

FP/0408-75-01



**ASPECTS ÉCOLOGIQUES  
DE L'INDUSTRIE DE L'ALUMINIUM**

**- vue d'ensemble -**



**PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT**

**ASPECTS ÉCOLOGIQUES  
DE L'INDUSTRIE DE L'ALUMINIUM**  
— une vue d'ensemble —



PNUE, Programme pour l'Industrie  
Paris, Mai 1977

## TABLE DES MATIERES

	<i>Pages</i>
AVANT-PROPOS .....	5
1. INTRODUCTION .....	7
2. L'INDUSTRIE DE L'ALUMINIUM .....	9
2.1. Extraction de la bauxite .....	10
2.2. Production d'alumine à partir de la bauxite .....	10
2.3. Réduction de l'alumine .....	10
2.4. Refonte, transformation et finissage .....	11
2.5. Recyclage des déchets .....	13
3. PROBLEMES ECOLOGIQUES ACTUELS, TECHNOLOGIE DESTINEE A REDUIRE LA POLLUTION, ET COUTS .....	13
3.1. Utilisation des sols .....	13
3.2. Déchets solides .....	14
3.3. Effluents liquides .....	15
3.4. Emissions atmosphériques .....	18
3.5. Effets biologiques des émissions atmosphériques de fluorures ..	24
4. INCIDENCE DES NOUVEAUX PROCEDES DE PRODUCTION SUR LA DIMINUTION DE LA POLLUTION .....	27
4.1. Procédés de substitution pour la production d'alumine .....	27
4.2. Procédés de substitution pour la production de l'aluminium ..	29
5. LEGISLATIONS ET NORMES CONCERNANT LES FLUORURES .....	30
5.1. Emissions de fluorures .....	30
5.2. Qualité de l'air ambiant .....	31
5.3. L'environnement en milieu professionnel .....	32
5.4. Normes concernant les effluents liquides .....	33
6. CONCLUSIONS .....	34

## AVANT - PROPOS

Lors de sa première session tenue en Juin 1973, le Conseil d'Administration du PNUE a reconnu l'importance des problèmes écologiques associés au développement industriel et a noté l'intention du Directeur Exécutif de lancer des travaux préliminaires sur les problèmes écologiques de certaines industries.

L'industrie de l'aluminium est l'un des principaux secteurs industriels retenus afin d'être examiné. Des consultations ont été entreprises avec des experts nommés par les Gouvernements, l'Industrie et des Organisations Internationales, Gouvernementales et non-Gouvernementales et se sont concrétisées par un séminaire, tenu à Paris en octobre 1975, au cours duquel ont été évaluées les techniques antipollution disponibles, les questions majeures et les issues possibles en matière de recherche et de développement permettant de résoudre ces problèmes concernant l'incidence écologique de l'industrie de l'aluminium.

Ce rapport présente une synthèse de l'évaluation qui a été effectuée et souligne les aspects techniques des problèmes écologiques associés à l'industrie de l'aluminium.

Les opinions exprimées dans ce rapport ne sont pas nécessairement représentatives des décisions ou de la politique adoptées par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement ; en outre la mention de marques ou de procédés commerciaux n'implique aucun assentiment de la part du PNUE.

## 1. INTRODUCTION

L'aluminium est le métal le plus abondant de l'écorce terrestre et l'alumine est la principale matière première dans la production de l'aluminium. Toutes les roches ignées contiennent des silicates d'aluminium, et face à l'érosion due aux intempéries, l'aluminium demeure généralement insoluble sous la forme d'un silicate impur d'aluminium, une argile. Certaines de ces argiles pourront un jour être utilisées dans la production de métal d'aluminium, mais actuellement c'est seulement le minerai de bauxite qui est utilisé. Les réserves mondiales de bauxite sont estimées à environ 6.000 millions de tonnes.

L'aluminium possède une large gamme d'applications en raison de sa faible densité, de son rapport élevé solidité/poids, de sa résistance à la corrosion, de sa conductivité électrique élevée et de sa facilité de transformation. L'ensemble de la production annuelle mondiale de métal de première fusion en 1973 dépassait 13 millions de tonnes. Au cours des dix dernières années la production a augmenté à un taux annuel d'environ 8 %, soit un doublement de la production en 9 ans.

La consommation de métal d'aluminium est plus élevée que la production de métal de première fusion, en raison du recyclage par l'industrie secondaire.

La production d'aluminium est une opération en deux étapes qui consiste en :

- a) Un affinage des matières premières riches en alumine pour obtenir de l'alumine pure ou éventuellement du chlorure d'aluminium et
- b) Une conversion d'alumine pure ou de chlorure d'aluminium en aluminium en fusion par électrolyse à haute température dans un bain de sels fondus.

Ces deux étapes s'effectuent souvent dans deux endroits différents et très éloignés l'un de l'autre. Dans un passé récent, de nombreuses recherches et des travaux d'application ont été réalisés sur la dite «réduction directe» en aluminium des matières premières contenant de l'alumine. Plusieurs autres méthodes ont été envisagées, mais aucune ne s'est montrée réellement prometteuse et, de ce fait, toutes ont été abandonnées. C'est pourquoi il est peu vraisemblable que ces activités reprennent un jour.

La production d'aluminium de première fusion, en particulier l'opération de réduction et la refonte, consomme une grande quantité d'énergie. Il est difficile de généraliser les besoins énergétiques nécessaires à la production de l'aluminium parce qu'il existe de grandes divergences d'une installation à l'autre. Lorsque l'on analyse les besoins énergétiques par tonne d'aluminium produit, il conviendrait d'effectuer une distinction entre les besoins en énergie électrique (principalement pour l'électrolyse) et les besoins en énergie thermique (pour la calcination, la vapeur nécessaire au traitement, la cuisson, la recuisson, etc.).

afin d'éviter toute conclusion erronée. Pour produire une tonne métrique d'aluminium, il a été estimé (1) que les besoins énergétiques typiques sont actuellement les suivants :

<i>Opération</i>	<i>Energie électrique (Kwh)</i>	<i>Energie thermique (10<sup>6</sup> Kcal)</i>
Extraction et transport	100	1,3
Production d'alumine	400	7,1
Réduction	17.400	5,5*
Fonte	100	2,0
	<hr/> 18.000	<hr/> 15,9

\* y compris le carbone

Grâce à l'amélioration des techniques de production, il a été possible de réduire la consommation d'énergie du procédé de réduction jusqu'à 17.400 Kwh/tonne en moyenne, et pour les installations les plus modernes, jusqu'à 14.300 Kwh/tonne. Dans l'avenir il semblerait que la consommation énergétique des nouveaux procédés, actuellement testés en usine pilote, puisse être abaissée jusqu'à environ 9.900 Kwh/tonne (1). Cependant d'importants investissements en capital seront nécessaires.

Même si les ressources en alumine sont abondantes et constituent quelque 7 % de l'écorce terrestre, l'approvisionnement en bauxite riche est limité et de ce fait, d'autres sources d'aluminium devront être utilisées. Cela se traduira par une certaine augmentation de la consommation d'énergie, comparée à ce qu'elle était lors de l'utilisation de bauxite pure.

Un aspect plus important de la protection des ressources dans la production de l'aluminium est le recyclage. Le recyclage de l'aluminium ne nécessite qu'un faible pourcentage de l'énergie nécessaire à la production du même métal à partir de sources vierges, et de très importantes quantités de déchets d'aluminium sont potentiellement recyclables.

---

(1) Organisation de Coopération et de Développement Economiques, OCDE (1976)  
"Adaptations industrielles dans l'industrie de l'aluminium de première fusion",  
OCDE PARIS.

Dans la fabrication de l'aluminium par utilisation de procédés et de technologies actuels, les principaux polluants émis sont les déchets solides (boues rouges), les émissions gazeuses (fluorures, oxydes de soufre, monoxyde de carbone, hydrocarbures, particules) et les effluents liquides (solution alcaline résiduaire contenant de l'aluminate de sodium ou du fluorure de calcium). Les problèmes écologiques majeurs sont associés au dégagement de fluorures et de particules solides, et à l'élimination des boues rouges.

## 2. L'INDUSTRIE ET L'ENVIRONNEMENT

Les facteurs importants pour l'établissement d'une usine de fabrication d'aluminium consistent en un gros investissement de capitaux, une source d'énergie abondante et à prix raisonnable, et l'approvisionnement en matières premières de bases. Les dépenses en capital d'une installation complète comprenant le traitement de la bauxite, la fusion de l'aluminium et la transformation du métal, ont été estimées à 2.500 US Dollars par tonne à la fin de 1974. Dans ce total, la transformation de la bauxite représentait 350 Dollars, la réduction de l'aluminium 1610 Dollars, et la transformation du métal 540 Dollars. Vers la fin du premier trimestre 1975, les coûts avaient augmenté d'environ 30 pour cent, atteignant 3.250 US Dollars par tonne. Ces coûts sont ceux des équipements construits en Amérique du Nord et varient en fonction de l'emplacement de l'installation.

La taille optimale d'une installation de réduction d'aluminium a été estimée à 100.000 tonnes environ. Cependant des usines plus petites, de 70.000 tonnes environ, ont également été construites. Les avantages économiques liés aux installations de grandes dimensions ne sont pas toujours suffisants pour garantir la construction de telles installations dès le départ.

Dans bien des cas la méthode choisie a été de commencer par une installation de réduction de taille réduite et d'en élargir les capacités au fil des années. La capacité d'une usine d'alumine devrait être environ deux fois supérieure à celle d'une installation de réduction. A son tour, la capacité d'une mine de bauxite devrait être deux fois supérieure à celle de l'usine d'alumine pour permettre au producteur d'être entièrement équipé, sans qu'il ait à acheter aucun matériau de complément.

De nos jours l'industrie de l'aluminium se compose de deux opérations de base :

- a) la production d'alumine à partir de la bauxite par le procédé Bayer, et
- b) la réduction de l'alumine en aluminium par le procédé électrolytique Hall-Héroult.

### 2.1. Exploitation minière de la bauxite

On extrait généralement la bauxite dans des mines à ciel ouvert, à l'aide d'explosifs ou d'engins de terrassement. Certaines bauxites sont broyées et lavées, afin d'en retirer une partie des matières argileuses et sableuses indésirables, puis séchées au four avant expédition. D'autres bauxites sont broyées et parfois séchées. En ce qui concerne l'exploitation minière de la bauxite, il faut s'attacher à une planification de l'utilisation des sols, de façon à ce que, après l'extraction du minerai, le sol puisse être rendu à son usage initial ou à tout autre usage convenu. Un certain budget devrait donc être prévu en vue de cette restauration.

### 2.2. Production d'alumine à partir de la bauxite

L'alumine est extraite de la bauxite par dissolution à haute température (149 °C à 204 °C), et sous forte pression (14 kg/cm<sup>2</sup>). La solution de lessivage contient de l'aluminate de sodium et de la soude. L'hydrate d'alumine contenu dans la bauxite est dissous par la soude en aluminate de sodium. Après la phase de dissolution, les composants insolubles de la bauxite, à l'origine des oxydes de fer, de la silice et du titane, sont retirés par dépôt et filtration, donnant un résidu appelé «boues rouges». Le filtrat, consistant en une solution épuisée, est recyclé après évaporation de l'excès d'eau. La silice est une impureté de la bauxite particulièrement indésirable, spécialement sous forme de boue, du fait qu'elle est dissoute facilement dans la solution de soude. Même si la silice est rapidement rejetée de la solution sous forme de mélange de silicate d'aluminium et de sodium, ces silicates posent des problèmes de détartrage et de filtration des installations, qui conduisent à laisser entraîner avec le précipité des quantités d'alumine et de sodium. La quantité de boue rouge formée peut, selon la composition de la bauxite, varier entre 0,5 et 1 tonne, en poids sec, par tonne d'oxyde d'aluminium. La boue contient normalement 20 à 30 pour cent de substances solides qui, par filtration, peuvent atteindre 40 à 60 pour cent.

### 2.3. Réduction de l'alumine

L'aluminium de première fusion est normalement produit à partir d'alumine affinée dans des usines utilisant le procédé électrolytique Hall-Héroult. Au cours de ce procédé, l'alumine est continuellement dissoute dans un bain de cryolite. L'aluminium migre vers la cathode et l'oxygène vers l'anode, ce qui libère du dioxyde de carbone. Les cuves électrolytiques sont des grands récipients d'acier garnis d'un isolant réfractaire et d'un revêtement de carbone. Des blocs de carbone disposés au fond de la cuve servent de cathode dans le circuit électrique. Pendant la réduction électrolytique, l'aluminium en fusion se dépose sous forme liquide dans le fond de la cuve, sur la surface de la cathode de carbone. Les cathodes sont une installation plus ou moins permanente. Normalement, un revêtement de cathode dure

trois à six ans, ce qui correspond plus ou moins à la durée de vie de la cuve elle-même, temps au bout duquel la cuve est mise hors-service, reconstruite et remise en fonctionnement.

Les anodes, également en carbone, sont suspendues dans l'électrolyte par des tiges conductrices raccordées au réseau positif. Les cuves, selon les types d'anode utilisés, se classent en cuves Söderberg (à goujons horizontaux ou verticaux) ou cuves à Pré-cuisson (ouvertes ou fermées).

Dans les deux systèmes on utilise un mélange de brai de charbon et de coke de pétrole qui constitue les anodes.

Dans le système Söderberg, on rajoute continuellement ce mélange appelé Söderberg au sommet de l'électrode, où la chaleur de la cuve et celle dégagée par le passage du courant cuisent la pâte et provoquent un dégagement des substances volatiles.

Dans le système à «pré-cuisson» les substances volatiles sont retirées lors de la fabrication des anodes par une cuisson préalable. Chacun des deux systèmes a ses avantages et ses inconvénients. Le système à pré-cuisson, le plus ancien des deux, requiert notablement moins d'énergie que le système Söderberg et, du fait que les anodes sont cuites dans des installations différentes, il est plus facile de récupérer les substances volatiles qui s'échappent lors de la cuisson de la pâte. Cependant le système Söderberg implique des coûts moins importants pour les petites fonderies, parce qu'il permet d'éviter le coût d'une installation distincte, destinée à la fabrication et à la cuisson des anodes. Avec ce système il est également plus facile de fabriquer des blocs d'anode de large section qui sont nécessaires pour les grandes cuves.

Dans le procédé Hall-Héroult, la réaction d'ensemble se déroule comme suit :



Les gaz dégagés à l'anode contiennent également du CO provenant d'une contre-réaction de l'aluminium dissous dans l'électrolyse réagissant avec du  $\text{CO}_2$  :



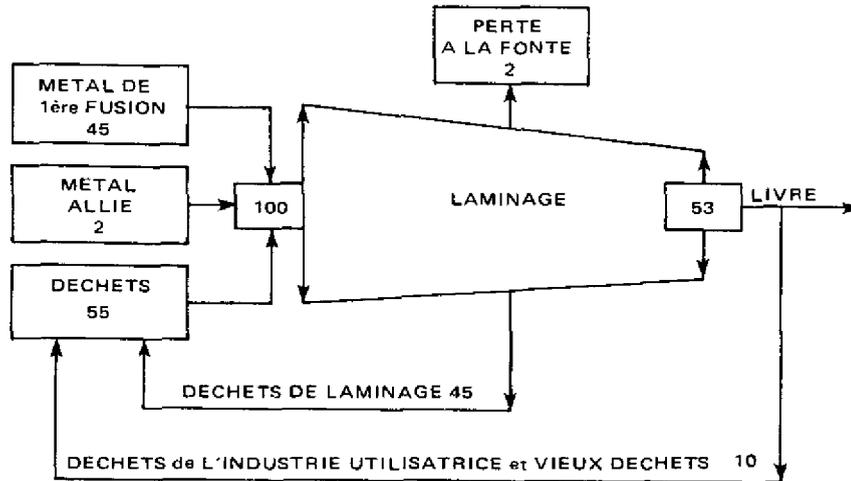
Le gaz s'échappant à l'anode est fonction de l'efficacité actuelle de l'électrolyse, sa composition typique est la suivante : 70 à 90 pour cent de  $\text{CO}_2$  et 30 à 10 pour cent de CO.

#### 2.4. Refonte, transformation et finissage

Refonte, transformation et finissage ne représentent qu'une part relative

vement faible du coût énergétique (12 à 15 %) de la fabrication de l'aluminium. Quand la refonte est nécessaire, ou lors du recyclage des déchets provenant de l'aluminium de première fusion, on utilise généralement des fours Martin à gaz ou au fuel.

Les différentes étapes suivies par le métal, depuis la refonte jusqu'à la transformation, sont les suivantes :



Le chiffre de deux pour cent pour la perte en métal peut sembler faible, s'il n'est pas replacé dans son contexte. La perte totale en énergie, y compris la chaleur et la quantité du métal devant être remplacée, est de 6,7 millions de Btu par tonne (1).

Les usines de transformation et de finissage de l'aluminium peuvent atteindre et ont atteint d'appréciables réductions d'énergie, de l'ordre de 10 à 25 pour cent par les mesures suivantes :

- Remplacement des fours à flamme directe par des fours à tubes radiants,
- Amélioration des fours et de l'isolation,
- Amélioration de la planification,
- Remplacement des véhicules à essence par des véhicules électriques,
- Entretien général des installations et programmes de formation du personnel,
- Programmes de réduction des déchets.

(1) M.C. Flemings (1975) "Ressources et Energie dans la production de l'aluminium". Rapport préparé pour le PNUE et présenté à un Séminaire par Secteur Industriel, Réunion Aluminium, Paris, Octobre.

## 2.5. Recyclage des déchets

La majeure partie des «nouveaux» déchets produits par l'industrie de première fusion, de transformation, et par les fabricants de produits industriels et de consommation est recyclée et retraitée par des usines d'affinage primaire ou secondaire. En théorie, l'énergie nécessaire pour fondre un kilogramme d'aluminium correspond à environ 1.100 Btu, mais en réalité 7.000 Btu sont utilisés. Il est donc possible et souhaitable d'améliorer l'efficacité de la fonte. De grandes économies d'énergie sont possibles par diminution des pertes par oxydation. Les technologies utilisées à ces fins comprennent la réduction au minimum de l'emballage, la fonte avec additions de sel en bain profond de sel, et la suppression des huiles et revêtements avant la fonte. Cependant des procédés plus efficaces et moins polluants sont nécessaires pour diminuer les pertes par oxydation et récupérer le métal.

Le recyclage des «vieux» déchets constitue un potentiel important de conservation de l'énergie et des métaux. Les boîtes d'aluminium, les carrosseries automobiles et les appareils ménagers sont les principaux produits recyclés après un traitement particulier pour enlever la saleté, la peinture et autres revêtements. On peut également déchiqueter, retrier par densité et purifier ces produits de récupération.

## 3. INCIDENCES SUR L'ENVIRONNEMENT

### 3.1. Utilisation des sols

Une région qui a été perturbée par une exploitation minière retrouve rarement l'équilibre écologique qu'elle connaissait avant cette perturbation. Ceci est particulièrement vrai lorsque les principales altérations du terrain, de la topographie, ou des organismes vivants ont lieu pendant cette perturbation. Une remise en valeur s'effectue dans les meilleures conditions lorsqu'une planification antérieure à l'exploitation minière comprend la définition d'objectifs souhaitables et réalisables en ce qui concerne l'utilisation du sol quand l'exploitation minière aura cessé. Ces objectifs de remise en valeur sont réalisables par une gestion attentive, comprenant le contrôle des techniques d'exploitation, la mise en forme des déblais, une restauration rapide de la végétation, un contrôle de l'érosion, et la prévention de toute atteinte aux systèmes hydrologiques. La remise en valeur d'un site spécifique dépendra de ses caractéristiques physiques et des objectifs fixés quant à l'utilisation du sol quand l'exploitation aura cessé.

Le choix d'une technique d'exploitation minière se fait le plus souvent sur des bases économiques. Quand la remise en valeur est considérée comme faisant partie de l'opération d'exploitation, les techniques d'extraction seront choisies en fonction de leur capacité à se combiner en termes économiques

aux objectifs d'exploitation de la bauxite et de remise en valeur des zones concernées (techniques qui permettent la remise en état la plus efficace des matériaux géologiques en ce qui concerne la croissance des végétaux, la lutte contre l'érosion, la prévention de la pollution des eaux, la réalisation d'objectifs esthétiques, etc.). Une évaluation des incidences écologiques devrait donc être considérée comme faisant partie de l'ensemble du plan d'organisation, afin de garantir que l'extraction de la bauxite reste compatible avec les objectifs fixés pour l'utilisation des sols.

Lors de la remise en état d'un site exploité, l'application de techniques de remise en valeur appropriées est essentielle. L'écosystème naturel ne s'arrête pas aux limites de la zone minière, mais s'intègre dans la zone qui l'entoure et, à plus forte raison, dans la région entière, avec des relations complexes qui ne sont pas toujours bien comprises. Parmi les opérations de remise en état dans lesquelles compétence et planification sont impératives, si l'on veut obtenir des résultats positifs, on peut citer le remaniement des terrains de couverture et de surface, la reconstitution de l'environnement physique et ses effets sur les animaux, les effets hydrologiques de cette reconstitution, le reboisement adapté des terrains exploités, etc.

### 3.2. Déchets solides

Pour chaque tonne d'alumine produite à partir de bauxite, entre 0,3 et 1,0 tonne en poids sec de résidus solides sont rejetés sous forme de «boues rouges», proportion variant selon la qualité de la bauxite utilisée. Ces «boues rouges» sont généralement évacuées, soit dans des bassins de décantation sur des terrains de décharge soit rejetées en mer. Ces pratiques peuvent susciter des inquiétudes croissantes pour l'environnement. La tendance actuelle est d'interdire les rejets en mer et d'imposer de sévères mesures de précaution pour les terrains de décharge en vue de mettre un frein à la demande de terrains utilisés à cette fin et de prévenir la dispersion des polluants par les eaux.

Dans les pays tropicaux subissant la mousson, il convient de veiller à ce que les bassins d'élimination soient équipés de barrages appropriés. Pour réduire au minimum l'impact esthétique, ces bassins d'élimination peuvent être conçus de manière à s'intégrer convenablement dans le paysage et à pouvoir être recouverts de végétation une fois pleins.

Il existe de nombreux procédés d'élimination et d'utilisation des boues rouges. Une méthode d'élimination consiste à filtrer les boues pour décharger les résidus sur des sites aménagés de façon à permettre la récupération des extraits alcalins, pour les réintroduire dans le cycle de production. Le sommet de la décharge est ensuite recouvert de terre.

Les boues rouges sont constituées d'une fraction solide composée de particules insolubles et d'une fraction soluble. Une composition typique de ces deux fractions est la suivante :

<i>Fraction insoluble</i>		<i>Fraction soluble</i>	
SiO <sub>2</sub>	5,5 Pour cent	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5 g/kg liquide
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,0 "	NaOH	3,7 "
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	49,5 "	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1,6 "
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,0 "	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,4 "
CaO	8,0 "	NaCl	0,7 "
Na <sub>2</sub> O	3,5 "	Na <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,1 "
TiO <sub>2</sub>	5,0 "	pH	12,5 "
MnO <sub>2</sub>	1,0 "	DBO	6 ppm
divers	1,5 "	DCO	148 ppm
Perte par combustion	11,0 "		

### 3.3. Effluents liquides

Les principaux déchets rejetés lors de l'affinage de la bauxite sont :

- les rejets de boues rouges
- les liqueurs résiduelles
- les condensats
- les eaux de refroidissement des condenseurs barométriques
- les eaux de refroidissement et rejets divers.

On dispose actuellement de technologies de traitement des effluents permettant d'atteindre le niveau «zéro» de rejet de polluants, excepté lorsque les précipitations sont supérieures à l'évaporation. Les coûts de réalisation de ces objectifs représentent principalement le coût de construction d'un bassin de décantation à boues rouges, les canalisations, la neutralisation et tout autre équipement nécessaire au fonctionnement adéquat d'un système de recyclage. Aux Etats-Unis, les coûts d'élimination (1) en 1973 ont été estimés de 0,27 à 0,60 US Dollars par tonne courte d'alumine, ou de 0,14 à 1,09 US Dollars par tonne courte de boue. Pour atteindre le niveau «zéro» de rejet de polluants, il faudra prendre les mesures de traitement suivantes :

(1) U.S. Environmental Protection Agency, EPA (1973). "Development Document for Proposed Effluent Limitations Guidelines and New Source Performance Standards for the Bauxite Refining Subcategory of the Aluminium Segment of the Nonferrous Metals Manufacturing Point Source Category".

EPA 440/1-73/019. October.

<i>Déchets rejetés</i>	<i>Paramètres</i>	<i>Meilleures technologies applicables actuellement disponibles</i>
Boues rouges	TDS*, TSS**, alcalinité	Décantation et phase de recyclage aqueux ; concentration si nécessaire
Acide de lessivage résiduaire	TDS, sulfates, pH	Bassin de décantation des boues rouges
Coulis de sel en provenance de l'évaporateur	TDS, sulfates, alcalinité	Bassin de décantation ou terrain de décharge
Eau de refroidissement du condenseur barométrique	TDS, chaleur, alcalinité	Refroidissement et recyclage
Eaux de purge de la tour de refroidissement du condenseur barométrique	TDS	Bassin de décantation
Eaux provenant du nettoyage et du passage au jet	TSS, TDS, alcalinité	Recyclage dans le circuit de production

\* TDS : matières solides dissoutes totales

\*\* TSS : matières solides en suspension totales

Les eaux résiduaires émises lors de la première fusion de l'aluminium peuvent provenir de différentes sources :

- épurateurs par voie humide utilisés pour les cuves et pour l'air de ventilation des salles d'électrolyse,
- épurateurs par voie humide utilisés pour les gaz émis par les fours de cuisson des anodes,
- épurateurs par voie humide utilisés pour les gaz de fonderie,
- eaux de refroidissement utilisées lors de la fonte des lingots dans les laminoirs, et lors de la transformation,
- eaux de purge des chaudières.

Ces sources sont directement reliées au type de système de lutte contre la pollution de l'air utilisé pour le captage des particules solides et des fluorures. Les éléments constitutifs des eaux résiduaires que l'on peut

rencontrer dans les effluents provenant de la fabrication de l'aluminium de première fusion sont les suivants :

Solides en suspensions	Fluorures
Solides en dissolution	Chlorures
Demande chimique d'oxygène (DCO)	Sulfates
Huiles et graisses	Cyanure libre
	Métaux à l'état de traces (comprenant Zn, Cu, Ni)

Les taux d'émission des eaux résiduaires et la quantité de polluants présents dépendent essentiellement du type spécifique de l'équipement de lutte contre la pollution atmosphérique utilisé (à sec ou par voie humide). Il n'est donc pas réaliste de rapporter les chiffres bruts concernant les produits de décharge de l'industrie de l'aluminium de première fusion, étant donné que ces chiffres diffèrent grandement selon les usines. En général cependant, les usines dotées d'un système de traitement à passage unique auront un taux d'émission d'effluents de 16 à 160 m<sup>3</sup>/tonne d'aluminium. D'une façon typique, la concentration en fluorures des effluents non traités varie de 10 à 50 ppm.

Les coûts de captage des fluorures contenus dans les effluents selon différents procédés de traitement ont été estimés (1), pour une usine produisant 250 tonnes d'aluminium par jour, à 20.000 m<sup>3</sup> d'effluents par jour, contenant 35 ppm de fluorures.

<i>Différents procédés</i>	<i>Emission de fluorures lb/1000 lb</i>	<i>Coûts d'investissement en Dollars par an et par tonne *</i>	<i>Coût total de fonctionnement en Dollars par tonne</i>
Epurateur à sec	0	48,6	19,8
Epurateur par voie humide à passage unique	5	9,0	4,5
Epurateur par voie humide à recyclage	1	12,2	7,5
Recyclage avec purge et traitement des filtrats	0,05	14,0	8,4
Traitement	1	22,2	16,7
Traitement à passage unique et alumine activée	0,25	11,3	9,4
Traitement à passage unique et hydroxyapatite	0,25	26,6	24,0
Traitement à passage unique et osmose inversée	0,8		29,7

\* Dollars par an et par tonne = coût total divisé par le taux de production annuel

(1) U.S. Environmental Protection Agency, EPA (1973) *Op. Cit.*

*Notes*

1. Les coûts d'investissement ont été ajustés au Dollar 1975 (ENR - 2126)
2. Les frais d'exploitation comprennent :
  - a. Dépréciation à 7,1 pour cent du capital investi
  - b. Rapport de l'investissement à 20 pour cent du capital investi
  - c. Frais généraux d'administration à 4 pour cent des frais d'exploitation et de maintenance.
  - d. Taxes et assurance à 2 pour cent du capital
  - e. Ensemble de l'énergie et des produits chimiques nécessaires aux installations de traitement.

**3.4. Emissions atmosphériques**

**Source** : — La principale source d'émissions, lorsque la bauxite est broyée et dissoute en vue de produire de l'aluminate de sodium, est le broyeur à minerai. Lors de la calcination du trihydrate d'alumine dans un four rotatif, le four est généralement équipé d'un dispositif de captage des poussières d'alumine. Cependant une épuration supplémentaire des gaz issus du premier dispositif de filtrage peut être nécessaire pour répondre aux normes d'émission relatives aux particules. Dans une fonderie d'aluminium, lors de la réduction, ce sont aussi bien des particules solides que des oxydes de soufre, des hydrocarbures et des fluorures qui sont émis. L'importance des émissions dépend du type de cuve utilisé. Dans les cuves Prebake, les émissions gazeuses se composent de monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, dioxyde de soufre, hydrogène fluoré et d'autres gaz à l'état de traces. Les émissions de particules comprennent de l'alumine, des sels de fluorure et du carbone. Dans le cas des cuves Söderberg, des hydrocarbures (volatils provenant du brai) sont émis en plus des émissions énumérées pour les cuves Prebake.

Dans les cuves Söderberg à goujons horizontaux, le capot n'est pas complètement appliqué à la cuve, ce qui explique que des volumes d'air importants soient entraînés avec les gaz par le capot de la cuve. Ceci a pour effet de réduire la combustion des hydrocarbures, créant ainsi un problème d'encrassement important par les dépôts goudronnés, étant donné que les hydrocarbures lourds se condensent dans les canalisations et les dispositifs d'épuration. Par ailleurs, les cuves Söderberg à goujons verticaux sont entièrement recouvertes par une jupe, qui permet de capter les gaz émis à l'anode avec une faible dilution et de les brûler dans un dispositif spécial. Ces gaz sont ainsi transformés en  $\text{CO}_2$  et en poussières de carbone qui n'encrassent pas les équipements.

**Taux d'émission** : — Les fluorures peuvent être émis sous forme de gaz (HF) ou de solides ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{NaF}_2$ , etc.). On estime à 23 kg/tonne d'aluminium l'émission typique de fluorures à partir d'une cuve (1) ; cependant les

---

(1) Singmaster and Breyer (1973) "Air Pollution Control in the Primary Aluminium Industry" New York.

émissions provenant de différents types de cuves et les diverses efficacités de captage ont été ainsi énoncées (1) :

Types de cuves	Système d'épuration des gaz de cuve	Épuration de l'air de ventilation	Émissions de composés fluorés en KgF/t Al. (Emission de HF, Kg/t Al) Rendement de captage des gaz des cuves, %			
			0	75	90	95
VSS Cuves Söderberg à goujons verticaux	Aucun Précipitateur électrostatique à sec + tour de pulvérisation	Aucun	20 (18)	20 (18)		
		"	20 (18)	5,2 (4,6)		
	Filtre à manche + Alumine	Ecran de pulvérisation	2,4 (1,3)	0,8 (0,5)		
		"	2,4 (1,3)	0,9 (0,6)		
HSS C.S. à goujons horizontaux	Aucun Epurateur à boule flottante	Aucun	20 (16)		20 (16)	
		"	20 (16)		4,0 (2,3)	
C.P. cuves à anodes précuites fermées	Aucun Epurateur à boule flottante	Aucun	16 (8)			16 (8)
		"	16 (8)			3,8 (0,7)
	Filtre à manche + Alumine	"	16 (8)			1,3 (0,6)
		Ecran de pulvérisation	4,8 (0,4)			0,7 (0,2)
OP Cuves à anodes précuites ouvertes	Aucun	Aucun Ecran de pulvérisation	16 (8) 4,8 (0,4)			

La quantité d'oxydes de soufre émis dépend de la teneur en soufre du brai et du coke servant à la fabrication des anodes des cuves Prebake ou à celle de la pâte pour les anodes des cuves Söderberg. Les émissions typiques d'oxydes de soufre et d'autres polluants selon les types de cuves sont les suivantes (2) :

(1) Nestaas, I. (1975) "Rapport sur les problèmes de pollution suscités par l'industrie de l'aluminium". Document établi et présenté lors d'un séminaire par Secteur Industriel, Réunion Aluminium, Paris, Octobre.

(2) Nestaas, I. (1975) - *Op. Cit.*

Type de cuve	F solide	HF	Kg/t Al		Particules	Hydro-carbures
			SO <sub>x</sub>	CO		
Anode précuite	8	8	15	200	30-100	négl.
Anode Söderberg à goujons verticaux	2	18	15	0 50	20-40	1-3 2-6
Anode Söderberg à goujons horizontaux	4	16	15	200	20-40	6-traces

Technologie de réduction des émissions : — Une diminution efficace des polluants émis par une fonderie d'aluminium peut être obtenue en améliorant les conditions d'exploitation des cuves à électrolyse, et par l'installation d'équipements de captage des émissions.

Les conditions d'exploitation des cuves peuvent être améliorées par la suppression de l'effet anodique, par une baisse de température du bain, par une attention particulière apportée à la conception, à la construction, à l'entretien et au fonctionnement des hottes, par une utilisation efficace des équipements auxiliaires, ainsi que par la formation adéquate du personnel des usines.

Les techniques de contrôle des émissions se divisent en deux étapes. La première consiste à capter les composés gazeux au moment de leur émission. Elle est alors suivie de la seconde étape, qui consiste à retirer de l'émission gazeuse les composants indésirables, avant qu'elle ne soit rejetée.

**Captage** : les polluants contenus dans l'air des salles d'électrolyse sont évacués par des lanterneaux et les émissions provenant des cuves par des capots ou des jupes. Dans les fonderies d'aluminium en général, l'efficacité du captage primaire pour les cuves Prebake fermées et les cuves Söderberg à goujons horizontaux est de 75 à 95 pour cent, avec une moyenne de 90 pour cent environ pour les cuves Prebake et une moyenne légèrement inférieure pour les cuves Söderberg.

**Epuration** : — Les problèmes de réduction des émissions sont principalement dus à l'épuration des particules solides et des fluorures d'hydrogène gazeux contenus dans les émissions.

**Particules solides** : — Celles-ci comprennent les particules d'électrolyte, d'alumine et de carbone, des vapeurs inorganiques et des aérosols bitumineux. Leur captage dans les émissions peut s'effectuer par séparation et attraction par un champ électrostatique (précipitateurs électrostatiques), captage en phase solide et/ou liquide (épurateurs), interception par un matériau poreux (filtres) ou séparation par inertie (cyclones). Le pouvoir de captage et de séparation de ces mécanismes dépend dans une large mesure de la taille des particules contenues dans les émissions. Normalement les particules d'une taille supérieure à 3 microns peuvent être séparées des gaz par des forces

gravitationnelles ou centrifuges. Cependant un pourcentage appréciable des fluorures solides se présente sous la forme de particules inférieures au micron qu'il est difficile d'éliminer efficacement.

Dans les usines qui affinent le minerai selon le procédé Bayer, les particules émises par le broyeur sont éliminées, après avoir été captées par une hotte, soit par un précipitateur électrostatique, un épurateur venturi ou un filtre à manche. Des dispositifs de captage par voie humide ont également été utilisés, mais ce sont révélés moins efficaces. Lors de la calcination, les particules sont généralement retirées par utilisation combinée d'un cyclone à effets multiples et d'un précipitateur électrostatique ou d'un filtre à manche. La poussière captée est essentiellement composée d'alumine qui est recyclée.

Dans le procédé de réduction électrolytique, la technologie de contrôle des émissions dépend du type de cuve utilisé. Les systèmes de contrôle comprennent des épurateurs utilisant de l'eau de recyclage neutralisée à la chaux pour éliminer les particules de même que l'acide fluorhydrique gazeux. Des procédés «secs» à l'alumine sont également utilisés. Ceux-ci éliminent les fluorures aussi bien sous forme de gaz que de particules et permettent de réintroduire le fluor récupéré directement au niveau de l'électrolyse. L'inconvénient de ces procédés est qu'ils ne captent pas le  $\text{SO}_2$ , qui doit donc encore être éliminé par une épuration finale par voie humide.

**Composés gazeux :** — Ce sont principalement des fluorures gazeux, des hydrocarbures et des oxydes de soufre. Les hydrocarbures sont normalement contrôlés par combustion dans un brûleur spécial, changeant les hydrocarbures en dioxyde de carbone et vapeur d'eau. Pour les fluorures et les gaz soufrés, le mécanisme d'épuration est l'absorption dans un solvant liquide choisi à cet effet, ou l'absorption à la surface d'un solide également spécial. Les épurateurs caustiques ou à lit flottant sont utilisés à cet effet.

Les caractéristiques de pollution de l'air et la technologie de lutte contre la pollution ont été adaptées à partir d'un rapport (1) pour être présentées comme suit :

---

(1) U.S. Environmental Protection Agency, EPA (1976) "Environmental Considerations of Selected Energy Conserving Manufacturing Process Options". Alumina/Aluminum Industry Report.  
EPA 600/7-76-034h (December).

Type de cuve	Particules et fluorures	Fluorures gazeux	Hydro-carbures	Oxydes de soufre	Dispositifs
Cuves Prebake	Oui	Oui	Poussières de carbone et volatils	Oui	Epurateur caustique
Four à anodes	Oui	Oui	Volatils	Oui*	Précipitateur à chaud Incinération Epuración à sec
VSS Cuves Söderberg à goujons verticaux	Oui	Oui	Poussières de carbone	Oui*	Epurateur caustique
HSS Cuves Soderberg à goujons horizontaux	Oui	Oui	Goudrons	Oui*	Epurateur à lit flottant

\* présent sous forme de SO<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub>S

Il conviendrait de noter qu'avec les fours de cuisson de l'anode Prebake, une forte proportion du soufre présent dans la matière première est retenue et transformée en SO<sub>2</sub> dans la cuve d'électrolyse.

Coûts :— le coût du contrôle des émissions de fluorures dans les usines récentes utilisant les cuves Prebake et Söderberg et dotées de différents équipements de lutte contre la pollution, a été décrit (1) comme ci-contre :

Les coûts ci-contre ont été déterminés en utilisant les hypothèses suivantes :

- Electricité - 0,012 Dollars par Kw/h
- Personnel d'exploitation - 8 Dollars/h (sans marge bénéficiaire)
- Personnel d'entretien - 9 Dollars/h (sans marge bénéficiaire)
- Personnel d'encadrement - 10 Dollars/h (sans marge bénéficiaire)
- Bénéfice par récupération des fluorures (poids sec) - 6 Dollars/t courte
- Bénéfice par récupération de particules sèches - 40 Dollars/t courte
- Produits chimiques pour le traitement de l'eau - Coût unique de 60.000 Dollars par an.

(1) International Primary Aluminum Institute, IPAI (1975) "Fluoride Emissions Control : Costs for New Aluminum Reduction Plants".  
IPAI, London (April).

Type de cuve	Famille d'équipement de contrôle	Mode de fonctionnement		Evolution Kg/Tonne d'Al	Fluorures Emission totale en Kg F/tonne métrique d'Al	Sommes récupérées en Dollars par tonne métrique d'Al	Taille de l'usine 1000 tonnes/an	Eléments de coûts	
		«Crust breaking» central	«Crust breaking» lateral					Coût de fonctionnement en Dollars/T métriques d'Al	Coûts d'équipement en Dollars/tonne métrique d'Al
Prebake	à sec	X		17-20	0,6-1,68	11,00-12,46	50-57	6,17-20,50	70-132
	Primaire voie humide	X	X	15-20	0,97-1,1	9,28-12,50	50	6,50-27,00	77-156
	Primaire	X <sup>1</sup>		12-18	0,6-2,3	6,51-10,84	50	19,00-31,30	70-142
	Primaire <sup>3</sup> + voie humide			16,7	4,46	8,10	50	32,34	159
	Voie humide secondaire	X	X	16-20	0,75-1,1	9,42-11,84	50	16,75-52,75	108-213
HSS Söderberg à goujons horizontaux	Hautes cheminées	X	X	16	4,8		50	27,37	110
	Primaire à sec	X		18,8	1,20	11,65	40	31,56	177,50
	Primaire voie humide	X	X	17,0	1,33-3,20	9,12-10,35	40	36,87-37,55	167,50-185,0
VSS Söderberg à goujons verticaux	Primaire à sec	X <sup>2</sup>		20	4,3	10,30	45	0,15	44,44
	Primaire voie humide + Secondaire voie humide	X <sup>2</sup>	X <sup>2</sup>	19	1,11	9,49	45	43,11	185-11

1. Système spécial (chaque cuve entièrement close)

2. Jupes sur cuve VSS (cuves Söderberg à goujons verticaux)

3. Le système primaire peut être à sec ou par voie humide.

Un facteur capital/récupération de 0,17698 pour un intérêt de 12 % sur dix ans a été utilisé pour déterminer le coût du capital et, de plus, les parts revenant à l'entretien ont été calculées sur la capitalisation totale.

### 3.5. Effets biologiques des fluorures atmosphériques

Le principal polluant émis par l'industrie de l'aluminium, et préoccupant sur le plan écologique, est le groupe des fluorures. Bien que l'on utilise les fluorures pour la fluoration de l'eau en vue de contribuer à la prévention de la carie dentaire, les risques potentiels que représente l'exposition de groupes importants de population à une absorption accrue de fluorures est cause d'une controverse permanente. Les fluorures émis dans l'air par les poussières et les gaz ont représenté un risque évident pour la santé dans de nombreuses localités depuis l'époque des premières éruptions volcaniques connues. Ce polluant de l'air est émis par des sources naturelles, à partir de substances contenant des fluorures et par des procédés industriels.

D'autres secteurs industriels émettent également des fluorures, parmi lesquels la fabrication des engrais surphosphatés, les aciéries, les briquetteries et tuileries ainsi que la combustion du charbon.

Les effets biologiques des fluorures atmosphériques ont été étudiés de façon très poussée et largement décrits (1), (2).

**Effets sur la santé** : — des atteintes sévères telles que la fluorose invalidante n'ont été observées que lors d'expositions professionnelles de longue durée.

L'augmentation en intensité des effets aigus en rapport avec des concentrations croissantes de fluorures gazeux est ainsi énoncée (3) :

- 3 ppm - aucun effet local, immédiat ou systématique n'a été noté
- 10 ppm - de nombreuses personnes sont gênées
- 30 ppm - l'ensemble des sujets se plaint et fait de sérieuses objections quant à demeurer dans cet environnement.
- 60 ppm - expositions brèves - irritation évidente de la conjonctive, des voies nasales, picotements et gêne au niveau du pharynx et de la trachée.
- 120 ppm - concentration la plus élevée tolérée moins d'une minute par deux sujets masculins.

- 
- (1) U.S. National Academy of Sciences (1971) "Biological Effects of Atmospheric Pollutants : Fluorides"  
National Academy of Sciences, Washington, D.C.
- (2) World Health Organization, WHO (1970) "Fluorides and Human Health"  
WHO Monograph Series N° 59
- (3) Hodge, H.C. and F.A. Smith (1977) "Occupational Fluoride Exposure"  
Special Issue on Understanding Occupational Exposure to Fluoride,  
*J. Of Occupational Medicine*, Vol. 19 N° 1, January.

On a estimé (1) que les limites d'expositions aux fluorures d'hydrogène et aux fluorures inorganiques, recommandées par le U.S. National Institute for Occupational Safety and Health, soit 2,5 mg de F par m<sup>3</sup> d'air dans un lieu de travail, 4,0 mg F/litre d'urine prélevée dans les différentes équipes et 7,0 mg F par litre pour les équipes travaillant aux cuves, sont une protection efficace pour le milieu de travail.

**Effets sur le bétail (2) :** – Il est normal que de petites quantités de fluorures soient ingérées par les animaux dans leur ration alimentaire sans effets dommageables, mais une ingestion excessive peut être nocive. Le rapport entre le contenu en fluorures de leur nourriture et le développement de différents symptômes chez le bétail peut être résumé ainsi :

Symptômes	Total des fluorures dans la ration alimentaire (ppm)			
	20-30	30-40	40-50	50
Taches dentaires visibles*	oui	oui	oui	oui
Hypoplasie de l'émail (degré 4)	non	non	oui	oui
Légère hyperostéose du périoste	non	oui	oui	oui
Hyperostéose modérée du périoste	non	non	oui	oui
Signes significatifs de boiterie	non	non	non	oui
Baisse de la production laitière	non	non	non	oui
F présent dans le squelette égal à 5000 ppm chez un sujet de 5 ans <sup>+</sup>	non	non	non	oui
F présent dans l'urine à raison de 25 ppm <sup>+</sup>	non	non	oui	oui

\* Seulement si les fluorures sont présents pendant la période de formation de la dent.

+ Os du métacarpe ou du métatarse. sec. dépourvu de graisse

+ Basé sur des valeurs relevées après 2 à 3 ans d'exposition ; gravité spécifique = 1,04.

Certains animaux domestiques peuvent ingérer et tolérer sans interférence clinique ni effet sur leur comportement, les niveaux suivants de fluorures tels que le NaF.

(1) Hodge. H.C. and F.A. Smith (1977).  
*Op. Cit.*

(2) Suttie, J.W. (1977) "Effects of Fluoride on Livestock" an expanded and updated paper presented at a UNEP Industry Sector Seminar. Aluminum Meeting, Paris, October 1975.  
*J. Of Occupational Medicine, Special Issue, Vol. 19, N° 1, January.*

<i>Animaux</i>	<i>Résultats (ppm F)</i>
Bœuf ou génisse laitière	40
Bœuf ou vache laitière adulte	50
Bétail âgé	100
Agneaux de lait	150
Brebis mères	60
Chevaux	60
Porcs âgés	150
Truies mères	150
Poussins ou poulets	300
Poules pondeuses ou couveuses	400
Dindes	400
Jeunes chiens	100

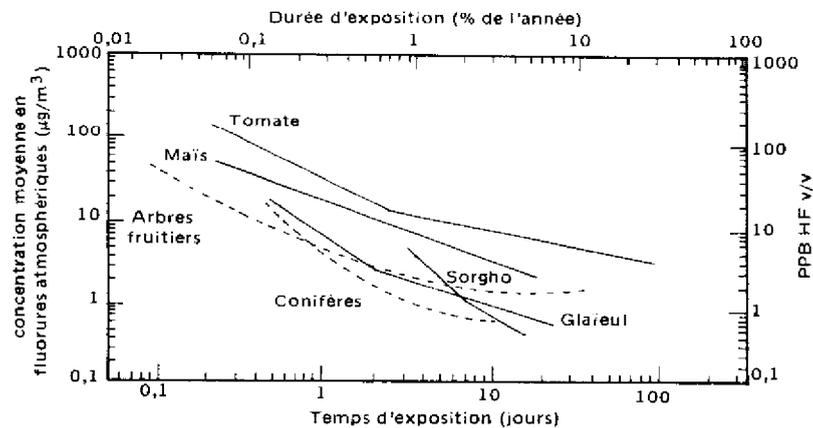
**Effets sur la végétation (1):** -Parmi les polluants courants de l'air, les fluorures viennent au 5e rang par ordre d'importance en ce qui concerne la somme des dommages causés aux végétaux aux Etats-Unis. Cependant les fluorures sont les plus phytotoxiques des polluants et ils peuvent endommager des espèces végétales sensibles avec des concentrations atmosphériques 10 à 1000 fois inférieures à celles d'autres polluants (moins de 1 ppb soit 0,8 mg de F/m<sup>3</sup>). Les fluorures ont aussi une autre caractéristique importante, ils s'accumulent dans les végétaux.

Tableau-guide pour les différentes sortes d'effets possibles des fluorures sur les végétaux, par le rapport des effets cellulaires avec des types supérieurs d'organisation biologique :

(1) Weinstein, L.H. (1977) "Fluoride and Plant Life" an expanded and updated paper presented at a UNEP Industry Sector Seminar. Aluminum Meeting, Paris, October 1975. *J. of Occupational Medicine*, Special Issue, Vol. 19, N° 1, January.

Cellule	Niveaux d'organisation biologique		
	Tissu ou organe	Organisme	Ecosystème
(Altération du milieu cellulaire ?)	Rendement accru	Croissance accrue	?
Effet sur les enzymes et les métabolites	Baisse de l'assimilation, Troubles de la respiration	?	?
Modification des organelles et du métabolisme	Baisse de l'assimilation, Troubles de la respiration	Croissance modifiée	Accroissement de F dans l'écosystème
Interruption des échanges	Diminution de la croissance et du développement	Baisse de la reproduction	Augmentation de la charge en F des animaux
Modification cellulaire	Lésions chlorotiques	Baisse de la reproduction	Fluorose des animaux
Rupture et mort de la cellule	Lésions nécrotiques	Baisse de l'adaptation à l'environnement	Changement dans un groupe végétal
	Mort ou perte des feuilles	Mort de la plante	Désolation

Les variations de dose-réponse pour une atteinte des feuilles pour différentes espèces végétales sont les suivantes :



#### 4. INCIDENCE DES NOUVEAUX MOYENS DE PRODUCTION SUR LA LUTTE CONTRE LA POLLUTION

##### 4.1. Procédés de substitution pour la production de l'alumine

L'industrie manifeste un intérêt croissant pour la possibilité de produire l'alumine à partir de matières premières riches en alumine, telles que l'alunite, le kaolin et les argiles anorthosites, ainsi que la dawsonite, un carbonate

d'aluminium et de sodium que l'on trouve dans les schistes bitumineux. De nombreux procédés sont en cours de réalisation pour produire de l'alumine à partir d'argiles, solutions de remplacement du procédé Bayer. Les procédés qui ont retenu l'attention (1) et qui présentent des possibilités d'application commerciale sont :

- le lessivage à l'acide nitrique
- le lessivage à l'acide chlorhydrique et
- la chloruration de l'argile

Le lessivage de l'argile à l'acide nitrique et à l'acide chlorhydrique : l'application de l'un ou l'autre de ces deux procédés produirait des liquides résiduels contenant des nitrates ou des chlorures solubles. Les résidus solides sont produits par la séparation des matériaux insolubles dans des épaisseurs au cours de la phase de lessivage. En outre, chacun des deux procédés comprend une phase cristalline qui permet d'éliminer les impuretés sous forme de nitrates et de chlorures. Ces derniers sont enfin traités par décomposition, afin de récupérer le nitrate et le chlorure d'hydrogène.

Les nitrates des métaux alcalino-terreux sont difficiles à décomposer complètement, et les chlorures ne se décomposent pas du tout. C'est pourquoi dans la plupart des cas, il y aura des nitrates ou des chlorures solubles dans les résidus solides de ces phases de décomposition.

Il est également vraisemblable qu'il se produira des émissions gazeuses d'oxydes d'azote et de chlorure d'hydrogène non récupérés provenant des systèmes de récupération par voie acide. Il se peut que ces gaz doivent alors être éliminés des gaz d'émission dans de petits épurateurs utilisant des solutions alcalines. Le coût de la lutte contre la pollution par tonne nette d'alumine a été estimé à 19 Dollars U.S., et à 5 Dollars pour les procédés utilisant les acides nitriques et chlorhydrique respectivement.

**La chloruration de l'argile :** - l'alumine peut également être extraite au moyen d'un procédé à sec par chloruration de l'argile en présence de carbone. Le chlorure d'aluminium est volatilisé au-dessus en même temps que d'autres chlorures de fer, de silicium, de titane, de sodium, etc. également présents dans l'argile. Les chlorures sont séparés par une combinaison de condensations et de distillations partielles pour produire des fractions séparées qui sont toutes oxydées, afin d'en retirer le chlore et les oxydes respectifs, principalement l'oxyde d'alumine et le dioxyde de titane destinés à la vente.

Ces opérations produisent de nombreux déchets solides. En premier lieu sont émis des matériaux qui n'ont pas réagi lors de la phase de chloruration, et qui se composent essentiellement de silice, mais aussi de quelques chlorures solubles. Ceci se présente normalement sous forme de matériaux

(1) U.S. Environmental Protection Agency, EPA (1976), *Op. Cit.*

secs, mais peut également être rejeté sous forme de boues. Il y a également d'autres sources, telles que la séparation du chlorure d'aluminium à partir de chlorures de fer et de sodium, ainsi que le procédé par oxydation en silice du tétrachlorure de silicone isolé. Cette silice pourrait être commercialisée, mais en tant que déchet, elle contiendrait des chlorures solubles et de fines particules solides qui déposent lentement.

La source principale d'émissions gazeuses pourrait être constituée par les gaz émis lors de la chloration suivant la condensation finale à basse température des tétrachlorures de titane et de silicone. Le gaz de rejet final contiendrait du monoxyde et du dioxyde de carbone, un peu de chlorure d'hydrogène, et peut-être quelques tétrachlorures de silicone non condensés qui pourraient être hydrolysés.

Ces émissions de gaz indésirables pourraient être éliminées par épuration à l'hydrate de soude ou à l'eau de chaux, qui rejeterait des carbonates et des sels solubles de chlorure. A l'aide de ce procédé, le coût de lutte contre la pollution par tonne nette d'alumine est estimé à 10,8 U.S. Dollars. L'ensemble des besoins énergétiques des procédés de lessivage acide et de chloration a été décrit comme deux à trois fois supérieur aux besoins du procédé Bayer conventionnel (39 à 27 millions de Btu par tonne nette d'alumine contre 14,5 millions de Btu environ).

#### 4.2. Procédés de substitution pour la production de l'aluminium

**Procédé Alcoa** : - le nouveau système Alcoa diffère du procédé Hall-Héroult actuel qui nécessite une rupture de croûte et entraîne des émissions de fluorures. Les nouvelles cuves Alcoa ressemblent plutôt à des cuves à magnésium qui ne nécessitent pas de rupture de croûte et dans lesquelles le chlore est récupéré à l'anode. On utilise également des cathodes de carbone, mais elles sont inertes, ce qui signifie que l'anode émet moins de gaz d'oxyde de carbone.

Les principales sources de pollution de l'air proviendraient du four et de la chloruration. Des gaz d'hydrocarbures craqués, d'hydrogène sulfuré, des oxydes de soufre, des oxydes de carbone et du chlorure d'hydrogène sont également émis.

Le coût principal de la lutte contre la pollution de l'air serait représenté par la diminution des émissions d'hydrogène sulfuré ou  $SO_2$  dans les gaz émis par le four, et de chlorure d'hydrogène lors de la chloruration. Le contrôle de cette dernière émission se traduirait par un flux d'eaux résiduaires contenant du chlorure de sodium. De plus, il faudrait également retirer périodiquement des cuves les boues et les sels.

Le coût de la lutte contre la pollution (1) a été estimé à 12,44 U.S. Dollars par tonne d'aluminium produite. Si tout le chlorure de sodium

(1) U.S. Environmental Protection Agency, EPA (1976) *Op. Cit.*

pouvait être rejeté dans des bassins de décantation parfaitement étanches, le coût passerait alors aux environs de 0,5 à 1,0 U.S. Dollars par tonne. Les besoins énergétiques du procédé Alcoa ont été estimés à environ 135 millions de Btu par tonne nette d'aluminium, en se basant intégralement sur un combustible fossile, et à environ 190 millions de Btu par tonne nette d'aluminium pour le procédé Hall-Héroult.

## 5. LEGISLATIONS ET NORMES CONCERNANT LES EMISSIONS DE FLUORURES

L'une des activités complémentaires issues du Séminaire par Secteurs Industriels du PNUE sur l'Industrie de l'aluminium en 1975, consistait en une enquête complète et une remise à jour des législations et des normes concernant les émissions de fluorures. L'IPAI (International Primary Aluminum Institute) a repris cette tâche (1) et les résultats de ces enquêtes sont résumés ci-dessous.

### 5.1. Emissions de fluorures

Les normes relatives à la lutte contre les émissions de gaz ou de particules solides (poussières) provenant des cheminées ou des orifices d'aération des toits peuvent se rapporter à un ou plusieurs des paramètres suivants :

Les normes sont fréquemment fixées en spécifiant les émissions totales soit de gaz (Fg) soit de particules (Fs) ou le fluorure F total rejeté par les cheminées et/ou les toits, exprimées en Kg F/heure ou par jour. Une autre solution consiste à spécifier l'émission admissible comme une fonction du poids de métal produit, par exemple en Kg F/tonne d'aluminium. Dans ce cas, le total des émissions autorisées pour un site donné est proportionnel au taux de production de métal.

Certaines normes limitent la concentration des fluorures ou des poussières dans les cheminées ou les gaz d'aération, ou les deux. Les volumes d'air concernés sont tels que les unités de concentration retenues sont généralement des mg F/m<sup>3</sup>.

Les réglementations relatives à la lutte contre les émissions de fluorures comprennent les données suivantes :

---

(1) International Primary Aluminum Institute, IPAI (1976) "Survey of Legislation - Fluoride and other Emissions".  
IPAI, London.

	Kg F / t AL		
	Fg	Pt	
U.S. (Oregon)	-	0,5 0,65	installations récentes : moyenne annuelle installations récentes : moyenne mensuelle Applicables aux installations anciennes au 1.1.84
U.S. (Federal)	-	1.0 0.95 PB plus 0,5 four à anodes	VSS et HSS
Norvège	-	1,0 max.	pour les installations récentes
Allemagne (RFA)	1,0 0,8	-	gaz de cuves gaz de ventilation

Au Japon les normes nationales concernant les émissions des cheminées et des aérateurs de toits sont respectivement de 3,0 mg Fg/Nm<sup>3</sup> et de 1,0 mg F g/Nm<sup>3</sup>.

## 5.2. Qualité de l'air ambiant

La qualité de l'air ambiant est normalement évaluée par des mesures de la concentration au niveau du sol (CNS) des fluorures en gaz et en particules dans les limites, ou au voisinage immédiat des installations de l'usine. Les unités généralement retenues sont :

$$\mu\text{g F} / \text{m}^3 \text{ ou ppb (par volume)}$$

Les effets écologiques des émissions de fluorures peuvent être contrôlés de différentes façons :

a) par l'accumulation de fluorures (F), par la végétation et les dommages caractéristiques causés au feuillage. On traduit généralement la charge en fluorures en ppm (par poids) de matière sèche. Certaines autorités imposent une limite supérieure de la teneur en F, par exemple pour les aiguilles de pin.

b) Lors de l'ingestion de fluorures par des animaux d'élevage, entraînant une teneur des os en F supérieure à la normale. Ceci provient de l'absorption de fluorures par l'herbe, le foin et autres récoltes concernées, et des réglementations sont souvent imposées spécifiant leur teneur maximum en F.

Un certain nombre de pays et états possèdent des réglementations spécifiant la teneur de fluorure maximum de l'air ambiant :

exemple Etats-Unis (Washington)

Fg  $0,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (1 ppb) par mois

Fg  $2,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (3,5 ppb) par jour

Fg  $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0,6 ppb) de moyenne entre le 1er mars et le 31 octobre, quelle que soit l'année.

En Europe, seule la RFA impose des limitations :

	Jusqu'en 1978	Après 1978
moyenne à long terme	$3 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$2 \mu\text{g}/\text{m}^3$
moyenne à court terme	$6 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$4 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Au Japon (Préfecture de Nigata), la réglementation de l'air ambiant, effective depuis 1974, est la suivante :

$1,3 \mu \text{F}^*/\text{Nm}^3$  (moyenne sur 10 ans)

$\text{F}^* = \text{Fg} + 0,1 \text{F}_s$  (soluble dans l'eau)

$2,5 \mu\text{g Fg}/\text{Nm}^3$  (moyenne des valeurs horaires d'une journée)

$5,1 \mu\text{g Fg}/\text{Nm}^3$  (moyenne sur deux jours consécutifs)

Les normes dites de Washington (Suttie), qui sont largement acceptées pour le fluor de l'herbe (sur une base de poids sec) broutée par des animaux d'élevage et prélevée mensuellement, sont les suivantes :

Teneur en F à ne pas dépasser :

40 ppm en moyenne pour 12 mois consécutifs

60 ppm par mois pour plus de 2 mois consécutifs

80 ppm plus d'une fois en 2 mois consécutifs

L'Organisation Mondiale de la Santé recommande 50 ppm comme niveau maximum tolérable pour des expositions de 6 mois ou plus.

### 5.3. L'environnement en milieu professionnel

La plupart des pays ayant des réglementations, ont adopté des normes uniformes soit pour une observation spécifique, soit comme référence. Ces normes sont les valeurs limites admissibles (TLV) recommandées par l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH).

Les unités de concentration des données TLV sont :

mg F/m<sup>3</sup> ou ppm (par volume)

Actuellement (depuis leur publication en 1974) ces valeurs sont les suivantes :

	<i>ppm (volume)</i>	<i>mg/m<sup>3</sup> (a)</i>
Fluorures (F)	—	2,5
Hydrogène fluoré	3	2
Dioxyde de soufre	5	13
Dioxyde de carbone	5000	9000
Monoxyde de carbone	50	55
Composants volatils du brai de charbon (fraction soluble de benzène)	—	0,2

(a) équivalents approximatifs seulement.

Les recommandations de l'URSS et de la Tchécoslovaquie sont les suivantes :

	<i>Fluorures</i>	<i>Hydrogène fluoré</i>
URSS (1966)	1,0 mg/m <sup>3</sup>	0,7 mg/m <sup>3</sup>
Tchécoslovaquie (1969)	1,0 mg/m <sup>3</sup>	1,2 mg/m <sup>3</sup>

#### 5.4. Normes concernant les effluents liquides

Les teneurs maxima en fluorures (F) des effluents sont précisées dans certains pays qui sont :

	<i>mg F/litre</i>	
Australie (NGS)	1,5	eaux non soumises aux marées
Australie (Tasmanie)	10	baies et estuaires
Espagne	1,5	rejets en rivière
Canada (CB)	2,5	installations récentes, rejets en mer ou en eau douce
Italie	10	tous rejets exceptés en mer
	20	rejets en mer
Suisse	10	tous rejets

Les réglementations fédérales intérimaires aux Etats-Unis expriment des rejets totaux de F en fonction de la quantité d'aluminium d'affinage primaire produite de la façon suivante :

	<i>KgF/t Al</i>	
	<i>En 1977</i>	<i>En 1983</i>
Sources existantes	1,0	0,05
Nouvelles sources	0,025	

## 6. CONCLUSIONS

Des quantités considérables d'énergie électrique et thermique, variant de 13.200 Kwh/t à 17.200 Kwh/t, sont nécessaires à la production d'aluminium de première fusion, niveau de consommation comparable à celui d'autres métaux sur une base de volume par unité. Cependant le recyclage de l'aluminium ne nécessite qu'une faible part (moins de cinq pour cent) de l'énergie utilisée pour la production du métal de première fusion. Même si un progrès notoire a été réalisé ces dernières années par l'industrie de l'aluminium pour diminuer sa consommation d'énergie, l'énergie n'en demeure pas moins l'élément unique et majeur des coûts de production de l'aluminium. C'est pourquoi la possibilité de réduire la consommation d'énergie réside plutôt dans la fonte, la transformation et le finissage.

L'on peut observer deux tendances divergentes en ce qui concerne l'implantation de nouvelles fonderies en rapport avec les ressources. L'une va dans le sens d'une implantation à proximité d'une source d'approvisionnement en matières premières et en énergie hydroélectrique. L'autre penche vers une implantation dans les régions industrialisées possédant l'infrastructure nécessaire, la main-d'œuvre qualifiée et les marchés. La première signifie des contrées éloignées et des pays en voie de développement. La seconde approche a l'avantage possible d'intégrer la production de l'aluminium à la transformation, évitant les besoins énergétiques de la refonte, du fait qu'il est généralement plus onéreux de transporter des produits fabriqués que du métal. Dans les deux cas, et même lorsque de sévères limitations des émissions ont été imposées, le choix attentif d'un site, une bonne ingénierie et l'incorporation d'équipements adaptés de lutte contre la pollution permettront de choisir librement un emplacement tout en répondant aux normes nécessaires de protection de l'environnement. L'IPAI élabore actuellement un ensemble de recommandations écologiques destinées à l'implantation et à l'exploitation de nouvelles usines de réduction de l'aluminium de première fusion, de nouvelles

usines d'affinage de la bauxite en alumine, ainsi que des recommandations écologiques destinées à l'exploitation minière de la bauxite.

En ce qui concerne l'exploitation de la bauxite, il faut s'attacher à une planification de l'utilisation des sols, afin que le territoire soit rendu à son usage originel, ou tout autre usage convenu, après extraction du minerai. Des postes budgétaires devraient donc être prévus à des fins de récupération et de restauration des sols. En ce qui concerne les rejets de résidus de bauxite, on dispose de technologies appropriées pour le stockage sur des terrains sans pertes de matériaux ou rejet d'effluents alcalins. Il est cependant essentiel de tenir compte des caractéristiques physiques de la bauxite, ainsi que des conditions météorologiques locales dans la conception de nouveaux bassins de décantation, et de considérations esthétiques dans le choix des emplacements des bassins. Le coût d'élimination des déchets d'affinage de la bauxite en 1975 était estimé entre 0,27 et 0,60 U.S. Dollars par tonne courte d'alumine, ou entre 0,14 et 1,09 U.S. Dollars par tonne courte de boues.

Dans l'industrie d'affinage primaire de l'aluminium, l'exposition aux fluorures atmosphériques et aux composants volatils du brai de charbon, particulièrement dans les salles des cuves Söderberg, représente le principal risque potentiel pour la santé. De plus, le personnel est soumis à d'autres polluants de l'air, tels que le dioxyde de soufre, le monoxyde de carbone et les particules solides, ainsi qu'à d'autres problèmes liés au bruit, aux risques dus à la chaleur, aux accidents et à d'autres facteurs.

Le principal risque écologique potentiel, hors des installations de réduction de l'aluminium, est l'hydrogène fluoré sous forme de gaz. Ce polluant est beaucoup plus toxique pour certaines espèces de plantes que d'autres polluants, tels que le dioxyde de soufre et l'ozone, et peut causer des dégâts aux récoltes et à d'autres végétaux, entraînant des pertes économiques. Les particules de fluorures sont généralement considérées comme beaucoup moins toxiques que les fluorures gazeux, mais peuvent se traduire par une accumulation accrue de fluorures dans ou sur les plantes.

Les animaux sont exposés aux fluorures par l'ingestion de fourrages contaminés, et l'on peut observer des effets néfastes sur le bétail continuellement en présence de fourrage contenant plus de 40 ppm de fluorure en moyenne annuelle. D'autres herbivores peuvent également subir des effets néfastes à des concentrations relativement plus élevées, selon la sensibilité de l'espèce.

En ce qui concerne la santé de l'homme, pour une concentration de 10 ppm de nombreuses personnes exposées éprouveront une gêne, et pour 30 ppm, tous se plaignent et s'opposent sérieusement à demeurer dans cet environnement. Les valeurs seuil adoptées par de nombreux pays équivalent à environ 2,5 mg/m<sup>3</sup> de fluorure (F) et 3 ppm ou 2 mg/m<sup>3</sup> d'hydrogène fluoré.

L'industrie de l'aluminium n'est pas l'unique source importante d'émission de fluorures. La sidérurgie, l'industrie des engrais, de la brique et de la céramique émettent également ce polluant.

Le coût de l'équipement de lutte contre les émissions de fluorures pour les nouvelles installations a été estimé comme variant entre 2 et 11 % d'investissement supplémentaire, avec une moyenne de 6,6 %. Cela équivaut à une estimation minimum de quelques 6,17 U.S. Dollars/t d'aluminium pour un système primaire par voie sèche, et à une estimation maximum de 52,75 US Dollars/t, pour un système primaire plus secondaire par voie humide, comprenant une usine de récupération de la cryolite pour les cuves Prebake. Le coût d'exploitation moyen pour un équipement à recyclage varie de 20 à 40 U.S. Dollars/t d'aluminium. Le débit d'eaux résiduelles et les quantités de polluants présents dépendent beaucoup du type spécifique d'équipement de lutte contre la pollution de l'air qui est utilisé. Il existe de nombreux procédés de traitement permettant d'éliminer les fluorures contenus dans les effluents. L'épuration par voie sèche, qui permet un rejet de fluorure égal à zéro, ainsi que le traitement à passage unique et le traitement par osmose inverse, sont quelques unes des possibilités.

Il existe de nombreux procédés nouveaux permettant de produire de l'alumine à partir d'autres matériaux que la bauxite. Ces procédés consomment cependant notablement plus d'énergie. Par ailleurs, les nouveaux procédés de remplacement pour la réduction de l'aluminium non seulement consomment moins d'énergie que la traditionnelle méthode de fonderie, mais encore ils réduisent les émissions de fluorures. Le développement de l'industrie de l'aluminium et les progrès dans le domaine de la récupération des matériaux pourraient être davantage entravés par une pénurie de capitaux que par la technologie elle-même.