte d'une réduction approximative de moitié des taux de croissance annuelle antérieurs (qui, pour les années 1960 à 1970, étaient de l'ordre de 8 à 10 %). Il semble très probable que la part qu'occupent les pays en développement dans la production et la consommation d'aluminium augmentera considérablement dans les années à venir. Selon S. Moment [7], la production dans les pays développés à économie de marché devrait en gros doubler pendant la période de 1975 à 1985, passant de 9,1 millions de tonnes à 19 millions de tonnes. Pendant la même période, les capacités des fonderies d'aluminium des pays en développement devraient quintupler, passant de 0,8 à 4 millions de tonnes par année. La validité de cette prévision

semble confirmée par les données que l'on possède aujourd'hui :

Année	Capacité (en milliers de tonnes)
1960 [8]	85,6
1970 [8]	538,2
1975 [7]	842
1977 [9]	1 104
1978 [9]	1 318
1985 [7]	4 000
2000 (chiffres estimatifs)	7 000-9 000

D'ici à 1985, la part revenant aux pays en développement dans la capacité des fonderies d'aluminium pourrait atteindre 17 % du total de la capacité installée dans le monde. Dans ces conditions, l'objectif proposé lors de la deuxième Conférence générale que l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel a tenue à Lima (Pérou) en mars 1975, à savoir qu'au tournant du siècle la part des pays en développement devrait correspondre à 25 % de la production industrielle mondiale, semble représenter un pourcentage parfaitement équitable, que les pays en développement devraient pouvoir atteindre, pour ce qui est de leur part dans la capacité mondiale de production d'aluminium [10].

La seconde flambée des prix du pétrole et la récession qui l'a suivie portèrent à douter des prévisions qui avaient été faites à partir de 1975. Les estimations des taux de croissance globaux et des valeurs relatives des matériaux de construction et, partant, des possibilités de remplacement des uns par les autres vinrent à être considérées comme douteuses. Simultanément, il devint évident que l'avenir économique des pays en développement ne serait pas aussi uniforme qu'on l'avait précédemment supposé. Un groupe de pays en développement "bien placés", composé essentiellement des pays d'Amérique latine, apparut alors. Indépendamment des richesses naturelles, ce groupe de pays avait également une main-d'œuvre qualifiée, condition indispensable à tout développement. En revanche, les pays à revenus extrêmement bas ne purent atteindre les objectifs proposés pour l'agriculture et le développement, même s'ils possédaient des ressources naturelles plus ou moins abondantes, le principal obstacle étant l'absence de personnel qualifié.

Les prévisions économiques récentes tiennent compte de celles d'"Interfutures" [11] et d'un rapport établi à l'intention du Président des États-Unis d'Amérique (1980) [12]. Les données fournies dans ce rapport concernant les taux de croissance en fonction du PIB sont présentées sous forme synoptique dans le tableau 9. Toutes les données relatives à la demande future de matériaux de construction et d'aluminium concordent pour donner à penser qu'il existe une corrélation entre le PIB et la consommation de certains de ces

TABLEAU 9. PIB ET TAUX DE CROISSANCE, 1975, 1985 ET 2000

Groupement économique, région ou pays	PIB, 1975 (en milliards de dollars E.-U. de 1975)	Taux de croissance annuelle prévu, 1975-1985 (en pourcentage)	PIB projeté, 1985 (en milliards de dollars E.-U.)	Taux de croissance annuelle prévu, 1985-2000 (en pourcentage)	PIB projeté, 2000 (en milliards de dollars E.-U.)
<i>Monde</i>	6 025	4,1	8 991	3,3	14 677
<i>Groupement économique</i>					
Pays développés	4 892	3,9	7 150	3,1	11 224
Pays en développement	1 133	5,0	1 841	4,3	3 452
Europe orientale et URSS	996	3,3	1 371	2,8	2 060
Amérique du Nord, Europe occidentale, Australie, Japon, Nouvelle-Zélande	3 844	4,0	5 691	3,1	8 996
<i>Régions</i>					
Afrique	162	5,2	268	4,3	505
Asie et Océanie	697	4,6	1 097	4,2	2 023
Europe					
Orientale	330	3,3	454	2,8	682
Occidentale	1 598	4,0	2 366	3,1	3 740
Amérique latine	326	5,6	564	4,5	1 092
<i>Sélection de quelques pays</i>					
Bangladesh	9	3,6	13	2,8	19
Brésil	108	5,6	185	4,4	353
Chine	286	3,8	413	3,8	718
Egypte	12	5,6	20	4,4	38
Inde	92	3,6	131	2,8	198
Indonésie	24	6,4	45	5,4	99
Japon	495	4,0	733	3,1	1 158
Mexique	71	5,6	122	4,4	233
Nigéria	23	5,4	43	5,4	94
Pakistan	10	3,6	14	2,8	21
Philippines	16	5,6	27	4,4	52
République de Corée	19	5,6	32	4,4	61
Thaïlande	15	5,6	25	4,4	48
URSS	666	3,3	917	2,8	1 377
Etats-Unis	1 509	4,0	2 233	3,1	3 530

Source : [12].

matériaux. Selon des prévisions plus récentes encore, le coefficient d'élasticité du PIB et la croissance de la consommation d'aluminium ont une tendance générale à régresser et deviennent de plus en plus différenciés selon les régions économiques considérées. Pour les pays industriels, ce quotient qui allait de 1,2 à 1,3 tombera à 0,9 ou 1,0 d'ici à l'an 2000. On prévoit qu'il sera de 1,3 à 1,4 pour l'Amérique latine [13], de 1,4 à 1,5 pour les pays les moins développés, et de 1,0 pour les pays à économie planifiée.

Le modèle, publié à l'occasion du deuxième Colloque international sur les techniques de transformation de l'aluminium et ses applications, tenu à Buenos Aires en 1981 [14], s'inspire en partie des renseignements de documents publiés [11] et [12] et en partie de documents non publiés de W. Leontief. Il fait le bilan de la consommation de matériaux de construction jusqu'à l'an 2000. L'auteur estime que la consommation mondiale d'aluminium primaire atteindra 32 à 33 millions de tonnes d'ici à l'an 2000, sous réserve que la situation technologique actuelle persiste. Si le recyclage de l'aluminium était étendu à l'ensemble du globe, il serait possible d'économiser de

grandes quantités de matières et d'énergie et la consommation mondiale d'aluminium primaire pourrait, d'ici la fin du siècle, être ramenée à 27 millions de tonnes. Les auteurs ont également estimé le taux de croissance à prévoir pour l'acier, le cuivre, le plomb et le titane. Les progrès techniques et les opérations de recyclage permettraient là encore d'abaisser les chiffres prévus pour la consommation.

Les résultats auxquels ces calculs ont permis d'aboutir pour les métaux primaires sont présentés dans le tableau 10, dans les figures V et VI.

TABLEAU 10. CROISSANCE DE LA CONSOMMATION MONDIALE DES PRINCIPAUX MÉTAUX PRIMAIRES D'ICI À L'AN 2000

(En millions de tonnes)

Métal	1980	1990	2000
Aluminium	15,2	22	32
Cuivre	9,6	13	17
Plomb	5,2	6	7
Acier	720,0	1 000	1 138

Source : [14].

Figure V. Projections de la consommation mondiale de plusieurs métaux primaires (indice relatif) [14]

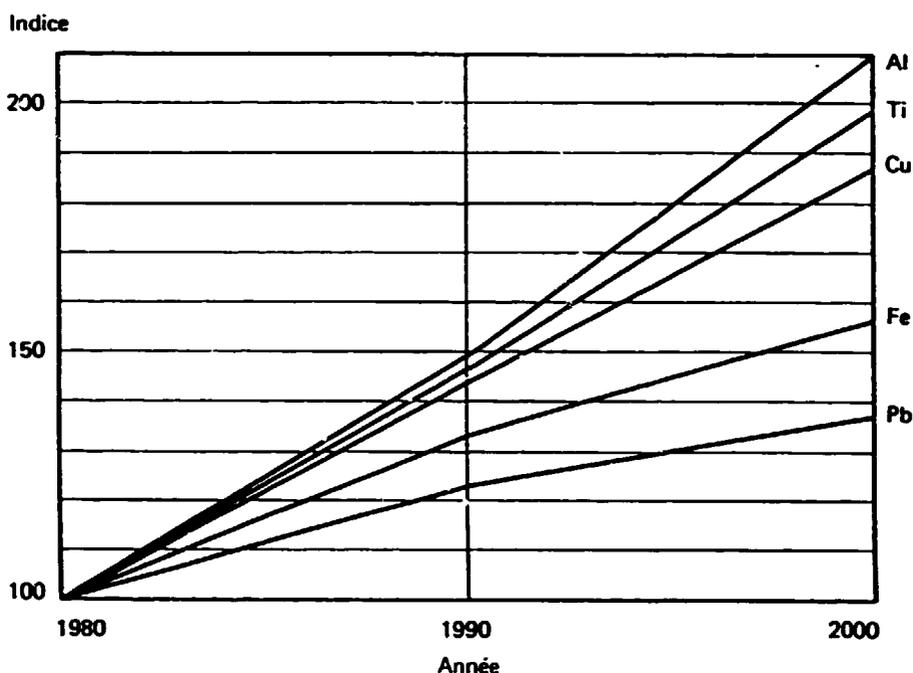
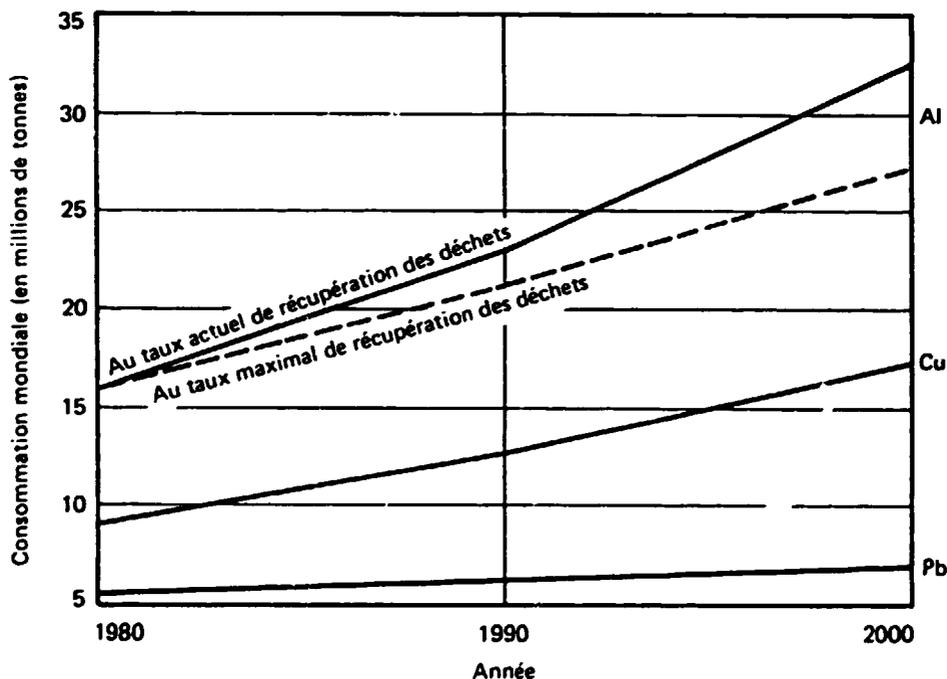


Figure VI. Projections a.: la consommation de quelques métaux non ferreux primaires



Il convient d'ajouter aux chiffres correspondant à la consommation de métaux primaires le volume de métal secondaire obtenu par recyclage des déchets qui, pour l'aluminium, pourrait représenter de 20 à 30 % du métal primaire.

La figure VI, établie d'après les projections de Varsavsky [14] et des prévisions faites par

"Interfutures" [11], laisse subsister une certaine incertitude. Indépendamment de la situation de l'économie mondiale, la demande future de matériaux de construction dépendra d'impondérables tels que le pourcentage et le rendement des opérations de recyclage des déchets; les progrès accomplis dans le domaine de la production et du

traitement et, plus spécialement, des incidences qu'ils auront sur les besoins en capitaux et en énergie; les innovations, la qualité des produits et les économies de matériaux; et, enfin, les possibilités de substitution des matériaux.

Un modèle permettant de prévoir la consommation brute d'aluminium primaire et secondaire,

avec division arbitraire entre les principales régions économiques, a été établi. Le tableau 11 donne la consommation brute d'aluminium, les taux de croissance annuelle correspondants figurant au tableau 12. On a estimé que, d'ici à l'an 2000, le volume de métal à recycler à partir de déchets s'élèverait à 20% du métal primaire.

TABLEAU 11. CONSOMMATION BRUTE D'ALUMINIUM PRIMAIRE ET SECONDAIRE, 1970-2000
(En millions de tonnes)

Groupement économique, région ou pays	1970	1975	1979	1980	1981 (estimation)	Prévisions		
						1985	1990	2000
Pays d'Europe occidentale à économie de marché	3,2	3,5	5,7	5,6	5,3	6,5	7,5	9,9
Japon	1,4	1,6	2,3	2,1	2,0	2,5	2,9	3,8
Etats-Unis d'Amérique	4,2	4,2	6,6	6,2	6,4	7,1	8,1	10,7
Autres pays développés à économie de marché	0,5	0,8	1,0	1,0	1,0	1,2	1,5	1,8
Total pour les pays développés à économie de marché	9,3	9,5	15,6	14,9	14,7	17,3	20,0	26,2
Amérique latine	0,2	0,4	0,6 ^a	0,7 ^b	0,7	1,0	1,3	2,1
Pays producteurs de pétrole	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,8
Total pour l'Amérique latine et les pays producteurs de pétrole	0,3	0,6	0,9	1,0	1,0	1,4	1,8	2,9
Pays les moins avancés d'Asie ^c , d'Afrique ^d , etc.	0,3	0,4	0,6	0,6	0,6	0,8	1,0	1,7
Pays d'Europe à économie planifiée ^e	1,7	2,6	3,0	3,1	3,0	3,6	4,2	5,5
Chine et autres pays à économie planifiée ^e	0,3	0,4	0,6	0,6	0,6	0,8	1,1	1,8
Total pour les pays à économie planifiée	2,0	3,0	3,6	3,7	3,6	4,4	5,3	7,3
Total	11,9	13,5	20,7	20,2	19,9	23,9	28,1	38,1

^aMetal Bulletin's Second Aluminium Congress, Madrid, septembre 1980.

^bAluminium, vol. 58, n° 1 (1983) p. 73.

^cA l'exclusion de la Chine, du Japon et des pays producteurs de pétrole.

^dA l'exclusion des pays producteurs de pétrole et de l'Afrique du Sud.

^eEstimation.

TABLEAU 12. AUGMENTATION ANNUELLE MOYENNE DE LA CONSOMMATION BRUTE D'ALUMINIUM PRIMAIRE ET SECONDAIRE
(En pourcentage)

Groupement économique, région ou pays	1970-1975	1976-1980	1980-1985	1985-1990	1990-2000
Pays d'Europe occidentale à économie de marché	2,0	5,8	3,1	2,8	2,8
Japon	2,5	4,1	3,2	2,8	2,8
Etats-Unis d'Amérique	--	3,9	2,8	2,8	2,8
Autres pays développés à économie de marché	9,8	7,1	4,5	3,0	3,0
Moyenne pour les pays développés à économie de marché	0,5	4,5	3,0	2,9	2,8
Amérique latine	14,5	13,0	7,2	5,4	4,8
Pays producteurs de pétrole	14,5	11,8	5,2	4,8	4,7
Moyenne pour l'Amérique latine et les pays producteurs de pétrole	14,5	12,6	7,0	5,1	4,8
Pays les moins développés d'Asie ^a , d'Afrique ^b , etc.	6,0	7,0	6,0	5,3	5,8
Pays d'Europe à économie planifiée	8,9	5,9	3,3	3,8	2,8
Chine et autres pays à économie planifiée	6,0	7,0	5,0	5,0	5,0
Moyenne pour les pays à économie planifiée	8,5	6,4	3,5	3,7	3,8
Moyenne générale	2,5	5,5	3,4	3,4	3,7

^aA l'exclusion de la Chine et du Japon.

^bA l'exclusion des pays producteurs de pétrole et de l'Afrique du Sud.

chiffre analogue à celui qu'avait retenu Varsavsky. On peut donc évaluer à quelque 30 millions de tonnes la demande mondiale d'aluminium en l'an 2000. Ce chiffre est également corroboré par Kapolyi [15] qui, dans son analyse des prévisions pour les années 70, conclut des projections que les taux de croissance ont tendance à régresser.

Cette régression du taux de croissance de la consommation d'aluminium peut être attribuée aux facteurs ci-après :

a) Les augmentations du PIB que l'on constate dans les pays développés proviennent surtout de secteurs industriels qui ne font pas un usage intensif de l'aluminium (par exemple, l'électronique et les télécommunications). Pour les pays en développement, des programmes intensifs d'électrification avec une structure industrielle analogue à celle qu'avaient les pays développés entre 1960 et 1970, entraînent une augmentation de la demande spécifique d'aluminium;

b) Les investissements nécessaires à la création de nouvelles installations de production d'aluminium primaire augmentent régulièrement par suite de l'augmentation des coûts de l'infrastructure et de l'énergie, de l'augmentation de la taille des unités de production et des normes antipollution plus rigoureuses;

c) On ne découvre que peu de nouvelles applications de l'aluminium, sauf pour les transports aériens et les véhicules automobiles;

d) La hausse des prix de l'aluminium par comparaison à celle qu'ont connue d'autres matériaux, notamment les aciers alliés et certains

plastiques, a joué au détriment de l'aluminium. A titre d'exemple, en 1979 le prix de l'aluminium sur le marché mondial était 2,31 fois plus élevé qu'en 1972, alors que celui des aciers alliés ne l'était que 1,68 fois plus.

Le tableau 13 donne des prévisions de la consommation mondiale d'acier, les augmentations annuelles en pourcentage [16] étant données au tableau 14. La présentation de ces tableaux et les incertitudes ainsi que les risques d'erreurs qu'ils peuvent comporter sont analogues à ce qu'ils sont pour les tableaux 11 et 12 relatifs aux prévisions de la consommation d'aluminium.

Les tableaux 15 et 16 donnent une comparaison en pourcentage de la consommation d'aluminium et d'acier par groupements économiques entre 1970 et l'an 2000. La part qui revient aux pays développés recule, tant pour l'aluminium que pour l'acier. La part qui correspond aux pays à économie planifiée reste égale pour l'aluminium alors que celle de l'acier recule pour les dernières années. La part des pays en développement fait apparaître une augmentation spectaculaire pour l'acier et pour l'aluminium, une augmentation qui, si elle est moins marquée, n'en est pas moins sensible. Quant aux pays les moins avancés, la tendance est analogue à celle des pays en développement, encore qu'elle se situe à un niveau nettement inférieur. Pour résumer, il semble qu'une augmentation de la demande d'aluminium soit possible dans les pays en développement. Cependant, une telle évolution suppose des services de commercialisation bien organisés, des services

TABLEAU 13. CONSOMMATION MONDIALE D'ACIER, 1970-2000

(En millions de tonnes)

Groupement économique, région ou pays	1970	1975	1979	1980	1981	Prévisions		
						1985	1990	2000
Pays d'Europe occidentale à économie de marché	120	120	130	130	128	130	130	140
Japon	80	90	100	100	90	95	105	115
Etats-Unis d'Amérique	120	108	120	100	108	120	125	140
Autres pays développés à économie de marché	36	52	60	60	54	55	60	65
Total pour les pays développés à économie de marché	356	370	410	390	380	400	420	460
Amérique latine	13	18	40	40	43	55	70	140
Pays producteurs de pétrole	2	6	15	15	17	20	40	100
Total pour l'Amérique latine et les pays producteurs de pétrole	15	24	55	55	60	70	110	240
Pays les moins avancés d'Asie ^a , d'Afrique ^b , etc.	16	16	16	17	18	40	60	150
Pays d'Europe à économie planifiée ^c	180	195	213	203	208	220	230	250
Chine e, autres pays à économie planifiée ^c	32	42	52	52	47	65	80	150
Total pour les pays à économie planifiée	212	237	265	255	255	285	310	400
Total	599	647	746	717	713	800	900	1 250

^aA l'exclusion de la Chine, du Japon et des pays producteurs de pétrole

^bA l'exclusion des pays producteurs de pétrole et de l'Afrique du Sud.

^cEstimation.

TABLEAU 14. AUGMENTATION ANNUELLE MOYENNE DE LA CONSOMMATION D'ALUMINIUM

(En pourcentage)

Groupement économique, région ou pays	1970-1975	1970-1980	1980-1985	1985-1990	1990-2000
Pays d'Europe occidentale à économie de marché	--	1,0	--	--	1,5
Japon	2,3	2,1	1,0	2,0	1,9
Etats-Unis d'Amérique	2,1	1,5	3,5	0,8	1,1
Autres pays développés à économie de marché	7,0	5,0	1,7	1,7	1,6
Moyenne pour les pays développés à économie de marché	0,8	1,0	0,5	1,0	1,8
Amérique latine	6,4	11,0	6,4	4,8	13,3
Pays producteurs de pétrole	20,0	22,0	5,7	13,3	17,1
Moyenne pour l'Amérique Latine et les pays producteurs de pétrole	22,8	13,5	6,2	7,6	7,4
Pays les moins avancés d'Asie ^a , d'Afrique ^b , etc.	--	1,0	5,7	8,0	17,1
Pays d'Europe à économie planifiée	1,6	0,8	1,6	0,9	0,8
Chine et autres pays à économie planifiée	5,0	5,0	4,6	4,1	6,0
Moyenne pour les pays à économie planifiée	2,2	1,8	2,2	1,7	2,5
Moyenne générale	1,5	1,8	2,1	2,4	3,2

^aA l'exclusion de la Chine et du Japon.^bA l'exclusion des pays producteurs de pétrole et de l'Afrique du Sud.

TABLEAU 15. PART DES GROUPEMENTS ÉCONOMIQUES DANS LA CONSOMMATION MONDIALE D'ALUMINIUM, 1970-2000

(En pourcentage)

Groupement économique	1970	1980	1985	1990	2000
Pays développés à économie de marché	78	74	72	72	69
Pays en développement semi-industrialisés	3	5	6	6	8
Pays les moins avancés	3	3	3	3	4
Pays à économie planifiée	16	18	19	19	19
Total	100	100	100	100	100

d'information technique et des services consultatifs compétents ainsi que des transferts de technologie efficaces. Enfin, il ne faut pas perdre de vue la concurrence de plus en plus vive des plastiques et des aciers alliés qui, de nos jours, progressent sur un large front, tout comme l'aluminium l'avait fait entre 1955 et 1970.

La structure et la ventilation sectorielle de la consommation d'aluminium d'une région à l'autre ou d'un pays à l'autre dépendent de la situation économique générale et des structures des industries locales. Il est tentant de faire une étude comparée des usages finals de l'aluminium par région quand on veut établir des prévisions très détaillées, mais l'insuffisance de données jointe à la complexité et à l'instabilité des phénomènes économiques ne permettent pas d'aller au-delà d'une simple estimation de certaines tendances fondamentales. On peut dégager les conclusions générales suivantes :

a) Les quatre principaux groupements économiques diffèrent par l'usage final qu'ils font de

l'aluminium. Dans les pays industriels à économie de marché, les plus gros consommateurs sont les secteurs des transports, de la construction et de l'emballage. Dans les pays en développement semi-industrialisés, les industries électriques ont un rôle important, les ustensiles ménagers sont en régression alors qu'on assiste à une croissance des produits employés dans les transports; de même, les emballages (s'il existe des industries alimentaires) et la construction (selon le climat local) peuvent également avoir un potentiel de croissance. Dans les pays les moins développés, le gros de la consommation d'aluminium est absorbé par le secteur des ustensiles domestiques et celui de l'industrie électrique. Dans les pays à économie planifiée (quel que soit leur niveau de développement industriel), où le marché n'est pas saturé, c'est le secteur de l'électrotechnique qui est le principal consommateur civil;

b) Avec le développement industriel que connaît le monde entier, il semble probable que,

TABLEAU 16. PART DES GROUPEMENTS ÉCONOMIQUES DANS LA CONSOMMATION MONDIALE D'ALUMINIUM, 1970-2000

(En pourcentage)

Groupement économique	1970	1980	1985	1990	2000
Pays développés à économie de marché	60	54	50	47	37
Pays en développement semi-industrialisés	2	8	9	12	20
Pays les moins avancés	2	2	5	6	12
Pays à économie planifiée	36	36	36	35	31
Total	100	100	100	100	100

peu à peu, les usages finals que tous les principaux groupements économiques font de l'aluminium finiront par être très voisins de ceux des pays développés à économie de marché:

c) La demande mondiale de demi-produits très élaborés en aluminium augmente en sorte que la frontière entre demi-produits et produits finis en aluminium s'estompe de plus en plus. Ce phénomène se manifeste dans certains pays industriels à faible population où une forte augmentation de la part des exportations de demi-produits peut représenter plus de 50 % de la production totale. Les usines de montage et les ateliers auxquels ces produits sont destinés foisonnent dans les pays en développement;

d) Il est peu vraisemblable que de nouveaux produits à usage civil, nécessitant des quantités importantes d'aluminium, apparaissent sur le marché au cours des vingt prochaines années, même dans les pays industriels. Cette impression semble confirmée par le cas de l'Italie [17] tel qu'il est exposé au tableau 17;

TABLEAU 17. CONSOMMATION D'ALUMINIUM PAR SECTEUR INDUSTRIEL EN ITALIE, 1977 ET 2000

(En pourcentage)

Secteur	1977	2000 (estimation)
Véhicules de transport	27	30
Constructions mécaniques	8	5
Electrotechnique	5	10
Bâtiment et architecture	18	25
Emballage	8	5
Produits ménagers et autres articles fabriqués	11	10
Divers	23	15
Total	100	100

Source : [17].

e) Certaines observations antérieures restent valables [6]. Dans les pays industriels, la nécessité d'épargner l'énergie entraînera une augmentation de la consommation d'aluminium pour les véhicules de transport, les industries électriques, la fabrication d'échangeurs de chaleur et de récipients, la production massive de certaines pièces mécaniques et d'articles de loisirs et de sports. Néanmoins, la croissance de la consommation d'aluminium pour le bâtiment et les emballages s'arrêtera. Dans cette période initiale de mise en valeur des pays en développement et des pays semi-industrialisés, l'emploi de l'aluminium dans les industries électriques et, dans certains cas, le large emploi de produits d'emballage en aluminium (par exemple pour le poisson, les produits laitiers et autres conserves) et la création d'industries produisant des ustensiles ménagers jouera un rôle important. D'autres secteurs consommateurs

d'aluminium se développent également selon l'économie du pays. L'agriculture aura besoin d'entrepôts frigorifiques modernes, d'installations d'irrigation, d'usines de dessalement et d'éléments de construction préfabriqués. Les éléments pour véhicules et machines feront leur apparition tout d'abord dans les usines de montage. Par la suite, ils seront fabriqués dans des installations spéciales telles que des fonderies de précision;

f) Parallèlement à l'expansion des opérations de traitement de l'aluminium, le recyclage des déchets devrait faire son apparition. En effet, quelque 21 à 26 % de ces déchets peuvent servir à produire de l'aluminium de deuxième fusion.

Le tableau 18 présente sous une forme synoptique la consommation d'aluminium, selon les usages finals qui en sont faits, pour quelques pays représentatifs et pour les pays industriels européens à économie de marché.

La consommation d'aluminium se ressent toujours de la concurrence d'autres matériaux. La figure VII montre l'évolution de la croissance de la production d'aluminium par le passé et envisage quatre scénarios possibles pour l'avenir.

Prix

Les tableaux 19 et 20 donnent les prix des principaux matériaux de construction sur le marché mondial comparés à ceux de l'aluminium pour la période de 1935 à 1981. Depuis la fin de la seconde guerre mondiale, un courant marqué en faveur de l'aluminium s'est créé au détriment du cuivre et de l'acier. La hausse des prix du pétrole de 1973 n'a guère modifié les prix relatifs des matériaux et les fluctuations des prix de l'aluminium et du cuivre ont été en grande partie dues à un mouvement de spéculation passager. Même la seconde hausse importante des prix du pétrole et la récession qui l'a suivie ne sont pas parvenues à modifier la plupart des rapports entre les prix (certains types d'aciers alliés et de plastiques faisant exception). Récemment, des perfectionnements fondamentaux apportés aux techniques de production ont entraîné une réduction sensible des prix qui a joué au détriment de l'aluminium [19]. Il en est résulté une chute de la demande de secteurs tels que ceux des industries alimentaires et du matériel pour l'industrie chimique et une intensification de l'emploi d'acier inoxydable dans la fabrication des véhicules de transport. La fluctuation temporaire de 1981 se reconnaît par la grande différence entre le prix moyen pratiqué par ALCAN et la cotation libre à la Bourse des métaux de Londres.

Les prévisions publiées concordent pour donner à penser que le niveau des prix relatifs des matériaux de construction atteint en 1970 per-

TABLEAU 18. EMPLOI DE L'ALUMINIUM PAR SECTEUR DANS LES PAYS EUROPÉENS A ÉCONOMIE DE MARCHÉ ET DANS D'AUTRES PAYS REPRÉSENTATIFS

Secteur	Economies du marché européen, 1979 ^a		Argentine, 1978 ^b		Brésil, 1980 ^c		Égypte, 1980 ^d		Hongrie, 1979 ^e		Inde, 1979 ^f		Japon, 1979 ^g		Afrique du Sud, 1980 ^h		Etats-Unis, 1977 ^h	
	Milliers de tonnes	Pourcentage	Milliers de tonnes	Pourcentage	Milliers de tonnes	Pourcentage	Milliers de tonnes	Pourcentage	Milliers de tonnes	Pourcentage	Milliers de tonnes	Pourcentage	Milliers de tonnes	Pourcentage	Milliers de tonnes	Pourcentage	Milliers de tonnes	Pourcentage
Transports	1 137	20,0	9,0	13,0	67,7	19,2	1,2	4,0	14,7	7,9	31,0	10,0	505	21,2	3,9	7,0	1 368	22,6
Mécanique	286	5,1	28	4,0	14,5	4,1	--	--	12,8	6,8	--	--	424	17,8	--	--	356	5,9
Electrotechnique	443	7,9	19,3	27,9	75,9	21,5	5,9	19,5	32,4	17,5	170,5	55,0	257	10,8	16,4	29,3	592	9,8
Bâtiment et construction	764	13,6	13,8	19,9	84,1	23,8	9,0	30,0	18,5	9,9	15,5	5,0	781	32,8	7,8	14,0	1 381	22,8
Chimie, alimentation et agriculture	68	1,2	9,7	14,0	28,6	8,1	--	--	4,4	2,4	--	--	125	5,2	10,0	17,9	81	1,3
Emballage	410	7,3	--	--	--	--	0,3	1,0	10,1	5,4	12,4	4,0	--	--	--	--	1 278	21,1
Ustensiles ménagers et de bureau	355	6,3	4,1	5,9	51,5	14,6	13,6	45,5	5,4	2,9	62,0	20,0	47	2,0	8,4	15,0	415	6,9
Métallurgie des poudres	30	0,5	--	--	--	--	--	--	5,0	2,7	--	--	--	--	3,3	5,9	48	0,8
Sidérurgie	203	3,6	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	110	1,8
Industries métalliques non dénommées	504	8,9	2,0	2,9	30,7	8,7	--	--	27,3	14,6	18,6	6,0	137	5,7	6,2	11,1	180	3,0
Divers	--	--	--	--	--	--	--	--	14,7	7,9	--	--	--	--	--	--	--	--
Exportation de demi-produits de feuille de poudre pour câbles	1 433	3,9	8,5	12,3	--	--	--	--	41,7	22,3	--	--	108	4,5	--	--	238	3,9
Total	5 633	100,0	69,2	100,0	353,0	100,0	30,0	100,0	187,0	100,0	310,0	100,0	2 384	100,0	56,0	100,0	5 633	100,0

^aStatistiques européennes pour l'aluminium, 1979.

^bAluminium, vol. 58, n° 2 (1982), p. 68.

^cIbid., p. 71.

^dIbid., p. 45.

^eMagyar Aluminium, n° 18, 1981, p. 215.

^fAluminium, op. cit., p. 50.

^gDonnées statistiques de NIMDOK, Budapest, 1981.

^hDemi-produits uniquement.

TABLEAU 19. PRIX MONDIAUX MOYENS DE MATÉRIAUX REPRÉSENTATIFS, 1935-1981

(En dollars par tonne)

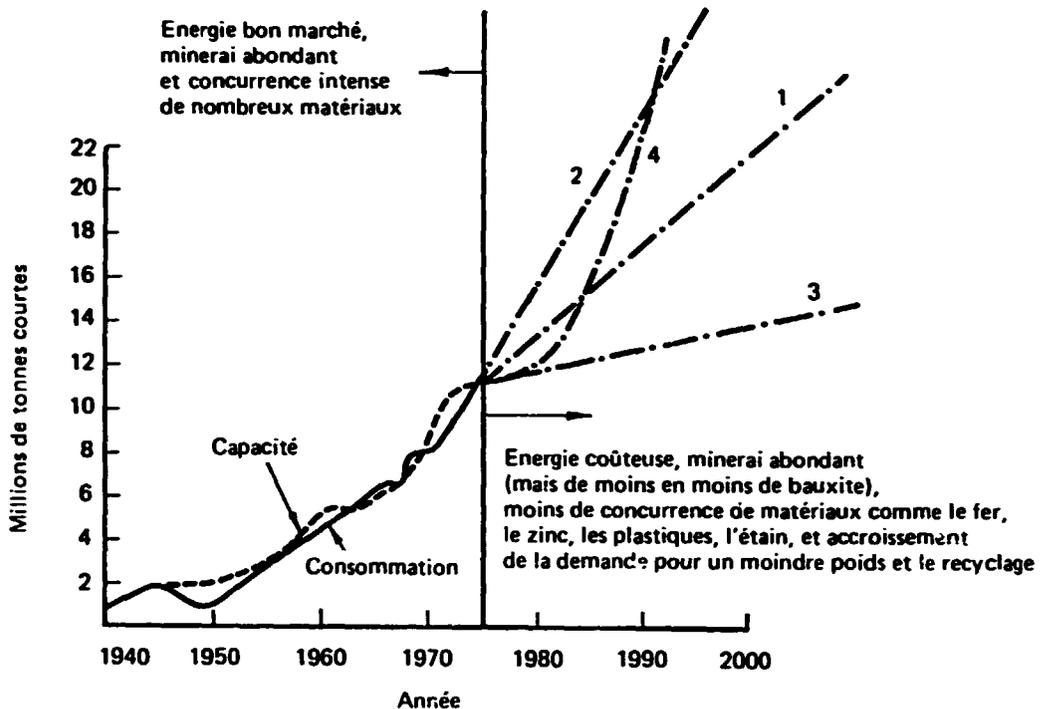
Matériau	1935	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
Aluminium ^a	482	370	500	577	545	614	860	969	1 108	1 167	1 398	1 714	1 750
Cuivre ^b	172	472	500	712	780	1 393	1 205	1 381	1 293	1 358	1 945	2 167	1 584
Plomb	69	300	332	265	260	304	446	446	617	--	1 202	937	639
Zinc	68	210	273	287	320	296	745	711	589	--	743	747	804
Etain	1 090	--	--	--	3 428	3 673	6 870	7 583	10 789	17 000	15 462	17 158	13 889
Fer-blanc	--	--	--	--	--	--	487	480	571	605	665 ^c	793 ^c	764 ^c
Fils machine acier	34	65	--	--	--	93	173	168	154	220	311 ^d	324 ^d	293 ^d
Chlorure de polyvinyle ^e	--	--	--	350	351	359	642	566	619	650	825	680	550
Ciment	--	6	--	7	8	120	20	--	25	29 ^f	31 ^f	34 ^f	..

^aPrix moyen pratiqué par ALCAN.^bEn cathodes^cChiffre estimatif^dMetal Bulletin, prix moyen^ePrix moyen en République fédérale d'Allemagne^fPrix moyen en France et en Italie

TABLEAU 20. COMPARAISON DES PRIX MONDIAUX DE MATÉRIAUX REPRÉSENTATIFS, 1935-1981

(Indices rapportés au prix moyen de l'aluminium)

Matériau	1935	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
Aluminium	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Cuivre	36	128	100	123	143	277	140	142	117	116	139	126	91
Plomb	14	81	66	46	48	50	52	46	56	--	86	55	37
Zinc	14	57	55	50	59	48	87	73	53	--	53	44	46
Etain	226	--	--	--	529	598	799	782	974	1 456	1 106	1 001	754
Fer-blanc	--	--	--	--	--	--	57	49	51	52	48	46	44
Fils machine acier	7	18	--	--	--	15	20	17	14	19	24	19	17
Plastiques	--	--	--	61	64	58	75	58	56	56	59	40	31
Ciment	--	2	--	1,2	1,5	1,6	2,3	--	2,2	2,5	2,2	2,0	..

Figure VII. Croissance mondiale^a de l'industrie de l'aluminium de 1940 à 1975 et prévisions de la croissance de 1975 à l'an 2000

Légende :

1 Taux de croissance analogue à celui de 1940-1975.

2 L'aluminium remplace le cuivre, le zinc et les plastiques.

3 L'insuffisance de la capacité de fusion et l'augmentation des prix de l'énergie exercent une influence profonde dans les secteurs du bâtiment, des véhicules de transport et de l'électrotechnique.

4 L'aluminium remplace de plus en plus d'autres matériaux structuraux mais la demande supplémentaire doit être satisfaite par les installations existantes. Les nouvelles installations qui devraient entrer en service après 1985 pour satisfaire la demande supplémentaire bénéficieront de nouvelles techniques faisant appel à des matières premières autres que la bauxite.

^aA l'exclusion de la Chine et de l'URSS.

sistera, encore qu'une hausse des prix soit prévue pour la période suivant 1983. Des augmentations des prix semblent nécessaires pour assurer la rentabilité des nouvelles installations mises en service pour satisfaire la demande toujours croissante. L'importance des augmentations dépendra des coûts réels de l'énergie et des capitaux. Les avantages que les économies réalisées grâce aux faibles prix de l'énergie dans certains pays en développement leur permettraient d'obtenir risquent d'être compromis par les investissements plus élevés que nécessitera la construction des fonderies [14]. Les prévisions font état d'une

augmentation annuelle moyenne de 3 à 5 % des prix de l'aluminium. L'apparition progressive dans les pays en développement de nouvelles fonderies employant de l'énergie bon marché limitera les augmentations moyennes. La pratique de prix excessifs pour l'aluminium pourrait facilement entraîner son remplacement par d'autres matériaux. Il semble probable que la majeure partie des augmentations de la consommation d'aluminium se limitera à quelques secteurs tels que l'électrotechnique, les véhicules de transport et l'emballage, où son emploi présentera des avantages économiques.

Références

1. E. Muraközi, "Correlation of aluminium consumption and economic development after the price explosion", *Magyar Aluminium* (Budapest), vol. 16, n° 1 (1979), p. 19 à 26.
2. E. Ehrlich et autres, "Levels, proportions and patterns of economic development" (Budapest, Institute of Economic Planning, 1977), manuscrit non publié.

3. "The competition of steel and aluminium" E/ECE/184, 1954).
4. W. Leontief et autres, *The Future of the World Economy: A United Nations Study* (New York, Oxford University Press, 1977).
5. M. F. Dowding, "The world of metals", *Metals and Materials* (Londres), n° 7, 1978, p. 27.
6. A. Bokor, A. B. Domony et I. Varga, "The economic use of aluminium (based on Hungarian experience)" [UNIDO/IOD.335, 1979].
7. S. Moment, "Long-term associations of developing countries with consumers of bauxite, alumina and aluminium". Paper presented at the seminar for High-Level Governmental and Corporate Officials "Bauxite—Alumina—Aluminium: Analysis of Demand for Decisions on Industrial Development", Budapest (Hongrie), 3-12 mai 1978 (ID/WG.273/7).
8. S. R. Spector, "Short, medium and long-range trends in aluminium supply/demand". Paper presented at the Seminar for High-Level Governmental and Corporate Officials "Bauxite—Alumina—Aluminium: Analysis of Demand for Decisions on Industrial Development", Budapest (Hongrie), 3-12 mai 1978 (ID/WG.273/5).
9. "Aluminium smelter construction in developing countries". Paper prepared for the Workshop on Case Studies of Aluminium Smelter Construction in Developing Countries, Vienne (Autriche), 27-29 juin 1977 (ID/WG.250/5).
10. Report of the Workshop on Case Studies of Aluminium Smelter Construction in Developing Countries, Vienne (Autriche), 27-29 juin 1977 (ID/WG.250/18).
11. Interfutures, *Facing the Future* (Paris, Organisation de coopération et de développement économiques, 1979).
12. *The Global 2000 Report to the President: Entering the Twenty-First Century* (Washington, D.C., Government Printing Office, 1980), vol. 2.
13. F. Sacchi, "Annotation of papers", Second International Symposium on Aluminium Transformation Technology and its Applications, Buenos Aires, août 1981, *Aluminium* (Milan), vol. 60, n° 11 (1981), p. 527.
14. C. M. Varsavsky, "Growth aspects of the primary aluminium industry to the year 2000". Lecture at the Second International Symposium on Aluminium Transformation Technology and its Application, Buenos Aires, août 1981, *Aluminium* (Düsseldorf), vol. 58, n° 3 (1982), p. 191.
15. I. Kapolyi, "The development of the aluminium industry to be expected and the environment". Opening address at the International Committee for the Study of Bauxite, Alumina and Aluminium, Tihany, 6 octobre 1981, *Kohászati* (Budapest), vol. 115, n° 3 (1982), p. 123.
16. L. Gombás, Unpublished information (Budapest, Iron and Steel Research Center, 1984).
17. M. Conserva, "Alluminio: quale futuro?", *Alluminio* (Milan), vol. 61, n° 1 (1982), p. 11.
18. A. R. Woodward, "Aluminium: a look into the past and future", *Engineers' Digest* (Londres), vol. 36, n° 2 (1975), p. 29.
19. R. J. Dowsing, "Ensuring supplies of strategic alloying elements for special steelmaking", *Metals and Materials*, n° 8, 1980, p. 13 à 16.

II. Nouveaux emplois de l'aluminium

Pour déterminer si l'aluminium peut remplacer d'autres matériaux, il faut tenir compte des avantages qui en résulteront pour le pays donné ou la région considérée et s'assurer de l'existence des matières premières et de l'énergie nécessaires à sa production. Il faut en outre tenir compte des éléments suivants :

- a) La structure économique et la répartition des capitaux pour la région considérée;
- b) L'expérience de la main-d'œuvre locale;
- c) Le marché intérieur et l'influence que peut avoir sur lui une intervention de l'État.

Pour appliquer ces considérations à l'aluminium, il faut, ainsi qu'il est précisé ci-après, tenir compte de conditions favorables et de conditions défavorables.

Conditions favorables

Matières premières

La production mondiale d'aluminium se fait, pour quelque 90 %, à partir de la bauxite et selon le procédé Bayer. Si l'on postule que la consommation d'aluminium croît en moyenne de 5 % par année, on calcule que toutes les réserves de minerai de bauxite du monde suffisent pour assurer une production d'aluminium pendant 150 ans [1]. Outre les minerais de bauxite de qualité commerciale, il existe également des réserves supplémentaires de bauxite pauvre et d'autres substances à faible teneur de Al_2O_3 , comme l'argile et les cendres. C'est à partir de ces matières qu'on s'est efforcé de produire économiquement de l'aluminium à une échelle industrielle. Vu l'existence de ce vaste potentiel, il semble que la matière première servant à alimenter les fonderies d'aluminium doit durer presque indéfiniment. Presque toutes les réserves de bauxite de haute qualité se trouvent dans les régions tropicales des pays en développement, l'Australie étant le seul pays industriel à posséder des réserves importantes. Ainsi, donc, pour ce qui des matières premières, les possibilités de développer les opérations des fonderies d'aluminium semblent pratiquement illimitées.

Une autre matière importante pour l'exploitation des fonderies d'aluminium est le coke de pétrole, dont on risque de manquer d'ici à la fin du siècle [1].

Energie

Pour pouvoir exploiter économiquement une industrie de l'aluminium, il faut avant tout avoir de l'électricité bon marché. L'exploitation d'une fonderie d'aluminium d'une capacité de 100 000 tonnes par an nécessite une puissance constante de 180 MW. Dans les pays industriels où, jusqu'à 1970, se trouvaient la plupart des fonderies d'aluminium du monde, il ne semble pas possible d'augmenter considérablement le nombre des fonderies qui sont fortes consommatrices d'énergie. L'exploitation de nouvelles fonderies n'y pourrait reposer que sur l'énergie d'origine nucléaire. Un cas intéressant est celui du Royaume-Uni où les fonderies d'aluminium créées après 1970 sont raccordées à un réseau où 60 % de l'énergie transmise provient de centrales nucléaires. En revanche, il existe encore dans les pays en développement un vaste potentiel hydroélectrique non exploité ainsi qu'on peut le voir dans le tableau qui suit [2].

<i>Continent</i>	<i>Potentiel hydroélectrique non exploité</i>	
	<i>(Pourcentage du total disponible) (MW)</i>	
Afrique	98	429 000
Amérique du Sud	93	269 000
Asie (à l'exclusion de l'URSS)	93	637 000

De plus, les pays producteurs de pétrole ont d'importantes quantités de gaz naturel qu'ils brûlent en pure perte sans en tirer le moindre parti.

Produits fabriqués

Pour les produits fabriqués, la situation est un peu différente. En effet, pour la fabrication de produits finis, un marché stable des lingots d'aluminium, pour souhaitable qu'il soit, ne suffit pas à résoudre tous les problèmes. Il est tout aussi indispensable d'avoir une capacité suffisante et

efficace de fabrication de demi-produits en mesure de satisfaire la totalité de la demande des secteurs qui emploient l'aluminium pour en faire des produits finis. D'un point de vue technique et économique, il est possible d'installer des usines de demi-produits fournissant une gamme assez étendue d'articles destinés aux fabricants de produits finis, même si les opérations restent à une échelle modeste. Le métal obtenu dans la fonderie peut, à l'état de fusion, être transformé immédiatement en demi-produits par des appareils de couléement en continu. De tels appareils installés à la fonderie même pourraient produire de 10 000 à 20 000 tonnes de bandes ou de fil machine. En revanche, les pièces extrudées, les profilés et les tubes doivent être fabriqués ailleurs à partir de billettes provenant de la fonderie. L'installation de petites usines de fabrication de demi-produits permettant de produire de nombreux articles (à l'exception des bandes larges) ne nécessite pas d'énormes capitaux et, si la demande le justifie, il est toujours possible de les agrandir.

Niveaux des prix

Jusqu'à 1980, quelque 70 à 75 % de la production totale d'aluminium des pays développés était aux mains de six entreprises dont la politique commerciale concertée déterminait le prix de l'aluminium sur le marché. Pour pousser la consommation d'aluminium et prendre pied dans de nouveaux domaines se prêtant à l'emploi de l'aluminium, les compagnies cherchaient à maintenir les prix aussi stables que possible. C'est ainsi qu'est née la notion de prix marchand dit "officiel" de l'aluminium. Ce prix reste pratiquement inchangé pendant de longues périodes, atteignant parfois deux ou trois ans. De 1965 à 1973, il n'a augmenté que de 10 %, soit une hausse annuelle moyenne de 1,3 % [3]. En principe, 90 % des transactions sur le marché de l'aluminium se font au prix officiel.

Par suite de l'intégration croissante du marché de l'aluminium, une partie importante du métal produit par les grandes sociétés est vendue à des filiales ou à des sociétés apparentées qu'elles font bénéficier de remises confidentielles spéciales afin de les protéger contre les fluctuations du marché. Quand une récession survient, elles accordent ces remises à des producteurs indépendants. Parallèlement au prix marchand officiel, la Bourse des métaux de Londres cote (à titre non officiel) des prix dits du marché libre, lesquels, au demeurant, ne s'appliquent qu'à des volumes de transactions marginaux. Depuis octobre 1978, la Bourse des métaux de Londres cote également un prix officiel de l'aluminium. En 1981, il y avait une grande différence (30 à 40 %) entre le prix officiel et celui de la Bourse des métaux de Londres.

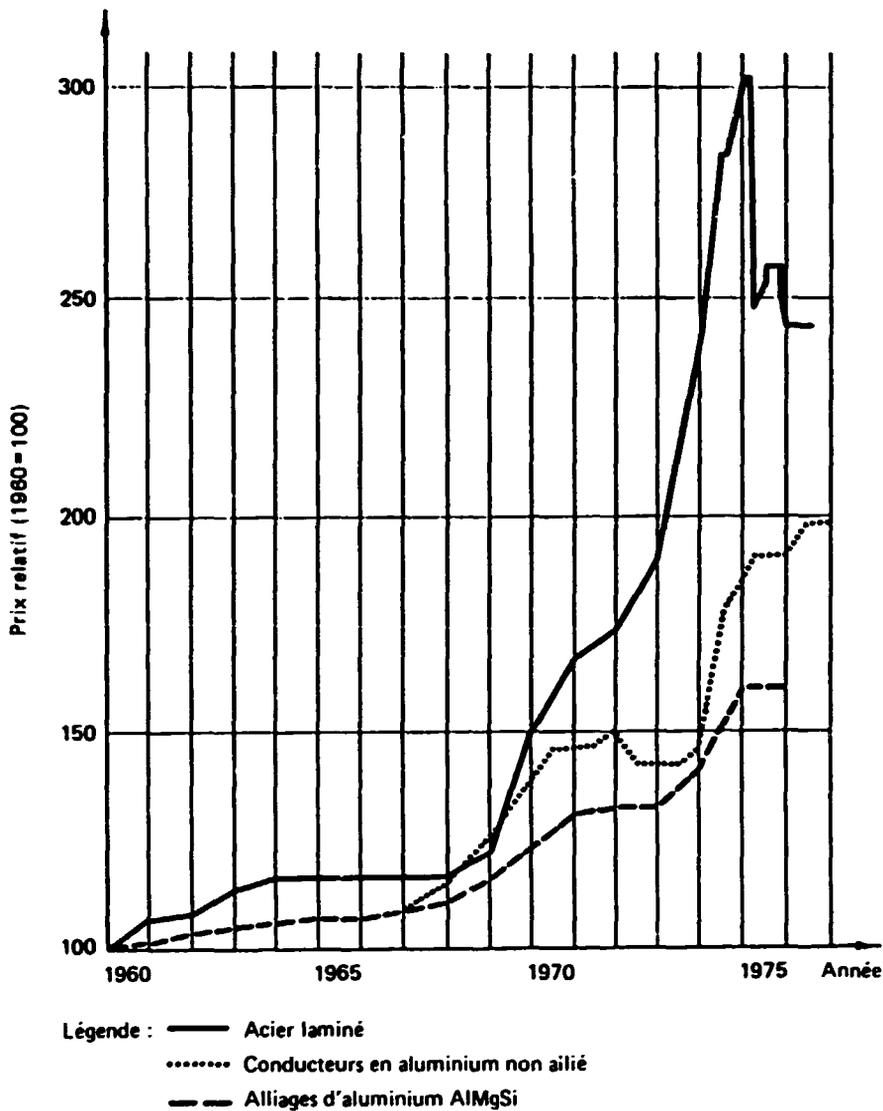
Ce système de stabilisation des prix a sans aucun doute contribué à la croissance de 9 à 11 % par an qu'a connue la consommation d'aluminium de 1960 à 1970. Cette politique de fixation des prix a fortement poussé l'emploi de l'aluminium dans les secteurs du bâtiment, de l'emballage et des matériels de transport. Cependant, certains inconvénients de ce système artificiel de stabilisation des prix sont apparus à l'évidence après la hausse des prix du pétrole de 1973 alors que les bénéfices tirés de la production d'aluminium ont commencé à décliner fortement. A cette époque, la capacité des fonderies des six grandes sociétés est tombée à 44 % de la capacité du marché mondial après la mise en service dans des pays en développement de nouvelles fonderies d'aluminium bénéficiant partiellement d'un appui gouvernemental [4]. Pour compenser leurs pertes, les grandes sociétés ont relevé les prix de l'aluminium de 62 % de 1973 à 1976 [3]. Récemment, la production de l'aluminium est devenue plus rentable et le prix de l'aluminium n'a guère changé par rapport à celui de la plupart des autres matériaux de construction (le niveau le plus bas qu'avait atteint le cuivre de 1977 à 1978 n'a été que temporaire). Après la hausse des prix du pétrole, les prix de certains matériaux ont aussi connu une fluctuation sensible, mais ceux de l'aluminium n'ont rien connu de semblable. La figure VIII donne, pour la France, une comparaison des prix des conducteurs et des extrudés d'aluminium avec ceux des produits en acier laminé [5].

Compétitivité

La généralisation récente de l'emploi de l'aluminium ne s'explique qu'en partie par les fluctuations du prix des autres matériaux alors que les prix de l'aluminium sont restés relativement stables. La vraie raison qui fait que l'emploi s'en est généralisé tient aussi à certaines propriétés physico-techniques que l'aluminium est seul à posséder. En aéronautique comme en recherche spatiale, sa légèreté jointe à sa résistance mécanique relativement élevée et à une bonne tenue à la corrosion rendent ce métal très compétitif.

On peut employer l'aluminium pour des raisons économiques ou techniques. Les variations dans l'évolution des prix font qu'il est économiquement plus intéressant d'employer l'aluminium, et ce métal peut remplacer des métaux non ferreux lourds. Les structures d'aluminium modernes peuvent être plus pratiques que les structures de type classique et le prix en est bien moins élevé. A titre d'exemples typiques, on peut citer les conducteurs en aluminium qui remplacent les conducteurs en cuivre; les tubes souples et les feuilles d'aluminium qui remplacent ces mêmes articles fabriqués autrefois en étain ou les capsules

Figure VIII. Prix des demi-produits en aluminium et de l'acier laminé en France, 1960 à 1976 [5]



à vis (inviolables) qui remplacent les bouchons de liège. D'après une enquête faite en République fédérale d'Allemagne, le prix moyen d'un bouchon de liège était, en 1970, de 0,045 à 0,100 DM alors qu'une capsule en aluminium ne coûtait que 0,02 DM. Le remplacement du zinc par l'aluminium pour les gouttières et descentes ou l'emploi de radiateurs en aluminium au lieu d'échangeurs de chaleur en acier inoxydable ou en cuivre étamé sont encore d'autres exemples.

En outre, même si les coûts sont plus élevés que ceux de certaines articles traditionnels, les caractéristiques techniques de l'aluminium peuvent en rendre l'emploi plus avantageux. De telles applications de l'aluminium finissent par être rentables malgré un prix d'achat initial plus élevé. On peut citer divers éléments en aluminium

employés dans le bâtiment, les châssis de portes et de fenêtres ou certains composants en aluminium employés dans d'autres industries pour assurer une meilleure exploitation, par exemple, les pistons, les pièces de machines textiles et les échangeurs de chaleur. Ces articles ne nécessitent pratiquement aucun frais d'entretien.

Les considérations ci-après sont particulièrement favorables et font de l'aluminium un métal qui présente un intérêt spécial :

Economies d'énergie;

Protection de l'environnement;

Possibilité de recyclage des déchets;

Economies de main-d'œuvre;

Plus grand confort pour l'utilisateur.

Dans les études de faisabilité, il ne suffit pas de déterminer si l'aluminium constitue un matériau qui équivaut au matériau à remplacer; il est très important que son emploi représente un intérêt pour le consommateur. C'est pourquoi il faut examiner de près les prix des matières premières qui entrent dans la fabrication ainsi que le pourcentage, la valeur et l'utilité des déchets récupérables. Si, par exemple, on compare la fabrication de capsules en aluminium et en fer-blanc pour la fermeture des bouteilles, il faut tenir compte des 30 % de déchets qu'entraînent les opérations de coupe nécessaires pour donner aux disques la forme voulue. Alors que pour l'aluminium les déchets récupérables représentent 9 % de la valeur de la tôle d'aluminium employée, pour le fer-blanc ce chiffre n'est que de 0,6 % [6].

La conception d'une pièce en aluminium doit permettre de tirer tout le parti possible des propriétés favorables du métal. Se contenter d'employer l'aluminium pour des types de pièces conçus à l'origine pour d'autres matériaux est une solution qui n'est pas économique et est vouée à l'échec dès le départ. Un bon exemple d'un emploi rentable de l'aluminium est donné par la toute dernière voiture de métro conçue par Alusuisse dans laquelle de grandes pièces extrudées sont employées pour les carcasses. De telles voitures coûtent 30 % de moins que les voitures de type classique à carcasse d'acier [7].

Pour faire une comparaison précise, il faut analyser en détail toutes les opérations qui entrent dans la fabrication et le montage, en s'attachant tout spécialement aux économies de temps et de main-d'œuvre. On peut trouver plusieurs exemples dans le bâtiment et l'industrie du travail des métaux. Pour les bâtiments classiques destinés à l'agriculture et au bétail, les matériaux de construction coûtent 17 % moins cher que les panneaux en aluminium léger, mais les coûts de la main-d'œuvre et le temps nécessaire à la pose de ces derniers sont réduits de 30 %. Le prix de revient est donc à peu près le même. De plus, les bâtiments en aluminium léger se prêtent bien à la construction en série et conviennent bien aux grandes installations agricoles comme les entrepôts frigorifiques ou les fermes d'élevage de poulets que l'on doit construire dans certaines régions reculées.

Il convient d'accorder une attention spéciale à l'évolution des ressources d'énergie et à l'augmentation des coûts correspondants. Dans le monde entier, on s'efforce d'économiser l'énergie et partout on cherche à réduire le poids des véhicules de transport. Les prix des matériaux employés dans leur construction est un élément capital pour déterminer l'intérêt de l'aluminium par rapport à l'acier.

La bonne tenue de l'aluminium à la corrosion permet de faire des économies considérables sur les frais de maintenance. On estime que, pour une structure en acier, ces derniers, sur une période de trente années, atteindront de 30 à 70 % du coût initial, plus 0,6 à 1 h de frais de main-d'œuvre par mètre carré et par an. Si, par exemple, on tient compte des coûts initiaux et du coût du loyer de l'argent, il apparaît qu'après six à huit années une clôture en aluminium peut être plus économique qu'une clôture en acier [8].

L'aluminium présente également de grands avantages pour la protection de l'environnement. Alors que la destruction des déchets plastiques est difficile et que le poids et le volume de la ferraille d'acier en rendent la manutention malaisée, la récupération des déchets d'aluminium et leur recyclage sont des opérations relativement simples et peu coûteuses [9]. Aux Etats-Unis, une récente campagne de récupération et de refonte des déchets de boîtes a permis d'augmenter la vente de la bière en boîtes.

Caractéristique techniques

C'est l'emploi final envisagé qui, dans le choix de l'aluminium comme matériau, détermine si l'on doit rechercher comme principales propriétés un faible poids spécifique, une bonne conductivité thermique ou une bonne tenue à la corrosion. Il va sans dire que l'idéal serait de pouvoir mettre à profit les propriétés exceptionnelles de ce métal pour toutes les applications qui en sont faites. Tel n'est malheureusement pas le cas, certaines de ces propriétés étant parfois difficilement compatibles. Il faut donc s'attacher aux propriétés qu'on recherche le plus pour un usage déterminé. Par exemple, la tenue à la corrosion et l'aptitude à la déformation plastique des alliages à résistance élevée sont inférieures à celles des alliages à résistance moyenne.

Quand on décide de choisir l'aluminium pour remplacer un autre matériau, il importe de savoir comment il résiste à la corrosion, surtout dans un environnement industriel pollué par le gaz sulfureux (SO₂). Le tableau 21 donne une comparaison des taux de corrosion relevés pour des surfaces d'acier, de zinc et d'aluminium [9, 10] après dix et vingt années en plusieurs endroits des Etats-Unis. Les taux de corrosion observés pour de l'aluminium, du cuivre et du zinc exposés pendant de longues périodes à divers types d'environnement corrosif ont fait l'objet d'une étude spéciale; les conclusions résumées à la figure IX montrent que c'est avec l'aluminium que le taux de corrosion a été le plus faible [11].

Le tableau 22 donne les prix des matériaux de construction en fonction de leur résistance mécanique [12]. Pour la résistance à la traction, les prix

TABLEAU 21. TAUX DE CORROSION DE L'ALUMINIUM, DU CUIVRE ET DU ZINC DANS DIFFÉRENTES CONDITIONS

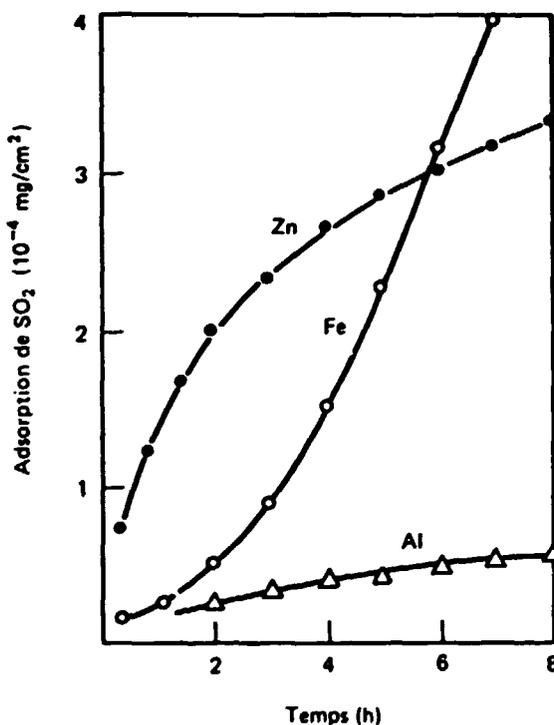
(mm/an)

Lieu	Climat ou atmosphère	Aluminium, 99,2 %		Cuivre, 99,9 %		Zinc, 98,9 %	
		Après 10 ans	Après 20 ans	Après 10 ans	Après 20 ans	Après 10 ans	Après 20 ans
Phoenix, Arizona State College.	Climat désertique	1×10^{-5}	$7,6 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-4}$
Pasadena, Californie	Climat continental	$2,5 \times 10^{-5}$	$7,5 \times 10^{-5}$	$5,8 \times 10^{-4}$	$4,3 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$
La Jolla, Californie	Climat maritime	$7,1 \times 10^{-4}$	$6,3 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-3}$
New York, New York	Atmosphère industrielle	$7,9 \times 10^{-4}$	$7,4 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$4,8 \times 10^{-3}$	$5,6 \times 10^{-3}$

Source : [11].

du béton expansé, de l'acier à forte résistance à la traction, de la fonte et de certains plastiques sont inférieurs à celui de l'aluminium. L'aluminium est toutefois préféré à ces autres matériaux, sans doute parce que son poids spécifique est moins élevé.

Le chapitre IV examine en détail comment les propriétés techniques favorables de l'aluminium ont influé sur la consommation de certains secteurs utilisateurs finals. Ce chapitre précise également comment l'aluminium peut remplacer d'autres matériaux.

Figure IX. Adsorption de SO₂ sur les surfaces métalliques

Note. Durée, 8 heures; humidité relative, 90 %; teneur de SO₂ dans l'atmosphère, 0,1 ppm

Source : [10].

Recyclage

Dans les pays industriels, la refonte des déchets assure quelque 25 % de la consommation totale d'aluminium. Après ramassage, tri et nettoyage, les déchets d'aluminium sont refondus selon divers procédés métallurgiques qui les débarrassent de leurs impuretés non métalliques. Alors qu'autrefois quelque 10 à 15 % des déchets étaient irrémédiablement perdus à la fusion, cette proportion est de nos jours tombée à quelques pour cent grâce à l'apparition de nouvelles techniques de refonte. De même, de nouveaux perfectionnements apportés à ces procédés métallurgiques ont permis de réduire de 10 à 20 % les traces d'impuretés d'oxydation et non métalliques qui subsistent dans le métal de seconde fusion récupéré à partir des déchets. Les quantités d'énergie nécessaires à la refonte ont également fortement diminué, passant de quelque 2 000 à 3 000 kWh/t à 800 kWh/t [3]. Les lingots secondaires refondus à partir des déchets judicieusement traités auxquels on ajoute le pourcentage voulu d'éléments d'alliage sont à tous égards équivalents aux lingots de première fusion.

On trouvera ci-après, à titre d'exemple, une ventilation des déchets récupérés en Hongrie :

	Pourcentage
Déchets industriels neufs	40
Déchets jetés par la population après usage	40
Tournures	20
Total	100

Environ les deux tiers des déchets recueillis sont refondus en lingots. Un tiers est ajouté aux coulées des plaques et des billettes ou sert de désoxydant en sidérurgie.

Le ramassage et le tri des déchets nécessitent une organisation assez poussée. Il est difficile et coûteux de raffiner par des méthodes métallurgiques des déchets mélangés. Il semble donc indiqué, quand on installe une usine de production d'aluminium, de prévoir les moyens voulus

TABLEAU 22. PRIX DE CERTAINS MATÉRIAUX REPRÉSENTATIFS PAR RAPPORT A LEUR RÉSISTANCE MÉCANIQUE

	Résistance à la traction (MN/m ²)	Module d'élasticité (GN/m ²)	Fatigue (MN/m ²)	Densité (t/m ³)	Prix (€/t)	Prix par unité de résistance (€/MN·m)		
						Résistance à la traction	Module d'élasticité	Fatigue
Fonte	400	35,0	105,0	7,30	135	2,46	0,03	9,4
Alliages Cu-Zn	400	37,3	140,0	8,36	515	10,75	0,12	30,7
Acier au carbone	250	77,0	193,0	7,85	140	4,4	0,01	5,7
Acier allié	800	77,0	495,0	7,83	212	2,1	0,02	3,4
Alliages au titane	960	45,0	310,0	4,51	6 500	30,5	0,65	94,5
Alliages d'aluminium	300	26,0	90,0	2,70	800	7,2	0,08	24,0
Alliages de magnésium	190	17,5	95,0	1,70	2 500	22,0	0,24	44,7
Chêne	14	4,5	6,0	0,67	895	43,0	0,13	100,0
Polypropylène	30	0	7,5	0,90	325	9,7	0	39,0
Nylon 66	80	0	24,0	1,36	925	15,7	0	63,0
Chlorure de polyvinyle	50	0	12,0	1,40	240	6,7	0	27,0
Béton expansé	38	10,0	23,0	2,50	23	1,5	0,01	2,4

Source : [12].

pour collecter, trier, entreposer, manutentionner et refondre les déchets, ainsi que les services nécessaires pour assurer la vente du métal de seconde fusion ainsi obtenu.

Autres considérations

Energie et capitaux nécessaires

L'installation d'une fonderie d'aluminium suppose deux conditions préalables primordiales : abondance d'énergie bon marché et abondance de capitaux (il en faut beaucoup plus que pour une usine de production de n'importe quelle autre matière première). Il n'est pas absolument indispensable d'installer la production de l'aluminium au voisinage des gisements de bauxite, l'aluminium se prêtant facilement à des transports sur de grandes distances.

D'une manière générale, jusqu'à 1960, seuls les pays développés et les pays à économie planifiée pouvaient se permettre de construire des fonderies d'aluminium. C'est pourquoi la plupart d'entre elles se trouvent en Europe, en Amérique du Nord et en Union des Républiques socialistes soviétiques où l'on dispose de grandes quantités d'énergie hydroélectrique et thermique. La proximité des marchés de consommation jouait également un rôle important.

L'implantation de nouvelles fonderies est de nos jours presque exclusivement déterminée par les énormes quantités d'énergie nécessaires à leur exploitation et les pays développés ont de plus en plus de difficultés à trouver de grandes quantités d'énergie bon marché. C'est pourquoi il faut implanter les nouvelles fonderies dans des régions où il est possible de trouver de l'énergie bon marché en quantités suffisantes. Or, l'exploitation

de nouvelles sources d'énergie suppose toujours de nouveaux investissements. A l'heure actuelle, c'est l'énergie électrique qui représente l'élément le plus important et le plus significatif du coût de l'électrolyse de l'aluminium.

Le tableau 23, qui fait une comparaison des quantités d'énergie consommées à chacune des étapes successives, de la matière première au demi-produit, pour l'acier, le cuivre et l'aluminium [14], donne une idée de l'importance des quantités d'énergie nécessaires à la production d'aluminium.

On est frappé par les énormes quantités d'énergie nécessaires à la production d'aluminium. Ces quantités sont très élevées, même si l'on tient compte du faible poids spécifique de l'aluminium et du fait que des additifs permettent d'obtenir des alliages dont les propriétés mécaniques sont voisines de celles de l'acier doux. Dans les calculs

TABLEAU 23. ÉNERGIE CONSOMMÉE A CHAQUE ÉTAPE DE LA PRODUCTION D'ACIER, DE CUIVRE ET D'ALUMINIUM

Étape	(GJ/t)		
	Ronds acier (30 mm de diamètre)	Fil de cuivre lamine	Plaque d'aluminium
Extraction	—	51,9	4,2
Cokéfaction	20,1	—	—
Concentration	5,9	—	—
Broyage	—	20,9	5,9
Flotation	—	7,5	—
Fabrication d'alumine	—	—	41,9
Fusion	0,3	14,2	218,5
Fabrication d'acier	6,6	—	—
Raffinage			
électrolytique	—	12,6	—
Laminage	5,4	18,4	28,1
Total		125,0	298,7
Total (GJ/m ³)		1 130,0	295,6

Source : [14].

correspondants, on constate que l'aluminium ne nécessite plus 8 fois autant d'énergie que l'acier mais seulement de 2.7 à 3 fois. En suivant le même raisonnement, on constate que l'énergie nécessaire à la fabrication de conducteurs en cuivre ou en aluminium est pratiquement la même si l'on tient compte de la différence des poids spécifiques.

Les frais d'énergie supplémentaires qu'entraîne la fabrication d'un article en aluminium peuvent toutefois être récupérés à l'occasion de l'usage qui en est fait. On peut citer comme exemple les économies d'énergie que permettent de réaliser les véhicules de transport dans la construction desquels entrent les éléments d'aluminium.

Non seulement la production d'aluminium nécessite beaucoup plus d'énergie que celle d'autres métaux (notamment l'acier et le cuivre), mais encore la réalisation d'installations complètes de production nécessite de plus grands investissements de capitaux. Le tableau 24 donne un modèle de calcul. Il expose en détail les capitaux nécessaires pour installer un complexe d'aluminium d'une capacité de 100 000 tonnes par an. Il convient de noter que :

a) L'éventail de la production à la phase IV (produits finis) a été choisi de façon aléatoire;

b) L'infrastructure et les locaux des services sociaux ne sont pas compris dans les estimations de l'investissement initial;

TABLEAU 24. DÉPENSES D'INVESTISSEMENT POUR UN COMPLEXE INTÉGRÉ D'ALUMINIUM D'UNE CAPACITÉ DE 100 000 TONNES PAR AN

(Dollars de 1977)

Stade de production	Opérations et produits	Dépenses d'investissement (en dollars par tonne)	Produits ou capacités (en milliers de tonnes)	Ventilation et total des dépenses d'investissement (en millions de dollars)
I. Matière première	Préparation de la bauxite	45-65	600	40,0
	Fabrication de l'alumine	500	200	100,0
	Refonte de l'aluminium ^a	2 000	100	200,0
	Total matière première			340,0
II. Demi-produits	Coulée continue de bandes	2 180	55	120,0
	Coulée continue de fil machine	250	20	5,0
	Extrusion	2 700	20	54,0
	Fabrication et finition de feuilles	4 000	5	20,0
	Coulée (à la machine)	4 440	7,5	33,0
	Coulée (moulage au sable et par gravité à l'échelle industrielle) ^b	4 000	2,5	10,0
	Refonte de déchets	200	20	4,0
Total demi-produits			246,0	
III. Finition demi-produits	Anodisation des profilés	670	3	2,0
	Découpage de disques	20	10	0,2
	Soudage de tubes	230	3	0,7
	Tôles ondulées	60	10	0,6
	Préparation à la peinture	700	10	7,0
Total finition des demi-produits			10,5	
IV. Produits finis	Conducteurs nus (tréfilage et câblage)	470	10	4,7
	Conducteurs et câbles isolés	1 220	10	12,2
	Tubes souples et récipients pour aérosols	2 560	5	12,8
	Structures pour le bâtiment	500	15	7,5
	Echangeurs de chaleur	1 000	5	5,0
	Récipients et articles d'emballage à parois épaisses	800	5	4,0
	Matériel pour emballage dans des feuilles d'aluminium	300	3	0,9
	Composants électromécaniques	800	7	5,6
	Divers composants structuraux	300	5	1,5
	Autres articles pour travail des métaux	500	20	10,0
	Articles ménagers	600	10	6,0
Total produits finis			70,2	
Total général			666,7	

^a Les coûts d'installation d'une centrale électrique ne sont pas compris.

^b Les dépenses d'investissement pour une fonderie moins complexe seraient de l'ordre de 2 000 à 2 500 dollars par tonne.

^c Equipement, locaux non compris. Pour éviter les chevauchements, on n'a pas fait la somme des tonnages.

c) La fonderie d'aluminium est calculée pour fonctionner à 2 000 MW, mais les estimations des coûts d'investissement ne comprennent pas l'installation d'une centrale électrique;

d) Dans la pratique, les investissements nécessaires à chaque étape successive de l'intégration peuvent varier considérablement en fonction des techniques employées. C'est pourquoi on a retenu des chiffres moyens;

e) Les capacités indiquées en regard de chaque stade correspondent à des chiffres raisonnables pour une étude de faisabilité économique; elles sont de plus coordonnées de façon à satisfaire la demande pour le stade suivant;

f) Pour plus de facilité on n'a pas calculé les exportations de matières premières et de demi-produits.

Selon le tableau 24, le total des investissements pour un complexe intégré d'aluminium ayant une production hypothétique de 100 000 tonnes par an s'élève à quelque 670 millions de dollars (valeur de 1977).

Le premier stade de la production comprend les opérations relatives à l'élaboration de la matière première y compris l'extraction de la bauxite, la fabrication de l'alumine et la fusion de l'aluminium; il représente quelque 50 % du coût total.

Le deuxième stade est la production de demi-produits. Elle représente 38 % du total des investissements. La coulée continue de bandes et de fil-machine représente 50 % des frais d'investissements de ce poste. Toutefois, ces opérations ont lieu à proximité de la fonderie. Si l'on tient compte de cette situation, la part des investissements pour l'élaboration de la matière première pendant la première étape s'élèvera à 70 % et celle des autres installations pour la fabrication de demi-produits (y compris extrusion, fabrication de feuilles d'aluminium, fusion et refonte des déchets) tombera à 18 %.

Le troisième stade comprend les opérations de finissage des demi-produits (par exemple traitement de surface des profilés servant à la construction de carrosseries préfabriquées pour véhicules automobiles). Pour des raisons d'ordre technique et financier, il est bon que ces opérations soient effectuées à l'usine même. La part correspondante des investissements représente 2 %.

Le quatrième stade correspond à la transformation en produits finis. Elle compte pour 10 % du total des investissements du complexe intégré. L'implantation des installations correspondantes est régie par des considérations d'ordre pratique. La fabrication peut démarrer sur une petite échelle et être développée ultérieurement.

Les matières premières sont fournies par des producteurs nationaux ou proviennent de sources

étrangères. Si les conditions locales, par exemple manque d'énergie, capitaux insuffisants ou demande intérieure trop faible ne permettent pas de mettre en place des installations nationales de transformation de matières premières, il existe d'autres moyens d'obtenir des demi-produits ou des lingots en vertu d'accords à long terme conclus avec des fournisseurs étrangers. Si une entreprise de transformation d'aluminium (produit fini) d'une capacité de 100 000 tonnes par an comme celle qui est exposée dans le modèle dépend entièrement d'importations de matières premières, on estime que les dépenses d'investissement nécessaires au projet — y compris les opérations de la phase III — sont de 80 millions de dollars. Si l'on y ajoute les installations de fabrication de demi-produits, permettant de faire les extrusions, les feuilles ou les moulages (éventuellement à partir de lingots importés) les dépenses d'investissements correspondant à la phase IV pourront nécessiter 100 millions de dollars supplémentaires.

Impératifs techniques

Les propriétés chimiques, physiques et mécaniques de l'aluminium diffèrent à de nombreux égards de celles des autres métaux. Il s'ensuit que pour la manutention et le traitement de l'aluminium on est appelé à adopter des procédés que l'on peut souvent considérer comme s'écartant des méthodes classiques de la métallurgie. Même le transport et l'entreposage de l'aluminium nécessitent un soin particulier. Un emballage défectueux, une manutention brutale en cours de transport ou un mauvais entreposage peuvent faire que la vapeur qui ne cesse de se condenser et de s'évaporer sur la surface laisse des tâches ou favorise la corrosion. La surface de l'aluminium peut être endommagée par des tournures de métal, des frottements contre du fer, du coke ou du sable. On peut éviter ces inconvénients en entreposant l'aluminium dans un milieu propre et bien aéré, faute de quoi il peut en résulter des ennuis pour les opérations de traitement ultérieures.

Une propreté presque aseptique est indispensable dans les ateliers techniques. Dans le travail de l'aluminium, il ne faut pas employer sans autre traitement préalable des matériels, y compris machines ou filières, qui ont déjà servi pour d'autres matériaux. Avant de couler de l'aluminium dans ces appareils, tous les composants, et les moules, et parfois les locaux eux-mêmes doivent être nettoyés avec soin.

À certains égards, le travail de l'aluminium ressemble davantage à celui du bois qu'à celui de

l'acier. La similarité se trouve encore renforcée par l'emploi de tours à grande vitesse, encore qu'il faille employer des outils spéciaux pour aluminium. Bien que l'aluminium soit un métal malléable se prêtant bien à la déformation plastique, il faut employer des matrices spécialement conçues, l'aluminium étant très sensible à la rugosité de la surface de la matrice. L'emboutissage profond de l'aluminium, métal mou, nécessite des matrices ayant une surface plus dure que celles qu'on emploie pour l'acier, moins déformable et plus robuste. Il convient de respecter scrupuleusement les instructions techniques établies compte tenu des propriétés particulières à ce métal, par exemple arrondissement plus marqué des bords, conicité du poinçon d'emboutissage. Il faut donc faire appel à des techniques entièrement différentes de celles qu'on emploie pour l'acier. Un autre exemple intéressant est la fabrication de tubes souples et d'objets cylindriques creux à parois minces pour lesquelles on emploie soit la technique d'injection sous pression soit l'extrusion par choc qui permettent d'obtenir des pièces de dimensions très précises présentant la résistance voulue.

Le soudage et le traitement de surface de l'aluminium sont fondamentalement différents de ce qu'ils sont pour les autres métaux. L'exposition à l'air fait déposer rapidement une pellicule tenace d'oxyde sur la surface d'aluminium. Pour cette raison, les méthodes traditionnelles de soudage, de traitement de surface et de peinture employées pour l'acier ne valent rien pour l'aluminium. En raison de la forte conductivité thermique de l'aluminium et de la formation d'une pellicule d'oxyde, on a remplacé les méthodes de soudage classiques par la méthode très efficace de soudage à l'arc sous gaz protecteur. On peut également employer diverses variantes du soudage par points et du soudage par cordon, encore que ces dernières nécessitent davantage d'énergie et le recours à une commande automatique. Le soudage à froid de l'aluminium nécessite une forte pression pour surmonter l'effet de la pellicule d'oxyde. Le brasage ou la soudure de l'aluminium nécessitent encore des techniques très poussées, les modifications des méthodes classiques de soudage mou ayant produit des joints assez instables vulnérables à la corrosion. L'emploi d'adhésifs pour joindre des pièces d'aluminium pose de graves problèmes à l'échelle industrielle en raison des normes techniques très strictes et des conditions de très grande propreté qu'elles supposent. Une nouvelle technique qui consiste à joindre les éléments des structures en aluminium à l'endroit où les profilés extrudés à assembler sont glissés les uns dans les autres pour en assurer la rigidité gagne du terrain. Bien que les pièces extrudées doivent être dimensionnées avec une grande précision, cette opéra-

tion peut être assurée par une main-d'œuvre non qualifiée.

Un moyen efficace d'améliorer la surface de l'aluminium consiste à renforcer sa pellicule d'oxyde par oxydation anodique. La pellicule d'oxyde anodisé ainsi obtenue aura une bonne tenue à la corrosion ou formera une surface poreuse, sur laquelle on pourra appliquer immédiatement un enduit indispensable pour préparer les surfaces d'aluminium à la peinture. Une autre technique consiste à employer comme revêtement une couche de plastique. Ainsi, que l'on souhaite avoir un produit ayant une bonne tenue à la corrosion ou en préparer la surface pour y déposer un enduit, un bon traitement de la surface est indispensable. Le revêtement de peinture s'appose en général comme pour les autres métaux.

Le choix des demi-produits se prête à certains compromis. Par exemple, l'usage et la sélection de ces produits dépendra de la présence ou non dans l'usine d'installations pour recuire ou durcir les pièces dans les limites d'une petite gamme de température en cours de production

Outre qu'ils doivent assurer la tâche importante que représente le choix de matériaux convenable et des techniques les meilleures, les spécialistes chargés de l'implantation et de l'organisation d'une usine doivent connaître parfaitement les particularités et les caractéristiques indispensables pour faire marche: une industrie d'aluminium moderne.

Résistance des consommateurs

Chaque fois qu'un nouveau produit en aluminium apparaît sur le marché, il doit faire la preuve indubitable de ses qualités techniques et économiques. Ce n'est pas facile, l'attitude prudente des consommateurs étant souvent déterminée :

Les habitudes;

L'expérience acquise en matière de fabrication en série;

Les méthodes classiques de montage, d'entretien et de réparation;

De nombreuses années de pratique d'exploitation profondément ancrée;

La réglementation et les usages (santé, sécurité de fonctionnement).

Dans un premier temps, il faut convaincre le consommateur de l'utilité d'un prototype, tâche particulièrement délicate et éprouvante. Un prototype ou un produit fabriqué sur commande est toujours plus coûteux et en général n'atteint pas la

perfection d'un produit fabriqué en série. Une assistance pour le montage et l'entretien est donc nécessaire. Le consommateur éprouve envers tout produit nouveau une méfiance invétérée qu'il est difficile de surmonter. Enfin, il faut modifier les règlements existants et en introduire de nouveaux.

Changer des habitudes prend du temps, est fatigant et coûteux.

On trouvera dans le chapitre suivant quelques exemples concrets de la manière dont on peut parvenir à surmonter ces difficultés initiales avec d'assez bonnes chances de succès.

Références

1. Report of the Workshop on Case Studies of Aluminium Smelter Construction in Developing Countries, Vienne (Autriche), 27-29 juin (ID/WG.250/18).
2. Report of the Workshop of Case Studies of Aluminium Smelter Construction in Developing Countries, Vienne (Autriche), 27-29 juin (ID/WG.250/18), p. 10.
3. A. Mersich, "World market of aluminium metal and semi-finished products: Quality aspects, conditions and problems with an impact on demand (internal and for export)" (ID/WG.273/3).
4. P. Relle et M. Kramer, *World Bauxite, Alumina and Aluminium Operations* (Budapest, Mineral-impex, 1977).
5. "News" *Chronique d'aluminium*, n° 2, 1977, p. 5.
6. Calculations by the Research Institute of Canning and the Paprika Industry (Bucarest, 1977).
7. M. Rey, "Nouveaux wagons pour le métro de Bruxelles", *Revue Suisse de l'aluminium*, vol. 25, n° 9 (1975), p. 282 à 286.
8. M. Kaszics, "The economic feasibility of aluminium fences", *Magyar Aluminium*, vol. 8, n° 2 (1971), p. 55 et 56.
9. D. Altenphol et P. Pachleitner, "Behaviour of aluminium in corrosive atmosphere compared to other metals. Perspectives in corrosion abatement in various new fields", *Magyar Aluminium*, vol. 12, n° 2 (1977), p. 45.
10. T. Sydberger et N. G. Vannerberg, "The influence of the relative humidity and corrosion products on the adsorption of sulfur dioxide on metal surfaces", *Corrosive Science*, vol. 12, n° 10 (1972), p. 775.
11. C. J. Walton et W. King, ASTM Special Publication, n° 75 (New York, 1953).
12. W. O. Alexander, "Economics of energy and materials", *Material Science Engineering*, n° 29, 1978, p. 195 à 203.
13. D. Altenphol, "Downstream operations and new applications of aluminium", document présenté au premier Colloque international sur les techniques de la transformation et les applications de l'aluminium, Buenos Aires (Argentine), 21-23 août 1978.
14. G. Osztrovszky, "Raw material situation of the Hungarian national economy with special regard to the chemical, alumina and aluminium industry", document présenté à l'Académie hongroise des sciences le 8 juin 1978, *Magyar Aluminium*, vol. 15, n° 10 (1978), p. 289 à 299.

III. Comment développer l'emploi de l'aluminium

Organismes consultatifs

La transformation de l'aluminium et les possibilités d'en étendre l'emploi à divers domaines ont entraîné un remaniement de certaines conceptions techniques traditionnelles. Vers la fin des années 20, tous les grands producteurs d'aluminium qui ne s'occupaient alors que de fonderie ont entrepris des recherches sur les techniques de fabrication de demi-produits et de produits finis et en ont fait connaître les résultats à leurs clients afin de pousser la consommation d'aluminium.

Entre-temps, l'aluminium était devenu le métal dont la consommation avait connu la croissance la plus rapide du siècle. On peut attribuer cette situation aux premières recherches dont les résultats furent aussitôt communiqués aux clients sous forme de renseignements, de conseils et d'assistance sur le plan technique. Cette pratique s'est maintenue, même quand les entreprises de fonderie ont elles-mêmes pris pied sur le marché des demi-produits et des produits finis; l'intégration s'intensifiant, le rôle consultatif des grands producteurs d'aluminium devint plus différencié.

Dans certains cas, surtout quand une grande entreprise d'aluminium avait été le seul producteur dans une région, on créa des services spéciaux chargés d'informer et de conseiller la clientèle. Dans une certaine mesure, ces services étaient indépendants et, administrativement, ne relevaient pas des services de recherche et de développement des compagnies productrices d'aluminium. Leur tâche essentielle était de faire connaître sur le plan commercial les résultats qu'ils avaient obtenus. Ainsi ces services furent-ils appelés à avoir des rapports avec les concepteurs, les fabricants et les consommateurs et à prendre l'initiative de diverses campagnes destinées à intensifier l'emploi de l'aluminium.

Aujourd'hui, même s'il existe plusieurs grandes compagnies d'aluminium dans le même pays ou dans la même région, il est bon de créer un tel service, de concert avec les représentants des fonderies, des usines de demi-produits et des principaux usagers finaux.

Peu importe que ce service consultatif soit indépendant ou parrainé par le producteur d'alu-

minium; les buts visés sont en fait les mêmes, à savoir :

a) Intensifier l'emploi de l'aluminium dans un domaine aussi vaste que possible;

b) Prospector et encourager de nouveaux débouchés pour l'aluminium;

c) Aider les producteurs et les consommateurs en leur fournissant des conseils et des documents techniques et en organisant des stages de formation pour les cadres et le personnel spécialisé;

d) Fournir aux pouvoirs locaux et aux organisations internationales les renseignements statistiques nécessaires sur les usages finaux de l'aluminium et sur les perfectionnements intervenus.

La différence fondamentale entre ces deux types de services consultatifs réside dans la politique qu'ils poursuivent sur le plan commercial. Le premier type est créé pour promouvoir les intérêts de l'entreprise ou de la société qui le parraine. Si cette dernière est une entreprise publique, simple fonderie ou complexe plus intégré, elle sera généralement invitée à appuyer des programmes de développement de la consommation d'aluminium lancés par les organismes gouvernementaux et à coordonner les intérêts de l'entreprise et des consommateurs. A cette fin, l'organisme consultatif compte sur la collaboration des fabricants et des consommateurs. Ses activités sont souvent déterminées par les résultats des services de recherche et de développement de la société intégrée, que l'organisme consultatif est chargé de faire connaître et dont il doit encourager l'application. On trouve de tels organismes dans les pays où il existe essentiellement un seul grand complexe d'aluminium intégré.

Dans le second type d'organismes consultatifs, l'Aluminium Zentrale (Centre de l'aluminium) de la République fédérale d'Allemagne, société financée par les entreprises qui en sont membres, est la mieux connue. Cette société publie également des livres et édite une revue. Sur ses 50 membres, 18 sont des producteurs d'aluminium primaire, 12 des usines de demi-produits et 20 des fonderies spécialisées et autres fabricants. L'Aluminium Zentrale est un organisme sans but lucratif créé pour encourager l'emploi de l'aluminium et de techniques de fabrication efficaces. Ses conseils

techniques ainsi que son service de documentation et ses cours de formation sont gratuits. Il coordonne les informations relatives à l'aluminium, représente l'industrie de l'aluminium dans les foires et expositions et fournit des renseignements statistiques sur diverses organisations. Il organise des stages de formation et des expositions mais ne possède pas de division de recherche et de développement.

En Hongrie, un organisme consultatif spécial a été constitué pour souligner l'importance de l'industrie de l'aluminium dans l'économie nationale. Le Centre de développement des applications de l'aluminium de la Compagnie hongroise de l'aluminium, placé sous les auspices de l'organisme consultatif spécial, a fonctionné jusqu'à 1976 en tant qu'organisation séparée. Les travaux à long terme de l'industrie hongroise de l'aluminium sont régis par un programme central de recherche et de développement approuvé par le gouvernement. Le programme fixe et coordonne les objectifs à moyen et à long terme pour chaque stade d'intégration de l'aluminium. Il s'étend à toutes les opérations industrielles de la Compagnie hongroise de l'aluminium, telles que le traitement de la bauxite et de l'alumine, la fonderie, les demi-produits et la fabrication de certains produits finis ainsi qu'aux activités d'autres entreprises travaillant l'aluminium dans le pays. Toutes ces entreprises appartiennent à l'Etat et sont exploitées sous l'autorité de divers ministères. La Compagnie hongroise de l'aluminium possède son propre institut de recherche et de conception; elle joue le rôle d'entrepreneur principal pour les grands projets de recherche sur l'aluminium et fournit l'appui scientifique nécessaire à la réalisation des produits finis.

Dans sa tâche, le Centre de développement bénéficie de l'expérience de l'Institut de recherche et de conception de la Compagnie hongroise de l'aluminium ainsi que des suggestions et recommandations de divers comités de travail et de la collaboration des grands fabricants.

Le centre compte 50 personnes dont 20 sont des ingénieurs et des techniciens et 10 des ouvriers spécialisés qui étaient employés à l'atelier de formation du centre. Son budget est financé conjointement par la Compagnie hongroise de l'aluminium (60 %) et par le Conseil national du développement technique (40 %). Les fonds servent en majorité à réaliser des prototypes, à subventionner une partie des dépenses supplémentaires qu'entraîne l'introduction de nouveaux produits et à financer l'information technique, les expositions, les publications, les stages de formation, etc. Ainsi les risques que comportent les innovations se trouvent partagés entre l'industrie de l'aluminium, les fabricants de produits finis et les organismes gouvernementaux responsables.

Il existe plusieurs organismes internationaux qui fournissent des services consultatifs. Le Centre international de développement de l'aluminium (CIDA) est composé des huit plus grandes entreprises européennes d'aluminium. Le CIDA s'occupe de diverses questions de perfectionnement et de normalisation des produits en aluminium, par exemple les dimensions des accords en aluminium, les nouvelles méthodes de lutte contre la corrosion. Les résultats de ses travaux ne sont généralement accessibles qu'à ses membres.

Certains pays en développement ont ressenti la nécessité de créer un organisme pour le développement de l'aluminium, et d'autres suivront certainement. Qu'il y ait un, deux ou plusieurs producteurs dans un pays ou dans une région, il semble souhaitable que cet organisme soit constitué en instance indépendante, travaillant de concert avec toutes les parties intéressées, y compris les producteurs de matière première, les usines de demi-produits, les fabricants de produits finis et les consommateurs.

L'innovation n'étant plus limitée à un domaine étroit de la technique, la coopération et la bonne volonté de nombreux spécialistes sont indispensables. La production d'éléments légers de construction, par exemple, est une opération complexe dans laquelle non seulement les spécialistes de l'aluminium mais encore les architectes concepteurs, les entrepreneurs et le client doivent pouvoir faire entendre leur voix. Pour les emballages destinés à l'industrie alimentaire, il faut que l'industrie de l'aluminium coopère avec l'industrie qui traite les aliments, avec les détaillants et avec les consommateurs. Outre les avantages qu'elle présente sur le plan technique, une coopération active entre toutes les parties intéressées facilitera grandement la planification à moyen et à long terme de la production et de la consommation nationales.

Recherche et développement

Nous venons de montrer comment la mise en place de services consultatifs peut contribuer à intensifier l'emploi de l'aluminium. Ces initiatives risquent pourtant de ne pas porter pleinement leurs fruits si elles ne sont secondées par un service de recherche et de conception bien organisé. Les nombreux usages auxquels se prête l'aluminium et les nombreuses techniques qui interviennent dans son travail supposent une politique soigneusement élaborée à tous les stades de la fabrication, des matières premières aux produits finis. Les grandes compagnies d'aluminium assurent cette tâche ardue, coûteuse et souvent aléatoire par l'intermédiaire

d'un réseau d'instituts de recherche, de développement et de conception. Un exemple typique est fourni par ALCOA, qui consacre 1,5 à 2 % de ses recettes — environ 60 millions de dollars de 1976 — à la recherche et au développement. Les laboratoires d'ALCOA sont le plus grand complexe de recherche sur les métaux légers qui soit au monde. Les autres grands producteurs mondiaux d'aluminium consacrent des sommes importantes à la recherche et les entreprises d'aluminium de petits pays en font de même. En Hongrie, un institut de recherche, de perfectionnement des techniques et de conception fonctionne sous les auspices de la Compagnie hongroise de l'aluminium; il est financé sur des fonds qui représentent 4 à 4,5 % du chiffre d'affaires total de cette compagnie. D'autres producteurs hongrois d'aluminium consacrent quelque 1 % de leur chiffre d'affaires sur les produits finis à la recherche et au perfectionnement des techniques.

Dans les pays qui se lancent dans la transformation de l'aluminium, des travaux de mise au point technique sont indispensables. Il faut en effet qu'ils puissent adapter les applications que d'autres pays font de l'aluminium. Leurs efforts doivent porter sur la prospection de nouveaux débouchés et la mise au point de produits destinés au marché local. Le gros des travaux et des dépenses est inévitablement à la charge de l'industrie de l'aluminium. Dans un premier temps, ces travaux de mise au point doivent porter sur :

- a) La fabrication ou l'adaptation d'alliages convenant le mieux aux conditions locales;
- b) L'introduction de techniques modernes de refonte des déchets, indispensables pour approvisionner les fonderies en divers types de lingots;
- c) L'introduction de techniques optimales pour les joints, y compris stages de formation au soudage et application de techniques de raccordement à froid;
- d) L'adaptation et, le cas échéant, la modification des méthodes de traitement de surfaces en fonction des conditions locales;
- e) L'étude et l'application pratique des techniques de déformation plastique, y compris la fabrication de matrices;
- f) L'emploi et la construction locale de machines-outils;
- g) La conception et la fabrication de prototypes et la fourniture de conseils techniques aux clients éventuels avant la fabrication en série.

Il est bon qu'à ce stade les chercheurs et ingénieurs locaux fassent appel à l'aide de spécialistes de diverses disciplines de façon à asseoir les travaux de perfectionnements techniques ultérieurs sur une base scientifique solide.

Fabrication de nouveaux produits

Déterminer s'il est rentable de mettre sur le marché des produits nouveaux, avec les travaux de recherche, de conception, d'adaptation, les formalités d'approbation et les conseils techniques que cela suppose est une tâche difficile et complexe. Le taux de croissance de la consommation de demi-produits et l'augmentation des bénéfices des usines en donnent une idée. Il existe également d'autres indicateurs, notamment :

a) La substitution de l'aluminium à d'autres métaux pour augmenter la rentabilité et simplifier les opérations. A titre d'exemples nous citerons le remplacement du cuivre dans la fabrication des conducteurs électriques qui réduit les coûts d'installation des systèmes d'alimentation en énergie, l'introduction d'échangeurs de chaleur en aluminium, ainsi que l'emploi d'emballages en feuille d'aluminium qui facilite la vente des denrées alimentaires à longue conservation;

b) L'emploi d'éléments en aluminium qui présente des avantages substantiels pour le consommateur. A titre d'exemples nous citerons les économies d'énergie considérables réalisées dans l'exploitation de véhicules de transport et l'emploi d'accessoires en aluminium permettant d'assurer une grande rapidité des mouvements alternatifs dans les usines de textiles et les presses d'imprimerie. De telles substitutions améliorent les normes techniques et réduisent les coûts;

c) Les économies sur les frais de maintenance des constructions légères.

Pour évaluer l'importance des innovations dans le secteur de l'aluminium, on a récemment mis au point une méthode qui permet d'établir une relation entre la part annuelle moyenne qui revient aux nouveaux produits dans le taux moyen de croissance annuelle sur des périodes de 5 à 10 ans. R. Kumar a présenté cette méthode lors du Colloque international sur les techniques de transformation et les applications de l'aluminium, qui s'est tenu en Argentine en 1978 [1].

Le tableau 25 donne la part qu'occupent les nouveaux produits dans le taux de croissance à long terme de la consommation d'aluminium.

Les chiffres pour l'Argentine et le Royaume-Uni font apparaître la nécessité d'apporter des perfectionnements, techniques, faute de quoi la croissance de la consommation risque de décliner fortement dans les périodes ultérieures. De fait, pour la période de 1966 à 1976, le taux moyen de croissance annuelle de la consommation d'aluminium au Royaume-Uni est tombé à 1,9 % [2].

Il est d'autant plus difficile d'évaluer l'influence des produits nouveaux que, pour bien faire, il faudrait considérer séparément le rôle de chacun d'eux. Qui plus est, la mise au point, les

TABLEAU 25 RELATION ENTRE L'APPARITION DE NOUVEAUX PRODUITS ET L'ACCROISSEMENT DE LA CONSOMMATION D'ALUMINIUM DANS CERTAINS PAYS REPRESENTATIFS

Pays	Période	Taux moyen de croissance annuelle de la consommation d'aluminium (en pourcentage)	Part annuelle moyenne des nouveaux produits (en pourcentage)
Allemagne, République fédérale d'	1958-1965	9,5	4,0
Argentine	1965-1974	15,5	2,3
Etats-Unis d'Amérique	1963-1966	12,4	6,9
Hongrie	1965-1970	9,8	6,3
Italie	1958-1965	9,8	5,8
Japon	1958-1965	14,4	6,5
Norvège	1958-1964	12,0	6,1
Royaume-Uni	1958-1965	6,1	2,3

Source: [1]

essais et l'introduction à l'échelle industrielle sur le marché d'une nouvelle application peuvent souvent prendre plus de temps que la vie utile du produit (par exemple, le gainage en aluminium extrudé des câbles souterrains).

Pour la Hongrie, la part de 6,5 % qui revient aux nouvelles applications de l'aluminium et le taux moyen de croissance annuelle de 9,2 % pour la consommation intérieure sur une période de six années se comparent favorablement avec les autres statistiques du tableau 25. En revanche, la croissance globale soutenue de la consommation hongroise d'aluminium et de déclin progressif, voire l'arrêt de certains emplois de l'aluminium, sont toujours dictés par les besoins que détermine l'évolution industrielle du pays.

L'aluminium est moins employé en Hongrie pour :

Les véhicules de transport sur les voies navigables (petites embarcations et transports fluviaux de tonnage moyen pour passagers);

Les conducteurs téléphoniques aériens en alliages d'aluminium (on emploie de plus en plus des câbles enterrés);

Les portes, les fenêtres et les toits en aluminium des wagons de chemin de fer (par suite de la réorganisation du matériel roulant national);

Les parties extérieures des bouteilles thermos (remplacées par du plastique);

Capsules de bouchage (remplacées par du plastique).

Parmi les nouveaux produits sur le marché on peut citer :

Les câbles d'alimentation électrique souterrains à enveloppe en aluminium avec conducteurs en aluminium massif;

Les récipients pour aérosols;

Les bouteilles pour gaz liquides;

Les cocottes-Minute;

Les nouveaux types de feuilles composites d'aluminium pour emballages et usage ménager;

Les nouveaux types de châssis de fenêtres et de toitures;

Les radiateurs.

Les organismes consultatifs, qui surveillent les tendances du marché intérieur et du marché mondial, doivent prévoir quelle sera l'évolution à long terme à l'échelon mondial. C'est là un élément déterminant pour la recherche de débouchés intéressants et la décision de fabriquer des prototypes.

Il ressort de l'expérience de la Hongrie que les fonds dont disposait l'organisme consultatif ont été répartis comme suit : quelque 30 à 40 % ont été consacrés à des innovations susceptibles d'applications immédiates, quelque 20 à 25 % ont servi à ouvrir la voie à de nouvelles applications de l'aluminium qui se concrétisent dans les 5 à 10 années à venir et 40 % ont été dépensés pour des projets qui, en fin de compte, se sont avérés irréalisables. La part relativement élevée des expériences qui ont échoué a du moins eu un avantage, à savoir qu'il a été possible de déterminer certains domaines où l'aluminium ne peut absolument pas se substituer à d'autres matériaux.

Les exemples qui précèdent ont abondamment montré que les travaux des organismes consultatifs peuvent contribuer efficacement à la production de nouveaux articles. De plus, les organismes partagent avec toutes les parties intéressées les risques inhérents à toute nouvelle tentative d'application de l'aluminium. Ce partage des risques varie naturellement avec le système économique, la répartition des industries et les disponibilités de matières premières dans chaque pays.

Références

1. Rapport de délégation au premier Colloque international sur les techniques de transformation et les applications de l'aluminium, Buenos Aires (Argentine), 21-23 août 1978 (Jamshedpur, Inde, National Metallurgical Laboratory, 1978).
2. European Aluminium Statistics, 1976 (Düsseldorf, Aluminium Zentrale).

IV. Applications de l'aluminium

Les énormes progrès que fait l'industrie de l'aluminium dans le monde entier et les efforts de ses promoteurs pour conserver intacte la place que ce métal s'est acquise se déroulent dans une atmosphère de compétition serrée avec d'autres matériaux de construction. Il existe cependant certains domaines où la position de l'aluminium qui semble fermement établie et incontestée ne devrait pas changer à long terme vu la situation du marché mondial des matières premières.

Un cas intéressant est celui de l'industrie électrotechnique où, pour le transport d'énergie sous forte et moyenne tension, les conducteurs en aluminium ont supplanté le cuivre de façon irréversible. Un phénomène analogue se produit actuellement dans la fabrication et l'emploi des échangeurs de chaleur.

Dans la fabrication des véhicules de transport, en revanche, l'aluminium est en lutte serrée avec l'acier et, plus récemment, les plastiques.

Dans d'autres secteurs, la concurrence est encore plus vive, la plupart des articles finals qu'ils fabriquent pouvant l'être aussi bien avec de l'aluminium qu'avec d'autres matériaux. On trouvera à ce propos une comparaison intéressante à la figure X qui donne les courbes de la demande d'ustensiles de cuisine en aluminium dans certains pays industriels d'Europe [1].

Les ustensiles de cuisine traditionnels ont maintenu leur position. En revanche, les ustensiles composites en aluminium et acier inoxydable, après avoir progressé pendant deux ou trois ans, ont disparu du marché en raison de leur prix élevé

et du manque de clientèle, et il est peu probable que les frais engagés pour leur fabrication aient pu être amortis sur une aussi courte période. Par la suite, des ustensiles de cuisine à revêtement de plastique ou émaillés sont apparus sur le marché. Après une période d'essai de trois ans, les ventes de ces ustensiles très appréciés ont considérablement augmenté. La persistance de cette tendance dépendra en grande partie de la demande future. Cependant, malgré les dépenses considérables engagées pour leur réalisation, ces ustensiles semblent devoir rapporter rapidement d'importants bénéfices.

On trouvera ci-après une étude détaillée de quelques usages finals types de l'aluminium que l'on a expressément retenus pour montrer l'importance de la recherche et du développement et la nécessité de trouver de nouveaux débouchés tout en conservant les anciens marchés. Plusieurs cas de produits pour lesquels on n'avait pas suffisamment pesé le pour et le contre ou que la compétition d'autres matériaux a contraint à abandonner temporairement ou définitivement sont exposés.

Le présent chapitre traite des techniques. Le chapitre V contient des renseignements sur les sources de savoir-faire et donne les noms et adresses d'institutions et de sociétés industrielles susceptibles de fournir des informations ou d'autres formes d'assistance.

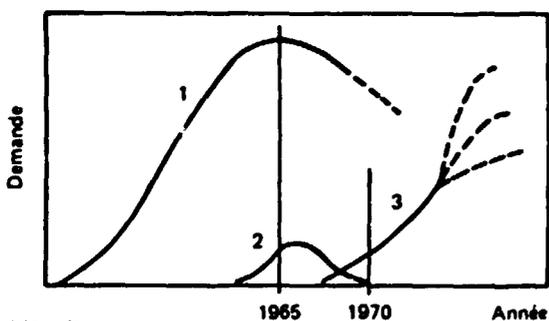
Electrotechnique

En 1976, la consommation mondiale d'aluminium du secteur électrotechnique était de quelque 2 millions de tonnes, soit 15 % total de la consommation mondiale [2]. La consommation par habitant pour l'électrotechnique varie considérablement selon les pays et les régions considérées, ainsi qu'il ressort du tableau 26.

Les perspectives d'expansion sont excellentes tant pour les pays industriels que pour les pays en développement.

L'Administration postale du Royaume-Uni a fait savoir qu'actuellement 25 % de son réseau de câbles téléphoniques était en aluminium. Il est probable que, d'ici à dix ans, les câbles téléphoniques en aluminium remplaceront complètement les câbles en cuivre [2]. Selon une autre prévision, aux Etats-Unis, le secteur électrotech-

Figure X. Demande d'ustensiles de cuisine en aluminium dans certains pays développés d'Europe



Légende :

- 1 Ustensiles traditionnels
- 2 Ustensiles composites en aluminium et acier inoxydable
- 3 Ustensiles en aluminium émaillé ou à revêtement en plastique

TABLEAU 26. CONSOMMATION D'ALUMINIUM PAR L'INDUSTRIE ELECTROTECHNIQUE DANS CERTAINS PAYS REPRESENTATIFS

(Moyenne pour 1973-1977)

Pays	Consommation par habitant (en kg)
Pays développés d'Europe occidentale	1,4 ^d
Brsil	1,2
Hongrie	3,5
Inde	0,15
Afrique du Sud	1,0
Etats-Unis d'Amérique	3,7

^dMoyenne pondérée. L'écart va de 0,7 à 1,8.

nique, pour lequel la consommation par habitant est déjà élevée, serait celui qui, dans ce pays, devrait connaître la plus forte croissance. D'ici à l'an 2000, on prévoit que l'électrotechnique comptera pour 20 % dans la consommation mondiale d'aluminium [4].

La Hongrie fait un usage intensif de l'aluminium en électrotechnique. Historiquement, cette situation peut s'expliquer par la pénurie chronique de métaux non ferreux lourds qu'elle a connue bien avant la seconde guerre mondiale et les mesures d'économie qu'elle a prises dans ce domaine, ainsi que par les fluctuations des prix du cuivre. C'est ainsi que l'aluminium a rapidement gagné du terrain dans la fabrication des câbles aériens de transport d'énergie, des conducteurs à faible et à moyenne tension ainsi que des bobinages pour moteurs et transformateurs. En 1951, la Hongrie a publié un recueil de normes concernant l'emploi de l'aluminium et de ses alliages en électrotechnique; ce recueil traite des applications techniquement et économiquement possibles de l'aluminium pour de nombreux usages en électricité. Il classe ces dernières comme souhaitables, possibles ou impossibles. Ce premier recueil de normes a depuis été revu en fonction des nouvelles techniques.

Conducteurs

La part qui revient à l'aluminium dans les conducteurs fabriqués en Hongrie est de 76 % contre 24 % pour le cuivre. Dans la plupart des pays à économie planifiée, l'aluminium représente de 50 à 60 % de la fabrication de conducteurs alors qu'en République fédérale d'Allemagne 70 % des conducteurs sont fabriqués en cuivre et 30 % seulement en aluminium.

Les fabricants hongrois de conducteurs et de câbles en aluminium ont acquis une grande expérience dans la fabrication de produits répondant à des normes techniques élevées. Les progrès remarquables de la consommation d'aluminium

dans le domaine des conducteurs ont en outre été accélérés parce que, très tôt, les ingénieurs et ouvriers hongrois se sont spécialisés dans les techniques des installations en aluminium et dans les applications de l'aluminium au matériel électrique. C'est pourquoi les entreprises hongroises qui travaillent dans ce domaine emploient l'aluminium de préférence au cuivre.

Ce sont les coûts de production des conducteurs en aluminium, les économies qu'ils permettent de réaliser et la sûreté de leur fonctionnement qui déterminent si l'on doit les employer de préférence aux conducteurs en cuivre. Or, les prix de l'aluminium ont une tendance marquée à baisser par rapport à ceux du cuivre.

Le faible poids spécifique des conducteurs en aluminium, leur conductivité spécifique (faibles pertes d'énergie) et leur tenue à la corrosion (économies sur les frais de maintenance) présentent des avantages supplémentaires. Leur fiabilité est assurée par leur forte résistance mécanique et par leur aptitude à la déformation plastique, à la coulée et aux divers types de soudage. Sous une même charge, la vitesse à laquelle leur température ambiante s'élève est identique à celle du cuivre.

On peut employer, pour comparer divers métaux, un indice de faisabilité économique, donné par la formule $\frac{1}{\rho p \gamma}$, où ρ représente la résistivité, p le prix donné par unité de volume et γ la densité [5]. Calculés aux prix de 1974 et si l'on retient comme base de comparaison l'unité pour l'aluminium, les indices correspondant au cuivre, au magnésium et au sodium sont respectivement de 2, 1,14 et 0,55. Pour le long terme, tels semblent être les conducteurs les plus prometteurs. Du point de vue économique, le magnésium et le sodium sont les deux métaux dont la valeur est la plus proche de celle de l'aluminium. Toutefois, l'un et l'autre sont difficiles à se procurer en grandes quantités, leur manipulation est mal commode et leur traitement difficile.

Lignes et câbles aériens

La Hongrie a joué un rôle de pionnier dans l'installation de réseaux complets de transport d'énergie et de télécommunications. L'expérience a amplement démontré que, sur le plan de l'exploitation, les conducteurs en aluminium sont équivalents et, d'un point de vue économique, peuvent être supérieurs aux conducteurs en cuivre ou en alliage cadmium-bronze employés auparavant. C'est pourquoi, dans le monde entier, on emploie l'aluminium dans la plupart des réseaux de transport d'énergie, même pour les tensions les plus élevées (par exemple, en Hongrie les lignes de transport à 750 kV).

Lignes aériennes à haute tension

Le tableau 27 donne une comparaison des réseaux électriques à haute tension.

TABLEAU 27. RÉSISTANCE ET PRIX DE TROIS CABLES A HAUTE TENSION DE MATERIAUX DIFFÉRENTS ET PESANT LE MÊME POIDS

Matériau	Prix relatif sur le marché mondial, 1976	
	Al 1000	Al 1000
Aluminium renforcé d'acier (ACSR 1:6)	108,7	70
Alliage d'aluminium (E-AlMgSi)	100	100
Bronze au cadmium	228	150

On voit que la résistance d'un conducteur à base d'aluminium est deux fois moindre que celle d'un conducteur en cuivre de même poids et que son prix n'est que la moitié de celui d'un conducteur en cuivre. Il en est de même pour les réseaux à basse tension où, par suite des nombreuses dérivations des lignes de distribution et de la proximité des pylônes qui le portent, la résistance à la traction de l'aluminium n'est pas utilisée à plein.

Les réseaux aériens de transport d'énergie sont généralement composés des types de câbles en aluminium indiqués au tableau 28.

TABLEAU 28. PROPRIÉTÉS DES CONDUCTEURS COMMUNEMENT EMPLOYÉS POUR LES LIGNES AÉRIENNES

Matériau	Résistivité spécifique (12 mm ² /m)	Résistance à la traction (N/mm ²)	Spécifications de température (°C)	
			Température normale	Température admissible en cas de court-circuit
Aluminium (dur)	0,0282	170-200	70	130
Alliage d'aluminium (E-AlMgSi)	0,325	295	80	155
Aluminium à renforcement d'acier	0,240	1 530	..	..
	0,0282	163-197	..	..

Les lignes aériennes à haute tension doivent rester sûres, quelles que soient les charges thermiques ou mécaniques auxquelles elles sont soumises, et résister aux effets corrosifs d'un séjour à l'air libre. Elles doivent en outre pouvoir supporter les surtensions qui peuvent se produire.

Dans les réseaux à basse tension où les charges métalliques sont plus faibles, on emploie généralement des conducteurs en aluminium non allié qui ont une résistance mécanique moindre. Pour les réseaux à moyenne et à haute tension on

emploie des câbles d'aluminium à âme d'acier (ACSR) et, dans une moindre mesure, des câbles en alliage d'aluminium [6]. On emploie également les ASCR pour les conducteurs spéciaux. Généralement, un revêtement de zone protège l'âme d'acier contre la corrosion. Récemment, une autre solution, le "revêtement d'aluminium soudé", a également été adoptée [7]. Les ACSR conviennent pour les conducteurs de phase ou de mise à la terre.

Dans un réseau électrique, il importe au plus haut point de déterminer correctement la puissance nominale maximale d'un conducteur. Ce maximum dépendra, outre des facteurs environnementaux et climatiques, de la composition, de la conception et des paramètres des torsions du conducteur. Dans le choix d'une spécification, il faut prêter une attention particulière aux problèmes de la sûreté d'exploitation pendant la vie utile du câble. Il faut empêcher qu'il ne subisse des dégâts importants et sa résistance mécanique ne doit pas perdre plus de 5 % de sa valeur initiale.

Il faut continuellement surveiller le bon fonctionnement et la fiabilité des câbles. Les initiatives pour réaliser de nouveaux types de lignes aériennes en aluminium encore plus efficaces sont nombreuses.

Le tableau 29 donne les puissances nominales maximales du courant des lignes aériennes à haute tension.

TABLEAU 29. PUISSANCES NOMINALES MAXIMALES DES COURANTS DES LIGNES AÉRIENNES A HAUTE TENSION

Matériau	Surface de la section transversale (mm ²)	Puissance nominale maximale	
		Normale (kA)	En cas de court-circuit (kA)
Aluminium	300	680	27
	643	1 120	58
Alliage aluminium (E-AlMgSi)	95	350	9
	240	625	24
	300	785	28
Aluminium à renforcement d'acier	..	..	..
	110	430	12
	250	710	24
	500	1 120	60

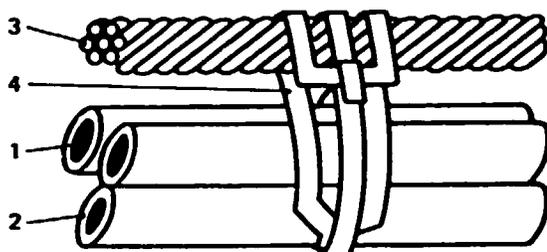
Note: Ces chiffres sont valables pour des conducteurs fabriqués en Hongrie et dans les conditions les plus défavorables de l'environnement (rayonnement solaire, température ambiante 30 °C, vitesse du vent 1 m/s).

Câbles

Les câbles aériens en aluminium sont employés comme conducteurs de phase et comme conducteurs neutres dans les réseaux de basse tension, les circuits de raccordement et les installations de

plein air ou provisoires (voir figure XI). Ils ont été très bien accueillis car ils permettent d'éliminer plus facilement 80 % des pannes que les circuits de raccordement de type classique provoquent dans les réseaux de distribution à basse tension. Ils se caractérisent surtout par leur facilité d'installation et par une réduction du nombre des pannes.

Figure XI. Câbles aériens



Légende :

- 1 Conducteur massif ou à torsion
- 2 Isolation par du plastique
- 3 Câble de suspension à torsion
- 4 Fixation de suspension

Les câbles aériens sont faits en aluminium à 99,5 % de section transversale de 6 à 300 mm² et ont une résistance à la traction de 70 à 110 N/mm². La puissance nominale maximale d'un câble de section transversale de 240 mm² en exploitation normale à la température ambiante de 25 °C est de 410 A; en cas de court-circuit la température ne doit pas dépasser 150 °C.

La rigidité diélectrique de l'isolant en plastique est de 40 kV/cm. Le câble de suspension en torsion tordés est en aluminium ou en alliage d'aluminium. Une fois bien fixé sur le circuit de raccordement, il satisfait à toutes les conditions techniques et électriques requises, et sert à porter le conducteur de phase isolé d'une part et le conducteur neutre d'autre part.

L'installation des câbles aériens doit être strictement conforme aux normes en vigueur. Des fixations préfabriquées en rendent le montage beaucoup plus rapide.

Fixations en aluminium

Dans le transport de l'énergie électrique, on emploie l'aluminium pour les fixations de conducteurs, de suspension et de protection. Les fixations de conducteurs servent à connecter deux ou plusieurs conducteurs d'une ligne de transport; les fixations de suspension servent à maintenir en position les câbles aériens, les conducteurs aériens et les isolateurs ou à les relier les uns aux autres; les fixations de protection sont mises en place pour accroître la sûreté de fonctionnement de la ligne de transport. Leur mise en place se fait généralement par serrage, ce qui permet d'avoir des

extrémités de câbles sûres, économiques et faciles à manier. Ces fixations représentent les progrès les plus récents réalisés dans les techniques d'installation. On les emploie dans des réseaux à faible tension de 0,4 kV jusqu'aux plus grands réseaux de transport d'électricité à haute tension de 750 kV [8, 9, 10].

Transport d'énergie

Le monde entier connaît de plus en plus une pénurie de main-d'œuvre qualifiée, qui s'accompagne d'une demande pressante de modernisation des techniques d'installation des conducteurs. Cette demande a récemment incité à mettre au point plusieurs structures en aluminium qui permettront de réduire les coûts de maintenance des lignes de transport d'énergie.

Les contrôles faits chaque année sur un prototype de pylône en aluminium pour ligne de transport monté il y a déjà dix ans dans une région industrielle de Hongrie n'ont jusqu'ici fait apparaître aucune trace d'altération ou d'endommagement. Ce prototype et d'autres du même genre ont suscité un grand intérêt dans le monde entier [11].

Télécommunications

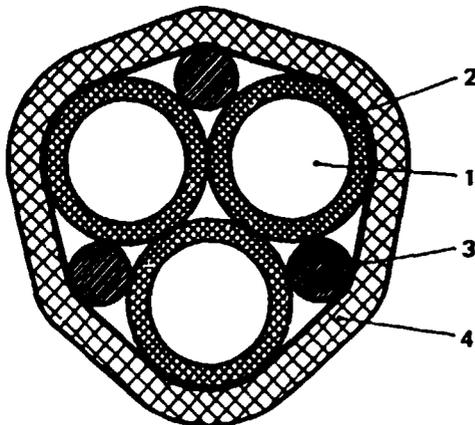
Autrefois, les câbles aériens qui servaient à acheminer les communications interurbaines sur des distances plus ou moins grandes étaient faits en fil d'alliage d'aluminium E AlMg Si vieilli. Les statistiques des trente dernières années ont montré que les défaillances survenant en cours d'usage ne représentaient que la moitié ou les deux tiers de celles que l'on relevait pour les conducteurs en bronze [12]. Ce résultat s'explique en grande partie par la qualité des techniques de fixation et d'assemblage employées et par les propriétés inhérentes à l'aluminium.

Câbles souterrains

On emploie des conducteurs en aluminium pour la fabrication des câbles depuis les années 1930. Cependant, ce n'est qu'après la seconde guerre mondiale que les techniques permettant de revêtir les câbles souterrains d'une gaine d'aluminium ont été mises au point et introduites sur le marché à une échelle industrielle. Un progrès décisif dans la conception des câbles souterrains est intervenu récemment avec l'apparition de conducteurs en aluminium massif dans les câbles à diélectrique massif pour basses tensions. Le pionnier dans ce domaine a été ALCAN, première société à communiquer en détail les caractéristiques techniques de ses câbles pour basses tensions à conducteur en aluminium massif (câbles Solidal) [13].

Les coûts de production des câbles à diélectrique massif de 0,6 à 1 kV ne peuvent concurrencer les câbles isolés par du papier imprégné faits de conducteurs de phase en aluminium à trois torons revêtus d'une gaine protectrice en aluminium servant de conducteur neutre que si les quatre conducteurs sont tous en aluminium. Les normes de certains pays (par exemple VDE 0271/3.69 de la République fédérale d'Allemagne) interdisent expressément l'emploi d'aluminium comme conducteur neutre placé concentriquement autour des trois autres conducteurs et exigent l'emploi du cuivre. Malgré les avantages techniques qu'il présente, l'emploi du cuivre compromet gravement la rentabilité de ce type de câble. Néanmoins, sous réserve d'une protection convenable contre la corrosion, l'emploi d'un quatrième conducteur d'aluminium disposé concentriquement est permis dans certains pays. On trouvera des exemples dans les figures XII et XIII [14, 15, 16].

Figure XII. Section transversale d'un câble en aluminium à trois conducteurs neutres



Légende :

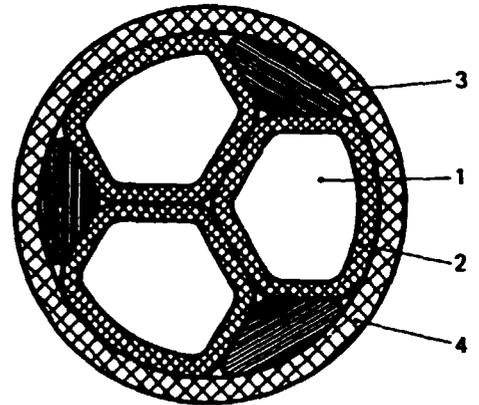
- 1 Conducteur en aluminium massif
- 2 Isolation par PVC
- 3 Neutre : fil d'aluminium entouré de bande d'aluminium
- 4 Gaine noire en PVC

Les conducteurs en aluminium à section transversale de 95, 150 et 240 mm² ont une résistance à la traction de 60-70 N/mm².

Ils sont suffisamment mous et souples pour que la pose en soit facile. Leur emploi a confirmé qu'il n'est plus nécessaire que les câbles souterrains à haute tension soient composés de conducteurs torsadés vu que, jusqu'à une section de 240 mm², on peut employer des conducteurs massifs.

On peut joindre les extrémités des câbles en aplatissant et en pinçant les extrémités du conducteur massif à l'aide d'un outil spécial. Les techniques de pression à froid employées pour raccorder les conducteurs à torons torsadés ont

Figure XIII. Section transversale d'un câble en aluminium à trois conducteurs neutres valables de 0,6 à 1 kV



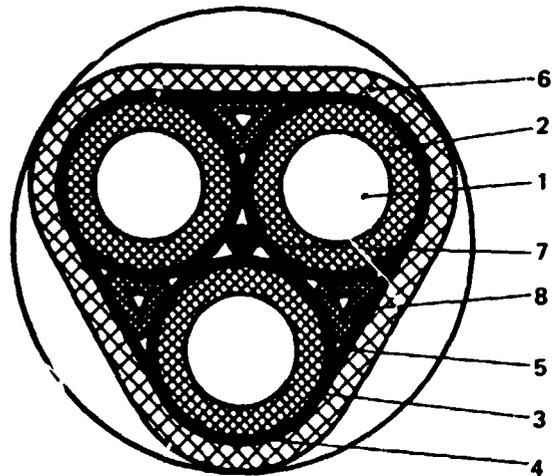
Légende :

- 1 Conducteur en aluminium massif à coupe pentagone à voûtes
- 2 Isolation par PVC
- 3 Neutre : fil d'aluminium de section triangulaire à voûtes entouré de bande d'aluminium
- 4 Gaine noire en PVC

été adaptées aux conducteurs massifs. De plus, on peut appliquer en toute sécurité les méthodes traditionnelles de soudage aux conducteurs massifs pour obtenir des joints résistants et sûrs.

Ainsi, les conducteurs massifs ont fait la preuve de leur utilité et sont employés depuis les dix dernières années dans les câbles à haute tension de 6 à 35 kV comme indiqué dans la figure XIV [6]. Ce type de câble est facile à poser.

Figure XIV. Section transversale d'un câble à haute tension



Légende

- 1 Conducteur en aluminium massif
- 2 Isolation par du plastique avec surface extérieure revêtue de graphite
- 3 Bande de papier partiellement conductrice
- 4 Double couche de bande d'aluminium
- 5 Double couche de bande d'acier
- 6 Gaine bleue en PVC
- 7 Fil de garde en aluminium
- 8 Remplissage en PVC

L'isolation s'en trouve facilitée du fait qu'il est plus commode d'ajouter une couche de plastique partiellement conductrice et à surface lisse à un conducteur massif qu'à un conducteur toronné.

Bien que certaines normes internationales interdisent l'emploi de conducteurs neutres et de conducteurs de garde en aluminium disposés concentriquement, en Hongrie, même la partie métallique de l'écran isolant est en bande d'aluminium [16]. Autrefois, on entourait cette bande autour du conducteur, mais dans le nouveau câble pour tensions de 0,6 à 1 kV une bande protectrice d'aluminium est fixée longitudinalement sur le conducteur.

Des expériences concluantes ont montré que les câbles à diélectrique massif pour basses et hautes tensions composés de conducteurs de phase en aluminium, d'une bande protectrice et de conducteurs neutres ou de garde peuvent permettre de réaliser des économies de matériaux et de main-d'œuvre [16].

Câbles téléphoniques et câbles de télécommunications

Pendant la seconde guerre mondiale, alors qu'il était difficile de se procurer du cuivre, la Hongrie a mis en service pour les communications locales et à grandes distances des câbles téléphoniques à paires symétriques pour courants porteurs fabriqués en aluminium avec papier isolant et gaine de plomb [13]. Pendant l'après-guerre, période où les prix du cuivre ont commencé à monter fortement, une tendance analogue s'est manifestée; néanmoins, ce n'est qu'en Australie [3, 14] que ces câbles ont été largement employés.

L'apparition des câbles à intérieur plein a fondamentalement modifié la situation. L'isolation de ces câbles est généralement assurée par du polyéthylène cellulaire. Les vides entre les fils sont remplis d'une gelée de pétrole imperméable qui protège le câble contre la corrosion. La gaine est constituée par une bande d'aluminium revêtue de polyéthylène et par du polyéthylène [15]. Certaines compagnies ont mis au point un conducteur en alliage spécial AlMgFe dont certaines propriétés mécaniques sont voisines de celles des conducteurs en cuivre, qui assure un meilleur rendement à la production et permet l'emploi de techniques de raccordement plus faciles lors de l'installation [16]. Les câbles en aluminium et en alliage à intérieur plein ont reçu un accueil très favorable, notamment au Royaume-Uni [15, 16].

Lignes de raccordement

Les lignes de raccordement servent à alimenter des installations électriques intérieures des immeubles, des locaux d'habitation des industries et

des bâtiments agricoles. Nous examinerons ci-après les conducteurs isolés [17], les canalisations des barres omnibus [18, 19], les raccordements et les fixations [19, 20].

Les progrès réalisés dans les techniques de fabrication et d'installation ont fait de l'aluminium un conducteur équivalent du cuivre pour de nombreux usages. De nos jours, l'aluminium est universellement admis comme matériau pour les installations courantes. On n'emploie le cuivre que s'il est important d'avoir une plus grande sûreté de fonctionnement (par exemple, signaux d'alarme, câblage intérieur des appareils, etc.) [21].

Conducteurs isolés

La conductivité de l'aluminium dépend de très nombreuses conditions. Dans de nombreux pays les conducteurs ont été normalisés. Ils sont généralement en aluminium à 99,5%, se présentent soit sous forme massive soit sous forme de torons comprenant plusieurs fils.

Parfois, on allie légèrement à l'aluminium à 99,5% d'autres métaux, surtout du fer [22], pour en augmenter la souplesse. Certains de ces alliages sont connus sous le nom de conducteurs Triple E et Super T. Leur conductivité est indiquée par les normes correspondantes mais dépend également des conditions d'installation (sous plâtre, pose extérieure blindée, etc.).

Dans de nombreux pays, on emploie essentiellement ou exclusivement des conducteurs isolés composés de plusieurs fils d'aluminium pour l'éclairage ou le fonctionnement d'appareils dans les logements, les industries, les écoles et autres locaux.

Pour la pose des joints, des raccordements et des fixations, il faut tenir compte de certaines particularités de l'aluminium pour éviter que les fils ne se cassent ou que le fluage ne provoque des températures excessives et d'éventuels courts-circuits.

Si des règlements très stricts de sécurité sont imposés ou si plusieurs joints et raccordements doivent être faits sur une courte distance (par exemple, dans les hôpitaux, les boîtes de dérivation, etc.) il est préférable d'employer du cuivre afin d'éviter les effets de fluage).

Canalisation des conducteurs

Les méthodes de construction classiques n'ont pas évolué au rythme des progrès techniques les plus récents. L'apparition de constructions légères a donné naissance à divers types nouveaux de canalisation qui, avec les plaques de montage perforées et les canalisations de barres conductrices en aluminium revêtues de plastique, facilitent grandement l'installation, améliorent le rendement et économisent de la main-d'œuvre.

On considère aujourd'hui que l'aluminium est préférable aux plastiques comme matériau pour les barres conductrices. L'aluminium, par ses propriétés, présente moins de risques d'incendie.

Jointes et fixations

Les conducteurs en aluminium sont vulnérables au fluage et aux incisions. Il importe donc tout particulièrement d'employer de bonnes techniques pour attacher, joindre, étirer et raccorder les conducteurs et d'adopter des fixations judicieusement conçues [19, 20].

On peut joindre les conducteurs par exemple par soudage, brasage ou par serrage. On a récemment mis au point de nombreux types de joints et de fixations pour obtenir un bon fonctionnement aux moindres frais. Montés par un personnel dûment qualifié, ils peuvent augmenter considérablement le rendement et la sûreté de fonctionnement.

Transformateurs et condensateurs

Transformateurs

On emploie depuis quarante ans des enroulements en aluminium pour la fabrication et l'exploitation des transformateurs. Employés essentiellement dans les transformateurs de distribution, les enroulements sont généralement calculés pour des puissances nominales pouvant atteindre 2,5 MVA et des tensions de 3,6 à 36 kV. Certains de ces enroulements sont employés dans les transformateurs à huile, d'autres dans les transformateurs secs. Il existe aussi des transformateurs à enroulements en aluminium à puissance nominale très faible (quelques VA) ou plus élevée (de l'ordre de 25 à 63 MVA). Dans les transformateurs à grande puissance, de modèles récents, on emploie plusieurs éléments de construction en aluminium afin de réduire les pertes supplémentaires. Ces éléments comprennent les culasses, les cuves, les couvercles et les surfaces d'isolation électromagnétique.

L'intérêt que présente l'emploi des enroulements en aluminium pour les transformateurs dépend de leur prix par rapport à celui des enroulements en cuivre. Si l'on remplace les enroulements en cuivre d'un transformateur par des enroulements en aluminium de mêmes dimensions, le rapport des puissances nominales de ces enroulements à la température de 75 °C s'exprime par la formule

$$P_{Al} = P_{Cu} \times \frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Al}} = 0,79 P_{Cu}$$

où P_{Al} et P_{Cu} sont respectivement les puissances de transformateurs à enroulement en aluminium et des transformateurs à enroulements en cuivre et ρ_{Al} et ρ_{Cu} les résistivités correspondantes. Si le prix

d'un transformateur à enroulements de cuivre d'une puissance nominale P_{Cu} est p_{Cu} et si, aux fins de comparaison, on réduit sa puissance nominale à celle d'un transformateur à enroulements d'aluminium, son prix devient p'_{Cu} . Les prix variant comme la puissance $^{1/2}$ des puissances nominales, on obtient la formule suivante :

$$p'_{Cu} = (P_{Cu}/P_{Al})^{1/2} p_{Cu} = 0,84 p_{Cu}$$

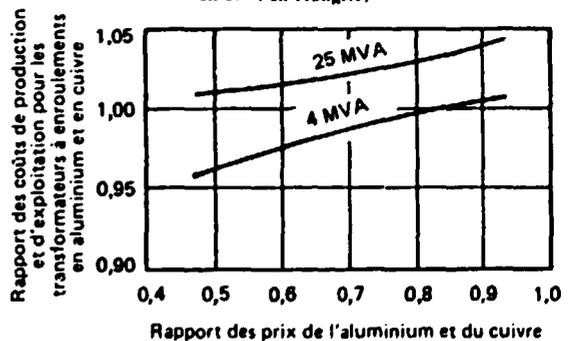
Du point de vue des coûts de production, il sera plus économique d'employer de l'aluminium si les économies sur les coûts de production qu'entraîne la réduction de la puissance nominale d'un transformateur à enroulements de cuivre restent supérieures à celles qu'on peut réaliser avec un transformateur à enroulements en aluminium ayant la même puissance nominale.

Un transformateur est économique quand ses coûts de production et d'exploitation sont réduits au minimum. Pour un tel transformateur, les enroulements en aluminium sont insuffisamment employés par rapport aux enroulements en cuivre ayant à supporter la même charge. Alors que, pour les enroulements en cuivre les densités de courant les plus économiques sont de l'ordre de 2,5 à 3,5 A/mm², avec l'aluminium elles se situent de 1,5 à 2 A/mm².

La figure XV donne le rapport des coûts totaux de production et d'exploitation entre des transformateurs à enroulements en aluminium et des transformateurs à enroulements en cuivre de 25 MVA et de 4 MVA en fonction du rapport des prix de l'aluminium et du cuivre établi d'après les prix de ces métaux en Hongrie en 1974. On notera que, pour un transformateur de grande puissance, l'emploi de l'aluminium est financièrement plus avantageux alors que pour un transformateur moins puissant, ou chaque fois que le rapport des prix de l'aluminium et du cuivre tombe à 0,85 ou en dessous, il est plus avantageux d'employer le cuivre [3, 23].

Les prix des métaux et de l'énergie peuvent varier d'un pays à l'autre, mais on peut poser en règle générale qu'au-dessous d'une puissance

Figure XV. Avantages financiers des transformateurs à enroulements en aluminium et en cuivre (d'après les prix de ces métaux en 1974 en Hongrie)



nominale de 2,5 MVA les enroulements en aluminium sont plus économiques que les enroulements en cuivre. Cette considération a son importance vu que 90 % de la production mondiale de transformateurs correspond à des puissances nominales inférieures à ce chiffre. Quant aux puissances supérieures à 25 MVA, il n'est pas possible, pour des raisons d'encombrement, d'employer l'aluminium.

Dans les transformateurs secs, les enroulements occupent la majorité de l'espace disponible, en sorte que l'emploi de l'aluminium est économique et réduit les coûts de production.

Compte tenu des charges et des dimensions correspondantes, le meilleur matériau d'aluminium pour les enroulements est le fil demi-dur ayant une conductivité de $35 \text{ S} \cdot \text{m}/\text{mm}^2$, une résistance à la traction de $110 \text{ N}/\text{mm}^2$, un allongement à la rupture de 12 % et une dureté Brinell de $200 \text{ N}/\text{mm}^2$. Récemment, pour les puissances nominales jusqu'à 4 MVA, on a employé des enroulements en feuille d'aluminium tant pour les transformateurs secs que pour les transformateurs à huile [24, 25]. Les avantages qu'ils présentent sont les suivants : meilleure dissipation de la chaleur dans les enroulements; meilleure résistance aux courts-circuits; meilleure répartition des tensions provoquées par les sautes de tension. Ces enroulements se prêtent bien à l'automatisation.

L'épaisseur de l'aluminium à 99,5 % des feuilles employées dans les transformateurs isolés à l'huile ou au plastique va de 0,01 à 0,04 mm; au-dessus de cette épaisseur on emploie des bandes d'aluminium. La Hongrie fabrique aujourd'hui des transformateurs secs modernes à feuilles d'aluminium isolées par des plastiques fabriqués sous licence spéciale de l'AEG.

Condensateurs

Les quantités d'énergie nécessaires aux sous-stations de condensateurs ne font que croître. Les condensateurs modernes à diélectrique pour haute tension et pour basse tension comportent presque exclusivement des enroulements en feuille d'aluminium. La feuille d'aluminium à 99,9 % que l'on emploie a 0,005 à 0,120 mm d'épaisseur et 60 à 400 mm de largeur. Il faut que la surface de la feuille soit propre, unie, et sans la moindre trace d'huile. Des fluctuations de plus de 10 % dans les dimensions de la feuille en diminuent la capacité et augmentent les coûts de production.

Véhicules automobiles

On constate actuellement une tendance marquée à construire les véhicules routiers de manière à en réduire le poids et, partant, la consommation d'énergie. C'est ainsi que, dans

l'automobile, on s'efforce de remplacer le cuivre traditionnel des conducteurs et des bobines par de l'aluminium. Il y a de fortes chances pour qu'à la longue l'aluminium remplace le cuivre si l'on trouve le moyen de réaliser de manière sûre et économique le raccordement et la fixation des conducteurs en aluminium avec le minimum de chute de tension.

Actuellement, la mise au point d'un alliage d'aluminium souple et résistant au fluage et de contacts spéciaux pour faibles tensions (12 V) est en cours. Ces produits devraient sous peu trouver une application commerciale.

Eclairage

Pour les appareils d'éclairage, l'emploi de l'aluminium est déterminé par son faible poids spécifique, sa tenue à la corrosion, son aspect agréable et son bon pouvoir réfléchissant. On emploie l'aluminium surtout pour les réflecteurs et les miroirs.

Le faible poids spécifique a son importance si l'on recherche la légèreté pour les supports des lampes. Il a une importance toute spéciale quand de nombreuses lampes sont installées en grappes serrées comme dans les stades sportifs, où souvent chaque lampadaire supporte de 60 à 80 projecteurs.

La tenue à la corrosion est importante pour les appareils d'éclairage fonctionnant en plein air qui doivent durer dix ans ou plus. La surface des miroirs en aluminium doit être anodisée. Ces surfaces sont un peu moins réfléchissantes mais leur grande dureté et leur résistance à l'usage permettent de les nettoyer régulièrement.

L'esthétique des appareils est surtout importante pour les éclairages intérieurs. La surface d'aluminium doit être dotée d'un poli brillant ou soumise à une oxydation anodique autocolorante.

Une bonne réflexion est indispensable pour les réflecteurs, les lampadaires et les éclairages d'intérieur. Pour augmenter la réflexion, on emploie de l'aluminium pur à 99,99 %, auquel on ajoute de 0,5 à 1 % de magnésium. La brillance de la surface d'aluminium peut s'obtenir par polissage chimique, électrolytique ou mécanique ou par une combinaison de ces traitements.

La production en série des appareils d'éclairage suppose l'automatisation des opérations. Une nouvelle technique fait intervenir la pression de la vapeur pour appliquer l'aluminium sur les surfaces plastiques. La résistance à la chaleur de ces miroirs reste toutefois limitée. Dans les sources de lumière où règnent des températures élevées, telles que les lampes au mercure, aux halogènes et au sodium, il est, d'un point de vue technique et économique, préférable d'employer des miroirs en aluminium.

Moteurs électriques

Les enroulements des moteurs électriques sont généralement faits en cuivre en raison de la résistance spécifique élevée de ce métal par rapport à celle de l'aluminium. L'emploi des enroulements en aluminium n'est pas encore répandu et reste pratiquement limité aux petits moteurs. Cependant, la plupart des petits moteurs sont du type dit à commutateur et l'aluminium ne se prête pas facilement à un emploi vu la pellicule d'oxyde qui se forme à sa surface.

En revanche, dans les enroulements des rotors des moteurs synchrones, l'aluminium, grâce à son poids spécifique trois fois plus faible, réduit la force centrifuge. De même, les fixations des bobines étant exposées à une charge moindre, il est possible d'en réduire les dimensions, ce qui laisse davantage d'espace pour le montage des bobines. Dans ce cas, il est avantageux d'employer l'aluminium.

Certaines entreprises électrotechniques spécialisées dans les matériaux pour transformateurs ont également commencé à fabriquer des fils d'aluminium isolés pour bobines de rotors. Ces fils sont cylindriques ou plats et l'isolation en est assurée par de l'émail, de la fibre de verre ou d'autres produits.

Les prix relatifs de l'aluminium et du cuivre détermineront lequel de ces deux métaux est le plus économique. De nombreux fabricants de moteurs ont commencé à employer des bobines en aluminium pour les rotors. Ils en retirent de nombreux avantages techniques et financiers, les fils d'aluminium isolés convenant mieux à leurs techniques particulières.

Matériel pour installations électriques

L'industrie électrotechnique emploie de grandes quantités d'aluminium pour les conducteurs, commutateurs et autres matériels décrits ci-après.

Conducteurs

L'emploi de barres conductrices en aluminium pour la transmission d'énergie à haute tension est maintenant répandu. Pour la conception et l'installation de ces barres, il faut tenir compte de trois paramètres, à savoir leur poids spécifique, leur conductivité électrique et leur résistance mécanique.

Du point de vue du poids spécifique, l'aluminium est nettement supérieur à tout autre matériau pour conducteurs. Pour ce qui est de la conductivité, il serait en théorie particulièrement indiqué d'employer de l'aluminium aussi pur que possible. Cependant, il faut satisfaire à certains impératifs de résistance mécanique. C'est pourquoi,

dans la pratique, on a donné la préférence aux alliages d'aluminium (AlMgSiO₂) qui répondent mieux à ces deux conditions. Il convient de veiller à ce que la manipulation des surfaces de contact lors des opérations de jonction, de raccordement et de fixation des barres conductrices soit effectuée avec le plus grand soin.

Pour avoir des joints détachables, le mieux est de visser les extrémités des barres avec des conducteurs extra-fins, on peut aussi boucler les extrémités. La résistance au point de contact des joints vissés dépend toujours de la manière dont ils ont été faits [26]. Les contacts risquent de ne pas être satisfaisants si l'on n'a pas pris soin d'éliminer des extrémités du conducteur à assembler la pellicule d'oxyde, mauvaise conductrice, qui se forme sur la surface de l'aluminium ou de les revêtir d'un métal ayant de bonnes propriétés de contact. On peut réaliser de bons contacts en nettoyant les surfaces des extrémités sous une couche de vaseline (on applique ainsi les particules de zinc qui s'y trouvent en suspension), en faisant un dépôt galvanoplastique d'argent, de cuivre ou d'étain sur les surfaces de contact ou en nébulisant un métal plus conducteur que l'aluminium (par exemple cuivre ou argent) [27]. Dans les barres Exconal mises au point par l'ASEAN de Suède, on combine les caractéristiques utiles de l'aluminium et du cuivre en pressant une feuille de cuivre sur le conducteur en aluminium. Ces barres sont composées de 85 % d'aluminium et de 15 % de cuivre (revêtement). Ces barres conductrices peuvent se joindre de la même manière que les barres en cuivre pur. Les joints permanents sont faits soit par soudage soit par pression [28]. Les joints soudés sont meilleurs conducteurs que les joints détachables et ne sont pas exposés à des pointes de résistance transitoires. Les opérations de soudage sont toutefois malaisées et il faut beaucoup de soin pour choisir la technique la plus indiquée [29, 30].

Les joints permanents sont faits par pression comme pour les câbles torsadés, ou par extrusion à froid comme pour le raccordement des conducteurs en feuille [28, 31-32]. On joint les extrémités des fils de câbles soit par extrusion à froid soit par serrage.

Barres à revêtement métallique

Pour augmenter la sûreté de fonctionnement à l'intention des usagers, on a mis au point plusieurs réseaux de distribution dotés d'une armure protectrice. Ces réseaux peuvent être répartis dans l'ensemble d'une zone industrielle et permettent le raccordement rapide de lignes individuelles. Certaines difficultés d'installation font qu'à cette fin on donne souvent la préférence au cuivre. Néanmoins, en Hongrie, l'EKA a mis au point une technique efficace pour raccorder ces

lignes secondaires à des barres conductrices en aluminium soit de manière permanente, soit à l'aide de prises appropriées.

On emploie des barres à revêtement métallique dans les centrales électriques et dans les réseaux de distribution pour raccorder les générateurs et les transformateurs [33]. Chaque phase des barres est revêtue séparément de métal, ce qui exclut pratiquement tout risque de courts-circuits.

Appareils à revêtement métallique

Les calculs montrent que l'emploi d'acier de construction dans les appareils supportant des courants supérieurs à 1 000 A donne lieu à des courants secondaires et à des pertes considérables. Vers 3 000 A, l'acier ne peut plus être employé dans ces appareils et doit être remplacé par un alliage d'aluminium [34].

En tant que matériau de construction, l'aluminium gagne également du terrain pour les panneaux de commutation exposés aux intempéries car il permet de réduire la corrosion et les frais de maintenance à un minimum raisonnable [34]. La Hongrie a exporté des panneaux de commutation en aluminium pour plus de 50 centrales électriques à turbines à gaz [35].

Le matériel électrique employé dans des locaux abrités peut être monté sur des panneaux de commutation en aluminium revêtu de métal; les sous-stations abritant le matériel électrique peuvent être montées facilement [34].

L'emploi de l'aluminium dans les sous-stations de transformateurs exposées aux intempéries présente des avantages analogues [35].

Une application intéressante de l'aluminium est faite dans les panneaux de commutation protégés par de l'hexafluorure de soufre gazeux où les barres conductrices et les équipements sont montés dans une carcasse en alliage d'aluminium.

Commutateurs exposés aux intempéries

Les sous-stations dans la gamme de 35 à 750 kV sont généralement non abritées comme la plupart des barres d'alimentation aujourd'hui en service, qui sont faites en alliage d'aluminium et se présentent sous forme de conducteur torsadé ou de tube.

Dans les pays industriels, on a tendance à doter les sous-stations non abritées de panneaux de commutation à revêtement métallique et à isolation par hexafluorure de soufre gazeux, ce qui permet d'économiser beaucoup d'espace. Sous licence de la BBC de Suisse, l'usine électrique de Ganz (Hongrie) a commencé la production de stations de transformateurs de 120 kV et 400 kV construits selon ce principe. De tels appareils (coupe-circuits, commutateurs de mesure, etc.) sont également employés utilement dans les sous-stations à barres d'alimentation traditionnelles.

Industrie chimique et industrie alimentaire

Dès les tout débuts de l'histoire de l'aluminium, l'industrie chimique et l'industrie alimentaire ont été de grands acheteurs de matériaux de construction, d'emballage et de stockage. L'intérêt de l'aluminium dans ces domaines s'explique en grande partie par sa tenue à la corrosion, son absence de toxicité, la facilité avec laquelle on le travaille, sa légèreté et parce que, dans la plupart des cas, il remplace avantageusement l'étain. Le rythme de sa croissance s'est néanmoins ralenti récemment après l'apparition de l'acier inoxydable et des plastiques. Ces matériaux, dont l'emploi abaisse le prix des produits fabriqués, ont depuis les dix dernières années pris pied sur le marché, au détriment de l'aluminium. Pour lutter contre cette tendance, les transformateurs d'aluminium se sont efforcés de trouver de nouveaux débouchés, de moderniser les techniques existantes ou d'en trouver de nouvelles afin de produire de grandes quantités avec le maximum de rentabilité. Il s'ensuit que la gamme des articles en aluminium employés dans l'industrie chimique et dans l'industrie alimentaire évolue rapidement. Les risques que supposent les innovations étant élevés, une étude approfondie du marché s'impose.

Emploi de l'aluminium dans l'industrie chimique

Les progrès accomplis récemment par les secteurs de la chimie organique et de la chimie minérale nécessitent des réservoirs de stockage et des conteneurs de transport très perfectionnés. Dans de nombreux cas, le cuivre étamé, le blanc ou l'acier revêtu de plomb ne satisfont plus aux nouveaux impératifs techniques qui sont de plus en plus rigoureux. C'est pourquoi l'aluminium, avec sa bonne tenue à la corrosion et son faible poids, a pu gagner du terrain dans des domaines tels que la fabrication d'oxygène, d'acide nitrique et d'acide acétique. Au début, les prix élevés de l'acier inoxydable ont favorisé cette tendance. Depuis, les prix de l'acier inoxydable sont tombés et l'on commence à avoir une expérience assez considérable de l'emploi de l'aluminium. A l'heure actuelle, ces deux considérations primordiales déterminent en grande partie les cas où, dans l'industrie chimique, il est plus avantageux d'employer l'aluminium.

A titre d'exemples d'application nécessitant de grandes quantités d'aluminium pour les constructions dont a besoin l'industrie chimique, nous citerons la fabrication de silos, de réservoirs, de conteneurs de transport et autres équipements auxiliaires.

Les silos d'entreposage ont pris une importance accrue depuis que les capacités de fabrication et d'entreposage des plastiques augmentent dans le

monde entier. Ils sont très en faveur chez les transformateurs de PVC et de polypropylène. Leur volume va de 150 à 500 m³; des unités plus petites de 50 à 150 m³ servent à assurer les stockages intermédiaires aux diverses étapes de la fabrication.

Les récipients fixes ou mobiles sont surtout employés pour la fabrication de produits chimiques légers, de produits pharmaceutiques et de peintures. Les récipients mobiles servent également au transport d'acide nitrique concentré, d'acide acétique et de certains produits de l'industrie pétrolière (pétrole, gaz liquides). La fabrication de récipients pour le transport de gaz liquides nécessite une grande expérience. En Hongrie, on emploie avantageusement depuis plus de vingt ans pour les gaz liquides des bouteilles et des cylindres en aluminium de 0,5 à 25 litres fabriqués par emboutissage profond avec étirage des parois. Un cylindre de 25 litres pèse 3 kg de moins que le même en acier. De plus, les cylindres en aluminium n'ont pas besoin d'être repeints tous les trois ans.

Dans l'industrie chimique, les refroidisseurs à air sont en général composés de tubes d'aluminium à ailettes ou d'ailettes d'aluminium entourant un tube d'acier, d'acier résistant aux acides, ou de cuivre. Les tubes dotés d'ailettes transversales façonnées sont généralement fabriqués dans les usines de demi-produits, selon une technique spéciale. Les plus grands consommateurs de tubes à ailettes en aluminium sont les raffineries de pétrole et les usines chimiques où ces refroidisseurs sont partie intégrante d'un système complet d'échangeurs de chaleur.

Les tubes souples en aluminium fabriqués par laminage continu de bandes d'aluminium gagnent constamment du terrain pour les conduites d'air des usines chimiques. Pour les conduites en tôle à section carrée, l'emploi de tubes d'acier galvanisé est encore largement répandu mais, en raison de leur souplesse, les tubes en aluminium devraient eux aussi gagner du terrain et être employés tant à l'intérieur des usines que pour les conduits de cheminées.

Dans l'industrie chimique, la plupart des tubes isolés doivent être dotés d'un revêtement protecteur supplémentaire. On emploie généralement des bandes en aluminium résistant à la corrosion et faciles à manier; les bandes en acier galvanisé ont été presque complètement remplacées par des bandes en aluminium.

Emploi de l'aluminium dans les brasseries et dans les laiteries

Pendant plusieurs siècles on a employé des appareils en cuivre étamé, en bois, puis en fer-blanc pour le brassage de la bière et le traitement du lait. C'est à partir de 1930 qu'on a commencé à

employer l'aluminium. Plusieurs dizaines d'années d'expérience ont montré à l'abondance que les appareils en aluminium employés pour la fabrication et le stockage des produits de brasserie et de laiterie sont plus économiques et qu'ils présentent de nombreux avantages techniques, notamment les suivants :

a) L'aluminium ne réagit pas avec les substances alimentaires, sauf avec le lait suri où se produit une très légère réaction.

b) Contrairement aux appareils et aux contenants de transport (par exemple bidons de lait) faits en cuivre étamé ou en fer-blanc, ceux qui sont en aluminium ne nécessitent aucun entretien.

c) L'aluminium qui se prête bien à la déformation plastique et au soudage est idéal pour produire en grand et de manière rentable des contenants et autres articles (fûts à bière, bidons de lait).

Pour l'emploi de l'aluminium dans les brasseries et les laiteries, il faut tenir compte des considérations suivantes :

a) Comme matière première on ne doit employer que de l'aluminium de fonderie exempt de cuivre [la teneur en cuivre ne doit pas dépasser 0,1 % selon les normes de l'industrie allemande (DIN) et 0,2 % à 0,3 % selon certaines normes des Etats-Unis], soit non allié soit allié avec un maximum de 3 % de magnésium ou une combinaison d'un maximum de 1 % de magnésium, 1,2 % de silicium et 1 % de manganèse;

b) Il convient d'accorder la préférence aux produits tout d'une pièce obtenus par emboutissage profond. Les accessoires — qui, dans la mesure du possible, doivent être faits avec le même matériau que la pièce principale — ne doivent être assemblés que par soudage à l'arc sous gaz protecteur;

c) Il faut accorder une attention toute spéciale à la propreté ainsi qu'à la bonne aération des ateliers et des salles d'entreposage; une fois les essais de résistance à la pression terminés, il faut sécher le matériel afin d'éviter les effets nocifs qu'entraîne la condensation de la vapeur. De même, dans les plans d'aménagement, il ne faut pas oublier que les appareils en aluminium ont un plus grand encombrement;

d) Les surfaces intérieures en contact direct avec la bière ou le lait doivent être polies (mécaniquement par exemple);

e) Des revêtements organiques ne peuvent être appliqués que sur des enduits homologués par les autorités sanitaires. Par exemple, on ne peut appliquer un revêtement de résine à l'intérieur des fûts à bière que sur un enduit spécial obtenu par oxydation anodique comme celui que l'usine

hongroise de réfrigérateurs a mis au point [36] (voir également chapitre V).

Tous les équipements et les conteneurs de transport doivent être maintenus dans un état de propreté scrupuleuse. Pour la stérilisation des équipements de laiterie, le mieux est d'employer une solution de formol inhibé à l'orthosilicate. Le tartre qui se dépose sur la surface interne des réservoirs à bière s'élimine à l'aide de silice trempée dans une solution de dextrine à laquelle on a ajouté 10 % d'acide nitrique. Il faut chasser ce mélange avec un jet d'eau chaude après 24 heures [37]. On peut utilement employer de la soude et des inhibiteurs (solutions contenant du métrasilicate de sodium ou un orthophosphate de sodium trimétallique). Le nettoyage des appareils en aluminium contenant des éléments en acier est décrit dans le brevet n° 2 948 392 déposé aux Etats-Unis d'Amérique [38].

Malgré ses nombreuses propriétés utiles, l'aluminium, depuis quelques dizaines d'années, subit la vive concurrence de l'acier inoxydable qui marque des points. La position de l'aluminium est devenue précaire depuis que le prix relatif de l'acier inoxydable a diminué et que de nouveaux détergents sont apparus sur le marché [39]. On peut résumer comme suit la situation actuelle et les perspectives pour les dix années à venir :

a) L'aluminium maintiendra sa position dans les brasseries et les laiteries si l'on produit en grandes quantités des récipients et des conteneurs de transport (tels que fûts à bière, nouveaux types de conteneurs et de bidons frigorifiés pour le transport du lait), de grands conteneurs fixes ou mobiles ainsi que des réservoirs de stockage où il est particulièrement important d'avoir une bonne conductivité thermique;

b) L'acier inoxydable devrait l'emporter pour les appareils plus complexes qu'il faut nettoyer fréquemment (par exemple, les centrifugeuses et les écrémeuses).

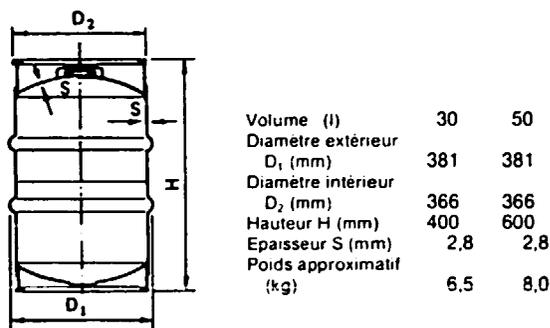
Brasseries

La plupart des appareils employés dans les brasseries modernes sont en aluminium qui a complètement remplacé le bois et le cuivre étamé. Pour le stockage, la fermentation et le transport, on emploie de grands réservoirs en aluminium non allié de 5 à 10 mm d'épaisseur. Les grandes caves souterraines de fermentation et de stockage sont refroidies par des échangeurs de chaleur et des conduites en aluminium. On peut également employer utilement des appareils en aluminium pour saturer la bière en gaz carbonique. Dans certains cas, on a construit des chaudières en aluminium qui remplacent les chaudières en cuivre étamé. Les récentes variations des prix relatifs de l'aluminium et de l'acier inoxydable ont entraîné

un recul de l'aluminium. Néanmoins, pour une dizaine d'années encore, la position de l'aluminium dans la fabrication de petits fûts à bière (25 à 100 litres) semble bien assise et incontestée. Le poids d'un fût en aluminium n'est que le tiers ou le quart de celui d'un fût en bois. Avantage supplémentaire, il ne nécessite aucun entretien.

Les fûts à bière en aluminium sont généralement en alliage AlMgSi vieilli, les deux moitiés de la carcasse produites par extrusion profonde étant réunies par soudage à l'arc sous gaz protecteur. Pour des raisons de protection et d'hygiène, la surface interne du fût est soit revêtue d'une couche d'aluminium pur à 99,8 % soit, après avoir été revêtue d'un enduit approprié, recouverte d'une pellicule de résine synthétique appliquée à la flamme sur la paroi interne du fût. La deuxième solution améliore la résistance chimique et permet d'utiliser le fût à d'autres fins également. En Hongrie, à l'heure actuelle, 100 000 fûts de ce genre sont fabriqués chaque année. Récemment, des barils de 30 et 50 litres mis au point au Royaume-Uni et plus faciles à fabriquer ont été mis en service [39] (voir figure XVI).

Figure XVI. Baril à bière avec trois rangées circulaires de soudures par points et bonde soudée



Laiteries

Dans les laiteries industrielles, la situation du matériel, par exemple les récipients, le matériel frigorifique et de pasteurisation, est analogue à celle des brasseries. Pour les appareils de refroidissement ou de chauffage à double paroi, on emploie de plus en plus une combinaison de deux métaux. La coque extérieure est en aluminium et la partie intérieure, qui est en contact direct avec le lait ou les produits laitiers, en acier inoxydable. Cette combinaison facilite le nettoyage. Dans les appareils de refroidissement et de chauffage l'emploi de tubes entièrement en tôle d'aluminium (colaminage) est très répandu. Ces derniers dont la fabrication est simple ont en outre une grande efficacité thermique.

Pour le ramassage et la distribution du lait, les bidons en aluminium ont complètement remplacé les bidons en acier étamé. L'étamage auquel

il fallait procéder tous les trois ou quatre ans n'étant plus nécessaire, les bidons en aluminium emboutis fabriqués en grande série et avec un fort rendement sont maintenant universellement employés. Pour des raisons de résistance mécanique et d'économie de matériau, on emploie de plus en plus pour leur fabrication des alliages d'AlMn, et de AlMgSi vieilli. Une nouvelle technique d'emboutissage qui réduit l'épaisseur du bidon est très efficace et permet de fabriquer annuellement des grandes séries de 100 000 bidons.

De nombreuses modifications ont été apportées récemment à la chaîne des opérations, du ramassage au stockage du lait. Le lait doit être tenu frais à la ferme jusqu'à son ramassage par des véhicules de transport réfrigérés; c'est pourquoi les réservoirs de stockage et les conteneurs de transport doivent être munis d'une double paroi. La partie extérieure et les échangeurs de chaleur (bouches d'amenée d'air et autres tuyaux) peuvent être en aluminium. L'intérieur est généralement en acier inoxydable, ce qui accélère et rend plus efficaces les opérations de lavage.

Réipients

Autrefois, le fer-blanc était le matériau traditionnellement employé pour les boîtes de conserve, les couvercles, les capsules et autres articles destinés à l'industrie alimentaire. Aujourd'hui, l'aluminium est en voie de supplanter le fer-blanc. Une des raisons en est le prix de l'étain. La production mondiale de fer-blanc, bien qu'ayant un taux moyen de croissance annuelle de 9 à 10 %, ne suffit plus à satisfaire la demande mondiale actuelle. En 1976, la production mondiale d'étain (non compris la Chine, l'Union soviétique et autres pays à économie planifiée) atteignait 178 000 tonnes dont les usages finals étaient les suivants :

Usage final	Pourcentage en poids
Fer-blanc	40
Soudure	25
Roulements	10
Industrie chimique	8
Revêtement de surface	5
Divers	12

Quelque 75 % des emballages en aluminium servent à l'industrie alimentaire (conserves alimentaires et boissons). Nulle part ailleurs peut-être la concurrence entre l'aluminium et d'autres matériaux, notamment l'étain, n'est aussi poussée que dans le secteur de l'emballage. Une raison en est que le coût des emballages modernes est souvent plus élevé que celui du produit proprement dit (cosmétiques et certaines denrées alimentaires). Le choix d'un moyen économique et technique-

ment réalisable peut donc réduire considérablement les coûts globaux de production*.

Des études faites à l'échelon international ont montré qu'il existait un rapport très net entre le PIB et l'emploi d'emballages modernes en aluminium. Dans les pays où le PIB dépasse 1 000 dollars par habitant l'usage des boîtes à bière et boissons non alcoolisées, ainsi que les récipients d'aérosols — essentiellement fabriqués en aluminium — se répand de façon spectaculaire. Toutefois, il ne suffit pas de constater cette corrélation pour faire pencher la balance d'un côté ou de l'autre. Pour porter un jugement valable, il faut tenir compte de la situation locale et en particulier de l'existence de machines et de matériel pour fabriquer les boîtes.

Les avantages de l'aluminium sont les suivants :

a) Matériau souple et facile à travailler. La résistance mécanique de l'aluminium non allié est toutefois inférieure à celle du fer-blanc. Il ne serait donc pas économique d'employer de l'aluminium non allié. Même une épaisseur de 0,30 à 0,35 mm ne peut assurer une résistance mécanique suffisante; un alliage est donc indispensable;

b) Tenue élevée à la corrosion. La quantité annuelle d'ions d'aluminium dissous dans les aliments par suite de la corrosion est de 6 à 70 mg par kg de denrée;

c) Aucun rejet d'ions métalliques toxiques, que la surface interne soit ou non revêtue de résine. La surface de la viande, traitée ou non, ne noircit jamais à l'intérieur de la boîte; les denrées contenant des acides aminés à teneur en soufre (par exemple : poisson, petits pois et choux-fleurs) ne présentent aucune réaction sulfureuse au chauffage;

d) Faible poids spécifique qui permet de réaliser de grandes économies comme indiqué ci-après pour une boîte de 240 ml :

Matériau	Poids (en g)
Fer-blanc	77
Aluminium	27
Feuille d'aluminium	15

e) A l'heure actuelle, les chaînes de production permettent de fabriquer de 800 à 1 000 unités à la minute.

La quantité annuelle de boîtes de métal fabriquées dans le monde entier est de l'ordre de 2 à $2,1 \times 10^{11}$ unités. Leur fabrication nécessite quelque $8,5 \times 10^9$ m² de tôle fine par an (avec un taux de croissance annuelle de 2 à 5 %); l'alu-

*Un exemple typique des économies qu'on peut réaliser en choisissant un emballage adéquat est celui d'un emballage en aluminium et plastique qui peut servir à conserver la viande et les fruits. Un lot de 1 000 emballages pèse 6 kg; 1 000 boîtes en fer-blanc de dimensions comparables pèsent 50 kg [40].

minium compte pour quelque 10 % de ce total [41].

Dans les pays industriels, la part des boîtes en aluminium dans le total de la fabrication était, en 1975, la suivante :

Pays	Pourcentage
Etats-Unis d'Amérique	15,0
France	10,1
Italie	9,4
République fédérale d'Allemagne	9,3
Norvège	9,0
Royaume-Uni	7,0

De 1965 à 1971, la quantité d'aluminium employée aux Etats-Unis pour la fabrication de boîtes a quadruplé alors que celle du fer-blanc n'a augmenté que 1,3 fois. Pendant la même période, la part relative de l'aluminium est passée de 1,9 % à 5,9 % [42].

Les tableaux 30 et 31 donnent des statistiques de la production de boîtes aux Etats-Unis. Pendant la période de 1968 à 1972, alors que la production totale de boîtes pour fruits et jus de fruits en conserve ($5,8$ à $6,0 \times 10^9$) est restée pratiquement constante, et que le nombre de boîtes pour légumes et jus de légumes en conserve est également resté relativement constant, le nombre des boîtes en aluminium a sensiblement augmenté. Alors que le total des boîtes de bière est passé de $1,72 \times 10^{10}$ en 1968 à $2,18 \times 10^{10}$ en 1972, la part des boîtes en aluminium est passée de 24,6 à 33,9 %. Depuis, la part des boîtes en aluminium ne cesse d'augmenter. En 1980, elle a représenté presque 70 % de la totalité des boîtes de bière et de boissons non alcoolisées. Quant aux boissons non alcoolisées, alors que la production totale est passée de $1,07 \times 10^{10}$ unités en 1968 à $1,54 \times 10^{10}$ unités en 1972, la part de l'aluminium, de 4,8 % qu'elle était, a atteint 11,7 % [40].

TABLEAU 30. EMPLOI DU FER-BLANC ET DE L'ALUMINIUM POUR LA FABRICATION DE BOÎTES MÉTALLIQUES AUX ÉTATS-UNIS, 1965-1971

(1965 = 100)

Année	Fer-blanc		Aluminium		Aluminium par rapport à l'étain	
	Milliers de tonnes	Indice	Milliers de tonnes	Indice	Pourcentage en poids	Indice
1965	4 407	100	85	100	1,9	100
1966	5 591	126	113	133	2,0	105
1967	4 671	106	158	186	3,4	179
1968	4 997	103	189	222	3,8	200
1969	5 149	117	246	289	4,8	253
1970 ^a	5 407	123	295	347	5,5	289
1971 ^a	5 715	130	345	406	6,0	316

Source [41]

^aEstimation.

TABLEAU 31. ESTIMATION DE L'EMPLOI DES BOÎTES AUX ÉTATS-UNIS (10¹⁰ unités)

Type	1968	1969	1970	1971	1972
Fer-blanc					
Fruits et jus de fruits	5,9	5,4	5,6	5,5	5,8
Légumes et jus de légumes	10,2	9,7	10,0	9,6	9,1
Bière	13,8	14,5	15,5	14,6	14,4
Boissons					
non alcoolisées	10,2	11,6	12,5	13,1	13,6
Divers	22,7	22,6	23,5	23,1	23,6
Total partiel	62,8	64,8	67,1	65,9	66,5
Aluminium					
Bière	3,4	4,2	4,7	5,9	7,4
Boissons					
non alcoolisées	0,5	0,7	1,0	1,3	1,8
Total partiel	3,9	4,9	5,7	7,2	9,2
Total	66,7	69,7	72,8	73,1	75,7

Les boîtes en aluminium sont généralement faites de bandes d'aluminium anodisées, laminées à froid ou de tôles revêtues de résine synthétique ou laminées avec du plastique. La pellicule de résine synthétique améliore considérablement la tenue à la corrosion de la surface d'aluminium. On emploie une résine synthétique à base d'époxy, de phénol ou de vinyle qui sèche en 30 à 40 secondes à une température de 250 à 350 °C.

Dans les pays industriels, 70 % des boîtes en aluminium servent à la mise en conserve de la bière, des jus de fruits et autres boissons non alcoolisées.

Pour les emballages, on emploie généralement dans l'industrie alimentaire les alliages d'aluminium suivants :

Usage	Alliage	Normes des Etats-Unis n°
Conserves alimentaires	AlMg _{2,5}	5052
Conserves de boissons	AlMg ₁ Mn ₁	3004
Capsules	AlMgMn	5182 et 5082

Certes, la production de bandes faites dans ces alliages coûte plus que celles de bandes non alliées, mais la différence est compensée par les économies que leur résistance mécanique plus élevée permet de réaliser. Voici, par exemple, les économies obtenues avec de la bande d'aluminium à 99,5 % de 0,6 mm (43).

Alliage	Indice comparé à l'indice Al = 1.10 pour l'aluminium pur	Economies de matériau dues à la résistance mécanique plus élevée (en pourcentage)
AlMn ₁	1,04	28
AlMg ₁	1,16	20
AlMg ₁	1,38	32

Les emballages à parois minces sont, dans le monde entier, fabriqués à partir de demi-produits

laminés, c'est-à-dire de tôles, bandes ou feuilles. Jusqu'ici les emballages doivent être revêtus intérieurement de résine, et laqués et imprimés à l'extérieur. On y parvient à l'aide de deux techniques. Dans la première, on extrude à froid des blocs de métal. Les boîtes ou les tubes souples sont laqués et imprimés ultérieurement. Dans la seconde, on donne la forme voulue à des demi-produits déjà laqués et imprimés [44].

Boîtes et récipients

Dans la production des boîtes en aluminium les deux opérations principales sont la fabrication du récipient et de son couvercle.

L'extrusion à froid [45] a été le premier procédé qui ait permis de fabriquer des boîtes minces en aluminium d'une hauteur supérieure à leur diamètre à partir d'une pièce de métal. Pour y parvenir on imprime des chocs à des blocs de 2 à 4 mm d'épaisseur qui deviennent ainsi malléables. L'aluminium mou s'écoule avec une grande force à travers le trou situé entre une matrice creuse fixe et le poinçon, formant ainsi le corps de la boîte. Les presses à filer à froid employées en Europe sont généralement conçues pour 50 à 80 chocs à la minute. En raison de l'épaisseur des fonds des boîtes (1,1 mm) et des parois (0,3 à 0,35 mm), cette technique n'est pas économique, des quantités relativement importantes d'aluminium étant nécessaires. La hauteur des boîtes se trouve également limitée.

Les parois des boîtes [42] fabriquées par emboutissage profond sont généralement plus courtes que le rayon de leur fond mais ne peuvent jamais être supérieures à 2,5 fois ce dernier. Elles sont fabriquées avec des presses à excentrique de 30 à 100 tonnes.

Les boîtes fabriquées par emboutissage profond pour l'industrie alimentaire sont généralement faites en un alliage $AlMg_{2,5}$, qui se prête bien à la déformation plastique. Bien que ce matériau durcisse considérablement au formage à froid, il n'en reste pas moins suffisamment flexible. Pour cette opération on emploie généralement une bande demi-dure de 0,22 à 0,30 mm, anodisée et laquée. La boîte obtenue peut avoir une section circulaire, carrée, ovale ou elliptique. Si les boîtes sont fabriquées dans une usine éloignée du lieu où elles doivent être remplies, une forme conique peut être préférable car elle permet d'économiser de l'espace et, partant, de réduire les coûts de transport. Pour une conicité de 6° les économies d'espace peuvent aller jusqu'à 70 %.

Les parois des boîtes sont parfois renforcées par des cannelures qui en augmentent les dimensions. Les bandes d'alliage de 0,25 à 0,30 mm sont revêtues de laque en continu.

Les boîtes ont généralement un volume de 100 à 350 ml, leur surface intérieure est laquée et l'extérieur laqué ou imprimé.

Récemment, la demande de boîtes fabriquées par emboutissage profond a été telle que le Ministère des pêcheries de l'Union des Républiques socialistes soviétiques a monté à Dimitrovo une installation de laquage de bandes d'aluminium d'une capacité de 12 000 tonnes par an combinée à une usine qui fabrique par emboutissage profond des boîtes rondes ou ovales de faible hauteur avec couvercles arrachables pour les conserves de poisson. L'entreprise d'Etat des pêcheries maritimes de la République démocratique allemande exploite une usine analogue à Stralsund [41, 46]. L'usage de boîtes d'aluminium de petite capacité (100 à 200 ml) est très répandu en France, en Norvège et en Suisse pour l'emballage du poisson, des pâtés et pâtes, et du lait.

La consommation de bandes fines d'aluminium employées dans la fabrication des boîtes de conserve est de 200 000 à 250 000 tonnes par an qui remplacent quelque 400 000 tonnes de fer-blanc.

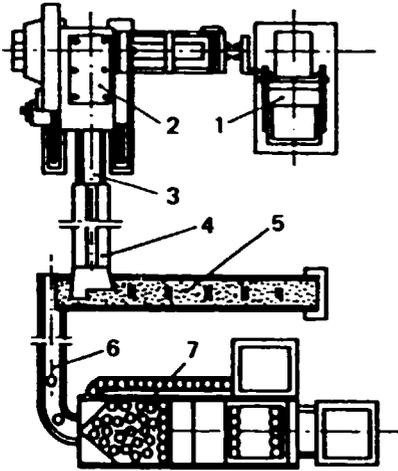
Malgré la grande différence des poids spécifiques du fer-blanc et de l'aluminium, le faible rendement de la technique d'emboutissage profond, imputable à la production importante de déchets, fait que 1 kg d'aluminium peut remplacer 2 kg de fer-blanc [47, 48]. Ce sont les conserveries elles-mêmes qui fabriquent la majorité des boîtes, mais une quantité importante est également fabriquée par des usines spécialisées.

Les chaînes automatiques de production de boîtes par emboutissage profond ont un rendement élevé. L'opération de base pour l'emboutissage est plus simple que les opérations que suppose le travail du fer-blanc notamment découpage, formage du corps, soudage, pose de la cornière annulaire et des fermetures. C'est pourquoi il est possible d'installer des presses à fort rendement fonctionnant simultanément, ce qui permet de gagner beaucoup d'espace. La figure XVII représente une chaîne de production moderne alimentée en tôles d'aluminium coupées aux dimensions et capable de produire 200 boîtes à la minute.

On place d'abord les tôles sur un mécanisme d'avance (1). Pour faciliter l'emboutissage et empêcher les tôles de se déchirer, il faut en huiler les surfaces. La presse automatique (2) découpe les tôles et les disques obtenus sont alors emboutis. Les déchets formés sont éliminés des bords par soufflage. Les boîtes sont ensuite amenées par un autre mécanisme d'avance (3) jusqu'à un réceptacle (4), et un collecteur (5) les fait passer sur un convoyeur (6) qui les conduit jusqu'à une machine de chargement (7) qui les empile en lots réguliers sur des palettes. Les déchets récupérés sont écrasés et expédiés à la refonte.

Les boîtes dont le diamètre est inférieur à 90 mm doivent être embouties avec des presses spéciales où 2 à 10 têtes fonctionnent simulta-

Figure XVII. Chaîne automatique de production pour la fabrication de boîtes par emboutissage profond (système Karges-Hammer)



Légende :

- 1 Mécanisme d'avance
- 2 Presse automatique
- 3 Mécanisme d'avance
- 4 Receptacle
- 5 Collecteur
- 6 Convoyeur
- 7 Machine de chargement

nément, qui produisent 200 à 1 000 boîtes à la minute.

Avec cette technique, il faut que les parois étirées des boîtes pour boissons contenant de l'acide carbonique aient des hauteurs égales à 1,5 à 3 fois leur diamètre. L'épaisseur initiale de la bande d'AlMg₂ ou d'AlMgMn non laquée est de 0,30 à 0,50 mm. On découpe d'abord les disques dans la bande dont on fait, par emboutissage, des cupules que l'on étire ensuite de manière classique pour en faire un corps cylindrique. On procède ensuite à l'étirage des parois. La paroi du corps de la boîte traverse de trois à cinq anneaux, le fond est légèrement concave et les parties inférieure et supérieure du matériau s'en trouvent renforcées. Lors de cette opération, le diamètre du corps est légèrement réduit (2 à 3 %) et sa hauteur multipliée parfois par plus de trois. La chaîne de fabrication fonctionne à raison de 200 unités par minute au minimum, bien que les chaînes à grand rendement puissent en produire jusqu'à 600 ou 650 boîtes à la minute.

La technique moderne d'étirage permet de fabriquer des boîtes des dimensions les plus courantes. Le fond d'une boîte de bière de 35 cl a 0,34 mm d'épaisseur et le corps (sauf les parties inférieure et supérieure qui ont 0,30 mm) une épaisseur de 0,125 mm. Elle pèse 9 g. Sa paroi peut résister à une pression de 70 N/mm². Le poids d'une boîte comparable extrudée à froid se situe entre 23 et 32 g.

Les boîtes à parois étirées sont ensuite dégraissées. La partie externe du corps est revêtue d'un enduit d'émail et passée entre les rouleaux de caoutchouc pour être imprimée. L'intérieur est revêtu de résine d'époxy et le laquage de l'intérieur et de l'extérieur se fait à la flamme en une seule opération. Enfin le corps est doté d'un anneau circulaire qui permet de fixer solidement le couvercle après remplissage. Ce procédé tire tout le parti possible des propriétés mécaniques de l'aluminium. Il permet de fabriquer des boîtes de n'importe quelles dimensions qui peuvent contenir des boissons renfermant de l'acide carbonique dans un milieu parfaitement stérile [49].

Les bandes d'aluminium employées n'ont pas besoin d'être revêtues en rouleaux mais les normes techniques sont très rigoureuses. Ce procédé gagne du terrain surtout dans les pays industriels où l'emploi de boîtes à parois étirées par emboutissage profond se développe à un rythme annuel moyen de 15 à 20 %. Le tableau 32 donne la consommation aux Etats-Unis en 1973 et 1974.

On trouvera ci-après une estimation de la ventilation des emballages pour boissons aux Etats-Unis :

	Pourcentage
Boîtes en aluminium	30
Boîtes en fer-blanc	30
Bouteilles en verre	40

Selon des renseignements fournis par une entreprise de brasserie aux Etats-Unis, en 1968, les dépenses d'investissement pour une installation d'une capacité annuelle de 50 millions d'unités se sont élevées à 2 millions de dollars. Les dépenses d'investissement pour une installation plus moderne (1,3 × 10⁹ unités par an) ont été de 15 millions en 1980.

Les boîtes en aluminium pour boissons sont dotées de couvercles spéciaux qui en facilitent l'ouverture. Aujourd'hui, les Etats-Unis emploient 770 000 tonnes d'aluminium pour la fabrication

TABLEAU 32. EMPLOI DES BOÎTES A PAROIS ETIRÉES PAR EMBOUTISSAGE PROFOND AUX ETATS-UNIS, 1973 ET 1974

Usage final et matériau	Consommation (en millions d'unités)		Variation (en pourcentage)
	1973	1974	
<i>Boissons gazeuses non alcoolisées</i>			
Fer-blanc	15 862	15 482	-2,4
Aluminium	1 731	2 017	+16,5
<i>Bière</i>			
Fer-blanc	14 959	14 017	-6,3
Aluminium	8 905	11 862	+33,2
Total	41 457	43 378	+4,6

Source [50]

de telles boîtes, soit 12% de la consommation totale d'aluminium du pays. La rapidité avec laquelle ces boîtes se sont imposées s'explique en grande partie par les économies que permettent de réaliser la récupération des déchets. Cette dernière est assurée par des fonderies qui coulent en continu des bandes larges telles que celle qui est installée dans la plus grande brasserie des États-Unis. Cette installation fabrique chaque année 4×10^9 boîtes avec fermetures et consomme quelque 100 000 tonnes d'aluminium. Elle fonctionne selon un procédé mis au point par Alusuisse et traite environ la moitié (environ 50 000 tonnes) de l'aluminium que la brasserie consomme chaque année pour fabriquer ses boîtes.

En 1977, une entreprise du Royaume-Uni a lancé une campagne expérimentale de récupération des boîtes en aluminium auprès de 5 000 foyers. Les résultats ont été des plus satisfaisants.

Couvercles

Les couvercles des boîtes en aluminium sont semblables à ceux des boîtes en fer-blanc. Il est facile de les ouvrir ou de les arracher. Il existe deux types de couvercles arrachables; les couvercles des boîtes de bière et de boissons non alcoolisées sont conçus pour qu'une partie seulement soit enlevée alors que les couvercles des boîtes de conserves de viande, de poisson et de légumes s'ouvrent complètement et peuvent être enlevés. Au milieu des couvercles qui ne s'ouvrent que partiellement, il existe une petite encoche en forme de coin qui présente une légère dépression de 0,09 mm d'épaisseur, dotée d'un anneau riveté. Quand on soulève l'anneau la surface rompt et on ménage une ouverture dans le couvercle en tirant sur l'anneau.

Dans les systèmes antérieurs de couvercles qui s'ouvraient complètement il existait une dépression en spirale de 1,5 à 2 tours partant du centre du couvercle vers l'extérieur, avec un anneau d'arrachage riveté au milieu. Ce système présentait les inconvénients suivants :

- a) La matrice nécessaire à la fabrication du couvercle était compliquée et coûteuse;
- b) La surface à arracher était trop longue;
- c) On risquait de se couper les doigts ou la main;
- d) La spirale réduisait la rigidité du couvercle.

Dans les nouveaux systèmes, le couvercle n'est aminci que le long du bord de sa circonférence. On n'ouvre plus la boîte avec une bague rivée mais avec un plongeur qui joue le rôle de levier à double bras. Les couvercles arrachables sont faits en alliage AlMg_{1,5}Mn (ASTM 5 182 H 19). Ils ont une épaisseur de 0,3 à 0,35 mm et sont

revêtus de résine époxy d'un côté. Leur résistance à la traction est de 300 à 370 N/mm², leur point de rupture se situe entre 270 et 330 N/mm².

Couvercles pour pots

La conservation de denrées alimentaires dans des pots en verre fermés par des couvercles en fer-blanc soulève certaines difficultés d'ordre technique. Au chauffage de certaines denrées, le soufre libéré peut réagir avec le fer contenu dans le fer-blanc et donner naissance à des composés sulfureux de couleur noire qui tachent la surface du couvercle. Les couvercles en aluminium ne présentent pas cet inconvénient. Il en existe deux types découpés dans des bandes d'aluminium de 0,15 à 0,25 mm d'épaisseur laqués d'un côté et imprimés de l'autre.

Les trois principaux types que l'on trouve sur le marché sont prévus pour les aliments chauffés à une température inférieure à 100 °C, pour les saumures et pour les aliments portés à une température supérieure à 100 °C.

En Europe, les tôles d'alliages d'aluminium dans lesquelles on fait les couvercles sont généralement laquées au moyen d'un appareil venant du Royaume-Uni, imprimées à l'aide d'une presse multicolore fabriquée en République fédérale d'Allemagne et flambées dans un four fabriqué également en République fédérale d'Allemagne. La tôle laquée et imprimée est découpée en bandes à l'aide d'une scie circulaire italienne. Les couvercles sont ensuite formés et colletés. Enfin, on applique et fait chauffer dans une étuve un composé de colmatage à l'aide d'un matériel et d'un fourneau qui proviennent de la République fédérale d'Allemagne.

Le couvercle est fixé à l'aide d'une machine de 1 à 10 têtes qui peut fabriquer de 1 200 à 15 000 unités à l'heure. (Il existe également des couvercles universels, fabriqués en République fédérale d'Allemagne qui sont fixés par des machines à trois, six et neuf têtes dont la capacité va de 800 à 12 000 unités à l'heure.)

Capsules pour bouteilles

On n'est pas encore parvenu à remplacer les capsules de fer-blanc dentelées, traditionnellement employées pour les bouteilles de boissons non alcoolisées et de bière par des capsules en aluminium. Toutefois, d'autres types de fermetures spéciales en aluminium ont été mis au point et leur emploi s'est généralisé.

On emploie des capsules à vis pour les bouteilles de boissons alcoolisées. Ces capsules sont dotées d'anneaux de sécurité qui se brisent quand on ouvre la bouteille pour la première fois. Elles sont faites à partir de bandes d'aluminium à 99,5% de 0,15 à 0,25 mm d'épaisseur qui se prête parfaitement à un emboutissage en une seule ou

en plusieurs fois. L'intérieur est revêtu de résine d'époxy et d'une laque adhésive qui assure l'obturation. L'extérieur est laqué et imprimé. Leur prix de revient est environ la moitié ou le tiers de celui des bouchons classiques.

Certaines capsules en aluminium sont plus simples et dotées d'une languette d'arrachage. On s'en sert en général pour fermer les bouteilles en verre de 5 à 10 centilitres; elles sont faites à partir de simples bandes étroites d'aluminium de 0,18 mm d'épaisseur. Elles se sont également imposées en France pour la fermeture des bouteilles plastiques et des bouteilles en verre de 0,5 à 1 litre [47].

Tubes souples

La plus grande partie de l'aluminium employé dans les emballages l'est sous forme de tubes souples que l'on jette après usage. Ces emballages sont hygiéniques, peu coûteux et bien plus légers que les autres emballages traditionnels. Ils assurent une protection efficace contre les influences nocives, tant chimiques que physiques, de l'environnement.

Ces tubes sont fabriqués par extrusion à froid à partir de pastilles d'aluminium de 3,5 mm de diamètre découpés dans des bandes d'une pureté de 99,5 à 99,7 % produites en coulée continue. Ils se présentent sous forme de tubes de 50, 100 et 200 g. D'une épaisseur de 0,11 mm, ils sont hermétiques, sans soudure, résistent à la chaleur, ne cassent pas, sont flexibles et on peut les stériliser. L'orifice peut en être fermé pour les aliments et ouvert pour les cosmétiques et les produits de nettoyage domestiques. Pour la décoration des plats (mayonnaise, pâte à sandwich, crème fouettée), l'orifice peut être étoilé. A l'extérieur peuvent être imprimés des motifs multicolores, des textes ou des slogans publicitaires. La surface interne est revêtu de deux pellicules de résine synthétique à base d'époxy, appliquée à la flamme, de 6 μ m d'épaisseur.

Les dimensions courantes des tubes souples sont de 30 \times 150 mm pour 80 g et 40 \times 180 mm pour 150 g. Ces tubes souples peuvent être employés pour des articles tels que coulis de tomates, condiments à base de paprika et de tomate, moutarde, pâtes d'ail, mayonnaise, pâte de viande, lait concentré, fromage, crème, cacao, jus de viande, pâtés de foie, confiture, crèmes glacées et jus de fruits concentrés. L'industrie alimentaire représente quelque 10 % de la consommation totale de tubes souples en aluminium [51]. En Hongrie, on peut estimer qu'à long terme ce chiffre passera à 25 %.

Afin de réduire les frais de transport, on met au point des tubes de forme conique qui devraient permettre de réduire de 30 à 40 % l'espace nécessaire au transport.

L'emploi des tubes souples en aluminium connaît dans le monde entier une croissance spectaculaire tant pour les aliments que pour les cosmétiques ou les produits d'entretien ménager. En République fédérale d'Allemagne, le nombre des tubes souples fabriqués en 1976 s'est élevé à 1 milliard 230 millions d'unités dont 1 milliard 100 millions en aluminium. Aux Etats-Unis, en 1970 la production de tubes souples est passée à quelque 1 milliard 120 millions d'unités destinées aux produits pharmaceutiques et aux cosmétiques; 67 % de ces tubes étaient en aluminium.

Même un double revêtement intérieur de résine ne pouvant protéger complètement les aliments de la corrosion, on a mis au point un nouveau type de tube souple en aluminium, dans lequel des plastiques assurent un surcroît de protection [52]. Il comporte trois couches superposées.

a) Une couche intérieure de polyéthylène de 0,050 à 0,100 mm pour augmenter la tenue à la corrosion. Cette couche maintient plus longtemps la qualité du produit et permet de souder le tube;

b) Une couche intermédiaire d'aluminium de 0,020 à 0,050 mm crée une barrière contre les gaz et la vapeur et assure une protection contre la lumière;

c) Une couche extérieure de polyéthylène de 0,050 à 0,100 mm protège contre l'environnement et permet les opérations de soudage et d'impression.

Les rouleaux de feuille ainsi obtenus sont alors formés en tubes et en coques soudés à fréquence élevée. On soude ensuite à la partie supérieure du tube un embout de plastique sur lequel on peut visser un bouchon. Après remplissage, on colmate hermétiquement avec de la soudure l'orifice du tube. On peut imprimer des textes ou des dessins polychromes sur la couche extérieure blanche, saturée de pigments, qui reçoit ensuite une pellicule de vernis transparent.

La capacité d'une telle chaîne de production est de 600 à 1 000 unités à la minute. Ce procédé relativement simple comporte moins d'opérations que la fabrication de tubes à partir de pastilles d'aluminium classiques.

Le tableau 33 donne les propriétés des tubes souples faits en aluminium, en plastique ou dans une combinaison de ces deux matériaux.

Feuille d'aluminium

Emballages

Dans les emballages, les feuilles d'aluminium ont complètement remplacé les feuilles d'étain.

Le taux annuel moyen de progression de la production de feuille d'aluminium est de 10 à 12 %, mais celui des feuilles d'aluminium laminées,

TABLEAU 33 - PROPRIÉTÉS DES TUBES SOUPLIS

Propriétés	Combinaison d'aluminium et de	
	Plastique	Aluminium
Protection contre la lumière	-	-
Étanchéité à la vapeur	-	-
Résistance aux ingrédients corrosifs dans :		
Pâtes dentifrices	-	-
Pâtes dentifrices au fluor	-	0
Moutarde, extraits de tomate	-	-
Déformation permanente une fois vidé	-	-
Vulnérabilité du tube vidé	0	-
Possibilité de présentation sous forme conique	-	-
Possibilité d'impression circulaire	-	-

Note : - favorable
0 moyenne
défavorable

à haute finition ainsi que des combinaisons de feuilles d'aluminium et de plastique est encore plus élevé. A l'heure actuelle, l'industrie alimentaire compte pour 60 à 70 % du total de la consommation mondiale.

Afin d'en améliorer les propriétés, on combine souvent la feuille d'aluminium avec d'autres matériaux (papier, vélin, plastiques) qui reçoivent un revêtement protecteur simple ou imprimé de laques colorées ou neutres résistant à la chaleur et des pellicules coulées à chaud. Une combinaison de ces matériaux peut donner toutes sortes de produits dont l'industrie alimentaire est la principale consommatrice. Le tableau 34 donne ces combinaisons et leur usage final dans cette industrie.

Barquettes

Les barquettes à usage commercial servent à contenir des plats cuisinés, des fruits, des légumes, des pâtisseries ou des confiseries. Elles sont faites en bandes de 0,03 à 0,08 mm lisses ou légèrement plissées et sont soit non laquées soit laquées d'un côté seulement. Même s'il existe un système de fermeture, elles ne sont pas étanches.

Le principal avantage de ces barquettes, outre qu'elles conservent aux aliments leur qualité et leur saveur, c'est que l'on peut en réchauffer ou faire cuire le contenu que l'on peut manger à même la barquette. Leur manipulation étant simple et hygiénique, elles ont obtenu un vif succès et sont préférées aux récipients en plastique. Aux Etats-Unis en 1970, 4 500 millions de ces

TABLEAU 34 - EMPLOI DES FEUILLES DANS L'INDUSTRIE ALIMENTAIRE

Type de feuille	Usage final
Feuille simple	Confiserie, feuille d'emballage, barquettes pour aliments cuisinés
Feuille à motif avec revêtement de laque colorée ou transparente	Confiserie (chocolats, desserts, bonbons), collerettes des goulots de bouteilles à vin
Feuille avec revêtement de laque colorée ou transparente coulé à chaud	Industrie laitière (enveloppes pour fromages)
Feuille dure avec revêtement de laque coulé à chaud et impression	Conserves (couvercles des pots de confitures)
Feuille souple avec revêtement de laque coulé à chaud et impression	Industrie laitière (fermeture des récipients de lait et autres produits laitiers)
Combinaison de feuille d'aluminium et de papier vélin laminage humide et impression	Industrie du tabac (emballage des cigarettes), sacs à café et à épices
Combinaison de feuille d'aluminium et de papier vélin, laminé (à la cire)	Industrie laitière (emballage de beurre et fromages mous), industrie des huiles végétales (emballage de la margarine)
Combinaison de feuille d'aluminium et de papier, laminage humide, revêtement à chaud et impression	Biscuiterie (gaufrettes, biscuits)
Combinaison de feuille d'aluminium de papier et de pellicule de polyéthylène, laminage à sec et humide, impression	Sachets pour soupes déshydratées ou épices
Combinaison de feuille d'aluminium avec pellicule simple ou double de plastique, laminage à sec, impression	Conserves (jus de fruits)

Note: [53]

barquettes ont servi à emballer des plats cuisinés [54]. Le stockage de ces plats cuisinés suppose toutefois une chaîne bien organisée d'installations frigorifiques du producteur jusqu'au consommateur.

Pots et petits récipients stérilisables

Ces récipients dont la profondeur maximale est de 30 à 35 mm sont fabriqués en une seule opération d'emboutissage à partir de bandes d'aluminium d'une pureté de 98,7 à 99,3 % ou d'alliage AlMn, dont l'épaisseur est comprise entre 0,05 et 0,1 mm; leur intérieur est revêtu d'une pellicule de polyéthylène ou de polypropylène de 0,05 mm. Ces récipients peuvent être de forme cylindrique, cubique, ovale ou elliptique. Leurs principaux usages sont indiqués au tableau 35.

TABLEAU 35 — POTS ET PETITS RÉCIPIENTS STÉRILISABLES EN FEUILLE COMBINÉE

Forme	Capacité (en ml)	Épaisseur de la paroi (en mm)	Contenu
Pot	60-110	0,05-0,07	Crème glacée, fromage
Boîte	30-130	0,10-0,15	Viande et poisson, fruits, crème, confiture, miel, fromage
Plat	150-1.300	0,07-0,09	Pâtes, gâteaux, brioches, aliments congelés

Source: [4].

Les pots et les petits récipients en feuille d'aluminium de 0,07 à 0,18 mm, laminée et revêtue de polyéthylène, sont rigides et risquent d'être endommagés quand ils sont vides. Il existe deux procédés de fabrication. Dans l'un d'eux, le formage et le remplissage du corps ainsi que la fabrication et la mise en place du couvercle sont assurés par une seule machine autonome. La fermeture du récipient qui se fait à une température de 240 à 260 °C sous une pression de 6 à 8 atm prend deux secondes. La machine fabrique en une minute soit de 80 à 120 récipients de 20 à 50 ml, soit de 50 à 80 récipients de 50 à 130 ml.

Les récipients peuvent être stérilisés à l'autoclave. Il n'est pas besoin de transporter les corps et les couvercles jusqu'à l'usine et comme les opérations de fabrication ont lieu sur place, les risques d'endommagement se trouvent réduits. La production annuelle de la machine est de 20 millions d'unités de 100 cm³, ce qui correspond à 120 tonnes de feuille laminée par an.

Quand il n'est pas possible d'assurer le formage et le remplissage des récipients dans les mêmes locaux, on peut employer un appareil qui apporte les corps des récipients et les couvercles sur des palettes séparées jusqu'à la machine automatique de chargement qui soulève et remplit les corps des récipients, pose les couvercles et assure leur fermeture.

Récemment, plusieurs autres combinaisons de feuilles d'aluminium ont été trouvées pour l'emballage des aliments en conserve. Pour l'emballage des confitures, les conserveries emploient des barquettes en plastique avec couvercles en aluminium. En formant sous vide des bandes de PVC ou de polystyrène, on obtient de petits récipients de 50, 100 et 200 ml que l'on remplit et ferme avec un couvercle d'aluminium revêtu de laque coulée à chaud et imprimé. Un autre système bien connu d'emballage emploie une feuille d'aluminium dur à 99,5 % de 0,03 à 0,05 mm d'épaisseur. La feuille est revêtue extérieurement d'une laque de 1 g/m² qui résiste à des températures atteignant 180 °C et intérieurement d'un film de laque de 5 à 8 g/m² coulée à chaud.

Echangeurs de chaleur

Il y a environ dix ans, les premiers tubes d'aluminium à ailettes pour systèmes de régulation thermique et de réfrigération sont apparus sur le marché. Pour assurer les échanges de chaleur, un gaz ou un liquide (vapeur ou eau) circule à l'intérieur de tubes tandis que l'air s'écoule perpendiculairement aux tubes. L'air étant un assez mauvais échangeur de chaleur, il est nécessaire d'avoir des ailettes du côté d'où vient l'air.

Dans le choix des matériaux susceptibles de constituer les ailettes, il faut tenir compte de leur conductivité thermique, de leur densité et de leurs prix relatifs, comme indiqué au tableau 36. On notera que c'est l'aluminium qui a la densité la plus faible, le cuivre ayant la plus grande conductivité thermique; toutefois, le prix du cuivre est égal à six fois celui de l'acier. L'aluminium vient en deuxième rang comme conducteur et son prix n'est que le double de celui de l'acier.

TABLEAU 36. CARACTÉRISTIQUES DES MÉTAUX EMPLOYÉS DANS LES ÉCHANGEURS DE CHALEUR

Métal	Densité (g/cm ³)	Conductivité thermique (kcal/h·m ² ·°K)	Prix relatif (à l'aluminium = 1)
Tôle d'aluminium à 99,5 %	2,7	182	1,0
Tôle d'alliage d'aluminium	2,7	142	1,3
Tôle de cuivre	8,3	320	3,0
Tôle d'acier	7,8	50	0,5
Tôle d'acier allié	8,0	13	0,8

D'un point de vue économique, l'aluminium est évidemment le matériau le plus indiqué pour les ailettes des échangeurs de chaleur. Certes, le cuivre est meilleur conducteur thermique mais, sa densité étant plus élevée, ce que l'on pourrait appeler son taux spécifique de transfert de chaleur est inférieur de 60 % à celui de l'aluminium (voir tableau 37). Ce taux est encore plus faible pour l'acier, 85 % de moins que celui de l'aluminium. (Les comparaisons ne valent que pour les ailettes et non pour l'échangeur de chaleur complet.)

TABLEAU 37. TAUX SPÉCIFIQUE DE TRANSFERT DE CHALEUR D'AILETTES FAITES EN DIFFÉRENTS MATÉRIAUX

Matériau	Taux spécifique de transfert de chaleur (kcal/h·kg ⁻¹)	Taux relatif (à l'aluminium = 100)
Taux d'aluminium à 99,5 %	3.400	100
Taux d'alliage d'aluminium	3.000	88
Tôle de cuivre	1.250	36,7
Tôle d'acier	500	14,7
Tôle d'acier allié	250	0,74

Petits échangeurs de chaleur industriels et ménagers

L'aluminium peut remplacer les autres métaux non ferreux employés dans les échangeurs de chaleur et, de fait, leur est supérieur. Il se prête excellentement à la déformation plastique et, par là même, est un matériau idéal. Dans les échangeurs de chaleur où le fluide chauffant circule sur surfaces plates, son action s'arrête aux espaces qui longent ces dernières. Ces espaces influent fortement sur le transfert de la chaleur : plus ils ont d'épaisseur et moins le transfert est efficace. Or, cette épaisseur augmente avec la distance où ils se trouvent des bords d'entrée des tôles; ce qui a pour effet de réduire progressivement le coefficient de transfert de chaleur local.

Pour les radiateurs de chauffage central classiques en fonte ou en tôle d'acier, l'air s'écoule vers le haut, le long des surfaces plates du radiateur; il s'ensuit que le coefficient de transfert de chaleur tend à diminuer en fonction inverse de la hauteur du radiateur.

Il est possible de remédier à cette dégradation progressive du coefficient de transfert de chaleur le long de la surface plate du radiateur en pratiquant une série de petites bandes étroites découpées dans la tôle du radiateur et légèrement relevées par rapport au plan du corps du radiateur; ce qui donne un radiateur doté de petites ailettes dont le coefficient de transfert est bien supérieur à celui des radiateurs classiques. Bien que les petites ailettes aient tendance à augmenter la résistance de la structure du côté d'où vient l'air, dans des conditions de ventilation identiques, ce système transférera davantage de chaleur que le système classique.

Pour la production d'électricité, les échangeurs de chaleur et les éléments réfrigérants du système de condensation à refroidissement par l'air (système Heller-Forgo bien connu) fonctionnent selon le même principe. Il est alors possible d'installer le matériel nécessaire aux centrales électriques dans des régions arides (voire dans des déserts). L'eau de condensation nécessaire au fonctionnement des turbines à vapeur, qui circule en circuit fermé, est refroidie par l'air à l'aide d'éléments réfrigérants en aluminium.

Cependant les éléments réfrigérants à petites ailettes ne présentent pas un intérêt pour les stations d'électricité uniquement. Ils peuvent être employés dans de nombreux autres domaines, par exemple pour les conduites de pétrole et de gaz naturel utilisant des systèmes de réfrigération du pétrole, du gaz ou de l'eau dans les stations de compresseurs situées dans des zones arides et pour assurer le refroidissement par l'air de certaines usines de produits chimiques.

Radiateurs pour moteurs

Dans l'industrie des transports, l'emploi de l'aluminium s'est développé pour la fabrication de pistons, de blocs-moteurs moulés et autres éléments. L'emploi de l'aluminium dans les systèmes de refroidissement à eau ou à huile est un perfectionnement assez récent bien que l'idée ne soit pas nouvelle. Vers la fin de la seconde guerre mondiale, et dans les années qui suivirent immédiatement, l'industrie aéronautique employa des échangeurs de chaleur en métal léger et des refroidisseurs à huile en aluminium. Dans les transports terrestres, ces innovations n'ont pas été adoptées en raison de la forte concurrence des refroidisseurs en cuivre, plus durables.

Dans les échangeurs de chaleur des véhicules de transport, l'aluminium est apparu pour la première fois sous forme de lamelles pour les radiateurs à eau employés dans les locomotives à moteur diesel et dans les moteurs diesel. Pour le refroidissement des moteurs des véhicules de transport, l'aluminium est le meilleur conducteur de chaleur après le cuivre.

Les récents perfectionnements intervenus dans la conception des radiateurs pour automobiles ont un double but. D'une part, on s'est efforcé d'augmenter la quantité de chaleur dissipée par unité de volume du radiateur afin d'augmenter l'énergie produite dans les moteurs. D'autre part, on a cherché à réduire le poids global des automobiles — ne serait-ce que de quelques grammes pour un composant donné — pour éviter toute consommation de carburant superflue, et même, si possible, pour la réduire en dépit d'une puissance accrue des moteurs. Pour cela, il faut évidemment réduire le poids du radiateur à eau et des travaux de mise au point de nouveaux radiateurs plus économiques sont en cours.

Climatisation et réfrigération

Dans les appareils de climatisation et de réfrigération, l'aluminium évince peu à peu les échangeurs de chaleur à ailettes de cuivre et, aujourd'hui, c'est lui seul qu'on emploie dans les évaporateurs. Les panneaux d'évaporation en aluminium sont faits de tubes qui font partie intégrante de la structure selon une technique dite de colaminage ou de soudage bord à bord. Dans le colaminage, deux tôles d'aluminium sont jointes en une seule mais, auparavant, on y a peint le tracé du réseau de tubes dont il doit être doté. Quand les deux tôles sont laminées pour n'en faire qu'une seule, les tracés ne fusionnent pas; on les gonfle légèrement avec un jet d'air comprimé et le tube ainsi obtenu est ensuite doté des raccords voulus. Le soudage bord à bord est analogue au

colaminage à ceci près que les tôles ne sont pas jointes par laminage mais par brasage, les conduits étant ensuite dégagés par fusion.

Energie solaire

Récemment l'utilisation directe de l'énergie solaire pour le chauffage a suscité beaucoup d'intérêt. L'énergie solaire peut servir à chauffer, à refroidir ou à produire de l'énergie électrique.

La partie principale d'une station d'énergie solaire est le collecteur dont la surface qui absorbe les rayonnements peut être faite en aluminium en raison de la conductivité élevée de ce métal. Sa bonne tenue à la corrosion fait qu'on emploie également ce métal pour la charpente et la superstructure du collecteur.

Applications diverses

Dans certains domaines, les avantages financiers qu'il y a à substituer l'aluminium à d'autres métaux sont indirects et moins évidents. On en trouvera ci-après quelques exemples.

Moulages

Pendant la période de 1974 à 1977, 20 à 25 % en moyenne de la consommation mondiale d'aluminium a servi chaque année à la fabrication de moulages. Sur les 2,5 millions de tonnes de moulages produits chaque année, quelque 60 % à 70 % ont été employés comme éléments constitutifs de véhicules de transport et notamment comme moteurs d'automobiles. Selon une estimation, dans les années 70 quelque 30 millions de voitures particulières et de motocyclettes ont été fabriquées chaque année dans le monde entier et ont nécessité quelque 1,2 million de tonnes de moulages en aluminium. Les prévisions laissent entrevoir que les types de matériaux qui entrent dans la fabrication des automobiles changeront considérablement [55]. La tendance à économiser l'énergie ne fera que s'accroître et un moyen d'y parvenir consistera à réduire le poids des éléments. Ainsi, on peut prévoir qu'à moyen terme l'emploi de moulages en aluminium progressera encore pour remplacer le fer et l'acier et, à un degré moindre, le cuivre et le zinc (voir tableau 38).

La consommation actuelle et future, les caractéristiques techniques et les méthodes de fabrication des moulages en aluminium ont été examinées à la Conférence internationale de l'aluminium et de l'automobile organisée par l'Aluminium Zentrale de la République fédérale

TABLEAU 38. ESTIMATION DES QUANTITÉS DE MATÉRIAUX ENTRANT DANS LA CONSTRUCTION D'UNE VOITURE PARTICULIÈRE, 1975, 1980 ET 1990

Matériau	1975		1980		1990	
	(en kg)	(en pourcentage)	(en kg)	(en pourcentage)	(en kg)	(en pourcentage)
Aciers et moulages de fonte	1 210	77	830	67	614	56
Alliages d'aluminium	45	3	107	8,6	390	35
Plastiques	55	4	95	7,6	127	11,5
Alliages de cuivre	15	1	11	0,9	7	0,6
Alliages de zinc	13	1	5	0,4	3,6	0,3

Source : [55].

d'Allemagne, qui a eu lieu les 22 et 23 mars 1976 [56].

De nombreuses raisons donnent à penser que l'emploi des moulages en aluminium augmentera. L'aluminium peut être moulé avec des tolérances élevées; les moulages, facilement interchangeables ne nécessitent aucun usinage supplémentaire. Diverses techniques modernes permettent de les produire en grandes séries et avec relativement peu de main-d'œuvre.

Les techniques de moulage les plus efficaces sont le moulage sous forte pression, sous faible pression et avec contrepression, ainsi que le matriçage. Cependant, les techniques classiques de moulage en sable ou par gravité peuvent facilement être mécanisées. Une idée approximative des investissements que suppose l'installation d'une fonderie pour métal léger a déjà été donnée au tableau 24. Ces coûts sont de loin inférieurs à ceux des fonderies d'acier modernes. En règle générale, jusqu'à 1 000 unités c'est le moulage en sable qui est le plus économique. De 1 000 à 10 000 unités, le moulage par gravité l'emporte. Pour des séries plus importantes, il existe des techniques économiques de moulage sous pression. Dans certains cas extrêmes, par exemple quand il faut assurer une parfaite étanchéité ou quand il faut appliquer des techniques spéciales d'usinage ou de traitement de surface, le moulage mécanisé sous pression peut être plus économique, même pour des petites séries. Le tableau 39 montre la répartition des principales techniques de moulage dans différentes régions du monde. Les caractéristiques techniques des moulages obtenus par ces méthodes sont données dans le tableau 40.

Le moulage de l'aluminium présente cet avantage particulier que tout passage d'une technique à une autre est relativement simple. En Hongrie, par exemple, les blocs de moteurs diesel de 100 kg étaient initialement moulés en sable. Quand ce procédé ne fut plus rentable, on le

TABLEAU 39. REPARTITION DES PRINCIPALES TECHNIQUES DE MOULAGE, 1970-1974

(En pourcentage)

Pays ou groupement	Moulage en sable	Moulage manuel par gravité	Moulage mécanique
Etats-Unis d'Amérique	14	22	64
Pays développés d'Europe occidentale	20	40	40
Pays modérément industrialisés ^a	35	45	20
Pays en développement ^a	45	50	5

^aEstimations.

remplaça par le moulage mécanisé par gravité [58] et, à l'heure actuelle 10 000 moteurs sont, chaque année, moulés de cette manière. Le changement n'a nécessité que des investissements relativement minimes et il n'y a pas eu à acheter des machines coûteuses de moulage sous pression. Les moulages peuvent être protégés contre l'usure par un traitement de surface spécial (anodisation extra-dure) qui permet d'employer des moulages légers pour les pièces exposées à l'usure. Les accessoires des équipements employés dans les usines de textiles et autres industries (telles que les broches, les châssis mobiles des machines d'imprimerie, les moulages et les pistons des soupapes de commande pneumatique) en sont un autre exemple.

Comme nous venons de le voir, l'aluminium présente de nombreux avantages pour les opérations de moulage: leur mécanisation est facile, il est possible de fabriquer des grandes séries et d'économiser du carburant (environ 1 litre par kilogramme de poids en moins pour 100 000 km). De plus, les prix relatifs de l'aluminium et de la fonte sont importants dans la conception des véhicules de transport. Si pour fabriquer 1 tonne d'un produit en acier il faut 38 GJ d'énergie alors qu'il en faut 300 pour le même produit en aluminium, dans le cas des

camions à moteur diesel le coût d'énergie supplémentaire est récupéré en deux années sous forme d'économies de carburant [59].

L'emploi de l'aluminium peut présenter des avantages analogues dans d'autres secteurs industriels également. L'installation à bas prix des fonderies spécialisées dans la fabrication de moulages d'aluminium en séries relativement petites offre de nombreuses possibilités intéressantes surtout pour les pays en développement. Ces considérations et la tendance favorable des prix sont les principales raisons pour lesquelles les moulages en métal léger peuvent maintenant concurrencer valablement les moulages en cuivre, en bronze et en zinc dans de nombreuses régions. Il est donc bon de tenir compte de cette situation quand on envisage de créer de nouveaux complexes industriels.

Transports

Châssis de fenêtres

L'aluminium est de plus employé dans plusieurs secteurs de l'industrie des transports. Un exemple intéressant est celui des châssis de fenêtres des wagons de chemin de fer qui, à l'origine, étaient faits en bois puis en bronze. Le premier châssis en bronze est apparu il y a une cinquantaine d'années. Depuis lors, pour des raisons de poids et d'économie, l'aluminium anodisé a complètement supplanté les autres matériaux pour les châssis de fenêtres.

L'aluminium est ensuite apparu dans certains éléments des wagons de chemin de fer, la plupart moulés, dont la fabrication et l'entretien nécessitaient moins de main-d'œuvre. Les porte-bagages, les boutons et les poignées de portes en bronze, en laiton ou en alliage de zinc devaient être nickelés ou chromés pour pouvoir résister à la corrosion. Pour les surfaces en aluminium, il suffit qu'elles

TABLEAU 40. PROPRIÉTÉS DE DIFFÉRENTES MÉTHODES DE MOULAGE

Technique	Épaisseur minimale de la paroi (en mm)	Tolérance d'épaisseur de la paroi (en pourcentage)	Rendement par ouvrier (unités/h)	Durée de la matrice (unités)	Minimum d'unités pour être rentable	Prix relatif d'une unité ^a	Résistance mécanique ^b	Régularité de la surface ^b	Anodisabilité ^b
Moulage en sable	3,0	±10	2	100-300 ^c	au-dessous de 1 000	1	C	C	B
Moulage par gravité	2,0	±5	30	10 000-20 000	au-dessous de 1 000	0,65	B	B	A
Moulage sous pression	0,8	±2	75-150	10 000-50 000	10 000	0,50	A	A	B

Source: [57].

^aMoulage en sable = 1.^bA = Excellent, B = moyen, C = moins satisfaisant.^cAvec matrice en bois; une matrice en aluminium durerait 10 fois plus.

soient polies ou (dans la plupart des cas) anodisées pour les protéger contre la corrosion et la décoloration. Récemment, il y a eu une forte concurrence des plastiques mais ces derniers n'ont pas pleinement répondu aux attentes en raison des lourdes charges qu'entraînait leur transport par rail.

L'emploi des alliages d'aluminium pour les pare-chocs des automobiles gagne en importance vu sa forte résistance et la facilité que présente l'automatisation des traitements de surface. Aux Etats-Unis d'Amérique, on a utilisé des pare-chocs en alliage AlZnMgCu (7016-T6) dès 1976. Ces pare-chocs en alliage d'aluminium présentent par rapport aux pare-chocs en acier les avantages suivants [60] :

a) Bonne absorption des chocs en cas de collision; il est plus facile de respecter les normes très strictes en vigueur aux Etats-Unis;

b) La fabrication et le traitement de surface se prêtent mieux à l'automatisation et nécessitent moins d'opérations; il s'ensuit qu'un pare-chocs en alliage d'aluminium revient moins cher qu'un pare-chocs en acier chromé;

c) Il n'est plus besoin d'employer du chrome (ou du nickel) pour revêtir le pare-chocs.

Carrosserie

Le soudage à froid et le soudage par points ainsi que les techniques de collage se répandent de plus en plus et les éléments en aluminium qui entrent dans la construction des carrosseries ont de plus en plus la faveur dans la construction des moyens de transports publics et des véhicules commerciaux.

Dans certains cas l'aluminium non seulement remplace les autres métaux non ferreux mais, s'il s'agit d'empêcher la corrosion, peut également remplacer l'acier. La légèreté de certaines structures mobiles qui permettent d'économiser la main-d'œuvre dans la construction du matériel roulant moderne tel que cloisons amovibles, grandes portes coulissantes, toits ouvrants ou glissants et panneaux extérieurs ouvrables ainsi que les châssis de fenêtres, les toits, les claire-voies des wagons de marchandises.

Une évolution intéressante est également le remplacement des caisses en acier ou en bois des camions par des structures en aluminium. L'emploi de l'aluminium permet de réaliser des économies considérables sur la maintenance et les réparations [61, 62, 63]. Les caisses en sections télescopiques d'aluminium extrudé que l'on peut assujettir avec une attache ne coûtent qu'à peu près le même prix qu'une caisse en acier et bois par suite des économies de main-d'œuvre; en outre, il n'est pas nécessaire de faire appel à des ouvriers spécialisés [64].

Le potentiel de l'aluminium dans la fabrication des véhicules de transports est certainement très prometteur. Il en est de même pour la fabrication des automobiles où l'on prévoit que, dans les années à venir, on emploiera davantage d'aluminium. Le tableau 41 est une projection établie par un producteur aux Etats-Unis.

TABLEAU 41. QUANTITES D'ALUMINIUM EMPLOYEES DANS LA CONSTRUCTION D'UNE AUTOMOBILE, 1965-1985^a

(En kilogrammes)

Année	Moulages	Parties laminées et extrudées	Total
1965	24	8	32
1970	26	9	35
1975	27	11	38
1977	29	15	44
1980	41-45	27-45	68-90
1985	57-79	34-102	91-181

Source: [64]

^aPrévision

Eléments très résistants

Le matriçage est un procédé technique important pour la déformation plastique de l'aluminium auquel il assure une plus grande résistance mécanique et une durée plus longue. Le produit obtenu convient pour les durs traitements auxquels il est soumis et peut supporter les lourdes charges que les véhicules ont souvent à transporter. Cette technique est également intéressante en ce sens qu'elle permet de fabriquer pour les voitures de tourisme des roues très robustes à partir d'une seule pièce : ces roues peuvent être employées en toute sûreté sur les terrains les plus difficiles.

La construction en alliage d'aluminium de toutes les parties porteuses d'un véhicule (châssis, cadre de la caisse, et armature de la superstructure) permet, indépendamment des économies de poids et de carburant, de réaliser des économies considérables sur les coûts de fabrication et les frais de maintenance. Grâce à la technique relativement simple qu'est l'extrusion, on peut fabriquer, pour la superstructure, des panneaux et des supports qui, contrairement aux pièces en acier laminées ou pliées et soudées, permettent de répartir l'épaisseur des parois en différents points de façon à assurer la meilleure résistance mécanique possible.

L'aluminium ne se corrodant pas, les parties restent intactes pendant toute la durée de vie du véhicule et il n'est plus besoin de procéder à des démontages, des traitements de surfaces et des remontages périodiques. La réduction de poids peut réduire l'usure des parties roulantes et du châssis.

Certes, la quantité totale d'énergie employée pour fabriquer un produit fini en aluminium est

plus élevée que pour les autres matériaux. Mais il ne faut pas s'y tromper. En fait, pendant la vie utile d'un véhicule de transport, on peut en général économiser neuf fois autant d'énergie que l'énergie supplémentaire nécessaire à la fabrication des parties et des éléments en aluminium. Dans le cas des rames en aluminium employées dans les métros, la situation est encore plus favorable : 1,5 à 2 années suffisent pour récupérer la différence [65]. Toutes ces considérations, auxquelles il faut ajouter les progrès réalisés dans les techniques modernes d'extrusion, ont conduit les services du métro parisien à acheter récemment 1 000 voitures en aluminium coûtant moins cher que des voitures analogues en acier [65]. Encouragés par ces résultats, les services du métro d'Atlanta viennent de commander des wagons de ce type en Europe [66].

Agriculture

Les machines agricoles étant soumises à de rudes traitements en raison des conditions d'exploitation et des particularités géologiques ou climatiques, la qualité des articles utilisés par ce secteur doit être sans défaut. La tenue à la corrosion est une considération de premier plan, vu les grandes quantités de produits chimiques employées.

En agriculture, l'aluminium doit faire face à la forte concurrence de deux autres matériaux : l'acier galvanisé et les plastiques. Ce qui en fin de compte décide de l'emploi des uns ou des autres est toujours lié aux prix relatifs et aux caractéristiques techniques de ces matériaux. Nous citerons ci-après deux exemples concrets qui illustrent les avantages de l'aluminium en agriculture. Ils sont repris en partie de l'expérience hongroise et en partie de publications professionnelles.

Irrigation

Les systèmes d'irrigation varient considérablement selon l'endroit où ils doivent être installés; ceux qui servent à irriguer une terre arable ne sont pas les mêmes que ceux qu'on emploie dans le jardinage. Les modèles sont différents, selon qu'il s'agit d'arroseurs rotatifs ou fixes ou de conduits souterrains.

Les systèmes d'irrigation en aluminium employés sur les terres arables ont trois types de canalisations : portatives, automotrices ou tractables sur de longues distances. Leur trait commun est qu'elles sont mobiles. Il s'ensuit qu'outre la tenue à la corrosion elles doivent présenter deux autres qualités : légèreté et résistance mécanique suffisante. Pour le poids, l'aluminium se compare très favorablement avec l'acier galvanisé; quant à

la résistance mécanique, il est très supérieur aux plastiques.

Les systèmes portatifs comportent une canalisation principale et trois ou six canalisations secondaires. La longueur de chaque élément de canalisation est de 6 m. Leurs deux extrémités sont dotées de raccords à fermeture rapide (partie mâle et partie femelle). Les systèmes portatifs diffèrent des deux autres en ce qu'ils comportent des joints du type Perrot ou Wright-Rain; les premiers sont des attaches métalliques qui s'encastrent fermement, dans les seconds c'est la pression de l'eau d'irrigation qui assure l'étanchéité des bagues de raccordement. Ces deux types permettent une déflexion de $\pm 15\%$ par rapport à l'axe de la canalisation. En Hongrie, c'est le système à joints mécaniques qui est le plus répandu.

Les dimensions et le poids de la canalisation principale et des canalisations secondaires sont les suivants :

	Canalisation principale	Canalisation secondaire
Diamètre intérieur (en mm)	130	87
Longueur (en m)	6	6
Épaisseur (en mm)	1,2	1,2
Poids (en kg)	1,5	7,8

La canalisation principale et les canalisations secondaires sont soudées dans une bande d'alliage d'aluminium. Pour les essais de résistance la pression est de 160 N/mm².

Les arroseurs mobiles automoteurs économisent de la main-d'œuvre, le travail étant assuré par le moteur dont ils sont dotés. Un arroseur normalisé de ce genre est fait de canalisations soudées en alliage d'aluminium, de 130 mm de diamètre.

Une canalisation tractable sert de canalisation principale aux arroseurs automoteurs. Le travail pénible que suppose le déplacement de cette canalisation est ainsi épargné. Les canalisations soudées en aluminium ont un diamètre de 159 mm et une épaisseur de 2 mm. Elles comportent 46 paires de roues, les canalisations secondaires reposent sur 19 roulettes.

On peut employer des systèmes d'irrigation portatifs pour n'importe quel type de culture en terre arable en champ, en verger ou en jardin potager, même si le sol n'est pas uni ou présente une déclivité. Les équipements tractables ne peuvent fonctionner que sur terrain plat, quel que soit le type de culture, alors que les arroseurs automoteurs n'irriguent que les plantes basses (un mètre au maximum) cultivées sur terrain plat. On ne peut donc s'en servir pour irriguer les vergers.

Horticulture

Les canalisations employées pour l'horticulture en serre et sous tente en plastique ont des dimensions beaucoup plus petites que celles qu'on emploie normalement dans les champs. Autrefois on utilisait, pour l'irrigation, des canalisations en aluminium stables, mais elles ont toutes été remplacées par des canalisations en plastique, notamment en polyéthylène. On emploie également le plastique pour les arroseurs qui assurent l'irrigation des vignobles et des petits vergers de plein air.

L'irrigation du sous-sol est surtout employée pour la culture potagère où des conduites souterraines humectent les racines des plantes. En règle générale les conduites sont en plastique. On n'emploie l'aluminium que dans les cas où, lors d'un changement de culture, on désinfecte le sol à haute température plutôt qu'avec des produits chimiques. D'une manière générale, l'aluminium ne peut concurrencer les plastiques pour ce genre d'irrigation. On peut cependant l'employer avantageusement comme cadre des tentes en feuille de plastique ou comme piquets et supports en viticulture.

Les tentes en feuille de plastique se présentent généralement sous deux formes. Ce sont soit des structures de 4,5 m de largeur creusées dans le sol et dotées d'un cadre en tubes d'aluminium de 300 mm de diamètre et 1,5 mm d'épaisseur ou de 7,5 m de largeur avec un cadre en tubes de 400 mm de diamètre et de 2 mm d'épaisseur. Dans les climats tempérés comme celui de la Hongrie, les tentes en plastique ont connu un vif succès pour la culture des légumes, des plants et des primeurs, leur coût n'étant que le dixième de celui des serres classiques.

L'emploi de structures en aluminium comme piquets et supports des vignes se développe. Une des principales raisons en est que, contrairement au bois et au béton, elles se prêtent bien à une manutention mécanique. Les piquets de 3 m de hauteur sont faits en profilés d'aluminium plié de $2,5 \times 40 \times 60$ mm que l'on enfonce dans le sol tous les 8 mètres à l'aide d'un dispositif hydraulique monté sur un tracteur. Pour les vignes, on n'emploie plus le bois et le béton. Dans la concurrence avec d'autres métaux, la tenue à la corrosion et la facilité d'entretien de l'aluminium présentent de grands avantages.

Bâtiment et architecture

Dans le bâtiment et l'architecture, les installations de stockage, les locaux agricoles, les bureaux ainsi que les bâtiments communs et les immeubles d'habitation à plusieurs étages créent une demande que les méthodes traditionnelles ne

parviennent plus à satisfaire. Il s'ensuit qu'on voit apparaître des techniques plus élaborées de construction et de réalisation d'éléments légers préfabriqués. Quand les capacités de construction sont insuffisantes ou quand il n'existe aucune industrie du bâtiment, ces nouvelles techniques peuvent présenter les avantages suivants :

a) Il est possible d'implanter les installations pour éléments préfabriqués dans des régions plus ou moins industrialisées où existe déjà l'infrastructure nécessaire;

b) Les éléments de construction peuvent également être réalisés dans des installations industrielles polyvalentes (travail des métaux, constructions mécaniques) et il est ainsi possible d'économiser une partie des fortes mises de fonds que suppose la création d'usines spécialisées dans la fabrication de matériaux de construction;

c) Par comparaison aux méthodes de construction classiques, les éléments légers permettent de réduire le volume de matériaux au cinquième ou au dixième, et, partant, de réaliser de grosses économies sur les frais de transport;

d) Le montage et l'installation nécessitent moins de main-d'œuvre;

e) Les usines peuvent être achevées plus vite et entrer en service plus tôt.

Couvertures

Pour les constructions légères, il est capital d'avoir suffisamment de couvertures et de parois murales préfabriquées prêtes à être assemblées sur le chantier. Divers produits en aluminium laminé tels que tôles ondulées, panneaux sandwich et autres combinaisons peuvent être utilement employés. Ils remplacent de grandes quantités d'acier galvanisé et c'est là une considération importante surtout dans les climats où l'acier galvanisé rouille vite.

Dans l'industrie du bâtiment et de la construction, les domaines où il peut être avantageux d'employer l'aluminium sont notamment :

a) Les locaux et les entrepôts industriels;

b) Les bâtiments à baies d'encadrement appelées à supporter des surfaces de toitures importantes. Ces constructions ont généralement une charpente en acier. Pour les revêtements on peut employer des tôles d'aluminium ondulées, des panneaux sandwich revêtus de tôle d'aluminium ou d'autres éléments préfabriqués;

c) Les étables, généralement conçues pour recevoir un toit de petite portée. Vu le grand nombre de bâtiments nécessaires et vu l'évolution rapide des techniques d'élevage, il faut limiter les coûts de construction et c'est pourquoi on emploie fréquemment des encadrements en bois revêtu d'aluminium;

d) Les installations d'entrepôts frigorifiques ou de congélation pour les fruits et la viande. Aujourd'hui on n'emploie plus que des panneaux sandwich en aluminium:

e) Le revêtement des châssis d'encadrement des édifices publics et des immeubles d'habitation. On peut employer des murs et des cloisons en panneaux sandwich d'aluminium. Dans les pays tropicaux plusieurs types de surfaces portenses d'ombre et de coques de ventilation peuvent être fabriquées en aluminium:

f) Les convecteurs solaires à revêtement d'aluminium qui produisent une partie de l'énergie calorifique nécessaire aux bâtiments (par exemple alimentation en eau chaude). Cette technique en est encore au stade expérimental.

Pour ériger les murs ou poser la couverture, on emploie généralement des tôles ondulées en aluminium. Ces dernières se présentent sous forme de bandes de 1 000 à 1 200 mm ou de 1 260 à 1 600 mm de large ondulées longitudinalement pour en assurer la rigidité. Il s'agit généralement d'un alliage d'AlMn₁ ou d'AlMg_{1,3}. Les nervures étant dans le sens de la longueur, les tôles peuvent être aussi longues qu'on le souhaite, sous réserve des possibilités de transport. L'épaisseur de la tôle dépend de l'usage auquel elle est destinée, de la charge qu'elle est appelée à supporter et de la profondeur des nervures. Elle varie en général de 0,45 à 1,2 mm. Le poids par unité de surface se situe entre 1,2 et 5,4 kg/m², 3 kg/m² étant une bonne moyenne économique. Pour pouvoir employer les tôles ondulées à une échelle commerciale, il faut diverses attaches et autres éléments en aluminium (tels que gouttières, parapets et raccords d'angle pour joindre les châssis de fenêtres ou d'autres éléments fabriqués en aluminium ou un autre matériau) formés à froid par pliage ou par laminage. Les installations de fabrication de tôle ondulée et de ces accessoires doivent être mises en place simultanément.

Des attaches, des joints et des accessoires bien conçus permettront de réaliser des économies tant sur la main-d'œuvre que sur les échafaudages, de compenser les effets d'expansion et de contraction que les variations des conditions climatiques produisent sur les structures en aluminium et de protéger les structures contre les fuites provoquées par les eaux de pluie, ce qui en prolongera la durée de vie.

Divers types de revêtements en aluminium ne différencient les uns des autres que par de légers détails ont été mis au point. Un revêtement d'une seule couche non isolée de tôle ondulée en aluminium peut être doté d'une couche d'isolant thermique, soit suspendue, soit placée derrière. On peut obtenir un mur ou un toit bien isolé en plaçant un isolant entre deux tôles d'aluminium ondulé. La partie intérieure du revêtement peut

également être faite en bois ou en un autre matériau. Dans ce cas, il faut naturellement ajouter d'autres éléments tels que des entretoises, des contre-fiches réglables et des nervurages secondaires. Les grands producteurs d'aluminium ont tous mis au point de bons systèmes d'isolation des murs et des couvertures.

Un des inconvénients des constructions légères est qu'elles risquent de chauffer outre mesure quand le soleil est très fort. Dans les régions tropicales, il est difficile de régler la température des locaux au niveau voulu pour des appareils délicats (par exemple ordinateurs) ou simplement pour le confort des occupants, même en faisant appel aux techniques de construction classiques. Pour abaisser la température, on a mis au point des systèmes spéciaux d'écrans en aluminium que l'on place au-dessus de la toiture et qui assurent une bonne ventilation. Les coûts supplémentaires qu'entraîne l'installation de ces écrans protecteurs sont très vite récupérés par les économies réalisées sur les systèmes de climatisation qu'il est parfois possible d'éliminer complètement.

Un élément de construction préfabriqué qui connaît un grand succès est le panneau sandwich composé d'une couche rigide en mousse de plastique fixée entre deux couches de bois dur, de plastique, d'acier ou d'aluminium. La couche intérieure de plastique est généralement en polyuréthane mais des recherches sont en cours pour réaliser une mousse de plastique plus ignifuge. Les panneaux préfabriqués ont en général de 8 à 12 m de long et de 0,60 à 1,5 m de large. La couche d'aluminium est faite dans une bande de 0,6 à 1,00 mm, de largeur moyenne, que l'on lamine pour obtenir les nervures. Les bords du revêtement ont une forme qui permet un assemblage rapide sur le chantier. Si la plupart des panneaux sandwich sont employés pour les murs, certains sont employés comme éléments de la toiture. Lors de l'installation il faut tout particulièrement veiller à la bonne étanchéité des joints.

L'épaisseur des panneaux employés dans les locaux industriels et agricoles est de 35 à 55 mm. Ils contiennent 5,5 kg d'aluminium et 2 kg de plastique au mètre carré. Pour la construction des entrepôts frigorifiques, il faut des panneaux plus épais : de 80 à 100 mm pour les fruits et de 200 à 300 mm pour la congélation d'autres denrées. Les panneaux doivent être joints très soigneusement et avec beaucoup de précision.

Comparés aux autres systèmes, les panneaux sandwich à revêtement en aluminium présentent l'avantage très net que, vu leur bonne tenue à la corrosion, ils ne nécessitent aucun traitement de surface lors de l'installation et aucun entretien par la suite. La dépense supplémentaire qu'entraîne l'emploi de ces panneaux est récupérée sous forme d'économies d'entretien sur une période de cinq à

huit années. Ainsi, l'emploi de l'aluminium dans la construction des entrepôts frigorifiques, qui se justifie sur le plan technique, est en outre financièrement avantageux.

Un type spécial de couverture préfabriquée a été réalisé en Hongrie. Il a la forme d'une coque cintrée où deux couches d'aluminium ondulé, reliées entre elles par des entretoises en métal rigide, entourent un produit isolant. Cette couverture existe pour des portées de 12 à 30 m de long, et tient sans poutres ou supports supplémentaires. Complètement préfabriquée, son installation prend peu de temps et est très économique. Elle est toutefois difficile à transporter sur de grandes distances vu son encombrement qui ne permet pas d'utiliser au mieux l'espace disponible dans les moyens de transport.

L'emploi de l'aluminium dans les bâtiments et les constructions permet de remplacer les matériaux de construction traditionnels à base de silicates. L'aluminium a également de grandes possibilités comme matériau de remplacement de l'acier galvanisé ou revêtu de plastique. Chaque tonne de tôle d'aluminium remplace 2,4 à 2,6 tonnes de tôle d'acier et 0,2 à 0,25 t de revêtement de zinc. De plus, la longévité de la tôle d'aluminium est plusieurs fois supérieure à celle de l'acier galvanisé. Aucun entretien n'est nécessaire alors que l'acier galvanisé doit être soumis à un traitement de surface tous les deux à quatre ans.

Gouttières et descentes

Toute construction légère en aluminium doit être dotée d'un bon système d'évacuation des eaux de pluie. Si un tel système n'existe pas, s'il est mal conçu ou s'il est endommagé, il peut en résulter des pertes financières indirectes et la valeur du bâtiment s'en trouver dépréciée.

Pour les gouttières et les descentes des eaux de pluie, le matériau traditionnel est le zinc encore que, par le passé, on ait parfois employé le cuivre. Depuis 1910 environ, l'emploi de l'acier galvanisé s'est généralisé. Néanmoins, la mince couche de zinc, souvent discontinue, ne remplace pas efficacement la feuille de zinc dont la longévité est normalement de 30 à 40 ans. En général, après 2 ou 3 ans d'usage, des taches de rouille apparaissent à la surface du revêtement de zinc et au bout de 5 ou 6 ans les conduites présentent des défauts en plusieurs endroits et doivent être remplacées. On a bien essayé de prolonger la durée des conduites en ajoutant une couche de peinture mais les frais de main-d'œuvre et de peinture sont prohibitifs et l'on n'a recours à cette solution que pour les petites habitations privées. Il s'est avéré plus utile de revêtir la tôle d'acier galvanisé d'un enduit protecteur efficace puis d'une peinture de haute qualité. Cette opération

coûteuse prolongeait de 10 à 15 ans la durée de vie utile des gouttières, ce qui ne représente qu'une fraction du temps pendant lequel une feuille de zinc véritable peut durer. On a également fait des expériences avec des conduites en plastique (PVC ou polystyrène résistant aux chocs) qui ne sont pas suffisamment rentables.

En Hongrie, en 1970, seulement 2 à 3 % des conduites pour eaux de pluie étaient en aluminium; en 1976 cette proportion est passée à 30 %. Il existe également aujourd'hui des usines qui fabriquent des attaches, des fixations et autres accessoires en aluminium.

L'expérience acquise jusqu'ici montre que ces conduites à usage général devraient être fabriquées en feuille d'aluminium de 0,8 mm. Des essais de tenue à la corrosion en plein air, faits avec des tôles d'aluminium demi-dur à 99,5 %, ont donné les résultats suivants :

a) Après exposition pendant six mois aux intempéries quelques petites taches blanches de corrosion, faciles à enlever, sont apparues à la surface des pièces soumises aux essais;

b) Après six mois, l'intensité de la corrosion tend à diminuer; même après plusieurs années, la corrosion n'a pas sensiblement augmenté et les pièces exposées aux intempéries n'ont présenté aucun défaut;

c) La vitesse à laquelle les taches blanches apparaissent ainsi que leur densité varient avec l'intensité de la pollution de l'air ambiant;

d) On a constaté que les phénomènes de corrosion étaient plus fréquents sous les impuretés se trouvant à la surface des conduites suspendues;

e) A l'ouverture des joints d'étanchéité on a constaté que l'isolant placé entre deux métaux pour éviter un contact direct était défectueux en plusieurs endroits; malgré cela on n'a pu observer qu'un phénomène léger, voire nul, de corrosion par contact;

f) L'arrière et les bords des revêtements sont en contact direct avec des substances (telles que mortier, ciment et béton) sensibles aux réactions alcalines. Si ces parties en aluminium ne sont pas montées correctement, l'humidité qui pénètre dans les interstices correspondants peut provoquer des phénomènes de corrosion;

g) Sauf les taches blanches précédemment mentionnées, on n'a discerné aucun phénomène appréciable de corrosion;

h) Des essais en laboratoire ont montré que la profondeur de la corrosion n'augmentait pas en fonction directe du temps; en d'autres termes, la vitesse et l'intensité de la corrosion ont tendance à diminuer à la longue.

Il faut, lors du montage, donner aux conduites d'évacuation des eaux de pluie suspendues une inclinaison plus forte qu'aux conduites revêtues de zinc pour éviter les phénomènes de corrosion. Si dans un bâtiment neuf revêtu d'aluminium on emploie des accessoires métalliques, il faut qu'ils soient en aluminium. Si, lors de travaux de rénovation on emploie des éléments en aluminium, il convient, dans la mesure du possible, de remplacer toutes les autres parties par des éléments en aluminium. L'emploi de métaux différents placés côte à côte est nocif et doit être évité.

Les principales dimensions des éléments de construction en aluminium sont pratiquement les mêmes que celles des éléments en zinc ou en acier ou en acier galvanisé aux exceptions suivantes :

a) Il faut employer de la tôle d'aluminium demi-dur à 99,5 %;

b) A une distance maximale de 10 m des points où les structures suspendues sont fermement fixées (par exemple, joints des extrémités des canalisations), il faut ménager des joints de dilatation étanches.

Compte tenu des propriétés de l'aluminium, il faut installer les gouttières avec une pente de 3 à 4 %. De plus, les supports des gouttières doivent être montés régulièrement tous les 1 000 mm, à ± 100 mm près et placés de façon à assurer la pente voulue.

Aucune technique efficace n'a été mise au point à l'échelle commerciale pour assurer le soudage des éléments de construction en aluminium, c'est pourquoi les différentes parties ne peuvent être raccordées que par des joints rivetés ou liés. Les rivets doivent être en aluminium ou en un matériau compatible avec l'aluminium.

L'aluminium ne doit pas être joint directement avec d'autres métaux. Pour éviter les effets néfastes de la corrosion, il faut garnir les surfaces en contact d'un bon isolant.

Portes et châssis des fenêtres

Un autre emploi de l'aluminium qui se développe rapidement dans la construction est celui des châssis de fenêtres. Les derniers progrès de la technique permettent de fabriquer des éléments de châssis aux dimensions extrêmement précises, que l'on peut monter facilement et rapidement sur le chantier même. Outre que tout le monde recherche plus de confort, un nombre toujours croissant d'entreprises industrielles, d'établissements scientifiques et médicaux tiennent à pouvoir régler correctement la température, l'hygrométrie, la stérilité et la présence de poussières dans leurs locaux. Les châssis modernes pour fenêtres et portes, de conception pratique et esthétique à la fois, peuvent répondre à ces

exigences. Les économies qu'ils permettent de réaliser apparaissent davantage dans les frais d'exploitation que dans les coûts d'investissement initiaux.

Les châssis en aluminium sont conçus en fonction des conditions climatiques locales. Si la température moyenne se situe au-dessus de 18 °C, de simples fenêtres suffisent généralement. Pour des raisons d'économie, on installe des châssis en profilés d'aluminium coulissant dans le sens vertical ou horizontal. Les profilés qui les constituent sont anodisés par lots. On a remplacé les coins soudés des châssis par des joints d'angle mécaniques. A cette fin, on a employé des attaches vissées, des chevilles en profilés coulés ou extrudés, des boulons, ainsi que des attaches formées à froid. Selon les dimensions, le poids par unité de surface d'un châssis coulissant moderne pour fenêtre horizontale simple varie de 4 à 7 kg au mètre carré.

Dans les climats tempérés, l'emploi de fenêtres isolantes à vitre double se justifie. La technique est pratiquement la même que pour les cadres à vitre unique. Cependant, pour assurer une parfaite étanchéité, il faut prendre des précautions spéciales. Le poids par unité de surface d'un châssis à double vitre est de l'ordre de 7 à 9 kg au mètre carré.

L'augmentation des prix des combustibles a conduit à concevoir un nouveau châssis en aluminium qui comporte des pontages thermiques. On ajoute entre les surfaces extérieure et intérieure en aluminium une couche de plastique dont la conductivité thermique est beaucoup plus faible que celle de l'aluminium. Les pertes de chaleur et la condensation de vapeur s'en trouvent considérablement réduites. L'élément plastique ayant tendance à réduire la résistance mécanique du châssis, il faut que celui-ci soit plus robuste; son poids par unité de surface atteint de 6 à 13 kg au mètre carré.

Dans les régions où les températures moyennes sont plus élevées et les heures d'ensoleillement plus nombreuses, il est plus difficile d'assurer un refroidissement en été que d'empêcher les pertes de chaleur en hiver. Des recherches en ce sens sont en cours pour mettre au point de nouveaux types de châssis capables de réduire l'excédent de chaleur, sans qu'un écran séparé soit nécessaire. Une première étape a consisté à mettre en place des vitres réfléchissant la lumière. Une solution plus efficace pourrait consister en une double fenêtre à deux châssis placés de 10 à 30 cm de distance l'un de l'autre. La circulation d'air provoquée naturellement ou artificiellement entre les deux peut éliminer la plus grande partie de la chaleur excédentaire.

Dans les bâtiments de types traditionnels, 60 à 80 % des pertes de chaleur qui se produisent

pendant les mois d'hiver sont dues à des transferts de chaleur qui se font par les matériaux de construction employés dans le bâtiment, 20 à 40 % des autres transferts se faisant par les châssis des fenêtres. Les châssis modernes bien isolés en aluminium peuvent ramener ce dernier chiffre à 10 %. Dans une moindre mesure, il est également possible de réduire de manière appréciable la chaleur pendant les mois d'été en employant des châssis judicieusement conçus. Toutes ces innovations ont un effet déterminant sur la consommation d'énergie, domaine où il est toujours bon de faire des économies alors que les prix de l'électricité et des combustibles ne cessent d'augmenter. Dans les entrepôts frigorifiques on met en place des portes en aluminium, dans les hangars, les ateliers d'usines et dans certains bâtiments publics on installe de grandes portes en aluminium à commande automatique; on trouve également des portes et des fermetures en aluminium dans les bâtiments agricoles.

La fabrication de châssis de fenêtres en aluminium nécessite des pièces extrudées de formes suffisamment nombreuses et présentant les caractéristiques voulues. C'est pourquoi, dans les usines qui fabriquent de tels châssis, on trouve souvent des presses hydrauliques qui assurent l'extrusion des profilés nécessaires.

Pour les usines qui fabriquent ces châssis, les dépenses d'investissement varient selon le degré de mécanisation et d'automatisation et selon le rythme de la production. L'installation d'une usine automatisée produisant 5 000 t/an (80 000 m²/an) avec un maximum de 20 salariés nécessite un investissement de 40 millions de dollars. Une usine de même capacité mais beaucoup moins mécanisée ne coûterait que quelque 13 millions de dollars mais devrait employer environ 80 ouvriers.

Bâtiments préfabriqués et maisons mobiles

Pendant la période qui a suivi la seconde guerre mondiale, plusieurs usines de construction d'avions ont dû arrêter leur production et les locaux (petits bâtiments préfabriqués en aluminium) ont été mis en vente au Royaume-Uni et aux Etats-Unis. Ces bâtiments n'ont rencontré aucun succès par suite de défauts de conception et de phénomènes de corrosion imputables à l'emploi d'un mauvais alliage d'aluminium.

A l'heure actuelle, on trouve sur le marché deux types de construction préfabriquées en aluminium :

a) Des maisons mobiles que l'on transporte jusqu'à l'endroit voulu pour les monter en tant qu'unités préfabriquées indépendantes;

b) Des éléments modulaires qui permettent de monter sur place des combinaisons de cadres,

de toitures, de panneaux, de cloisons, de châssis de fenêtres et de portes.

Certes, les bâtiments préfabriqués en aluminium coûtent plus cher que des bâtiments analogues construits en matériaux traditionnels mais ils présentent un intérêt dans certains cas particuliers :

a) En tant que locaux temporaires lorsque les frais de démontage et de remontage sont inférieurs à ce qu'il coûterait de bâtir de nouveaux locaux (par exemple sur les chantiers de construction de nouveaux immeubles ou de nouvelles usines);

b) Dans les régions où il est difficile d'accéder ou difficile de manœuvrer;

c) Quand le temps presse.

Dans les régions où l'infrastructure est insuffisante, ces systèmes présentent des avantages supplémentaires:

a) Les transports sur de grandes distances étant coûteux et difficiles, la légèreté des éléments en aluminium est une considération importante;

b) Il est souvent difficile de trouver sur place de la main-d'œuvre, surtout qualifiée; le travail que suppose le montage ou l'installation de constructions préfabriquées est réduit au minimum.

Les bâtiments à charpente en aluminium peuvent avoir deux étages au maximum et doivent être conçus pour des portées petites ou moyennes ne dépassant pas 6 m. Ils sont particulièrement indiqués pour la construction de bungalows, de dortoirs, de locaux pour bureaux, d'ateliers, de laboratoires, de salles pour moteurs, d'écoles, de dispensaires, de salles de consultations ou de motels.

C'est aux Etats-Unis que les premières maisons mobiles ont été mises au point. Les cadres en aluminium sont faits dans un alliage AlZnMg à haute résistance qui se prête bien au soudage et sont généralement amenés sur place aux fins d'installation. Le système de cadres en aluminium mis au point en Suisse est analogue, à ceci près que les cadres soudés sont amenés sur le chantier où ils sont assemblés à l'aide de boulons.

Deux systèmes réalisés en République fédérale d'Allemagne sont faits de barres d'aluminium coupées aux mesures voulues, percées et dotées de dispositifs d'attache que l'on boulonne sur le chantier.

Un système réalisé actuellement en Hongrie comporte un maximum d'éléments préfabriqués, ce qui réduit la main-d'œuvre au minimum. Le cadre est soudé et les cloisons intérieures ainsi que

les panneaux extérieurs sont préfabriqués, ce qui permet d'aménager l'espace intérieur comme on le souhaite. Panneaux et cloisons sont attachés au cadre par un système simple de fixation.

Tous ces systèmes permettent de donner des formes diverses aux pièces extrudées et ont des joints qui facilitent la jonction des poutres, de la couverture et des murs à l'ossature du bâtiment.

La quantité d'aluminium nécessaire varie de 10 à 30 kg au m² pour chaque étage.

Usages divers

Les autres applications de l'aluminium dans l'industrie du bâtiment comprennent notamment :

Les échafaudages en tubes d'aluminium employé pour la construction et le ravalement;

Les murs-rideaux et les revêtements extérieurs des bâtiments;

Les rampes, les frises, les échelles;

Les appareils de construction, les conduites d'air, les radiateurs et les refroidisseurs.

Références

1. D. Altenpohl, "Technology planning and perspectives of aluminium industries in the seventies", Document présenté à la première Conférence sur l'aluminium à Székesfehérvár, octobre 1972, *Magyar Aluminium*, vol. 10, n° 1 (1973), p. 19 et 20.
2. G. Callaioli, "Perspectives of aluminium applications in electrical engineering", *Alluminio*, vol. 57, n° 3 (1978), p. 93.
3. A. Domony, "Present standards of aluminium finished product manufacture as reflected by world developments", *Magyar Aluminium*, vol. 9, n° 9 (1972), p. 245.
4. A. Domony, "Technical and economic features of aluminium usage in electrical engineering", *Magyar Aluminium*, vol. 3, n° 3 (1966), p. 63.
5. L. Deschamps, A. M. Schwab et A. Lacoste, "Perspectives d'énergie par câble isolé", *Bulletin de la direction des études et recherches EdF*, n° 2, 1975, p. 35.
6. R. Rols, "Généralisation de l'emploi de l'almelec dans les lignes aériennes de distribution à moyenne et basse tension de l'Electricité de France", *Revue de l'aluminium*, n° 414, 1973, p. 80 à 84.
7. H. Dibon, "Alumowelddrähte und Seile im Starkstromleitungsbau", *Aluminium*, vol. 49, n° 7 (1973), p. 483 à 487.
8. A. Domony, F. Miklos et T. Toth, "Principal trends and latest developments in aluminium usage by the electrical engineering industry of Hungary", *Magyar Aluminium*, vol. 11, n° 3 et 4 (1974), p. 82 à 93.
9. T. Tóth, "Development problems and research results with aluminium conductors", *Magyar Aluminium*, vol. 13, n° 3 et 4 (1976), p. 100 à 107.
10. T. Tóth et W. Zarebski, "International cooperation in the use of aluminium by the electric power industry", *Magyar Aluminium*, vol. 12, n° 3 et 4 (1975), p. 114 à 124.
11. F. Miklos et J. Friedrich, "Medium voltage aluminium pylon head structures", *Magyar Aluminium*, vol. 5, n° 2 (1968), p. 40 à 43.
12. J. Schuller, "Aluminium alloy overhead telephone conductors and their installation", *Kohaszati Lapok*, vol. 90, n° 12 (1957), p. 497.
13. G. Kardos, "The role of aluminium in new cable types", *Magyar Aluminium*, vol. 14, n° 6 (1977), p. 169 à 175.
14. F. A. Clark, M. A. Rheinberger et A. W. Sisson, *Aluminium Conductor in Paper-insulated Telephone Cables* (Prescott, Royaume-Uni, BICC, 1974). (Pamphlet)
15. K. I. Kincaid, "Recent trends in plastic-insulated telephone cable technology", *Electrical Communication*, vol. 49, n° 60 (1974).
16. BICC Telephone Cables Division, *Aluminium Conductor Fully Filled Concentric Layer Twin Cables up to 100 Pairs* (Prescott, Royaume-Uni). (Pamphlet)
17. G. Kardos, *Plastic-insulated High-power Conductors and Cables* (Budapest, Műszaki Könyvkiado, 1966).
18. A. Kara et F. Miklos "Practical aluminium applications in electric switchgear", *Magyar Aluminium*, vol. 7, n° 7 et 8 (1970), p. 196 à 199.
19. F. Miklos, "Up-to-date aluminium joints in electrical engineering", *Magyar Aluminium*, vol. 4, n° 8 (1967), p. 213 à 218.
20. J. Fodor et L. Szanto, *Electric Building Installations* (Budapest, Műszaki Könyvkiado, 1977).
21. F. Czelecz, J. Gardonyi et B. Sido, *The Installation of Heavy Power Equipment* (Budapest, Műszaki Könyvkiado, 1968).
22. M. Anka et A. Eva, "Thermal stability and improvement of creep resistance in unalloyed aluminium overhead conductors", *Magyar Aluminium*, vol. 12, n° 12 (1975), p. 361 à 371.
23. G. Ujhazy, "Experiences by Ganz Electrical Works in the field of transformers with aluminium armatures", *Magyar Aluminium*, vol. 11, n° 11 (1974), p. 337 à 340.
24. W. Nimmrichter, "Transformatoren", *Elektrizitätswirtschaft*, vol. 13, n° 9 (1973) p. 414.
25. E. C. Westinghouse, *Rectangular Coil Core Form Transformers* (1969). (Pamphlet)
26. W. Küster et H. Jaron, "Kriechverhalten und elektrischer Übergangswiderstand bei Aluminium-Schraubverbindungen", *Aluminium*, vol. 48, n° 7 (1972), p. 496 à 500.

27. A. Kara et F. Milos, "Joints of aluminium conductor bars", *Magyar Aluminium*, vol. 6 n^o 7 et 8 (1969), p. 213 à 215.
28. O. Feimer, "Die Verwendung von Platten und Aluminium für die Kapselung von Schaltungsanlagen", *Energietechnik*, n^o 10, 1973.
29. "Explosion techniques in joining aluminium conductors", *Energetyka* (Varsovie), n^o 11, 1975.
30. "Explosionsschweißen von Aluminiumschienen", *Werkstatt und Betrieb*, n^o 10, 1973.
31. "Erwärmung von Kapselungen elektrischer Leiter und Schalter", *Schweizer Maschinenmarkt*, n^o 11, 1972.
32. I. Varga, *Welding of Aluminium: Post-graduate textbook* (Budapest, Technische Universität, 1972), vol. 1 et 2.
33. A. Kara et F. Milos, "Practical aluminium applications in electrical switchgear", *Magyar Aluminium*, vol. 7, n^o 7 et 8 (1979), p. 196 à 199.
34. A. Horvath et A. Kara, "The first aluminium switchgear in Hungary", *Villamosság*, vol. 14, n^o 5 et 6 (1966), p. 137 à 143.
35. A. Kara, "Aluminium electrical switchgear for exports", *Magyar Aluminium*, vol. 9, n^o 12 (1972), p. 365 à 368.
36. S. Egerhazi, "Variations in the structure of anodic oxide films with field strength and the material used", *Magyar Aluminium*, vol. 13, n^o 6 (1976), p. 180 à 185.
37. A. Domony, *Aluminium Handbook* (Budapest, Nehezipari Könyvkiado, 1967).
38. Aluminium Association, *Aluminium With Food and Chemicals* (New York, 1967).
39. W. Hufnagel, "Aluminiumgeräte für Lagerung, Transport oder Zubereitung von Nahrungsmitteln und Getränken", *Aluminium*, vol. 54, n^o 6 (1978), p. 403 à 406.
40. J. I. Menzies, "Testing time in US can making", *Metal Bulletin Monthly*, vol. 82, n^o 3 (1974), p. 10.
41. N. P. Shumeyko et J. P. Smolocmtsev, *Proysvodstvo alyuminievoy konservnoy tary* (Moscou, Pischevaya Promyslennosty, 1978).
42. "Aluminium and tinplate usage in can manufacture", *Revue de l'aluminium*, n^o 393 (1971), p. 146.
43. I. Kelemen, "Thin-walled aluminium packaging items", *Kozerv-es Paprikaipar*, n^o 2, 1978, p. 62.
44. I. Komjati, "Aluminium packaging and technical development in Hungary", *Magyar Aluminium*, vol. 6, n^o 10 et 11 (1969), p. 299 à 302.
45. A. Domony et I. Komjati, "The use of thin strips in canning", *Magyar Aluminium*, vol. 5, n^o 2 (1968), p. 37 à 39.
46. H. Schmidt, "Aluminium in the fish canning industry of the German Democratic Republic", *Magyar Aluminium*, vol. 12, n^o 10 (1975), p. 293 à 295.
47. A. Domony, "Replacement of tinplate by other materials", *Magyar Aluminium*, vol. 14, n^o 12 (1977), p. 361 à 365.
48. E. Szenes, "Aluminium usage in canning", *Magyar Aluminium*, vol. 7, n^o 12 (1970), p. 353 à 357.
49. A. Domony, "Up-to-date can manufacture by wall-reducing deep-drawing (ironing)", *Magyar Aluminium*, vol. 10, n^o 6 (1973), p. 180 à 183.
50. "Tecinno-economic novelties", *Magyar Aluminium*, vol. 14, n^o 10 (1977), p. 302.
51. F. Balla, "The usage and economic feasibility of aluminium collapsible tubes in food-processing", *Magyar Aluminium*, vol. 10, n^o 6 (1973), p. 177 à 179.
52. T. B. Herbst et H. Schröder, "Tuben aus Aluminium-Kunststoff-Verbindungen", *Aluminium*, vol. 54, n^o 5 (1978), p. 313.
53. I. Acsady, "Aluminium foil manufacture at the Kőbánya Light Metal Works", *Magyar Aluminium*, vol. 15, n^o 3 et 4 (1978), p. 136 à 140.
54. M. Frecska, "Prepared food in aluminium foil trays", *Magyar Aluminium*, vol. 9, n^o 3 et 4 (1972), p. 119.
55. F. Palazzo, "The future of aluminium in the automotive industry", *Alluminio*, vol. 56, n^o 9 (1977), p. 323 à 334.
56. *Fachtagung Aluminium und Automobil* (Düsseldorf, Aluminium Zentrale, 1976).
57. K. Karácsonyi et A. Rajczy, "Modernisation of crankcase production and increasing productivity by mechanization with the aid of the enterprise's own resources", *Kohászati Lapok*, vol. III, n^o 3 (1978), p. 55 à 63.
58. P. Müller, "Aluminium und Energie", *Schweizer Aluminium Rundschau*, vol. 28, n^o 42 (1978), p. 165 à 172.
59. D. Fertou, F. Guiraldeno et T. Vinh, "Emploi d'aluminium dans les structures absorbant les chocs", *Revue de l'aluminium*, n^o 457 (1976), p. 563.
60. G. Sburlati, "Prefabricated superstructures of industrial vehicles", *Alluminio* (Milan), vol. 56, n^o 9 (1977), p. 344 à 347.
61. G. H. Gross, "Die Anwendung von Aluminium bei Kippfahrzeugen", *Aluminium*, vol. 45, n^o 9 (1969), p. 574 à 576.
62. G. H. Gross et U. Duncker, "Aluminiumfahrzeugkonstruktionen", *Aluminium*, vol. 45, n^o 9 (1969), p. 577 à 579.
63. I. Baránszky-Jób, "How to improve cost-effectiveness of aluminium rolling stock production by using semis of special design", *Magyar Aluminium*, vol. 15, n^o 5 (1978), p. 170 à 177.
64. "Energiesparer Aluminium" *Aluminium Presse-Information* (Düsseldorf, Aluminium Zentrale), vol. 11, n^o 5 (1978), p. 7020.
65. "Leichtmetallwägen für die U-Bahn von Atlanta", *Eisenbahntechnische Rundschau*, vol. 26, n^o 3 (1977), p. 2.

V. Fabrication des produits

Pousser la consommation d'aluminium a toujours été un des soucis majeurs des producteurs d'aluminium. L'apparition de nouveaux débouchés augmente la demande et contraint les usines de demi-produits et autres fabricants à rechercher des techniques plus perfectionnées pour répondre aux exigences toujours plus grandes des consommateurs.

L'industrie de l'aluminium est constamment en butte à la concurrence d'autres matériaux et il lui est difficile de maintenir sur place et de trouver de nouveaux marchés. Pour cela, elle bénéficie souvent des services d'organismes consultatifs (voir chapitre III). Pour la fabrication des produits, les organismes peuvent :

a) Aider à élaborer les ébauches de normes par leurs recommandations et leur participation active;

b) Coopérer à l'établissement et la publication de manuels, de documents et de tableaux de référence, ainsi qu'à l'organisation de conférences et de cours postuniversitaires à l'intention des ingénieurs et spécialistes des secteurs usagers;

c) Participer activement, en coopération avec les pouvoirs locaux, à la réalisation de projets nécessitant des économies d'énergie ou un usage plus rationnel de matériaux peu abondants.

Normalisation

La normalisation assure que les dimensions d'un produit sont exactes, que ce produit est interchangeable et durable et qu'il satisfait à des critères de sûreté d'exploitation, d'hygiène et de protection de l'environnement. Pour que les normes puissent être appliquées, il faut qu'un accord complet soit intervenu au sein d'un organisme composé des principaux producteurs et consommateurs. Il faut également des règlements et des normes spéciales qui régissent le montage et l'installation des produits et en garantissent la qualité.

Un ensemble de normes distinctes concernant les lingots et les demi-produits doit être établi

d'un commun accord entre les fabricants et les fonderies. C'est là parfois une tâche ardue car les intérêts des parties sont souvent contradictoires. L'industrie de l'aluminium est parfois contrainte à introduire des techniques nouvelles et coûteuses avant que certaines normes ne soient adoptées. Il importe que les représentants de cette industrie participent aux délibérations de tous les comités de normalisation.

Bien que les normes diffèrent d'un pays à un autre, il en existe trois types principaux :

a) Les normes visant les matières premières, qui régissent la composition, les propriétés mécaniques, les dimensions et, plus récemment, les propriétés techniques des lingots et des demi-produits (par exemple : conductivité électrique, possibilité d'emploi pour emboutissage profond, etc.). Ces normes sont généralement rédigées par des experts de l'aluminium, mais les principaux consommateurs doivent être consultés avant leur adoption;

b) Les normes visant les demi-produits sont applicables à un secteur bien particulier; elles énumèrent les caractéristiques techniques essentielles du matériau à partir duquel le produit fini est fabriqué ainsi que les principales propriétés de ce dernier. Ces normes doivent être coordonnées avec celles qui visent les matières premières. Elles sont généralement rédigées en commun par des spécialistes d'un secteur déterminé auquel l'aluminium est destiné (électrotechnique, bâtiment et construction, emballage, etc.) et des spécialistes de la production d'aluminium;

c) Les normes techniques sont applicables au soudage, aux traitements de surface, etc. Si ces normes sont établies à l'initiative de l'industrie de l'aluminium, les principaux fabricants qui emploient ces techniques doivent être consultés.

Dans de nombreux pays industriels, les propriétés et les applications d'une large gamme de produits sont régies par des normes qui viennent souvent compléter tout un ensemble d'instructions ou de règles détaillées intéressant les techniques et les modalités d'installation. Il faut, le cas échéant, que chaque pays révise et adapte ces normes en fonction des conditions locales.

Peu après 1950, un système de recommandations a été établi en Hongrie. Bien qu'il ne s'agisse pas de normes à proprement parler, ces recommandations visaient d'une part à pousser l'emploi de l'aluminium et d'autre part à réduire l'emploi d'autres métaux non ferreux. Elles précisaient si cet emploi était souhaitable, indiqué, possible ou impossible. (Il va sans dire que ces recommandations doivent être révisées de temps à autre pour tenir compte des progrès techniques les plus récents.)

Manuels

Il importe au plus haut point que les concepteurs, les chercheurs, les ingénieurs du bureau d'études et de l'usine, des spécialistes tels que les économistes et surtout les ouvriers qualifiés et les artisans sachent bien comment traiter et employer l'aluminium dans les divers secteurs industriels. En effet, même s'ils connaissent bien les éléments essentiels de leur spécialité ils connaissent généralement assez peu les études, les techniques, les normes, les possibilités d'emploi et autres considérations particulières à la consommation de l'aluminium.

Les chercheurs, les ingénieurs et les consultants des bureaux d'études qui travaillent pour l'industrie de l'aluminium doivent prendre l'initiative de rédiger des manuels, des traités, des brochures et des tables à l'intention des ingénieurs, techniciens et ouvriers spécialisés qui travaillent dans cette industrie. L'Aluminium Zentrale de la République fédérale d'Allemagne a sa propre entreprise d'édition, l'Aluminium Verlag. Toutes les grandes sociétés multinationales et la plupart des grandes sociétés d'aluminium font paraître des publications plus ou moins nombreuses.

Nous indiquons ci-après les principaux types de documents publiés par l'industrie de l'aluminium.

Manuels. Les manuels exposent les propriétés mécaniques et techniques de l'aluminium ainsi que les usages auxquels sont destinés les demi-produits (par exemple les très nombreux profilés obtenus par extrusion), les méthodes de traitement auxquels ils sont soumis, les techniques et les opérations correspondantes (par exemple moulage, soudage, traitement de surface, usinage). Ils donnent également des directives concernant la conception, l'installation et l'emploi des produits en aluminium.

Tables. Les tables aident ces ingénieurs des bureaux d'études à réaliser des pièces optimales en

tirant le meilleur parti des caractéristiques essentielles de l'aluminium. Etant donné qu'il est très rare que l'on puisse adapter valablement et économiquement les pièces fabriquées avec des matériaux traditionnels pour en faire des pièces en aluminium, il est indispensable de rechercher de nouveaux modèles judicieusement conçus.

Opuscules et brochures. Les ouvrages de ce genre pourraient traiter des opérations ou des techniques spéciales telles que la déformation plastique, le moulage, le soudage, l'usinage ou le traitement de surface de l'aluminium. Ils devraient être circonscrits, comporter de nombreuses illustrations et être rédigés dans un style facilement accessible aux ingénieurs, techniciens et ouvriers spécialisés.

Publications spéciales. Ces publications précisent dans quels cas il est indiqué d'employer l'aluminium. Là encore, le langage doit être clair et sans ambiguïté, le jargon professionnel n'intervenant que s'il est impossible de l'éviter.

Notes de stage. On y trouvera des résumés d'exposés faits lors des stages ou des enseignements recueillis lors des cycles d'études.

Catalogues et dépliants. Ces publications peuvent donner des spécifications détaillées de demi-produits ou exposer les caractéristiques d'une certaine génération de produits. Elles peuvent également traiter des produits accessoires (par exemple lubrifiants spéciaux, systèmes de soudage, bains pour traitements de surface) employés dans le travail de l'aluminium. L'industrie de l'aluminium doit encourager leur publication et leur diffusion, même si elle ne fabrique pas les produits en question.

Revue. La publication d'une revue de l'aluminium ne se justifie que s'il existe dans la région une industrie puissante de l'aluminium. Une telle revue est très utile pour développer les relations entre fonderies, transformateurs primaires et secondaires et consommateurs, et pour renforcer la coopération entre les instituts de recherche et d'étude d'une part et les entreprises industrielles d'autre part. C'est l'industrie de l'aluminium qui doit en être le principal promoteur.

Il serait bon que les techniques de l'aluminium soient inscrites au programme des instituts de mécanique et de chimie. Des cours de formation pourraient aussi être organisés à l'intention des techniciens et des ouvriers spécialisés ou pour former des spécialistes ayant déjà reçu une formation universitaire. Il serait souhaitable que les services de l'Etat apportent leur appui moral ou financier à ces cours.

Réglementation

Quand l'aluminium remplace un matériau traditionnel, il peut falloir jusqu'à vingt ans pour mettre au point les techniques nouvelles correspondantes. L'élaboration d'un nouveau produit ou d'une nouvelle technique prend beaucoup de temps et se fait en plusieurs étapes : la première consiste à bien concevoir le produit; la deuxième intéresse la fabrication d'un prototype qui doit être soumis à des essais pratiques. Si le prototype paraît ne pas avoir d'avenir commercial il faut en reprendre l'étude; c'est seulement après qu'on pourra commencer la fabrication en série. Toutes ces étapes se déroulent dans un climat de concurrence acharnée et impliquent de gros risques financiers. Les grands producteurs d'aluminium sont prêts à prendre de tels risques, comptant bien en tirer des profits substantiels et ouvrir de nouveaux débouchés au métal. Dans les pays où il n'existe que de petits producteurs indépendants ou quand l'industrie de l'aluminium fait partie du secteur public, l'Etat est souvent amené à subventionner ces initiatives pour parvenir à restructurer la production nationale.

L'intervention de l'Etat n'aura toutefois de sens que si elle s'inscrit dans la stratégie économique à long terme d'un pays ou d'une région. En effet, l'industrie de l'aluminium (existante ou potentielle) peut influencer puissamment l'avenir économique d'un pays. Réflexion méthodique, perspicacité et patience s'imposent si l'on veut faire reposer une telle industrie sur des bases économiques saines et rentables.

La création d'une industrie de l'aluminium doit couvrir le plus grand nombre possible d'étapes de la production. Il faut à cette fin arrêter un programme à long terme, coordonner les plans d'investissement et de développement à chaque niveau de l'intégration, en fonction notamment des perspectives du marché. Il faut aussi tenir compte des possibilités de substitution de l'aluminium à d'autres matériaux.

En Hongrie par exemple, la complète intégration de l'industrie de l'aluminium en vertu d'un programme lancé et approuvé par le gouvernement a exercé une influence considérable sur l'économie du pays [1, 2]. Partant des ressources nationales en bauxite, il couvre toutes les étapes successives de l'intégration (fabrication de l'alumine, fonderie et demi-produits) et fixe aussi des objectifs à long terme au développement des industries utilisatrices. Il accorde une attention spéciale aux possibilités de substitution de l'aluminium à d'autres matériaux chaque fois que cela est techniquement et économiquement possible. Les objectifs de recherche et les détails techniques correspondants font partie intégrante du pro-

gramme centralisé [3, 4], de même que les plans visant à substituer l'aluminium à d'autres matériaux et à créer les installations nécessaires à cet effet.

Dans l'établissement des priorités, les organismes responsables accordent un plein appui moral et financier à la recherche, à la conception, à la réalisation des prototypes et à l'exploitation d'usines témoins. Un comité de travail, où toutes les parties intéressées sont représentées, contrôle l'exécution des éléments du programme central de développement. Il coordonne aussi les travaux des instituts de recherche et d'études avec ceux des entreprises industrielles, évalue périodiquement les résultats obtenus et les échecs enregistrés et soumet des recommandations aux autorités. Les organes de l'Etat, les instituts scientifiques et les entreprises ayant souvent des intérêts et des obligations financières contradictoires et les risques du lancement de nouveaux produits pouvant être considérables, ce type d'organisation semble être la meilleure solution.

Quelle est la part d'intervention gouvernementale nécessaire pour administrer correctement une industrie de l'aluminium ? C'est là une question à laquelle il est difficile de répondre. La situation différant d'un pays à l'autre selon le régime et la structure de l'économie et le potentiel de l'industrie locale de l'aluminium. Ouvrir de nouveaux marchés à l'aluminium et faire en sorte qu'il se substitue à d'autres matériaux n'est pas une opération spontanée. Souvent les consommateurs éprouvent une sentiment inné d'hésitation à accepter toute innovation; la plupart d'entre eux ont besoin que les idées nouvelles leur soient présentées avec force détails. Pour mener à bien de nouvelles entreprises, il faut généralement des mises de fonds élevées et le concours de spécialistes les plus divers. Dans les pays industrialisés, l'industrie de l'aluminium est entre les mains de grandes sociétés qui disposent des ressources nécessaires pour prendre pied sur de nouveaux marchés et vendre leurs produits au plus offrant. S'il le faut, elles rachètent les petites entreprises, créent des filiales ou concluent des associations. Dans ces pays, les organes de l'Etat et le secteur public jouent généralement un rôle secondaire en ce qui concerne l'industrie de l'aluminium. Dans les pays à économie planifiée, la situation est différente : c'est à des organes de l'Etat qu'il appartient de fixer les objectifs à long terme et de prendre les mesures d'organisations propres à les atteindre. Ces organes non seulement sont chargés de surveiller et de coordonner les divers secteurs de l'industrie, mais partagent souvent aussi les risques financiers que comporte le lancement de nouvelles entreprises et établissent les priorités des efforts techniques et des innovations à entreprendre.

Références

1. F. Levardi, "Programme approved by the government for the development of the aluminium industry", *Magyar Aluminium*, vol. 7, n° 5 (1970), p. 129 à 133.
2. I. Dozsa, "Central Development Programme of the Hungarian Aluminium Industry", *Magyar Aluminium*, vol. 14, n° 1 (1977), p. 1 à 5.
3. M. Horanyi et A. Domony, "Main technical development targets embodied in the development programme of the aluminium industry", *Magyar Aluminium*, vol. 8, n° 10 (1971), p. 305 à 310.
4. A. Domony et G. Temesszentandrasi, "Domestic aluminium consumption in Hungary and the introduction of new products", *Magyar Aluminium*, vol. 14 n° 1 (1977), p. 6 à 11.

ABSTRACT

The present volume of the Development and Transfer of Technology Series is based on a study entitled "The economic use of aluminium" (UNIDO/IOD.335). The study outlines the factors affecting aluminium production and consumption and the main reasons for using aluminium and describes how and under what circumstances aluminium consumption expands in a developing country. Although the study reflects largely experience in Hungary, it is applicable in a general sense to many countries. It is designed to reveal the economic effects of establishing and developing an aluminium industry. While reporting experience in various areas, it cites several concrete examples of design, prototype manufacture and production on an industrial scale. It deals with organizational matters, the importance of staff training and the intervention, if necessary, by various government agencies with a view to boosting aluminium consumption.

In chapter I, world production and world market prices of diverse structural materials are analysed in relation to aluminium, and the effects of production and prices on the raw material consumption pattern in some countries and parts of the world are discussed. Forecasts to the end of the century are made.

The second chapter describes how aluminium may successfully replace other structural materials, even if there is serious competition. It emphasizes that the steep rise in aluminium consumption over the past decades has not been a spontaneous but rather a carefully premeditated and well-engineered process. The driving force of techno-economic advance may be a Government, a major aluminium company or a group of firms interested in processing aluminium.

The third chapter discusses what organizational steps have to be taken in acquiring and adopting know-how and how to take advantage of know-how in the most effective manner. In this connection, the Hungarian experience is dwelt on at some length to demonstrate how this goal may best be achieved.

The fourth chapter is devoted to existing or prospective demand by electrical and chemical engineering, breweries, dairies, food packaging, the building trade, the manufacture of heat exchangers and transport vehicles, as well as agriculture. Several concrete examples from these and related fields are cited.

The fifth chapter is a summary of measures that are necessary to promote aluminium usage. Increasing aluminium consumption and finding new economically feasible outlets are, in the first place, a major concern of the aluminium raw material producers; a wider spectrum of new end-uses is creating an added demand for aluminium in the form of metal and semi-manufactures. Hence, it is desirable to set up advisory bodies to co-ordinate solutions to the technological and marketing problems of smelters, mills and finished product manufacturers. Furthermore, it is expedient to launch long-term programmes for technical development and business strategies. Development targets have to be brought into line with anticipated market demand: a case in point is Hungary, where development concepts of the vertically integrated aluminium industry (bauxite operations, alumina production, aluminium smelting and the manufacture of semi-fabricated products) are always closely linked to the wishes of end-using industries and consumers.

No universal formula is presented; development of the aluminium industry will depend on the economic structure of a country and the position of its local aluminium industry.

EXTRACTO

El presente volumen de la Serie "Desarrollo y transferencia de tecnología" se basa en el estudio titulado "El uso económico del aluminio" (UNIDO/IOD.335). El estudio reseña los factores que afectan la producción y el consumo de aluminio así como las principales razones para utilizarlo, y describe cómo y en qué circunstancias aumenta el consumo de aluminio en un país en desarrollo. Si bien el estudio refleja en gran parte la experiencia de Hungría, es aplicable en un sentido general a muchos países. Su objetivo es dar a conocer los efectos económicos del establecimiento y desarrollo de una industria del aluminio. Al tiempo que informa sobre las experiencias en diversas esferas, cita varios ejemplos concretos de diseño, fabricación de prototipos y producción a escala industrial. Trata de asuntos relativos a la organización, la importancia de capacitar personal y la intervención, en caso necesario, de varios organismos gubernamentales con miras a promover el consumo de aluminio.

En el primer capítulo, la producción mundial y los precios de mercado mundiales de diversos materiales estructurales se analizan en relación con el aluminio y se examinan los efectos de la producción y los precios sobre la estructura del consumo de materias primas en algunos países y partes del mundo. Se consignan previsiones hasta el final del siglo.

El segundo capítulo describe cómo el aluminio puede reemplazar ventajosamente a otros materiales estructurales, aun cuando existe una gran competencia. Pone de relieve que el fuerte aumento del consumo de aluminio en los últimos decenios no ha sido espontáneo, sino más bien un proceso cuidadosamente premeditado y bien gestionado. La fuerza impulsora del adelanto tecnoeconómico puede ser un gobierno, una importante empresa de aluminio o un grupo de empresas interesadas en la elaboración del aluminio.

El tercer capítulo examina qué medidas cabe adoptar en materia de organización para adquirir y adoptar know-how, y cómo aprovechar ese know-how de la manera más eficaz. A ese respecto, se expone con cierto detalle la experiencia húngara para demostrar de qué forma esa meta puede lograrse mejor.

El cuarto capítulo está dedicado a la demanda existente o futura por parte de las empresas de ingeniería eléctrica y química, las cervecerías, las empresas lecheras, de envasado de alimentos, del sector de la construcción, de fabricación de termointercambiadores y vehículos de transporte, así como en el sector de la agricultura. Se citan varios ejemplos concretos de esas esferas y otras conexas.

El quinto capítulo resume las medidas que son necesarias para promover el empleo del aluminio. Incrementar el consumo de aluminio y encontrar nuevas salidas económicamente factibles son, en primer lugar, la preocupación primordial de los productores de materias primas de aluminio; al ampliarse el espectro de usos finales aumentó la demanda de aluminio en forma de metal y semimanufacturas. Por lo tanto, conviene crear órganos asesores que coordinen las soluciones a los problemas tecnológicos y de comercialización de los fundidores, los talleres de preparación mecánica y los fabricantes de productos acabados. Además, es conveniente iniciar programas a largo plazo de desarrollo técnico y estrategias comerciales. Las metas del desarrollo deben ajustarse a la demanda del mercado prevista: un caso típico es Hungría, donde los conceptos de desarrollo de la industria del aluminio integrada verticalmente (beneficio de la bauxita, producción de alúmina, fusión del aluminio y fabricación de productos semielaborados) siempre están estrechamente relacionados con los deseos de las industrias que son las usuarias finales del aluminio y de los consumidores del mismo.

No se presenta ninguna fórmula universal; el desarrollo de la industria del aluminio dependerá de la estructura económica de un país y la posición de su industria de aluminio nacional.

Série "Mise au point et transfert des techniques"

- *N° 1 Systèmes nationaux d'acquisition des techniques (ID/187), numéro de vente : F.78.II.B.7. Prix : 8 dollars des Etats-Unis.
- N° 2 UNIDO Abstracts on Technology Transfer (ID/189). (Introduction en anglais, en espagnol, en français et en russe.)
- *N° 3 Fabrication de véhicules bon marché dans les pays en développement (ID/193), numéro de vente : F.78.II.B.8. Prix : 3 dollars des Etats-Unis.
- N° 4 Manuel sur le matériel d'essais et le contrôle de la qualité dans l'industrie textile (ID/200).
- *N° 5 Techniques d'utilisation de l'énergie solaire (ID/202), numéro de vente : F.78.II.B.6. Prix : 10 dollars des Etats-Unis.
- N° 6 Les techniques audiovisuelles au service de l'industrie (ID/203).
- N° 7 Techniques provenant des pays en développement (I) (ID/208).
Techniques provenant des pays en développement (II) (ID/246).
- N° 8 Procédés de fabrication des engrais phosphatés (ID/209).
- N° 9 Procédés de fabrication des engrais azotés (ID/211).
- *N° 10 Briqueterie : profil d'une industrie (ID/212), numéro de vente : F.78.II.B.9. Prix : 4 dollars des Etats-Unis.
- N° 11 Profils techniques sur l'industrie sidérurgique (ID/218).
- N° 12 Principes directeurs pour l'évaluation des accords de transfert de technologie (ID/233).
- N° 13 Manuel des engrais (ID/250).
- N° 14 Etudes de cas d'acquisition de technologie (I) (ID/257).
Case-Studies in the Acquisition of Technology (II) (ID/295).
- N° 15 L'autosuffisance technologique des pays en développement : vers l'adoption de stratégies opérationnelles (ID/262).
- N° 16 Metal Production Development Units (ID/271).
- N° 17 Les exportations de techniques des pays en développement (I) : Argentine et Portugal (ID/289).
- N° 18 Basic Technological Disaggregation Models : I. The Petrochemical Industry (ID/302).
- N° 19 Technological Perspectives in the Machine-Tool Industry and their Implications for Developing Countries (ID/312).
- N° 20 Bauxite Testing Laboratories (ID/316).
- N° 21 L'économie de l'aluminium (ID/324).
- N° 22 Informatics for Industrial Development (ID/326).

En Europe, en Amérique du Nord et au Japon, toutes les publications citées ci-dessus peuvent être obtenues gratuitement, à l'exception de celles qui sont marquées d'un astérisque et qui sont mises en vente, séparément, dans ces régions, au prix indiqué. Dans les autres régions, toutes les publications, sans exception, peuvent être obtenues gratuitement.

Pour obtenir des numéros gratuits, il suffit d'adresser une demande au Rédacteur en chef du *Bulletin d'information*, boîte postale 300, A-1400 Vienne (Autriche), en indiquant le titre et la cote du ou des documents souhaités.

Il est possible de commander les numéros mis en vente, en indiquant le titre et le numéro de vente, aux vendeurs autorisés des publications des Nations Unies ou à l'un des services suivants :

Pour l'Europe
Section des ventes
Office des Nations Unies
CH-1211 Genève 10
(Suisse)

Pour l'Amérique du Nord et le Japon
Section des ventes
Nations Unies
New York, New York 10017
(Etats-Unis d'Amérique)

