



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



16521-F

Distr. LIMITEE

ID/WG.470/3

17 juillet 1987

FRANCAIS

Original : ANGLAIS

Organisation des Nations Unies pour le développement industriel

Première consultation sur
les industries des métaux non ferreux

Budapest (Hongrie),
30 novembre - 4 décembre 1987

**LES PROBLEMES DE POLLUTION ET LEURS SOLUTIONS
DANS L'INDUSTRIE DES METAUX NON FERREUX */**

rédigé par

le Secrétariat de l'ONU

742

*/ Ce document est la traduction d'un texte qui n'a pas fait l'objet d'une mise au point rédactionnelle.

V.87-85054 (EX)

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
1. INTRODUCTION	1
2. ALUMINIUM	2
2.1 Techniques de lutte contre la pollution dans les usines de production d'aluminium	2
2.1.1 Lutte contre la pollution pendant la production de l'alumine	2
2.1.2 Lutte contre la pollution pendant la production de l'aluminium	2
2.2 Réaménagement des installations existantes en vue de réduire la pollution	5
2.3 Coûts de la lutte contre la pollution	8
2.4 Normes d'émission	9
2.5 Protection de la santé du personnel	10
3. NICKEL	14
3.1 Techniques antipollution pour les usines de traitement de minerai sulfuré	14
3.2 Réaménagement d'installations anciennes pour réduire la pollution	16
3.3 Coût de la lutte contre la pollution	16
3.4 Normes d'émission	19
3.5 Protection de la santé du personnel	19
4. CUIVRE	
4.1 Techniques contre la pollution dans les installations de production de cuivre	22
4.1.1 La lutte contre la pollution pendant l'extraction	22
4.1.2 Lutte contre la pollution pendant le traitement des minerais	22
4.1.3 Lutte contre la pollution pendant le grillage des concentrés	22
4.1.4 Lutte contre la pollution pendant la production des mattes	23
4.1.5 Lutte contre la pollution pendant le convertissage des mattes	23
4.1.6 Lutte contre la pollution pendant l'affinage au feu	23

	<u>Page</u>
4.1.7 Lutte contre la pollution pendant le raffinage électrolytique	24
4.1.8 Lutte contre la pollution dans les procédés hydrométallurgiques	24
4.1.9 Extraction de l'anhydride sulfureux des courants de gaz	24
4.2 Réaménagement d'installations existantes afin de réduire la pollution	26
4.3 Coût de la lutte contre la pollution	27
4.4 Normes d'émission	31
4.5 Protection de la santé du personnel	33
5. PLOMB	
5.1 Technique de lutte contre la pollution pour les usines à plomb	36
5.1.1 Lutte contre la pollution pendant l'extraction	36
5.1.2 Lutte contre la pollution pendant le traitement du minerai	36
5.1.3 Lutte contre la pollution pendant la fusion des concentrés	37
5.1.4 Lutte contre la pollution pendant le raffinage du plomb argentifère	39
5.2 Réaménagement des installations existantes afin de réduire la pollution	39
5.3 Coût de la lutte contre la pollution	40
5.4 Normes d'émission	43
5.5 Protection de la santé du personnel	46
6. ZINC	
6.1 Techniques de lutte contre la pollution dans les usines à zinc	49
6.1.1 Lutte contre la pollution pendant l'extraction	49
6.1.2 Lutte contre la pollution pendant le traitement du minerai	49
6.1.3 Lutte contre la pollution en fonderie	50
6.1.4 Lutte contre la pollution pendant le raffinage	51
6.1.5 Lutte contre la pollution pendant le procédé hydrométallurgique	52
6.2 Réaménagement d'installations existantes pour réduire la pollution	52
6.3 Coûts de la lutte contre la pollution	52

	<u>Page</u>
6.4 Normes d'émission	54
6.5 Protection de la santé du personnel	56
7. ETAIN	
7.1 Techniques de lutte contre la pollution dans les usines de production d'étain	58
7.1.1 Lutte contre la pollution pendant l'extraction	58
7.1.2 Lutte contre la pollution pendant le traitement du minerai	58
7.1.3 Lutte contre la pollution pendant la fusion de concentrés d'étain à haute teneur	58
7.1.4 Lutte contre la pollution pendant la fusion de concentrés d'étain à basse teneur	59
7.1.5 Lutte contre la pollution pendant le raffinage d'étain brut	60
7.2 Réaménagement d'installations existantes pour réduire la pollution	60
7.3 Coût de la lutte contre la pollution	60
7.4 Normes d'émission	61
7.5 Protection de la santé du personnel	62
8. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	64

<u>Tableaux</u>	<u>Page</u>
2.1 Captage de poussières par cyclones	3
2.2 Techniques de captage des vapeurs	5
2.3 Techniques de lutte contre la pollution pour usines d'aluminium de différentes capacités (uniquement pour anodes précuites à traitement central)	7
2.4 Coût de cinq types d'équipement antipollution pour fonderies d'aluminium primaire	9
2.5 Valeurs limites concernant la protection de la santé du personnel	13
3.1 Teneur de l'air en nickel dans certaines opérations hydro- métallurgiques	14
3.2 Caractéristiques des courants de gaz nécessaires pour un traitement optimal dans les installations de récupération du soufre	17
3.3 Coût de la fixation du soufre par livre de nickel produite	18
3.4 Limites maximales d'exposition professionnelle au nickel dans l'air	19
3.5 Teneurs en nickel de l'air dans les fines latéritiques et les fonderies en Nouvelle-Calédonie	20
4.1 Propriétés des gaz nécessaires pour leur traitement optimal dans les installations de récupération du soufre .	25
4.2 Coût de la fixation du soufre par livre du cuivre produite	29
4.3 Rendement et coût du matériel de dépoussiérage pour un million de mètres cubes de gaz par heure, à 20°C	30
4.4 Directives de la Banque mondiale concernant les émissions de gaz	31
4.5 Normes concernant les effluents liquides	32
4.6 Limites d'exposition professionnelle à des substances toxiques présentes dans l'atmosphère	34
5.1 Teneurs en polluants des eaux usées d'une fonderie de plomb	38
5.2 Coût de l'antipollution pour certaines usines à plomb primaires des Etats-Unis	41
5.3 Coûts de l'antipollution pour certaines usines à plomb secondaires	41
5.4 Impact prévu de l'observation de la norme EPA de teneur en plomb de l'air ambiant	42
5.5 Limites envisagées pour les usines à plomb	43

<u>Tableaux</u>	<u>Page</u>
5.6 Limites de la pollution de l'air pour les usines à plomb	44
5.7 Directives concernant les polluants admissibles de l'eau émise par une fonderie de plomb primaire	45
5.8 Directives concernant les polluants admissibles de l'eau émise par une fonderie de plomb secondaire	45
5.9 Limites de l'exposition professionnelle aux substances toxiques présentes dans l'air	47
5.10 Teneur en plomb de l'air dans trois fonderies de plomb primaires (microg/m ³)	48
6.1 Coûts de l'antipollution pour les producteurs primaires de zinc des Etats-Unis	53
6.2 Coût de l'antipollution pour les producteurs secondaires de zinc des Etats-Unis	53
6.3 Directives concernant les polluants admissibles de l'eau provenant d'une fonderie primaire de zinc	55
6.4 Directives concernant les polluants admissibles de l'eau provenant d'une fonderie primaire de zinc	55
6.5 Limites d'exposition professionnelles au zinc contenu dans l'air en mg/m ³	56
6.6 Limites d'exposition professionnelle au cadmium présent dans l'air, en mg/m ³	57
7.1 Comparaison entre les fours à étain	61
7.2 Directives pour les niveaux d'émission de gaz des fonderies d'étain	62

Glossaire

- ACGIH** American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Groupe de spécialistes appartenant au personnel d'organismes gouvernementaux ou d'établissements d'enseignement qui se consacre à l'étude des aspects administratifs et techniques de la protection de la santé des travailleurs et à l'élaboration de normes et de techniques concernant l'hygiène industrielle. Son comité des valeurs limites assure une révision permanente de la concentration admissible de 400 à 500 substances.
- CWPB** Précuisson par traitement central. Il s'agit des bacs d'électrolyse pour la production de l'aluminium dont les anodes en graphite sont fabriquées (cuites) dans un local particulier de l'usine. L'alimentation en alumine des bacs s'effectue en brisant la croûte solide de cryolite dans un emplacement "central" situé entre deux lignes d'anodes.
- KWhr CC** Un kilowatt par heure de courant continu.
- m³** Mètre cube normal. Contenu en gaz d'un mètre cube d'espace mesurée sous température et pression normales, c'est-à-dire 0°C et une atmosphère.
- SWPB** Précuisson par traitement latéral. Il s'agit de bacs d'électrolyse pour la production de l'aluminium. Analogues en principe aux bacs CWPB (voir ci-dessus), les bacs SWPB ont un système d'alimentation en aluminium qui consiste à briser la croûte solide de cryolithe sur tout le pourtour de l'anode.
- TSS** Total des solides en suspension.
- TWA** Moyenne pondérée en fonction du temps. Il s'agit de la teneur moyenne en polluants de l'air pendant un laps de temps donné.

1. INTRODUCTION

Les industries des métaux non ferreux dont il est question ici : aluminium, nickel, cuivre, plomb, zinc et étain, jouent un rôle capital dans l'économie de plusieurs pays industriels ou en développement. Ce sont malheureusement aussi les secteurs industriels qui émettent ou rejettent dans l'environnement d'énormes quantités de polluants. Chacune des opérations nécessaires à la production d'un métal est plus ou moins associée à une détérioration de l'environnement, détérioration à laquelle l'importance de l'industrie en question et la nature des polluants confère une gravité accrue. Rappelons à titre d'exemple que les cheminées d'une seule installation de production de nickel et de cuivre rejettent chaque jour dans l'atmosphère environ 2 500 tonnes d'anhydride sulfureux.

La fusion de minerais sulfurés tels que ceux du nickel, du cuivre, du plomb et du zinc entraîne habituellement deux catégories de rejets nuisibles à l'environnement, poussières et vapeurs d'une part, anhydride sulfureux (SO₂) de l'autre. Les premières sont encore plus graves lorsque les poussières contiennent une forte proportion de métaux lourds nocifs tels que le plomb, le cadmium et le mercure ou des éléments tels que l'arsenic, l'antimoine et le bismuth. Il est aujourd'hui établi que c'est le SO₂ qui est directement responsable des pluies acides qui ont déjà gravement endommagé l'environnement. Les fonderies modernes peuvent être équipées de dispositifs qui captent les poussières et les vapeurs et transforment l'anhydride sulfureux en produits chimiques utilisables et en réduisent ainsi sensiblement la nocivité à l'égard de l'environnement. De plus il existe déjà, en usage ou à l'essai, de nouvelles techniques de fusion qui réduisent la quantité de polluants produits ou donnent des polluants que l'on peut éliminer ou transformer en produits inoffensifs. Les fonderies plus anciennes continuent cependant à contaminer l'atmosphère d'autant plus qu'elles ne se prêtent guère à un réaménagement qui permettrait de réduire sensiblement la pollution.

La fusion de minerais oxydés - aluminium, nickel, étain - s'accompagne de rejets de poussières et d'autres éléments (tels que les fluorures) nuisibles à l'environnement.

Ces phénomènes imposent aux industries des métaux non ferreux l'obligation de poursuivre leurs efforts pour réduire au minimum les effets de leurs activités sur l'environnement. Depuis quelques dizaines d'années, les innovations techniques et les importantes transformations de la structure des marchés, accompagnées d'une sévérité croissante de la réglementation relative à l'environnement, ont déjà eu pour effet de modifier sensiblement les stratégies de cette industrie dans un sens favorable à l'environnement. Il faut espérer que cette tendance se maintiendra dans l'avenir.

Le présent document a été rédigé par la Division des études et de la recherche du Service des études sectorielles à la demande de la Division du système de consultations.

2. ALUMINIUM

2.1 Techniques de lutte contre la pollution dans les usines de production d'aluminium

2.1.1 Lutte contre la pollution pendant la production de l'alumine

Le principal effluent de l'usine d'alumine étant constitué par les boues rouges (résidus alcalins de bauxite), les méthodes utilisées pour leur enlèvement, leur mise en décharge ou leur stockage présentent une importance particulière.

Le stockage terrestre peut présenter pour l'environnement les inconvénients suivants : 1/

- 1) Infiltration dans le sol de liquide alcalin risquant d'entraîner une contamination des nappes aquifères.
- 2) Fuites dues à des fissures des conduites ou des murs de soutènement.
- 3) Pollution par la poussière dans les régions arides.
- 4) Réduction de la superficie des terrains utilisables.
- 5) Dommages esthétiques.

C'est pourquoi la meilleure façon de lutter contre la pollution ou de la limiter consiste à bien choisir l'emplacement de l'usine et de l'aire de stockage, à aménager et à surveiller avec soin cette dernière, à réduire au minimum l'infiltration en la garnissant d'un matériau étanche. La décharge en mer entraîne une réaction rapide entre le liquide et le magnésium contenu dans l'eau de mer. Cette réaction chimique donne un précipité très fin qui peut nuire aux organismes vivants marins. C'est pourquoi ce mode d'élimination ne doit être utilisé qu'à défaut de tout autre. Le rejet en eau peu profonde est absolument proscrit. Au cas où une grave pénurie de terrains imposerait le rejet en mer, il faudrait procéder à une étude approfondie de l'impact sur l'environnement, suivie d'une surveillance constante. Cette méthode de rejet peut coûter plus cher que le stockage terrestre.

2.1.2 Lutte contre la pollution pendant la production de l'aluminium

L'emploi du procédé Hall-Héroult entraîne une émission de déchets gazeux à partir des salles d'électrolyse, des lignes de cuves, des ateliers d'anodes crues et de cuisson des anodes et de l'atelier de coulée. Le captage et l'élimination des divers polluants sont efficacement assurés dans la plupart des usines, et il y a donc très peu de rejets dans l'atmosphère. Nous examinerons maintenant les différentes sources d'émission.

Vapeurs produites dans les cuves d'électrolyse

Ces vapeurs doivent avant tout être soigneusement captées. Dans les cuves à anodes précurées cette opération s'effectue au moyen de hottes comportant plusieurs écrans. A chaque remplacement d'anode, il ne faut enlever que deux ou trois de ces écrans, ce qui fait le rendement

1/ "Guidelines for the Environmental Management of Alumina Production", PNUE, Industry and Environment Guidelines Series".

du captage ne diminue pas sensiblement pendant cette opération. On a estimé à 20 pour cent seulement la proportion du fluorure total produit dans les cuves qui n'est pas captée par les hottes lors du changement d'anode. 2/ En ce qui concerne les cuves Söderberg, on a essayé, sans y parvenir entièrement, de capter les vapeurs au moyen de panneaux montés au-dessus des jupes. 3/ Il est toujours indispensable de bien capter les vapeurs pour protéger la santé des ouvriers contre les polluants toxiques. Après captage, les particules plus grosses que contiennent les vapeurs sont éliminées au moyen de cyclones. Le tableau 2.1 donne des rendements de captage caractéristiques.

Tableau 2.1
Captage de poussières par cyclones

Emplacement de l'usine	Kg de poussière captés par tonne d'Al	Perte de pression (en mm d'eau)	Teneur des poussières	
			Pourcentage d'Al ₂ O ₃	Pourcentage de fluor
Etats-Unis	38,5	76	60	10
République fédérale d'Allemagne	32,0	100	64-74	15-20
Nouvelle-Zélande	47,0	160	70	9,2
France	12,37	40	60-80	16-19

Source : "Environmental Aspects of Aluminium Smelting" PNUE, Industry and Environment Technical Review Series, Vol. 3, 1981, p. 51.

Les vapeurs passent ensuite par des épurateurs à sec ou humides qui enlèvent une partie considérable des fluorures. Certains épurateurs par voie humide sont toutefois moins efficaces pour l'élimination des particules de moins d'un micron. Les épurateurs humides consistent en dispositifs de contact où les vapeurs sont lavées au moyen de soude caustique, de chaux ou d'eau douce. Les fluorures sont ainsi enlevés sous forme de cyrolithe ou CaF₂. L'opération peut aussi enlever une partie du SO₂, ce qui réduit la pollution de l'air. Il faut toutefois traiter la solution de lavage avant de la rejeter dans l'environnement. Dans le procédé à sec, les vapeurs captées à partir des fours de précuison sont mis en contact dans un réacteur à 100°C avec l'alumine qui est sur le point d'être apportée aux cuves. Le réacteur est constitué par un lit fluidisé ou un tube où l'on injecte l'alumine en même temps que le gaz. Bien que le contact ne dure qu'une seconde environ, l'enlèvement d'HF (à la teneur de 100-200 mg F/Nm³) est efficace (99 pour cent). Les particules d'alumine entraînées par le gaz

2/ "Environmental Aspects of aluminium Smelting", PNUE, Industry and Environment technical Review Series, Vol. 3, 1981.

3/ Aluminium Pechiney, Ph. Le Cardinal, Hooding of Söderberg Pots in Saint-Jean-de-Maurienne Plant, AIMA, 1976.

épuré sont ensuite retenues par un filtre en tissu. Toute l'alumine est ensuite rapportée aux cuves.

Lutte contre la pollution dans les cuves d'anodes crues

Tous les appareils (fusion du brai, mélangeur de pâte, broyeur, tamis, formage de l'anode) doivent être couverts et la vapeur de goudron doit être traitée avant rejet. On peut opérer à sec ou par voie humide.

Lutte contre la pollution des fours de cuisson d'anodes

Les polluants produits sont SO₂, les oxydes d'azote (produits de combustion) les vapeurs de goudron, la poussière de carbone, les fluorures (des queues d'anode). Les particules solides peuvent être captées par un précipitateur électrostatique, par lavage humide ou par contact avec l'alumine sèche. Les oxydes d'azote et le SO₂ restant s'échappent d'ordinaire dans l'atmosphère.

Lutte contre la pollution dans l'atelier de coulée

Il y a d'ordinaire une production de vapeurs de fluxage contenant de petites quantités de fluorure et de poussières. Ces vapeurs peuvent nuire à la santé des ouvriers et il faut veiller à ce que leur concentration dans l'air soit toujours faible. Si l'on emploie du chlore gazeux pour le dégazage du métal liquide, les vapeurs doivent être lavées au moyen de solutions alcalines.

Lutte contre la pollution des effluents liquides

C'est l'eau de lavage qui est la plus polluée. Elle contient des fluorures, des sulfates et, dans le cas des cuves Söderberg, des hydrocarbures. Cette eau doit être traitée. Les fluorures sont d'ordinaire récupérés sous forme de cryolithe.

Lutte contre la pollution des déchets solides

Il faut assurer le stockage et l'élimination des queues d'anodes et des doublages de cuves usagés. Lors du stockage en plein air, des fluorures et cyanures risquent d'être entraînés par l'eau de pluie et de contaminer le sol. Ces matières doivent donc être transformées en déchets inoffensifs avant élimination définitive.

2.2 Réaménagement des installations existantes en vue de réduire la pollution

Les progrès réalisés dans la technique de production de l'aluminium et dans la défense de l'environnement ont permis depuis 30 ans de réduire sensiblement la quantité de fluorures produite par les fonderies. En 1950, par exemple, une fonderie émettait de 12 à 25 kilos de fluorures par tonne d'aluminium produit. Elle n'en émettait plus que de 0,5 à 1 kilo en 1985. La première opération de réaménagement doit consister à poser des hottes aux cuves existantes afin de bien capter les vapeurs. Le tableau 2.2 montre les résultats obtenus par diverses techniques de captage. 4/

Tableau 2.2
Techniques de captage des vapeurs

Lignes	Ampérage KA	Technique de captage	Taux d'évacuation		Rende- ment de captage (%)
			Nm ³ /s/cuve	Nm ³ /t Al 105	
CWFB	150	Hotte à écrans multiples	1,1	0,9	95-99
CWPB	180	Hotte à écrans multiples	2,0	1,3	97-99
SWPB	130-140	Hotte à un panneau de chaque côté	0,9-1,2	0,8-1,0	80-90
SWPB	90	Hotte locale	0,1	0,13	65-75
VSS	100-120	Jupe à un ou deux brûleurs	0,13	0,15	65-85

Source : "Environmental Aspects of Aluminium Smelting", PNUE, Industry and Environment Technical Review Series, Vol. 3, 1981, p.25.

Il faudrait ensuite enlever les grosses poussières au moyen de cyclones et les recycler. On devrait alors installer des épurateurs après les cyclones ce qui réduirait la teneur en particules de fluorure et HF d'environ 50 pour cent (avec les seuls cyclones) et de

4/ "Environmental Aspects of Aluminium Smelting", PNUE, Industry and Environment Technical Review Series, Vol. 3, 1981, p.25.

95 pour cent (avec cyclones plus épurateurs). Les usines nouvelles et plus grandes (200 000 tonnes d'Al par an) devraient être munies d'un système d'épuration à sec et d'une cheminée. Le tableau 2.3 récapitule ces renseignements. Il faut toutefois signaler qu'en général, l'industrie ne juge pas bon de doter des usines anciennes d'un matériel moderne de lutte contre la pollution. Certaines sociétés et gouvernements ont en conséquence adopté un programme de modernisation et de remplacement. 5/

5/ "The Aluminium Industry and the Environment", PNUE, Industry and Environment, juillet, août, septembre 1979, Vol. 2, n° 3.

Tableau 2.3

Techniques de lutte contre la pollution pour usines d'aluminium de différentes capacités (uniquement pour anodes précuites à traitement central); rendement de captage 97 %)

Etape N°	Capacité annuelle	Evolution kg/t Al					Technique d'épuration	Emission kg/t Al					Emission Ft par an
		Total Ft	Air de ventilation Ft	Vapeurs captées				Total Ft	Ventilation Ft	Fumée de cheminée			
				Fg	Fp	Ft				Fg	Fp	Ft	
1	50 000	18	0,54	8,73	8,73	17,46	Cyclone + cheminée	14,51	0,54	8,73	5,24	13,97	725
2	50 000	18	0,54	8,73	8,73	17,46	Cyclone + épurateur humide + cheminée	3,60	0,54	0,44	2,62	3,06	180
3	200 000	>20	0,6	10,67	8,73	>19,4	Procédé à sec + cheminée	0,95	0,6	-	-	0,35	190

Source : "Environmental Aspects of Aluminium Smelting", PNUE, Industry and Environment Technical Review Series, Vol. 3, 1981, p. 50.

2.3 Coûts de la lutte contre la pollution

D'après la référence 50, l'établissement d'un aire de dépôt (en Hongrie) coûte environ 0,3 - 0,4 dollar E.U. par mètre cube de capacité de stockage à condition d'employer pour la construction des digues les boues de cendres volantes provenant de la centrale électrique. Avec des digues en terre le coût s'élève à 0,7 - 0,8 dollar par mètre cube. Les frais d'exploitation se montent à 0,1 à 0,15 dollar par tonne d'alumine selon la distance entre l'usine et l'aire de dépôt. 6/

Un rapport établi par l'Institut international d'aluminium primaire (IPAI) 7/ et d'autres études montrent que les coûts de la lutte contre la pollution dans les usines nouvelles sont très inférieurs à ceux d'un réaménagement d'usines existantes.

Le tableau 2.4 donne les frais d'exploitation, les investissements, et les récupérations possibles (le cas échéant) pour divers types de systèmes antipollution. 8/ Ils ont été calculés pour une usine d'une capacité annuelle de 50 000 t de métal. Pour donner une idée de ce que coûterait un réaménagement, l'adjonction d'un épurateur humide secondaire à une usine existante coûterait au moins le double de ce qu'a coûté l'épurateur primaire. L'investissement moyen nécessaire pour combattre le fluor représente sept pour cent de supplément à l'investissement initial dans l'appareil de production (en comptant 2 000 dollars E.U par tonne de capacité installée). Le supplément de frais d'exploitation serait de 0,8 à 6,6 pour cent.

L'OCDE a fait faire en 1977 une autre étude qui a porté sur les usines d'aluminium des Etats-Unis, du Canada, du Japon et de la Norvège. 9/ Elle a conclu que l'investissement nécessaire à la construction d'usines nouvelles se montait à 2 300 dollars (par tonne d'Al) et que les frais d'exploitation variaient de 780 à 1 040 dollars. D'après ces chiffres, la lutte contre la pollution entraînerait une augmentation de 6,3 pour cent au maximum du coût total de production et les frais d'exploitation correspondants représenteraient de 2,2 à 7,2 pour cent de l'investissement initial. Pour les électrolyses existantes, le rapport estime que la lutte contre la pollution entraînerait une dépense supplémentaire de 17,5 dollars par tonne de capacité installée. Les frais d'exploitation correspondant étaient estimés à 22,4 dollars par tonne d'Al soit un écart considérable de 18,2 dollars par rapport à la normale.

6/ Anonyme. "Information on the Environmental Aspects of Alumina Production in Hungary", Document ALU 80/495C, Budapest, 1980.

7/ Rapport de l'Institut international d'aluminium primaire.

8/ Atkins, M.H. and J.P. Lowe. The Economics of Pollution Control in the Non-Ferrous Metals Industry, Pergamon Press, 1979, p. 36.

9/ "Pollution Control Costs in the Primary Aluminium Industry", OCDE, Paris, 1977, p. 36.

Les rendements antipollution obtenus par Rush, Russel et Ireson ^{10/} au moyen de méthodes relativement nouvelles telles que l'injection d'alumine à sec sont très satisfaisants moyennant un coût relativement faible. D'autres méthodes de lutte contre la pollution sont non seulement moins efficaces mais aussi plus coûteuses.

Tableau 2.4
Coût de cinq types d'équipement antipollution pour
fonderies d'aluminium primaire

Type d'opération	Investissement */	Charge annuelle du capital +/	Frais d'exploitation †/	Récupération †/	Coût total annuel †/
Haute cheminée	50	8,85	3,04	1,72	10,17
Secondaire humide seulement	110	19,40	7,97	-	27,37
Primaire humide	108	19,20	14,30	8,50	25,00
Primaire sec	75	13,30	11,20	10,50	14,00
Primaire + secondaire humide	174	30,80	17,20	11,80	36,20

*/ Dollars par tonne métrique de capacité de production annuelle.

†/ Dollars par tonne métrique d'aluminium produit.

Source : Rapport de l'IPAI, cp. cit.

2.4 Normes d'émission

Les principaux polluants émis par une usine d'aluminium sont le fluor et SO₂. Des normes d'émission ont été prescrites dans la plupart des pays industriels. Aux Etats-Unis l'EPA (Agence de protection de l'environnement) a publié des normes de rendement applicables à toute nouvelle installation d'électrolyse et limitant l'émission totale de fluor à 0,95 kg par tonne d'aluminium produite (1976). La limite étant de 0,05 kg pour le four de cuisson, le total est donc de 1 kg de F par tonne d'Al. Ces limites sont observées dans plusieurs pays.

Il y a également des prescriptions relatives à la teneur des émissions. Par exemple, l'Etat de Washington (Etats-Unis) prescrit que

^{10/} Rush, Russell et Ireson, "Air Pollution on Primary Aluminium Potlines : Effectiveness and Cost", Journal of the Air Pollution Control Association, février 1973, vol. 23, n° 2.

les émissions de F soient inférieures à : 11/

3,68	microg/m ³	pendant 12 heures,
2,86	"	" " 24
1,64	"	" " 1 semaine
0,82	"	" " 1 mois
0,50	"	" du 1er mars au 31 octobre

Des normes analogues sont aussi en vigueur en République fédérale d'Allemagne et au Japon. Les émissions de fluor de l'usine ne causent ordinairement aucun dommage à la population car on n'a constaté aucun cas de fluorose (maladie du squelette due à l'absorption de fluor) dans le voisinage des usines d'aluminium modernes.

En ce qui concerne SO₂, les normes des Etats-Unis prescrivent qu'une installation industrielle ne doit pas causer dans son voisinage une augmentation de la teneur de l'air ambiant dépassant 40 microg/m³ (moyenne annuelle) ou 182 microg/m³ (moyenne sur 24 heures).

Il y a également des normes pour les effluents liquides. Aux Etats-Unis les rejets pour les fonderies d'aluminium primaires sont limités comme suit : 12/

Fonderie d'aluminium primaire

Maximum en 24 heures

Fluorures (total)	0,05 kg/tonne d'aluminium
TSS	0,10
pH	6 - 9 unités

Fonderie d'aluminium
secondaire

Maximum en 24 heures

Fluorures (total)	0,4 kg/tonne d'aluminium
TSS	1,5
NH ₃ (en N)	0,01
Al	1,0
Cu	0,003
pH	6 - 9 unités

2.5 Protection de la santé du personnel

Les problèmes d'environnement du travail que soulèvent l'extraction de la bauxite et la production de l'alumine qui lui fait suite sont dus aux causes suivantes :

- Maniement de machines et de matériel lourds,
- Manipulation de produits chimiques corrosifs tels que soude caustique et acides,

11/ "Environmental Aspects of Aluminium Smelting", PNUE, Industry and Environment Technical Review Series, Vol. 3, 1981.

12/ Environmental Guidelines, Office of Environmental Affairs, Banque mondiale, juillet 1984, p. 239.

- Exposition à la chaleur, au bruit, aux vapeurs, aux poussières, aux émanations de soudage et à certains produits chimiques toxiques. 13/

Des systèmes de protection appropriés et des règlements de sécurité s'imposent donc. La plupart de ces problèmes et des mesures nécessaires ne sont pas particuliers aux usines d'aluminium. Dans les fonderies d'aluminium l'exposition du personnel aux polluants nocifs varie considérablement selon les opérations qu'il effectue pendant son temps de travail. Dans la plupart des pays industriels, les normes de protection de la santé exigent que la teneur en polluant, pondérée en fonction du temps, ne dépasse pas une valeur donnée au cours d'une période de travail de huit heures. Le tableau 2.5 donne des valeurs caractéristiques concernant les polluants les plus fréquents dans les fonderies.

Le personnel peut toutefois être exposé à des concentrations de polluants plus fortes pendant certaines opérations qui ne durent que quelques minutes. Il s'agit par exemple du remplacement des anodes dans les fours de pré cuisson ou de l'enlèvement des queues dans les cuves Söderberg. Les teneurs de pointe peuvent atteindre les valeurs ci-dessous : 14/

HF	= 20 mg/m ³
Fluorure (F)	= 25 mg/m ³
CO	=200 mg/m ³
SO ₂	=100 mg/m ³

C'est pourquoi l'aire de travail est toujours ventilée, même dans les installations anciennes. Les nouvelles sont généralement munies d'un système de circulation de l'air à partir du sol en sorte que l'ouvrier se trouve dans un courant ascendant d'air pur. On peut encore réduire la concentration des polluants dans le poste de travail :

- a) En réduisant la teneur en soufre du bloc d'anode, ce qui diminue la quantité de SO₂ produite;
- b) En augmentant le rendement des hottes de captage;
- c) En réduisant le rendement d'adsorption de SO₂ du procédé à l'aluminium sèche. 15/ C'est là la mesure la plus efficace parce que la plus grande partie du SO₂ s'échappe par la cheminée;
- d) En captant les vapeurs de jupe au moyen de panneaux montés au-dessus de la jupe afin de former une manière de hotte pour les cuves Söderberg. 16/

Le bruit peut, lui aussi, produire des effets nocifs. Dans une fonderie, il arrive souvent que la limite de 90 dB prescrite par l'organisme américain NIOSH soit dépassée (par ex. broyage de coke

13/ "Guidelines for the Environmental Management of Alumina Production" PNUE, Industry and Environment Guidelines Series.

14/ "Environmental Aspects of Aluminium Smelting" PNUE, Industry and Environment Technical Series, Vol. 3, 1981, p.29.

15/ Alcan, W.D. Lamb, The Role and Fate of SO₂ in the Aluminium Reduction Cell Dry Scrubbing Systems, AIME 1979.

16/ PNUE/ONUUDI, "Compte-rendu des journées d'étude sur la production d'aluminium et l'environnement" Paris (UNEP/WS/A1.7 Final), 1981.

ou de brai, formage des anodes précuites, rupture de la croûte, aspiration du métal par siphon à vide). Il y a plusieurs façons de réduire ce facteur de nuisance notamment en habillant le matériel au moyen de substances poreuses qui absorbent le bruit 17/, 18/.

17/ Intalco Aluminium Corporation, K.G. Sandell, Noise Control in an Aluminium Reduction Plant, AIME 1974.

18/ Swiss Aluminium, W. Schmidt-Hatting, Investigations of Noise in Aluminium Electrolysis Cells, AIME 1975.

Tableau 2.5
Valeurs limites concernant la protection de la santé du personnel

A. Fluorure (Etats-Unis, NIOSH)

HF en F	2 mg/m ³
Particules de fluorures en F	2,5 mg/m ³
Total de HF en F et de particules de fluorures en F	2,5 mg/m ³
F dans l'urine †/	4 mg/litre avant le travail après 48 h de non-exposition 7 mg/litre après le travail prélevé le 4 ^{ème} jour (ou un jour suivant) de la semaine de travail

†/ Limite non officielle mais observée dans toutes les fonderies. Ces deux valeurs, 4 et 7 mg/litre, s'appliquent à des groupes de travail (par ex. changeur d'anodes) et le nombre représente des valeurs géométriques moyennes pour chacun de ces groupes.

B. Autres contaminants (Etats-Unis)

SO ₂	5 mg/m ³
Total des particules en suspension	10 mg/m ³ (respirable 5 mg/m ³)

C. Eléments volatils du brai de goudron (Etats-Unis)

Matières organiques solubles dans le benzène	0,2 mg/m ³
---	-----------------------

Cette limite est toujours appliquée mais les recherches ont montré que les particules d'hydrocarbures aromatiques (PHA) se présentent en concentrations variables. On recherche actuellement une méthode chromatographique simple qui permettrait de mesurer plusieurs PHA déterminés.

On a tendance à remplacer le benzène par un solvant moins toxique, le cyclohexane.

D. Hydrocarbures polycycliques aromatiques (chromatographie sur couche mince)

Norvège - PHA totales	40 microg/m ³
Suède - Benzo-3, 4-Pyrène seul	5 microg/m ³

Source : "Guidelines for Environmental Management of Aluminium Smelters", PNUE, Industry and Environment Guidelines Series, 1986, p. 37.

3. NICKEL

3.1 Techniques antipollution pour les usines de traitement de minerai sulfuré

Dans les mines, on humecte le minerai avec de l'eau. Cette opération, à laquelle s'ajoute une ventilation forcée, limite la teneur en poussières de l'air à environ 1 mg/m³. L'eau doit passer par des installations centrales de traitement d'eaux usées avant d'être rejetée des mines et des crassiers. Le courant est d'ordinaire neutralisé jusqu'à pH 9 afin de précipiter les métaux lourds. On procède ensuite à la floculation et à la clarification afin d'obtenir une eau de bonne qualité propre au rejet.

Tableau 3.1
Teneur de l'air en nickel dans certaines opérations hydrométallurgiques

Opération	Nombre d'échantillons	Gamme des concentrations (mg Ni/m ³)	Concentration moyenne (mg Ni/m ³)
Lavage des mattes à l'acide	-	0,005-1,630	0,099
Epuración de l'électrolyte :			
Opérateur du filtre à tube	12	0,013-0,316 0,011-0,316 a/	0,144 0,129
Opérateur de la presse du filtre	16	0,061-0,535 0,031-0,246 a/	0,209 0,152
Zone du filtre à presse	11	0,064-0,508 0,052-0-466 a/	0,242 0,221
Epuración de l'électrolyte : (échantillons sur zones)			
Cémentation de cuivre sur nickel en cuves Pachuca	39	0,048-0,644 0,001-0,133 a/	0,168 0,038
Enlèvement des boues ferreuses au moyen d'un filtre à tube	56	0,027-0,653 0,003-0,433 a/	0,200 0,085
Oxydation du cobalt par le chlore	47	0,030-0,672 0,001-0,267 a/	0,183 0,066

a/ Nickel soluble

Source : Warner, J.S., "Occupational Exposure to Airborne Nickel in Producing and Using Nickel Products", dans "Nickel in the Human Environment", Agence internationale de recherche sur le cancer, Oxford University Press, 1984.

De plus, on recycle l'eau (à concurrence de 85 pour cent dans certaines installations). L'amélioration du rendement de la concentration du minerai a procuré de grands avantages tant à l'industrie du nickel qu'à l'environnement. Par exemple, à l'usine de l'Inco à Sudbury, le courant de concentrés contenait autrefois 4 pour cent de nickel et 60 pour cent de pyrotite ferreuse de nickel, ce qui signifiait que pour produire une tonne de nickel il fallait traiter 26 tonnes de concentrés, et brûler 17 tonnes de sulfure de fer donnant 13 tonnes de SO₂ et 26 tonnes de crasses. Or aujourd'hui, pour chaque tonne de nickel produite, les chiffres sont respectivement 10, 6, 4,3 et 10 tonnes.

Le problème des résidus a été en partie résolu en utilisant les éléments les plus gros pour combler les galeries. On peut parfois se débarrasser ainsi d'environ 20 pour cent des déblais. La difficulté subsiste en ce qui concerne les éléments plus fins qui produisent des poussières. On y a paré en mouillant la zone de dépôt pour ensuite la replanter. Cette méthode est en usage à Sudbury depuis le milieu des années 1950. 19/, 20/ A Copper Cliff, on a obtenu de bons résultats avec des gazons (par exemple fléole des prés) des légumineuses (alfa) et des arbres (bouleau, saule) 21/. Du point de vue de l'environnement, l'avantage est bien évident. De plus, la végétation réduit l'infiltration de l'eau de pluie dans le sol et en diminue l'humidité par transpiration, ce qui empêche aussi les résidus de s'infiltrer dans le sol.

On a réussi à éliminer d'autres polluants tels que les thiosulfates et les polythionates qui se forment dans l'eau servant au traitement des minerais en les mettant en décharge avec soin et en les laissant ensuite être transformés en acide sulfurique par l'action oxydante des bactéries et du soleil. On peut ensuite neutraliser l'acide avec de la chaux.

De nombreuses opérations de pyrométallurgie et de raffinage produisent des poussières (par exemple dans les fours à griller, les fours à réverbère, les fours électriques et les convertisseurs). Ces poussières peuvent contenir jusqu'à 5-10 pour cent de nickel et 10-20 pour cent de sulfate. On résout d'ordinaire ce problème en améliorant le rendement des hottes pour enlever la poussière au moyen de divers dispositifs (précipitateurs électrostatiques ou épurateurs) qui seront décrits dans d'autres chapitres.

19/ Young, C.A. et T.H. Peters, The Use of Vegetation to Stabilize Mine Tailings at Copper Cliff, 68-77. Compte-rendu de la 15^{ème} Ontario Industrial Waste Conference, juin 1968.

20/ Michelutti, R., "How to Establish Vegetation on High Iron-Sulphur Mine Tailings" Canadian Mining Journal, octobre 1974, pp. 54-58.

21/ Peters, T.H., Inco Metals reclamation program, The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, décembre 1978.

Le problème le plus grave est probablement celui de la formation de SO₂. Les deux méthodes possibles reposent sur le captage de SO₂ des gaz de carneau suivi de leur conversion en d'autres substances chimiques. La première consiste à convertir SO₂ en produits chimiques vendables tels que le soufre élémentaire, le bioxyde de soufre liquide, le sulfate d'ammoniaque ou l'acide sulfurique. C'est la méthode à employer chaque fois qu'elle est économiquement applicable. On peut aussi convertir SO₂ en produits tels que le gypse, que l'on élimine ensuite car le gypse, contaminé par les métaux lourds, n'est pas vendable. Cette méthode n'est pas actuellement employée. 22/, 23/

3.2 Réaménagement d'installations anciennes pour réduire la pollution

On peut améliorer la qualité des émissions soit en modifiant le procédé de manière à réduire la production du polluant primaire (comme le fait l'INCO dans ses usines de Sudbury et de Thompson) soit en épurant les effluents de l'installation. Un meilleur traitement "au bout du tuyau" signifie un meilleur rendement du dépoussiérage des gaz et par conséquent une moindre émission de SO₂. Chaque fois qu'il est possible, le dépoussiérage à sec doit être préféré. Les épurateurs par voie humide risquent de polluer les courants d'eaux usées. S'il n'y a pas de cyclones, il faut en monter après coup sur tous les circuits chargés de poussières dans les vieilles usines. Les précipitateurs électrostatiques ont souvent un meilleur rendement, notamment pour les particules plus fines, mais ils coûtent plus cher.

L'enlèvement de SO₂ des gaz de carneau est possible au moyen du procédé de production d'acide sulfurique par contact, du procédé par absorption chimique ou du procédé de production de soufre élémentaire. Les grandes usines de nickel existantes ne se prêtent pas facilement à l'adoption de procédés simples d'enlèvement du SO₂ surtout lorsque la teneur des émissions est faible. Par contre, on a construit des installations nouvelles comportant des dispositifs de récupération de jusqu'à 80 pour cent du SO₂ produit.

3.3 Coût de la lutte contre la pollution

Les émissions de SO₂ sont les plus difficiles et les plus chères à combattre. Il y a plusieurs systèmes de lutte mais chacun n'est adapté qu'à un mode particulier d'émission. Le tableau 3.2 24/ donne les caractéristiques des courants de gaz qui se prêtent au traitement pour chacun des systèmes d'élimination les plus fréquents. Il n'existe pas encore de procédé économique de traitement des gaz à faible teneur en SO₂ mais la question est à l'étude.

22/ "Background Information for New Source Performance Standards : Primary Copper, Zinc and Lead Smelters", EPA-450/2-74-002 a.

23/ Environment Canada, A Study of Sulphur Containment Technology in the Non-Ferrous Metallurgical Industry, Rapport EPS 3-AP-79-8, avril 1980.

24/ Environment Canada, A Study of Sulphur Containment Technology in the Non-Ferrous Metallurgical Industry, Report EPS 3-AP-79-8, April 1980.

Tableau 3.2
Caractéristiques des courants de gaz nécessaires pour un
traitement optimal dans les installations de
recupération du soufre

	Pourcentage SO ₂	Pourcentage O ₂	Débit et composition
Contact acide - simple	5- 8	8-12	Peut être variable <u>1/</u>
- double	5- 8	8-12	Peut être variable <u>1/</u>
SO ₂ liquide - physique	70-80	Le plus bas possible	Constant
- chimique	10-11 <u>2/</u>	-	Constant
Soufre élémentaire	10	1-3	Constant

1/ Plus économique quand il est constant.

2/ L'installation exige une pression ou une absorption chimique suivie d'un traitement d'un fort courant régénéré.

Source : Lemmon, W.A., "Environmental Aspects of the Extraction and Production of Nickel", Journées d'étude PNUE, Genève, 13-16 avril 1981.

En plus de ce que coûte l'extraction de SO₂ des gaz d'échappement, il y a les frais considérables que comporte la fabrication des sous-produits (acide sulfurique, SO₂ liquide, soufre) la commercialisation, le transport, le stockage ou l'élimination définitive. Par exemple, la distance maximale à laquelle on puisse expédier économiquement de l'acide sulfurique est estimée à 300 km. 25/ Or, la plupart des usines de nickel sont situées loin des débouchés possibles.

Le rapport soufre/nickel dans les concentrés varie d'ordinaire entre 2,2 et 4,8 et peut peser lourdement sur le coût de l'élimination du SO₂. Le tableau 3.3 donne les coûts pour divers systèmes de fixation en supposant que le produit final est sans valeur. 26/

25/ Anonyme, New Smelter, Acid Plant at Falconbridge to Improve Working Conditions, Efficiency, Canadian Mining Journal, 99, 5 mai 1978.

26/ Environment Canada, A study of Sulphur Containment Technology in the Non-Ferrous Metallurgical Industry, Report EPS 3-AP-79-8, April 1980.

Tableau 3.3
Coût de la fixation du soufre par livre de nickel produite */

	Installation acide à catalyse unique				Catalyse double			
	Gaz continus seulement		Gaz variables seulement		Gaz continus et variables		Gaz continus et variables	
Fixation du soufre, pourcentage	50	45	95	97				
Coût de production \$ E.U./tonne de S	59	92	54	58				
Coût de neutralisation \$ E.U./tonne de S	92	92	86	86				
Rapport soufre/métal dans le concentré	Bas	Elevé	Bas	Elevé	Bas	Elevé	Bas	Elevé
Coût de fixation du soufre en cents par lb de Ni	2,95	6,43	4,14	9,02	5,12	11,18	5,64	12,31
Neutralisation (coût total de confection et de neutralisation de l'acide) en cents par lb de Ni	7,57	16,51	8,29	18,09	13,25	28,91	13,94	30,42

*/ Coût d'épuration du gaz non compris.

Source : Lemmon, W.A., "Environmental Aspects of the Extraction and Production of Nickel", Journées d'étude PNUE, Genève, 13-16 avril 1981.

3.4 Normes d'émission

On trouvera dans d'autres chapitres (aluminium, cuivre) les normes d'émission du polluant majeur qu'est le SO₂. Le taux d'émission de particules dans l'air doit être maintenu au-dessous de 240 microgrammes par m³ sur une pointe d'émission de 24 heures, et au-dessous de 75 microgrammes par m³ en moyenne géométrique annuelle. ^{27/} La teneur maximale de l'air en nickel doit être inférieure à 20 mg/m³. Une teneur en nickel dépassant 50 mg/kg peut être toxique pour les plantes. Il faut donc limiter la quantité de sels de nickel répandus sur les terres cultivées, notamment sur les sols acides. Le Département de l'environnement du Royaume-Uni recommande de ne pas apporter au sol plus de 7 g/m² (en nickel) au cours d'une période de 30 ans. ^{28/} En ce qui concerne les effluents liquides des usines de nickel, lorsque la décharge contrôlée n'est pas possible, les autorités canadiennes recommandent les limites ci-dessous :

Total des solides en suspension	15 mg/l (moyenne de 30 jours)
Cu	0,2 "
Ni	0,5 "
Fe	0,5 "
pH	6 à 9 unités

3.5 Protection de la santé du personnel

Plusieurs pays ont adopté des limites d'exposition professionnelle au nickel en suspension dans l'air dans les lieux de travail. Elles figurent au tableau 3.4.

Tableau 3.4
Limites maximales d'exposition professionnelle au nickel dans l'air

Rép. féd. d'Alle- magne	Japon	Suède	URSS	Norme prof.	Etats- Unis ACGIH		
					TWA	Court terme	
Nickel, mg/m ³	1	0,01	0,5	1	1		
Carbonyle de nickel mg/m ³	0,7	0,007	0,007	0,0005	0,007	0,35	0,35

Source : Occupational Exposure Limits for Airborne Toxic Substances, Série sécurité et hygiène du travail, n° 37, Genève 1977.

^{27/} Environmental Guidelines, Office of Environmental Affairs, Banque mondiale, juillet 1984.

^{28/} "Environmental Aspects of Selected Non-Ferrous Metals Industries", PNUÉ, Industry and Environment Overview Series, 1984.

A titre d'exemple d'exposition effective du personnel, le tableau 3.5 29/ donne des chiffres communiqués par la Société Métallurgique Le Nickel pour son usine de Nouvelle Calédonie. Ils montrent que les teneurs en nickel de l'air sont très faibles, ce qui est peut-être dû en grande partie à la base teneur en nickel du minerai.

Tableau 3.5
Teneurs en nickel de l'air dans les fines latéritiques et les fonderies en Nouvelle-Calédonie

Teneur en nickel de l'air (mg Ni/m ³)	Echantillonnage sur zone		Echantillonnage sur personnel	
	Fréquence des observations (pour cent)	Teneur moyenne a/	Fréquence des observations (pour cent)	Teneur moyenne a/
0,05	67,1	0,0047	83,2	0,0022
0,05-0,10	8,3	0,076	1,4	0,081
0,10-1,00	24,6	0,029	15,5	0,274

a/ Echantillonnage pour les particules d'un diamètre inférieur à 30 microns.

Source : Warner, J.S. "Occupational Exposure to Airborne Nickel in Producing and Using Nickel Products" dans "Nickel in the Human Environment", Agence internationale de recherche sur le Cancer, Oxford University Press, 1984.

D'une façon générale, le risque couru par le personnel dépend en grande partie du composé de nickel en cause. Alors que le nickel métallique et la plupart de ses sels minéraux sont relativement non toxiques, le gaz carbonyle de nickel (présent dans certaines opérations de raffinage) est toxique même à basse teneur. Il faut donc protéger le personnel. De plus, des études expérimentales ont montré que plusieurs composés du nickel peuvent produire des tumeurs malignes chez des animaux lorsqu'ils sont inhalés (subsulfate et carbonyle de nickel) ou injectés (subsulfure, oxyde, carbonate et hydroxyde de nickel) 30/. En fait, il est aujourd'hui bien démontré que les ouvriers des usines de nickel courent un certain risque de cancer des fosses nasale et du poumon. Les données proviennent de raffineries du Canada, du Japon, de Norvège, de République démocratique allemande et d'URSS. Sans qu'on ait encore de preuve concluante, il semble que l'on puisse incriminer l'inhalation de poussières d'oxyde de nickel et de vapeurs

29/ Warner, J.S. "Occupational Exposure to Airborne Nickel in Producing and Using Nickel Products" dans "Nickel in the Human Environment", Agence internationale de recherche sur le Cancer, Oxford University Press, 1984.

30/ Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk of Chemicals to Man, Vol. II., Agence internationale de recherche sur le cancer, Lyon, 1976, pp. 75-112.

de carbonyle 31/, 32/. L'analyse des données montre aussi que le risque de cancer couru par les ouvriers des raffineries a sensiblement diminué avec le temps ce qui résulte probablement de l'amélioration des conditions de travail. Certaines estimations des teneurs en nickel de l'air lors d'opérations de raffinage où se produisaient autrefois une incidence accrue de cancers étaient deux ou trois fois supérieures à celles que l'on constate aujourd'hui dans l'industrie du nickel.

31/ IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans, Chemicals and Industrial Processes Associated with Cancer in Humans, IARC Monographs Volumes 1-20, Monographies de l'AIRC, Volumes 1-20, supplément 1, Agence internationale de recherche sur le cancer, Lyon, septembre 1979.

32/ Warner, J.S., "Occupational Exposure to Airbone Nickel in Producing and Using Nickel Products" dans Nickel in the Human Environment", Agence internationale de recherche sur le cancer, Oxford University Press, 1984.

4. CUIVRE

4.1 Techniques contre la pollution dans les installations de production de cuivre

4.1.1 La lutte contre la pollution pendant l'extraction

Au stade de l'extraction, le principal problème d'environnement est celui de la poussière. La poussière soulevée par les transports par camions peut être réduite en employant des camions de plus grande capacité et en recouvrant les routes d'un revêtement non pulvérulent. On peut utiliser à cet effet des émulsions. Cette méthode offre en outre l'avantage d'accélérer les transports et de prolonger de 10 à 15 pour cent la vie des pneus. ^{33/} On peut réduire la formation de poussière dans les mines à ciel ouvert en créant un léger brouillard au moyen de jets d'air et de vapeur. On peut réduire la quantité de poussière soulevée par les explosions en répandant dans les cavités une solution d'hydroxide de calcium ou de sulfate de sodium (10 pour cent). Le reboisement joue un rôle important; il permet de récupérer le sol et de créer des zones tampon de verdure qui empêchent la poussière et les produits chimiques nocifs de se répandre. Un hectare de forêt peut capter jusqu'à 18 tonnes de poussière. On peut empêcher la formation de poussière sur les emplacements de mines à ciel ouvert épuisées en y semant des céréales pérennes.

4.1.2 Lutte contre la pollution pendant le traitement des minerais

Là encore, c'est la poussière qui pose le plus de problèmes. Pendant le concassage et le broyage, le moyen le plus efficace d'éviter la formation de poussières est d'arroser ou d'asperger d'eau. Dans un local fermé, il faut recouvrir les machines qui font de la poussière, assurer une bonne aération et monter des appareils de captage des poussières. A ce stade, le rendement du captage peut atteindre 95 pour cent. Toutes ces opérations doivent être télécommandées.

En ce qui concerne la flottation des minerais, le principal problème d'environnement est celui de la pollution de l'eau par les agents de flottation. On l'a résolu en partie depuis quelques années en remplaçant les sels de cyanure, très toxiques, par des sulfures et les agents moussants phénoliques, du type crésol, toxiques eux aussi, par des agents non phénoliques. On a aussi de plus en plus recours au recyclage de l'eau.

4.1.3 Lutte contre la pollution pendant le grillage des concentrés

Cette opération est peut-être celle qui contribue le plus à la désulfurisation dans l'ensemble du processus de production du cuivre (50 à 70 pour cent d'enlèvement). Le grillage sur lits fluidisés donne du SO₂ en concentrations assez fortes (jusqu'à 14 pour cent) pour permettre des taux de récupération élevés (jusqu'à 99,5 pour cent). Le rendement général de récupération du soufre dans l'ensemble du processus de production s'en trouve porté à 75-85 pour cent. D'autres courants à base teneur en SO₂ provenant d'autres opérations peuvent être dilués dans les effluents gazeux du grillage. Le courant ainsi obtenu se prête encore

^{33/} "Environmental Aspects of Copper Production", Journées d'études des PNUZ, Genève 13-16 avril 1981.

à un traitement efficace, par exemple dans une installation de SO_4H_2 pour l'enlèvement du SO_2 . Dans les fours à foyers multiples, la teneur en SO_2 du gaz d'échappement n'est toutefois que de 7,5 pour cent. Cela suffit encore pour un bon enlèvement de SO_2 mais pas pour la dilution dans d'autres courants gazeux. Les gaz de grillage contiennent aussi des poussières qui peuvent facilement être captées par des cyclones et des précipitateurs électrostatiques.

4.1.4 Lutte contre la pollution pendant la production des mattes

Lorsque la fusion s'effectue dans des fours à réverbère, la teneur des gaz émis en SO_2 est trop faible pour permettre un enlèvement efficace. On n'y procède donc pas à présent. On récupère la chaleur excédentaire et on capte ensuite la poussière des gaz dans des précipitateurs électrostatiques (rendement supérieur à 99 pour cent). La poussière captée est ensuite recyclée.

Lorsqu'on procède à la fusion rapide, le grillage est remplacé par une opération de pelletisation et de frittage qui produit un courant gazeux dont la teneur en SO_2 (7 pour cent environ) se prête à la conversion en acide sulfurique. Si l'on a ensuite recours au procédé pyritique modifié, on peut encore extraire le SO_2 du gaz, mais avec un rendement moindre. Cela n'est plus possible avec la fusion rapide semi-pyritique parce que la teneur en SO_2 est trop basse (moins de 2 %).

Dans la fusion au four électrique, la teneur en SO_2 des gaz émis est très forte. L'air n'a pas accès au four (à condition qu'il soit bien couvert, surtout au voisinage des électrodes) et le volume des gaz est faible, de même que la teneur en poussières, ce qui permet d'utiliser des précipitateurs électrostatiques plus petits.

La fusion "flash" produit, elle aussi, des gaz à haute teneur en SO_2 (jusqu'à 30 pour cent), qui peut augmenter encore si l'on emploie de l'oxygène presque pur (85-95 pour cent). Ces gaz peuvent être dilués dans d'autres courants provenant d'autres parties de l'usine et ils se prêtent à une très bonne récupération du soufre.

4.1.5 Lutte contre la pollution pendant le convertissage des mattes

C'est la fuite de vapeurs qui, avec le SO_2 et la poussière, pose le plus de problèmes d'environnement. On peut les résoudre avec des hottes bien conçues, conduites et entretenues. La teneur des gaz en SO_2 est en moyenne de 4 à 4,8 pour cent et parfois même davantage (à condition de prendre certaines mesures : bonne fermeture des hottes et des conduites de gaz, refroidissement de l'eau des hottes et de l'évaporation). Ces basses teneurs limitent le rendement de la récupération de SO_2 à 50 pour cent environ (on obtient parfois jusqu'à 85 pour cent) dans une installation de production d'acide sulfurique.

4.1.6 Lutte contre la pollution pendant l'affinage au feu

Le four émet des gaz d'une teneur en SO_2 inférieure à 0,3 ce qui est trop peu pour l'extraction. On peut le munir de chaudières pour la récupération de la chaleur et le captage des poussières. Le gaz est ensuite rejeté dans l'atmosphère sans autre traitement vu sa faible teneur en polluants. Un captage supplémentaire de poussière peut parfois être utile.

4.1.7 Lutte contre la pollution pendant le raffinage électrolytique

L'air de ventilation de l'atelier est d'ordinaire chassé sans traitement. La teneur en métaux lourds de l'eau usée est neutralisée avec de la chaux, qui précipite les métaux sous forme de sels. On peut aussi employer des méthodes plus modernes, échange d'ions ou floculation.

4.1.8 Lutte contre la pollution dans les procédés hydrométallurgiques

En hydrométallurgie, il faut éliminer les liquides et les boues. Il y a également un risque de fuites d'acide. Alors que les boues pyrométallurgiques sont solides et inertes, celles de l'hydrométallurgie peuvent contenir des métaux non dissous, des acides et de grandes quantités d'eau. On les dépose ordinairement dans des bassins, qui doivent être étanchés.

4.1.9 Extraction de l'anhydride sulfureux des courants de gaz

L'anhydride sulfureux est présent dans tous les courants gazeux qui sortent des fours de fusion, à des teneurs qui vont de 0,1 à 95 pour cent. A l'heure actuelle, les techniques industrielles permettent d'extraire le SO_2 à condition que la teneur soit supérieure à 4 pour cent. Sa récupération et sa transformation ultérieure en SO_4H_2 permettent non seulement de résoudre les problèmes de pollution mais aussi d'améliorer le rendement économique de la production du cuivre. Il existe aussi des techniques applicables à des teneurs inférieures, mais leur coût en interdit l'utilisation industrielle. Le SO_2 peut être converti en acide sulfurique, en soufre élémentaire, en anhydride sulfureux liquide, en sulfate d'ammoniaque ou en gypse. Le tableau 4.1 indique les teneurs permettant l'épuration du courant pour chacune de ces méthodes. 34/

34/ Lemmon, W.A., "Environmental Aspects of the Extraction and Production of Nickel" Journées d'Etudes PNUE, Genève, 13-16 avril 1981.

Tableau 4.1
Propriétés des gaz nécessaires pour leur traitement
optimal dans les installations de récupération du soufre

		Pourcentage SO ₂	Pourcentage O ₂	Débit et composition
Acide de contact	- simple	5- 8	8-12	Peut être variable a/
	- double	5- 8	8-12	Peut être variable a/
SO ₂ liquide	- physique	70-80	Le plus bas possible	Constant
	- chimique	10-11 b/	0	Constant
Soufre élémentaire		10	1-3	Constant

a/ Plus économique quand il est constant.

b/ L'installation nécessite une pression ou une absorption chimique suivies d'un traitement du fort courant régénéré.

Source : Lemmon, W.A., "Environmental Aspects of the Extraction and Production of Nickel" Journées d'Etudes PNUE, Genève, 13-16 avril 1981.

Production d'acide sulfurique par contact

C'est le procédé le plus répandu de récupération de SO₂. Il consiste à mettre en contact SO₂ et oxygène en présence d'un catalyseur (le pentoxide de vanadium) pour former du SO₃ qui est ensuite transformé en SO₄H₂ par l'addition d'eau. La réaction est exothermique et l'eau peut être récupérée. Le procédé fonctionne avec des teneurs en SO₂ de 5 à 8 pour cent et des teneurs en oxygène supérieures de 30 à 50 pour cent à celles du SO₂. Le rendement de la conversion est respectivement de 97 et 99,5 pour cent pour les installations par contact simple et double. Le grave inconvénient économique de ce procédé est qu'il faut transporter l'acide jusqu'à ces marchés qui sont ordinairement éloignés du lieu de production.

Production de soufre élémentaire

Plusieurs procédés ont été mis au point (Outokompu Allied Chemical, ASARCO, Texagulf). Ils reposent tous sur une opération en deux temps qui consiste à réduire SO₂ à H₂S et ensuite à convertir par catalyse le sulfure d'hydrogène en soufre en recyclant le réactif. On ne peut traiter que des courants de SO₂ d'une teneur de 10 à 15 pour cent. Il faut que la teneur en oxygène soit plutôt basse (moins de 3 pour cent). Le rendement de la conversion est d'environ 30 pour cent. Le principal avantage de ce procédé est que le soufre est facile à transporter et à stocker.

Production d'anhydride sulfureux liquide

Ce procédé ne peut fonctionner qu'avec une concentration de SO₂ atteignant 70 à 80 pour cent et pratiquement pas d'oxygène. Le gaz émis doit être épuré. Il est comprimé et réfrigéré jusqu'à liquéfaction de SO₂. On peut aussi extraire SO₂ du courant gazeux primitif apr absorption suivie d'une régénération sous forme concentrée, pour le liquéfier ensuite.

4.2 Réaménagement d'installations existantes afin de réduire la pollution

On tient beaucoup depuis quelques années à améliorer le rendement du traitement des minerais. Pour réduire la consommation d'énergie, on a doté certaines usines de dispositifs permettant un broyage du minerai beaucoup plus fin qui améliore la récupération du métal. La commande de l'opération a été perfectionnée par l'adoption de méthodes d'analyse en cours de fonctionnement et de circuits automatisés.

Le rendement de la flotation promet d'être amélioré par la technique de flotation inversée. On fait flotter la gangue et non le minerai riche en cuivre. Ce procédé a déjà été utilisé à la mine de la société CRA à Woodlawn en Australie. 35/

En ce qui concerne les opérations de fusion, le principal problème, dans les installations anciennes, est celui de l'émission de SO₂. Bien souvent, la teneur en SO₂ des gaz émis (surtout ceux des fours à réverbère

35/ "Impact of New Technologies on the World Copper Market - A Study Prepared for UNCTAD", Commodities Research Unit Ltd. (Londres) et CRU Consultants Inc. (New York), 1986.

ou des convertisseurs) est trop faible pour permettre l'extraction. En principe, il est techniquement possible de ramener ces émissions à un très bas niveau. On peut par exemple absorber le SO₂ en faibles concentrations puis le rejeter pour obtenir un courant plus concentré. Mais en pratique cette technique n'est pas encore rentable. C'est pourquoi la plupart des fonderies anciennes continuent à rejeter du SO₂ non traité. Pour réduire au minimum le dommage causé à la vie et à l'environnement dans le voisinage de l'usine, on peut avoir une haute cheminée qui assure une bonne dispersion dans l'atmosphère. Rappelons cependant que la diffusion à longue distance du SO₂ a déjà provoqué des pluies acides en Europe et en Amérique du Nord.

Il est préférable de munir les convertisseurs anciens de dispositifs de soufflage d'air enrichi d'oxygène. On obtient ainsi un meilleur rendement énergétique ce qui signifie qu'on produit moins de gaz et que le SO₂ est plus concentré. On en trouve un exemple dans le "convertisseur modifié Teniente" mis au point par Codelco pour la fusion des concentrés de minerai de El Teniente (Chili). Il s'agit là d'une modification de la configuration fondamentale de la fonderie existante qui a comporté la pose de brûleurs de combustible enrichi d'oxygène. Elle a permis de produire 600 tonnes de plus de cuivre par jour sans augmentation de la consommation de combustible en une seule opération de fusion et de convertissage. Les convertisseurs à sortie latérale des gaz peuvent présenter les avantages. Ces systèmes assurent un meilleur rendement en cuivre et en SO₂ moyennant un investissement limité dans la modernisation.

Le réaménagement est possible en hydrométallurgie grâce à l'adoption de nouveaux solvants. Après lixiviation du minerai à l'acide sulfurique, on met le courant en contact avec une solution organique pour récupérer le cuivre. Le réactif le plus souvent utilisé à cet effet est le LIX 64 de General Mills (échange d'ions liquides). Ce solvant (dont la composition est brevetée) réagit sélectivement au cuivre. Plus récemment, la mise au point d'une deuxième génération de solvants tels que le LIX 860 a permis aux usines existantes de réduire leurs frais d'exploitation et d'améliorer le rendement. Les réactifs les plus récents ne sont pas trop sensibles aux variations du pH et peuvent en conséquence fonctionner avec des charges plus fortes au moyen de solutions cuivreuses plus acides.

4.3 Coût de la lutte contre la pollution

Pour un four à réverbère moderne (d'une capacité de 1 500 tonnes/jour) les frais de fusion peuvent être estimés à 97,8 cents par kilo de cuivre produit 36/. Ce montant ne comprend pas l'action contre l'émission de SO₂ et les frais de captage des particules. D'autre part les frais de fusion pour un four "flash" nouveau ne sont que de

36/ "Compendium of Low- and Non-Waste Technology", Copper Production Using the Noranda Process, Conseil économique et social des Nations Unies, 1 mai 1984.

61 cents par kilo 37/, compte tenu de ce que coûte l'observation des normes en vigueur sur les rejets dans l'air.

Le tableau 4.2 38/ donne une estimation des frais pour différentes méthodes d'extraction de SO₂ des gaz émis dans les cas où elle est possible (c'est-à-dire lorsque la teneur en SO₂ est suffisamment forte). Le tableau ne donne que des ordres de grandeur et ne comprend pas les frais d'épuration des gaz chauds qui pourraient entraîner une augmentation atteignant 30 %. Aucune modification ni adaptation de l'installation existante n'est envisagée.

37/ "Ibid.", Copper Production Primary Using the Outokumpu Flash Furnace, Conseil économique et social des Nations Unies, 1 mai 1984.

38/ "Background Information for New Source Performance Standards : Primary Copper, Zinc and Lead Smelters", EPA-450/2-74-002a.

Tableau 4.2
Coût de la fixation du soufre par livre de cuivre produite */

	Installation acide à catalyse unique				Double catalyse			
	Gaz continus seulement		Gaz variables seulement		Gaz continus et variables		Gaz continus et variables	
Fixation de soufre pourcentage	50	45	95	97				
Coût de production \$ E.U./tonne de soufre	59	92	54	58				
Coût de neutralisation \$ E.U./tonne de soufre	92	92	86	86				
Rapport soufre/métal dans le concentré	Bas	Elevé	Bas	Elevé	Bas	Elevé	Bas	Elevé
Coût de fixation du soufre cents/livre Cu	1,07	2,14	1,50	3,01	1,86	3,73	2,05	4,10
Neutralisation (coût total de fabrication et de neutralisation de l'acide) cents/livre Cu	2,75	5,50	3,02	6,03	4,67	9,64	5,07	10,14

(Canada - 1979)

*/ Frais d'épuration du gaz non compris

Source : Lemmon, W.A., "Environmental Aspects of the Extraction and Production of Nickel" Journées d'étude PNUE, Genève, 13-16 avril 1981.

En ce qui concerne les frais de techniques et rendements divers d'élimination des poussières, on en trouvera une idée au tableau 4.3. ^{39/} Les chiffres datent de 1972.

^{39/} Stone, E.H.F., "Fume and Effluent Treatment in the Non-Ferrous Metals Industry", Institute of Metals, Review 169, 1972.

Tableau 4.3

Rendement et coût du matériel de dépoussiérage pour un million de mètres cubes de gaz par heure, à 20°C

Matériel	Rendement, poussière normale (%)	Frais totaux de fonctionnement (Livres sterling par an)	Coût total y compris rémunération du capital (livres sterling par an)
Collecteur par inertie	58,6	587	1 313
Cyclone à rendement moyen	65,3	1 233	1 693
Cyclone cellulaire à basse résistance	74,2	480	1 380
Cyclone à grand rendement	84,2	1 547	2 567
Cyclone tubulaire	93,8	1 360	2 467
Précipitateur électrostatique	99,0	933	5 867
Filtre en tissu à secousses	99,7	3 380	6 847
Filtre en tissu à faible vitesse	99,8	3 127	6 327
Filtre en tissu à jet inversé	99,8	6 640	11 507
Epurateur à jet heurté	97,9	2 807	4 807
Cyclone irrigué	91,0	1 900	3 153
Dépoussiéreur arroseur automatique	93,6	2 093	3 493
Tour d'arrosage	94,5	4 000	6 933
Epurateur à lit fluidisé	95,0	3 067	4 180
Epurateur à objectif irrigué	97,9	2 513	4 247
Désintégrateur	98,5	15 840	18 707
Précipitateur électrostatique irrigué	99,0	1 320	7 653
Epurateur à basse énergie à gorge annulaire	99,5	4 933	7 067
Epurateur Venturi à énergie moyenne	99,7	7 293	9 560
Epurateur à gorge annulaire à énergie moyenne	99,8	7 466	9 733
Epurateur Venturi à haute énergie	99,9	10 933	13 400

Source : E.H.F. Stone, op. cit.

4.4 Normes d'émission

D'après la Banque mondiale, les émissions de gaz doivent être maintenues au-dessous des niveaux ci-après :

Tableau 4.4
Directives de la Banque mondiale concernant les
émissions de gaz

<u>Anhydride sulfureux (SO₂)</u>		
A l'intérieur de la clôture de l'usine	Moyenne arithmétique annuelle	100 g/m ³
	Pointe maximale en 24 heures	1 000 g/m ³
A l'extérieur de la clôture de l'usine	Moyenne arithmétique annuelle	100 g/m ³
	Pointe maximale en 24 heures	500 g/m ³
<u>Particules</u>		
	Moyenne géométrique annuelle	75 g/m ³
	Pointe maximale en 24 heures	260 g/m ³
<u>Oxydes d'azote (en NO₂)</u>		
	Moyenne arithmétique annuelle	100 g/m ³
<u>Oxyde de carbone (CO)</u>		
	Moyenne maximale de 8 heures	10 mg/m ³
	Moyenne maximale d'une heure	40 mg/m ³

Source : Environmental Guidelines, Office of Environmental Affairs, Banque mondiale, juillet 1984.

Les normes concernant les gaz émis par les usines de production de cuivre au Royaume-Uni sont les suivantes : le total des particules ne doit pas dépasser 0,46 g/m³ pour des émissions allant jusqu'à 700 m³/minute, cette limite étant abaissée à 0,23 g/m³ pour des émissions supérieures. Le cuivre et le zinc ne doivent pas dépasser 0,115 g/m³. D'autres normes sont fixées pour le cadmium et le plomb, selon l'importance de l'installation. Pour les grandes émissions les limites sont 0,012 g/m³ et 0,7 kg/heure pour le cadmium et 0,012 g/m³ et 5,4 kg/h pour le cuivre. La cheminée doit avoir au moins 30 mètres. 40/

En ce qui concerne les effluents liquides, les normes diffèrent selon les installations.

40/ Butler, D.H., "Copper, Environmental Impact in Its Processing, Use and disposal" PNUE, Programme Industrie et environnement, Paris 1 septembre 1982.

Tableau 4.5
Normes concernant les effluents liquides

Pour les fonderies primaires de cuivre, les limites sont les suivantes :
(en mg par litre d'effluent)

	<u>Maximum en 24 heures</u>	<u>Moyenne de 30 jours consécutifs</u>
TSS	50	25
As	20	10
Cu	0,5	0,25
Pb	1,0	0,5
Cd	1,0	0,5
Se	10	5
Zn	10	5
pH	6 - 9 unités	6 - 9 unités

Pour les raffineries électrolytiques de cuivre, les limites sont les suivantes (en kilos par tonne métrique de produit) :

	<u>Maximum en 24 heures</u>	<u>Moyenne de 30 jours consécutifs</u>
TSS	0,10	0,05
Cu	$1,7 \times 10^{-3}$	$0,8 \times 10^{-3}$
Cd	6×10^{-5}	3×10^{-5}
Pb	6×10^{-4}	$2,6 \times 10^{-4}$
Zn	$1,2 \times 10^{-3}$	$0,3 \times 10^{-3}$

Pour les raffineries secondaires de cuivre, les limites sont les suivantes :

(en mg par litre d'effluent)

	<u>Maximum en 24 heures</u>	<u>Moyenne de 30 jours consécutifs</u>
TSS	50	25
Cu	0,5	0,5
Zn	10	5
Huile et graisse	20	10
pH	6 - 9 unités	6 - 9 unités

Source : Environmental Guidelines, Office of Environmental Affairs, Banque mondiale, juillet 1984.

4.5 Protection de la santé du personnel

Le cuivre est un métal assez peu toxique, ce qui paraît confirmer la rareté des publications concernant les effets nocifs subis par ceux qui y sont exposés 41/, 42/. Le tableau 4.6 donne quelques valeurs limites d'exposition professionnelle à du cuivre présent dans l'atmosphère, recommandées dans quelques pays. 43/

41/ "Copper, Medical and Biological Effects of Environmental Pollutants", The National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, D.C. 1977.

42/ Demayo, A., M.C. Taylor and K.W. Taylor, "Effects of Copper on Humans, Laboratory and Farm Animals, Terrestrial Plants and Aquatic Life", août 1982.

43/ Nordman, H., UNEP Workshop on the Environmental Aspects of Non-Ferrous Metal Industries, Programme OMS/NU sur l'environnement.

Tableau 4.6
Limites d'exposition professionnelle à des substances
toxiques présentes dans l'atmosphère

	Rép. féd. d'Alle- magne	ETATS-UNIS					
		JAPON	SUEDE	URSS	Norme prof.	ACGIH	
						TWA	Court terme
Poussières de cuivre mg/m ³	1	1	1	1	1	2	
Vapeurs de cuivre mg/m ³	0,1			0,1	0,2	0,2	

Source : OIT, Série Sécurité et hygiène du travail, n° 37, Genève 1977.

Le cuivre fond et bout à des températures relativement élevées. C'est pourquoi il n'émet pas de vapeurs métalliques aussi librement que d'autres métaux tels que le plomb, le cadmium ou le zinc. De plus, les poussières et les vapeurs de cuivre ont une odeur caractéristique qui alerte le personnel, ce qui limite l'exposition avant qu'une ingestion toxique puisse avoir lieu. La santé du personnel peut toutefois subir des effets fâcheux lorsque certaines teneurs limites sont dépassées. Dans des cas extrêmes, la fièvre des vapeurs métalliques, affection qui dure de 24 à 48 heures, peut se déclarer. On a également signalé des cas de dermatite par contact 44/ mais des observations faites sur le personnel de fonderies et de raffineries de cuivre pendant plus de 25 ans n'ont révélé aucune incidence tant soit peu importante de dermatite. Les opérations de fonderie du cuivre occasionneront probablement des vapeurs plus nocives de plomb, de cadmium, d'antimoine, de sélénium, de béryllium et surtout d'arsenic. Tous les auteurs qui ont signalé une incidence accrue de cancer du poumon chez le personnel des fonderies de cuivre ont incriminé le trioxyde d'arsenic en poussières et en vapeurs 45/, 46/, 47/, 48/.

44/ Saltzer, E.I. and J.W. Wilson, "Allergic Contact Dermatitis Due to Copper", Arch. Derm. 98 : 375-376, 1968.

45/ Kuratsune, M., S. Tokudome, T. Shirakusa, M. Yoshida, Y. Tokumitsu, T. Hayano and M. Seita, "Occupational Lung Cancer among Copper Smelters", Int. J. Cancer 13 : 552-558, 1974.

46/ Lee, A.M. and J.F. Fraumeni Jr. "Arsenic and Respiratory Cancer in Man : an Occupational Study", J. Nat. Cancer Inst. 42 : 1045-1052, 1969.

47/ Milham, S. Jr. and T. Strong, "Human Arsenic Exposure in Relation to a Copper Smelter", Environm. Res. 7 : 176-182, 1974.

48/ Tokudome, S. and M. Kuratsune, "Cohort Study on Mortality from Cancer and other Causes among Workers at a Metal Refinery", Int. J. Cancer 17 : 310-317, 1976.

Le SO₂ peut être considéré comme un élément chimique susceptible de nuire à l'environnement du travail. Ses effets nocifs sur la santé humaine se manifestent à des teneurs ne dépassant pas 0,5 mg/m³ alors que son odeur ne peut être détectée qu'à 2,6-3 mg/m³. Des effets irritants sensibles se manifestent à 20/mg/m³. D'autres éléments chimiques et substances, telles que l'humidité et la poussière paraissent avoir un effet synergique en combinaison avec SO₂.

5. PLOMB

5.1 Technique de lutte contre la pollution pour les usines à plomb

5.1.1 Lutte contre la pollution pendant l'extraction

Les mines souterraines sont toujours équipées d'un système de ventilation qui doit pouvoir apporter de l'air frais de l'extérieur et en même temps diluer suffisamment l'air vicié par des poussières et des vapeurs dues aux opérations d'extraction. On peut limiter la formation de poussière en arrosant d'eau la roche ou le minerai avant chaque opération. Les eaux usées de la mine peuvent être traitées dans une installation spéciale afin d'enlever au moins les solides en suspension et de la recycler en partie. Dans les régions arides, la rareté de l'eau peut aggraver le problème et une bonne gestion méthodique de l'eau s'impose. On en trouve un exemple dans les mines de la société Mount Isa en Australie. Elles sont équipées d'un système complexe de collecte, de pompage et de distribution d'eau qui alimente tous les points de demande. 49/ Le problème inverse se pose dans les mines où la roche contient de l'eau qu'il faut enlever par pompage. Cette eau est souvent acide et contaminée par des sels métalliques dissous. Il faut donc la traiter. Le traitement consiste alors en un ajustement du pH par la chaux qui précipite les métaux lourds. L'addition de coagulants donne une boue qui est ensuite recueillie dans les épaisseurs, pour être pompée puis stockée en bassins 50/.

5.1.2 Lutte contre la pollution pendant le traitement du minerai

La pollution de l'air pendant les opérations de moussage est d'ordinaire négligeable. Toutes les autres opérations comportant une manipulation de matières solides peuvent causer des poussières. Les solides pulvérulents peuvent être stockés dans des locaux fermés ou protégés afin d'éviter la dispersion par le vent. Pour la même raison, il y a lieu de couvrir les concentrés de minerai pendant leur transport par camions ou par péniches. On a constaté de fortes teneurs de poussière de minerai dans l'air (jusqu'à 100 m de hauteur) le long des routes à forte circulation de camions chargés 51/. Pour atténuer la difficulté, on peut expédier à la fonderie un minerai contenant 10 à 12 pour cent d'humidité. 52/

49/ "Operations at Mount Isa", Mount Isa Mines Limited, Australia, 1977.

50/ "Processes, Procedures, and Methods to Control Pollution from Mining Activities", United States Environmental Protection Agency, EPA 430/9-73-011, Washington, D.C., octobre 1973.

51/ Hemphill D.D., "Lead Contamination along Roadways", dans Lead in the Environment, Boggess, W.R. and Wixon, B.G. (ed.), Natl. Sci. Foundation, NSF/RA-770214, Washington, D.C., 150, 1977.

52/ Environmental Impacts and Controls in the Extraction and Production of Lead, Zinc and Cadmium", Journées d'études PNUE, Genève 13-16 avril 1981.

La pollution peut poser de graves problèmes dus à la présence d'agents de flottation et de résidus. Il faut recycler chaque fois que c'est possible. Dans nombre de mines, l'eau usée sert à des opérations ultérieures telles que broyage et flottation. Il y a trois façons de se débarrasser des boues contenant des résidus : sous terre, dans des bassins ou en mer. Le stockage souterrain a été adopté par de nombreuses sociétés. Il consiste à refouler par pompage les boues dans les espaces laissés libres par les opérations d'extraction, quelquefois en y ajoutant du ciment. C'est la méthode qui a le moins d'impact sur l'environnement.

Le stockage en bassins risque d'avoir des effets sur l'environnement si l'eau contaminée s'infiltré dans le sol. Dans la pratique, ce risque d'infiltration d'eau acide dans le sol a fait que l'industrie du plomb et du zinc a été classée aux Etats-Unis immédiatement après celle de l'uranium dans l'ordre de gravité du danger toxique occasionné par les déchets stockés en terre ferme. 53/, 54/ Une fois l'eau évaporée, les résidus peuvent être exposés à l'action du vent qui disperse des poussières. Il faut donc stabiliser le terrain avec de la végétation. Dans certains cas, par exemple dans les régions arides, où cette solution serait impossible, on a recouvert de pierres les résidus séchés. Ce système a été employé avec de bons résultats en Australie.

Le rejet des résidus en mer est peu pratiqué. La mine Greenex Black Angel, au Groënland, en offre un exemple. Les résidus sont stabilisés avec de la chaux et ensuite rejetés dans un fjord voisin. 55/

5.1.3 Lutte contre la pollution pendant la fusion des concentrés pendant la préparation des charges

L'échappement des poussières peut présenter de graves dangers en raison de leur forte teneur en plomb. On peut y parer en mouillant les charges ou en montant des dispositifs efficaces de captation. La teneur en humidité de la charge ne doit jamais tomber au-dessous de 8 pour cent. Les émissions captées peuvent être traitées dans un épurateur humide afin de récupérer la poussière qui peut ensuite être recyclée.

Pendant le grillage et le frittage

Les principaux problèmes que soulève cette opération sont dus aux émissions de SO₂ et de poussières. La plupart des machines à fritter à tirage ascendant peuvent produire des gaz contenant au moins 4 pour cent de SO₂ convertibles en SnO₂ dans une installation à l'acide (voir les détails au chapitre sur le cuivre). On obtient cette teneur en recyclant dans la machine les gaz plus pauvres en SO₂ jusqu'à ce que la concentration voulue soit atteinte.

53/ "The Health and Environment Impacts of Lead on an Assessment of a Need for Limitations", Office of Toxic Substances, U.S. Environmental Protection Agency EPA-560/2-79-001, Washington, D.C. avril 1979.

54/ "Environmental Impacts and Controls in the Extraction and Production of Lead, Zinc and Cadmium", Journées d'études PNUE, Genève 13-16 avril 1981.

55/ Greenland Fisheries Investigations, Recipient andersogeke ued Marmorilik, 1980, 1979, 1978, 1977, 1976, Ostervaldgade 10, 1350 Copenhagen, K, (Danemark) (En danois avec résumé en anglais et en groënlandais).

La teneur en SO₂ des gaz émis par les machines à tirage descendant est trop faible pour en permettre l'extraction, et c'est pourquoi ils sont évacués après refroidissement et passage par sacs filtrants, précipitateurs électrostatiques ou épurateurs humides pour capter les poussières. Le refroidissement condense les métaux lourds, sans quoi leur condensation pourrait avoir lieu dans la cheminée ou dans le panache ce qui entraînerait des retombées et une pollution de l'environnement. L'emploi d'épurateurs humides entraîne une contamination des eaux usées par les métaux lourds et il faut les traiter avant évacuation, par exemple en ajoutant de la chaux afin de précipiter les métaux lourds. Le tableau 5.1 donne la teneur de principaux polluants des eaux usées qui sortent d'une fonderie. 56/

Tableau 5.1
Teneurs en polluants des eaux usées d'une fonderie de plomb

Polluant	Nombre		Teneur mg/litre		
	d'analyses	de constatations	Gamme	Médiane	Moyenne
COD	3	2	ND* - 170	3,7	58
TOC	1	1		3,3	3,3
TSS	1	1		26	26
Phénol total	2	2	0,012 - 0,050		0,031
Ammoniac	2	2	0,43 - 3,8		2,1

* / Non détectable

Source : EPA Treatability Manual, Vol.II, Industrial Descriptions, Agence de la protection de l'environnement des Etats-Unis, juillet 1980.

Pendant la réduction en haut fourneau

On fait d'ordinaire passer les gaz du four par une chaudière afin de récupérer la chaleur excédentaire. Quelques métaux peuvent se condenser pendant cette phase et être récupérés. On peut ensuite extraire les poussières des gaz en les faisant passer par des sacs filtrants, et recycler la poussière captée. Le soufre contenu dans les matières apportées au fourneau entre lui aussi dans le courant gazeux sous forme de SO₂ mais en teneur trop faible pour permettre

56/ EPA Treatability Manual, Vol II, Industrial Descriptions, Agence de la protection de l'environnement des Etats-Unis, juillet 1980.

l'extraction. C'est pourquoi les gaz sont dilués dans de l'air frais qui sert aussi à l'aération avant dépoussiérage et envoi à la cheminée. Dix pour cent environ du total des émissions possibles de SO₂ proviennent de cette source.

Les scories résultant de cette opération et du frittage sont d'ordinaire apportées à une décharge terrestre.

5.1.4 Lutte contre la pollution pendant le raffinage du plomb argentifère

Les opérations de raffinage s'effectuent d'habitude à des températures relativement basses. Le seul risque pour l'environnement provient des éventuelles émissions de vapeurs. Elles contiennent du plomb et, dans certains cas des métaux tels que le bismuth, du cadmium, du thallium et de l'arsenic qui sont les principaux polluants. On procède d'ordinaire à une abondante aération et l'air passe par des sacs filtrants avant d'être jeté.

Dans le raffinage électrolytique du plomb le principal risque vient des émanations de trioxyde d'arsenic qui se dégagent des cuves. Il faut donc procéder à un refroidissement afin de condenser le trioxyde d'arsenic avant d'envoyer les gaz aux sacs filtrants.

5.2 Réaménagement des installations existantes afin de réduire la pollution

Les principaux risques que la production du plomb fait courir à l'environnement proviennent des émissions de SO₂ et de poussières. On peut et on a pu réussir à les réduire dans les installations existantes. La première chose à faire pour extraire SO₂ des effluents gazeux consiste à modifier la technique de grillage des concentrés de minerais en remplaçant les machines à fritter à tirage descendant par des machines à tirage ascendant. On obtient alors des effluents gazeux qui se prêtent à l'extraction de SO₂. Dans les usines situées dans des régions écartées (où le transport de l'acide sulfurique coûterait trop cher) on peut délibérément produire des gaz très pauvres en SO₂ qu'on peut alors disperser au moyen d'une haute cheminée. On sait cependant que ce genre de fonderies de plomb pollue le voisinage. Dans un cas par exemple, l'air a été pollué jusqu'à cinq kilomètres de la fonderie et le sol dans un rayon de plus de 10 kilomètres. 57/, 58/ De même, aux mines et fonderies de Mezica (Yougoslavie) la pollution de l'air et du sol a été constatée dans un rayon de dix et de sept kilomètres respectivement. 59/, 60/

57/ "Lead", Critères d'hygiène de l'environnement 3, OMS, Genève 1977.

58/ Landrigan, P.J., S.H. Gelbach, B.F. Rosenblum, J.M. Shoults, R.M. Candelaria, W.F. Barthel, J.A. Liddle, A.L. Smrek, N.W. Staehling and J.F. Sanders (1975b) "Epidemic Lead Adsorption Near an Ore Smelter; The Role of Particulate Lead" New Engl. J.Med., 292 : 123-129.

59/ Djuric, D., Z. Kerin, L. Graovac-Leposavic, L. Novak and M. Kop, Environmental Contamination by Lead from a Mine and Smelter; A Preliminary Report. Arch. Environ. Health, 23 : 275-279, 1971.

60/ Kerin, Z., Lead in New-Fallen Snow near a Lead Smelter, Arch. Environ. Health, 26 : 256-260, 1973.

L'Agence de la protection de l'environnement des Etats-Unis a examiné en 1974 les six principales usines de production de plomb du pays. Elle a estimé qu'il en coûterait 51 millions de dollars de les rendre conformes aux normes fédérales de protection (bien que trois d'entre elles fussent déjà munies d'installations à l'acide). 61/ Cela montre que même en pareil cas, la lutte contre la pollution est possible si l'on y consacre des ressources suffisantes.

En ce qui concerne les rejets de particules, il est relativement facile d'équiper les usines existantes de sacs filtrants ou d'autres dispositifs de captage de poussières capables d'extraire des effluents gazeux près de 100 pour cent des poussières et des vapeurs.

5.3 Coût de la lutte contre la pollution

L'Agence de la protection de l'environnement des Etats-Unis a fait en 1974 une estimation de ce que coûterait aux fonderies de plomb primaires l'observation de normes environnementales strictes. 62/ Cette estimation a envisagé l'émission des poussières et de SO₂ et le coût d'installation, à l'acide. Le tableau 5.2 donne les résultats de ces investigations pour certaines usines prises pour modèle. 63/

61/ The Cost of Clean Air, United States Environmental Protection Agency 1974.

62/ The Cost of Clean Air, Environmental Protection Agency, 1974.

63/ Atkins, M.H. and J.F. Lowe, The Economics of Pollution Control in the Non-Ferrous Metal Industry, Pergamon Press, 1979.

Tableau 5.2
Coût de l'antipollution pour certaines usines à plomb
primaires des Etats-Unis

Capacité type (tonnes)	Investis- sment prévu (Mil- lions de \$)			Coût annuel prévu (mil- lions de \$)			Coût prévu par tonne de capacité annuelle		
	mini	maxi		mini	maxi		Mini	maxi	
107 000	8,9	4,3	12,5	2,1	1,0	3,0	17,8	8,8	26,3
131 000	9,9	5,1	13,8	2,5	1,2	3,4	17,4	8,3	23,6

Source : Atkins, M.H. and J.F. Lowe, The Economics of Pollution Control in the Non-Ferrous Metal Industry, Pergamon Press, 1979.

On estime que les coûts sont très inférieurs pour les fonderies secondaires parce que ces usines sont beaucoup plus favorablement situées du point de vue de l'environnement. Le tableau 5.3 donne les chiffres correspondants.

Tableau 5.3
Coûts de l'antipollution pour certaines usines à plomb secondaires

Modèle t/jour	Investis- sment 1 000 \$ prévu			Coût annuel prévu (1000 \$)			Coût unitaire prévu 1 000 \$ tonne/ jour		
	mini	maxi		mini	maxi		mini	maxi	
109	305	171	434	68,9	26,3	108,1	0,63	0,24	0,99
54	148	79	218	34,3	11,3	54,4	0,64	0,21	0,99
15,8	59	37	82	15,3	9,3	21,7	0,97	0,59	1,31

Source : Atkins, M.H. and J.F. Lowe, The Economics of Pollution Control in the Non-Ferrous Metal Industry, Pergamon Press, 1979.

Dans une étude faite pour la Lead Industry Association, Charles River Associates et la Research Corporation of New England ont estimé l'impact sur l'industrie du plomb des nouvelles normes de qualité de l'air prescrites par l'EPA en 1978. 64/ L'observation de la norme de 1,5 microg/m³ (moyenne de 90 jours) proposée par l'EPA pour la teneur en plomb de l'air a été jugée économiquement catastrophique.

64/ "Lead-Zinc-Tin '80", Colloque mondial TMS-AIME sur la métallurgie et l'environnement, J. Cole : United States Environmental Laws and Regulations as Applied to the Lead and Zinc Industries, AIME, New York, 1979.

Tableau 5.4
Impact prévu de l'observation de la norme EPA de teneur en
plomb de l'air ambiant

Secteur industriel	Coûts (\$EU)		Fermetures d'usines
	En capital	Annuels	
Fonderie primaire	190 millions	35 millions	Toutes les sept
Fonderie secondaire	285 millions	60 millions	40 sur 50 (90 pour cent de perte de capacité)

Source : "Lead-Zinc-Tin '80", Colloque mondial TMS-AIME sur la métallurgie et l'environnement, J. Cole : United States Environmental Laws and Regulations as Applied to the Lead and Zinc Industries, AIME, New York, 1979.

5.4 Normes d'émission

Les directives de la Banque mondiale concernant la teneur en polluants des effluents gazeux des fonderies de plomb sont les suivantes. 65/

Tableau 5.5
Limites envisagées pour les usines à plomb

Anhydride sulfureux

A l'intérieur de la clôture de l'usine	Moyenne arithmétique annuelle	100 micro/m ³
	Pointe maximale en 24 heures	1 000 micro/m ³
A l'extérieur de la clôture de l'usine	Moyenne arithmétique annuelle	100 micro/m ³
	Pointe maximale en 24 heures	500 micro/m ³

Particules

Moyenne géométrique annuelle	75 micro/m ³
Pointe maximale en 24 heures	260 micro/m ³

Arsenic (en As)

A l'intérieur de la clôture de l'usine	Moyenne en 24 heures	0,006 mg/m ³
A l'extérieur de la clôture de l'usine	Moyenne en 24 heures	0,003 mg/m ³

Cadmium (en Cd)

A l'intérieur de la clôture de l'usine	Moyenne en 24 heures	0,006 mg/m ³
A l'extérieur de la clôture de l'usine	Moyenne en 24 heures	0,003 mg/m ³

Plomb (en Pb)

A l'intérieur de la clôture de l'usine	Moyenne en 24 heures	0,008 mg/m ³
A l'extérieur de la clôture de l'usine	Moyenne en 24 heures	0,004 mg/m ³

Source : Environmental Guidelines, Office of Environmental Affaires, Banque mondiale, juillet 1984.

Au Royaume-Uni, les limites imposées dépendant de la taille de l'usine et par conséquent de la quantité de gaz émis. Il y a

65/ Environmental Guidelines, Office of Environmental Affaires, Banque mondiale, juillet 1984.

trois classes. Le tableau 5.6 donne les limites correspondantes. 66/

Tableau 5.6
Limites de la pollution de l'air pour les usines à plomb
(Royaume-Uni)

Catégorie d'usine	Volume de gaz		Concentration dans chaque cheminée */		Emission totale*/	
	Pieds cube/ minute	m ³ /minute	grains/ pieds cube	g/m ³	lbs/heure	kg/heure
Classe I	>7 000	200	0,05	0,115	0,6	0,27
Classe II	7 000-140 000	200-4 000	0,01	0,023	6,0	2,7
Classe III	>140 000	4 000	0,005	0,0115	12,0	5,4

*/ Mesuré en plomb élémentaire.

Source : "Lead-Zinc-Tin '80", Colloque mondial TMS-AIME sur la métallurgie et l'environnement., A. Barbour : European Economic Community Laws and Regulations as Applied to the Lead and Zinc Industries, AIME, New York, 1979.

66/ "Lead-Tin-Zinc '80", Colloque mondial TMS-AIME sur la métallurgie et l'environnement, A. Barbour : European Community Laws and Regulations as Applied to the Lead and Zinc Industries, AIME, New York, 1979.

Les directives de la Banque mondiale concernant la teneur en polluants des effluents liquides des fonderies de zinc primaires sont les suivantes : 67/

Tableau 5.7
Directives concernant les polluants admissibles de l'eau émise par une fonderie de plomb primaire (en kg par tonne de produit)

	Maximum en 24 heures	Moyenne de 30 jours consécutifs
TSS	$4,2 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$
Cd	$8,0 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$
Pb	$8,0 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$
Zn	$8,0 \times 10^{-3}$	$4,0 \times 10^{-3}$
pH	6-9 unités	6-9 unités

Source : Environmental Guidelines, Office of Environmental Affairs, Banque mondiale, juillet 1984.

Pour les fonderies de plomb secondaires, les chiffres sont les suivants :

Tableau 5.8
Directives concernant les polluants admissibles de l'eau émise par une fonderie de plomb secondaire (kg/tonne de produit)

	Maximum en 24 heures	Moyenne de 30 jours consécutifs
TSS	5×10^{-2}	$2,5 \times 10^{-2}$
Cd	4×10^{-5}	$2,0 \times 10^{-5}$
Pb	1×10^{-3}	$0,5 \times 10^{-3}$
As	1×10^{-4}	$0,5 \times 10^{-4}$
pH	6-9 unités	6-9 unités

Source : Environmental Guidelines, Office of Environmental Affairs, Banque mondiale, juillet 1984.

67/ Environmental Guidelines, Office of Environmental Affairs, Banque mondiale, juillet 1984.

5.5 Protection de la santé du personnel

On sait que le plomb provoque un empoisonnement aigu et durable, notamment chez les travailleurs de son industrie. Ce sont les opérations de fusion et de raffinage qui comportent le plus de risques d'exposition. Depuis quelques années, l'empoisonnement par le plomb a sensiblement reculé parmi le personnel en raison de l'adoption de procédés de manutention moins dangereux, de l'amélioration de la protection du personnel au poste de travail et de l'automatisation qui rend la présence du personnel moins nécessaire pendant certaines phases de la production.

L'empoisonnement se produit par inhalation, ingestion ou absorption à travers la peau. En moyenne, 30 + 10 pour cent du plomb inhalé sont absorbés par l'organisme. 5 à 10 pour cent du plomb ingéré sont eux aussi absorbés. 68/ Le plomb ainsi introduit dans le métabolisme peut entraîner des effets à long terme car on admet généralement que la période biologique du plomb dépasse dix ans. 69/ Le plomb agit spécialement sur le système nerveux. Les effets sur la santé sont en rapport avec la teneur en plomb du sang. Le niveau de non-détection de l'effet en neuropathie subclinique est actuellement de 40-50 microg/100 ml. On constate des disfonctions du cerveau à partir de la teneur de 60-70 microg/ml. Les indications ci-après peuvent être utiles pour l'évaluation des effets sur la santé : si l'on admet que la teneur en plomb du cerveau donne la mesure de l'absorption du plomb, l'exposition continue à un microg/m³ de plomb dans l'air donne des niveaux de plomb d'environ 1-2 microg/100 ml de sang. 70/ C'est pourquoi la plupart des pays prescrivent des limites assez basses à l'exposition professionnelle au plomb contenu dans l'air. Le tableau 5.9 donne quelques-unes de ces valeurs : 71/

68/ "Environmental Health Aspects of Non-Ferrous Metals : Cadmium, Copper, Lead, Nickel and Zinc". Journées d'étude PNUE sur les industries des métaux non ferreux et environnement, OMS, Programme des Nations Unies pour l'environnement.

69/ "Plomb", Critères d'hygiène de l'environnement, 3, OMS, Genève 1977.

70/ "Plomb" Résumé, Ibid. OMS Genève 1983.

71/ "Environmental Health Aspects of Non-Ferrous Metals : Cadmium, Copper, Lead, Nickel and Zinc". Journées d'étude PNUE sur les industries des métaux non ferreux et l'environnement, OMS, Programme des Nations Unies pour l'environnement.

Tableau 5.9
Limites de l'exposition professionnelle aux
sustances toxiques présentes dans l'air

	Rép. féd. d'Alle- magne	ETATS-UNIS					
		Japon	Suède	URSS	Norme profes- sionnelle	TWA	ACGIH Court terme
Plomb et composés inorga- niques mg/m ³	0,2	0,15	0,1	0,01	0,2	0,15	0,45

Source : OIT, Série Sécurité et hygiène du travail, n° 37, Genève 1977.

Le personnel peut néanmoins courir des risques très graves. On a par exemple, mesuré la teneur en plomb de l'air lors de diverses opérations dans une fonderie caractéristique de Salt Lake City dans l'Utah (Etats-Unis). Le tableau 5.10 ^{72/} donne ces valeurs qui montrent nettement la présence de très fortes teneurs présentant des risques pour la santé du personnel qui devait d'ailleurs porter des masques.

^{72/} "Plomb", Critères d'hygiène de l'environnement 3, OMS, Genève, 1977.

Tableau 5.10
Teneur en plomb de l'air dans trois fonderies de
plomb primaires (microg/m³) a/

Fon- derie	Année	Empla- cement b/	Moyennes c/	Moyenne des moyennes	Gamme (toutes valeurs)
A	1972-75	(1)	610, 1 930, 2 860	1 800	250- 3 670
		(2)	970, 470, 450	630	250- 1 380
		(3)	860, 950, 320	710	200- 1 700
		(4)	1 220, 350, 950	840	260- 1 640
B	1973-74	(1)	1 310, 2 330, 4 720	2 790	370- 5 160
		(2)	2 740, 3 460, 770	2 320	310- 7 570
		(3)	860, 140, 530	510	120- 1 560
		(4)	1 270 540 5 730, 4 050	2 900	60- 7 220
C	1973-74	(1)	--	--	--
		(2)	3 850, 8 740, 830	4 470	10-31 200
		(3)	1 320, 230	780	90- 1 340
		(4)	80	80	

a/ Chiffres communiqués par M. Varner, American Smelting and Refining Co. Salt Lake City, Utah (Etats-Unis).

b/ Emplacements : 1) Dosage du minerai; 2) mise en nodules et frittage, 3) four; 4) enlèvement des impuretés et réverbération.

c/ Déterminées par observation du personnel en plusieurs fois. Chaque période d'échantillonnage a duré de 5 à 7 heures.

Source : "Plomb", critères d'hygiène de l'environnement 3, OMS, Genève, 1977.

On ne possède pas de données similaires pour les fonderies secondaires mais quelques études paraissent indiquer que le personnel y est exposé à de fortes teneurs en plomb de l'air qui entraînent une augmentation de la teneur en plomb du sang.

6. ZINC

6.1 Techniques de lutte contre la pollution dans les usines à zinc

6.1.1 Lutte contre la pollution pendant l'extraction

Le principal problème est alors celui du traitement et de l'évacuation des eaux. Elles sont boueuses et contaminées par des particules d'une densité et d'une qualité très variables. Comme elles sont ordinairement acides, on peut en augmenter le pH en ajoutant de la chaux. Cela présente un avantage particulier lorsque l'eau doit être recyclée vers le dispositif de traitement du minerai car la flottation des minerais de zinc et de plomb-zinc s'effectue d'ordinaire à des valeurs de pH élevées (de 8,5 à 11). En ce cas, il faut toutefois au préalable enlever les solides en suspension. L'eau impossible à recycler sera évacuée après traitement.

La mine de Tochibora offre un bon exemple de cette technique. Comme la roche originelle qui contient le plomb et le zinc est riche en calcaire, la valeur du pH de l'eau souterraine se trouve déjà plus ou moins dans la gamme alcaline (7-8). De plus, elle contient peu d'ions dissous. En enlevant les solides en suspension on peut utiliser l'eau de la mine comme eau industrielle dans l'usine à plomb et à zinc voisine de Shikama. La mine de Tochibora assure environ 60 pour cent des besoins de Shikama. 73/

6.1.2 Lutte contre la pollution pendant le traitement du minerai

On peut réduire les émissions de poussière pendant les opérations de broyage en mouillant le minerai et en coiffant les broyeurs. Mais le problème beaucoup plus grave est celui de l'évacuation des résidus et de l'eau des opérations de flottation. Les boues résiduairees sont d'abord envoyées à des épaisseurs où les solides se déposent. Les solides vont ensuite, sous forme de boue épaisse, à des bassins ou à des décharges. Ce qui déborde de l'épaisseur peut être recyclé et réemployé en flottation, de même que les débordements des autres opérations d'épaississement et de flottation. Ces courants contiennent toutefois des impuretés nocives, consistant surtout en agents de flottation, qu'il faut éliminer. On a imaginé plusieurs procédés à cet effet. Par exemple le procédé de flottation IPU (Ions, Précipitation, Ultra fines) a recours à des additions d'acide sulfurique, de sulfure de sodium, d'un flocculant dénommé acofloc et de méthylisobutyl-cétone pour précipiter les impuretés, qui sont ensuite séparées par filtration. L'eau peut être recyclée. Ce système a été utilisé à l'usine de Shikama où il a remarquablement amélioré la qualité de l'ensemble de l'effluent, permis d'importantes économies

73/ Matsui, N. "Pollution Preventive Measures in a Lead-Zinc Mine in Japan", PNUÉ Industrie et environnement, vol. 8, n° 1, Janvier, février, mars 1985.

d'agents de flottation et un supplément de récupération de zinc et même de cuivre (comme sous-produit) à partir des eaux usées. 74/

6.1.3 Lutte contre la pollution en fonderie

Pendant le procédé de grillage et d'électrolyse

Pendant le grillage, le principal danger pour l'environnement vient des gaz du grill, qui contiennent du SO₂, de la poussière et des vapeurs, ainsi que de celles des métaux lourds tels que le mercure, le cadmium et l'arsenic présents à l'origine dans le concentré. Dans les usines relativement modernes, on emploie une chaudière pour récupérer la chaleur et refroidir les gaz émis par le four à griller. On enlève ensuite la poussière et les vapeurs en les faisant passer par des cyclones et ensuite, pour compléter l'opération, par un précipitateur électrostatique. Dans les usines plus anciennes dont les fours ont un faible rendement (par exemple, les fours à foyers multiples) la teneur en SO₂ des gaz est trop faible pour permettre leur extraction et on les envoie directement à une cheminée. Dans les usines modernes qui ont des fours à lit fluidisé, la teneur en SO₂ peut atteindre 9,5 pour cent. C'est le cas de l'usine nouvelle (1979) de la Jersey Minière Zinc Company à Clarksville, Tennessee (Etats-Unis). 75/ On peut alors utilement convertir le SO₂ en acide sulfurique.

Avant d'enlever le SO₂ il faut débarrasser les gaz d'échappement du précipitateur électrostatique de leur teneur en métal lourd. Ils passent d'abord dans un épurateur Venturi et ensuite dans une tour d'enlèvement du mercure Boliden-Norzink où une solution de chlorure de mercure coule à contre-courant. Le mercure du gaz réagit à la solution pour former du chlorure mercuriel qui se précipite et est ensuite enlevé par flottation. Le courant de gaz exempt de métal lourd peut alors être traité dans une installation où a lieu la conversion en SO₄H₂. Les gaz épurés sont d'ordinaire évacués par une cheminée.

Dans la seconde partie du procédé, les dangers pour l'environnement sont surtout dus à l'opération de lixiviation du zinc, dont le résidu contient tous les solides insolubles présent dans le calciné en plus de la solution d'électrolyte. Ce résidu est recueilli au fond des épaisseurs sous forme de boue, après floculation. Il est ensuite traité à la chaux pour enlever l'excédent d'acidité, lavé et filtré. Le gâteau de résidu final lavé est ensuite envoyé à une décharge ou à un bassin. Le problème environnemental est compliqué par la présence de résidus de métal lourd.

74/ Ibid.

75/ "Lead-Zinc-Tin" '80", Colloque mondial TMS-AIME sur la métallurgie et l'environnement, L. Painter : The Electrolytic Zinc Plant of Jersey Minière Zinc Company at Clarksville, Tennessee, AIME, New York, 1979.

Pendant le procédé pyrométallurgique

L'opération de grillage est en principe similaire de celle qui a lieu dans le procédé électrolytique. Elle pose donc le même type de problèmes d'environnement. Toutefois, dans le procédé pyrométallurgique, la phase de grillage est aussi une phase de frittage, c'est-à-dire que le produit final doit non seulement être entièrement calciné mais aussi en morceaux d'une dimension suffisante pour répondre aux conditions de l'opération de réduction qui suit. Ceci signifie que 80 pour cent environ du produit de la machine à fritter doivent être recyclés sous forme de poussière. 76/ C'est pourquoi, en plus de l'épuration normale des gaz d'échappement, il faut aussi extraire et dépoussiérer un gros volume d'air de ventilation. On peut employer à cet effet des sacs filtrants, des cyclones ou des épurateurs Venturi. 77/ Les gaz doivent ensuite être débarrassés des métaux lourds avant d'être envoyés à l'installation d'acide sulfurique pour enlèvement du SO₂.

Les problèmes d'environnement de la phase suivante, à savoir réduction par frittage, dépendent pour beaucoup du type de matériel employé. Le procédé Imperial Smelting est beaucoup plus sain pour l'environnement que les cornues horizontales. Les gaz contenant du zinc produits pendant la phase de réduction sont presque entièrement récupérés par le rotor éclabousseur. Les vapeurs de zinc qui s'échappent se condensent en passant par des épurateurs humides. Les autres métaux lourds sont eux aussi enlevés pendant cette opération. Les gaz peuvent ensuite être rejetés.

La liqueur qui sort de l'épurateur contient les métaux lourds des gaz. L'addition de chaux à la liqueur précipite ces métaux, qui se déposent dans des épaisseurs, sont déshydratés puis retraités en vue de leur récupération. La plus grande partie de la liqueur est recyclée vers l'épurateur et une partie seulement est déchargée après traitement. Les boues que donne le procédé Imperial Smelting sont granulées et mises en décharge ou bien utilisées comme liant du béton.

6.1.4 Lutte contre la pollution pendant le raffinage

Le principal danger pour l'environnement vient alors des émissions de vapeurs contenant des métaux lourds, notamment le cadmium. A condition d'avoir un bon système de captage des vapeurs, on peut extraire les métaux lourds au moyen d'épurateurs comme l'expose le paragraphe précédent.

76/ Aktins, M.H. and J.F. Lowe, "The Economics of Pollution Control in the Non-ferrous Metal Industry", Pergamon Press, 1979.

77/ "Processes, Procedures and Methods to Control Pollution from Mining Activities", Agence de la protection de l'environnement des Etats-Unis, EPA-430/9-73-011, Washington, D.C., octobre 1973.

6.1.5 Lutte contre la pollution pendant le procédé hydrométallurgique

De même que dans le procédé électrolytique, l'évacuation des boues après lixiviation peut poser un problème d'environnement. Le recyclage réduit au minimum la production d'effluents. On traite l'excédent pour enlever les métaux lourds avant décharge. Les boues peuvent être déposées sur des terrains étanches.

6.2 Réaménagement d'installations existantes pour réduire la pollution

Pour les usines qui utilisent des techniques dépassées ou anciennes, il n'y a guère de remèdes. Ces usines souffrent parfois aussi de leur faible rendement et de coûts de production trop élevés; elles sont destinées à disparaître tôt ou tard. Par exemple, aux Etats-Unis, six des huit fonderies primaires de zinc utilisant les cornues horizontales ou verticales ont fermé entre 1969 et 1978. Une autre a adopté le procédé électrolytique et la dernière était encore en service en 1979.

Les techniques de remplacement, tout au moins dans certaines parties de l'installation, peuvent être utiles tant du point de vue économique que de celui de l'environnement. Par exemple, les appareils de grillage modernes non seulement peuvent fonctionner sans apport supplémentaire de combustible mais encore produisent des courants riches en SO₂ qui se prêtent beaucoup mieux à la conversion en acide sulfurique. On sait maintenant lutter contre les émissions de métaux lourds, notamment le mercure. Les colonnes Boliden-Morzink donnent de très bons résultats. En fonderie pyrométallurgique, le procédé Imperial Smelting est déjà bon pour l'environnement à condition de régler les émissions gazeuses finales. Le matériel supplémentaire de lutte contre la pollution n'a pas à être dépendant du four et peut être adapté à des installations existantes.

6.3 Coûts de la lutte contre la pollution

On trouve une importante source d'information sur les coûts de la lutte contre la pollution dans l'industrie du zinc dans une publication de l'Agence de la protection de l'environnement des Etats-Unis concernant la situation dans ce pays. 78/ L'EPA a estimé en 1971 que toutes les fonderies primaires de zinc des Etats-Unis (produisant plus d'un million de tonnes par an) émettaient 263 000 tonnes de SO₂ et 18 600 tonnes de particules. A l'époque l'émission du SO₂ n'était pas limitée et 90 pour cent seulement des particules résultant de la fonderie étaient captés avant le rejet des gaz dans l'atmosphère. L'EPA prévoyait qu'en 1979 les chiffres correspondants seraient de 1 900 tonnes pour SO₂ et 31 000 tonnes pour les émissions de particules grâce à l'adoption de techniques appropriées. Les investissements nécessaires étaient estimés à 32,4 millions de dollars et les frais annuels de fonctionnement à 8,15 millions (en prix de 1974). Le tableau 6.1 donne des renseignements plus détaillés pour les usines de différentes dimensions. 79/

78/ Atkins, M.H. and J.P. Lowe, "the Economics of Pollution Control in the Non-Ferrous Metals Industry", Pergamon Press, 1979.

79/ Ibid.

Tableau 6.1
Coûts de l'antipollution pour les producteurs
primaires de zinc des Etats-Unis

Capacité type (tonnes)	Investissement prévu Millions de \$ E.U.			Frais annuels d'exploitation prévus Millions de dollars E.U.			\$/t/an prévus	Coût unitaire	
	mini	maxi		mini	maxi			mini	maxi
91 000	8,67	6,66	11,1	2,17	1,65	2,77	23,8	18,1	30,4
139 000	11,6	8,82	15,0	2,91	2,23	3,76	20,9	16,0	27,1
149 000	12,2	9,42	15,6	3,09	2,37	3,97	22,2	17,1	28,6

Source : The Cost of Clean Air, EPA, Document sénatorial n° 93-122, 1974.

Le tableau 6.2 donne les investissements estimatifs pour divers types d'usines à zinc secondaires.

Tableau 6.2
Coût de l'antipollution pour les producteurs secondaires de
zinc des Etats-Unis

Capacité type (tonnes)	Investissement prévu (1 000 \$)			Coût annuel prévu (1 000 \$)			Coût unitaire prévu \$/t/an	Coût unitaire	
	mini	maxi		mini	maxi			mini	maxi
4 990	138	80,4	195	43,2	22,5	64,4	7,85	4,09	11,7
10 990	225	131	345	12,3	386	113	6,03	3,22	9,42

Source : The Cost of Clean Air, EPA, Document sénatorial n° 93-122, 1974.

6.4 Normes d'émission

D'après la référence 80/ les maxima admissibles d'émission dans l'atmosphère sont les mêmes pour les usines à zinc que pour les usines à plomb. Ils ont déjà été indiqués au chapitre sur le plomb en 5.10. En ce qui concerne les effluents liquides, le tableau 6.3 donne les limites prescrites par l'Agence de la protection de l'environnement des Etats-Unis. 81/ Le tableau 6.4 donne les normes pour les usines de production primaire de zinc en kilos de polluant par tonne de métal produite.

80/ "Development Document for Interim, Final and Proposed Effluent Limitations Guidelines and New Source Performance Standards for the Ore Mining and Dressing Industry", Agence de la protection de l'environnement des Etats-Unis EPA 440/1-75/061 Vol.I and II, Washington D.C., octobre 1975.

81/ "Processes, Procedures and Methods to Control Pollution from Mining Activities", Agence de la protection et de l'environnement des Etats-Unis, EPA-430/9-73-011, Washington, D.C. octobre 1973.

Tableau 6.3
Directives concernant les polluants admissibles de
l'eau provenant d'une fonderie primaire de zinc
(mg/litre)

Teneur (mg/litre) de l'effluent		
	Moyenne de 30 jours	Maximum de 24 heures
pH	6-9 unités	6-9 unités
TSS	20	30
Cyanure	0,01	0,02
Cd	0,05	0,1
Cu	0,05	0,1
Hg	0,001	0,002
Pb	0,2	0,4
Zn	0,2	0,4

Source : Développement for Interim Final and Proposed Effluent Limitations Guidelines and New Source Performance Standards for the Ore Mining and Dressing Industry", Agence de la protection de l'environnement des Etats-Unis, EPA 440/1-75/061 Vol. I et II, Washington D.C., octobre 1975.

Tableau 6.4
Directives concernant les polluants admissibles de l'eau
provenant d'une fonderie primaire de zinc
(kilos par t de Zn)

	Maximum de 24 heures	Moyenne de 30 jours consécutifs
TSS	0,42	0,21
As	$1,6 \times 10^{-3}$	8×10^{-4}
Cd	$8,0 \times 10^{-3}$	4×10^{-4}
Se	0,08	0,04
Zn	0,08	0,04
pH	6-9 unités	6-9 unités

Source : "Environmental Guidelines", Office of Environmental Affairs, Banque mondiale, juillet 1984.

6.5 Protection de la santé du personnel

Le zinc est relativement peu toxique. L'intoxication la plus fréquente est due à l'inhalation de vapeurs pendant des opérations telles que la fusion ou la galvanisation ou tout autre comportant une température élevée du métal. Elle donne une fièvre dont l'ouvrier se remet d'ordinaire en 24 ou 36 heures. On a montré que des expositions professionnelles aux vapeurs d'oxyde de zinc de l'ordre de 3 à 15 mg/m³ pendant 2 à 35 ans n'entraînaient pas d'effets nocifs. 82/ On a constaté dans certains postes de travail des teneurs atteignant 100 mg/m³ voire davantage. 83/ Une bonne aération est nécessaire pour ramener ces valeurs au-dessous de la limite d'exposition professionnelle prescrite dans chaque pays. Le tableau 6.5 donne quelques-unes de ces limites.

Tableau 6.5
Limites d'exposition professionnelles au zinc contenu dans l'air
en mg/m³

	ETATS-UNIS					
	Rép. féd. d'Allemagne	Japon	Suède	URSS	Norme prof.	ACGIH TWA Court terme
Chlorure de Zn (vapeurs)			1		1	1 2
Oxyde de Zinc (Vapeurs)	5	5	1	6	5	5 10

Source : Occupational Exposure Limits for Airborne Toxic Substances, OIT, Série Sécurité et hygiène du travail n° 37, Genève 1977.

Des effets toxiques plus graves peuvent résulter de l'exposition du personnel au cadmium, sous-produit de la fabrication du zinc. Le cadmium peut entraîner des effets aigus et durables, notamment sur les poumons et les reins. Une exposition de huit heures à un air contenant 5 mg/m³ peut être mortelle. 84/ Une exposition à des teneurs de 1 mg/m³ de cadmium dans l'air peut entraîner des effets toxiques. Aussi de nombreux pays ont-ils adopté des limites d'exposition professionnelles assez basses. On les trouvera au tableau 6.6.

82/ Occupational Exposure Limits for Airborne Toxic Substances, OIT, Série Sécurité et hygiène du travail n°37, Genève 1977.

83/ Ibid.

84/ Ibid.

Tableau 6.6
Limites d'exposition professionnelle au cadmium présent
dans l'air, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

	Rép. féd. d'Allemagne	Japon	Suède	URSS	ETATS-UNIS		
					Norme prof.	ACGIH TWA	ACGIH Court terme
Poussière et sels solubles de Cadmium (en cadmium)			0,5			0,5	0,15
Oxyde de cadmium (vapeurs en cadmium)	0,1	0,1	0,02	0,1	TWA/Ma/ 0,1/3	M _a / 0,05	0,05

a/ M = Valeur plafond

Source : Occupational Exposure Limits for Airborne Toxic Substances,
OIT, Série Sécurité et hygiène du travail n° 37, Genève 1977.

7. **ETAIN**

7.2 Techniques de lutte contre la pollution dans les usines de production d'étain

7.1.1 Lutte contre la pollution pendant l'extraction

La nature et l'emplacement des gisements d'étain sont très différents et les opérations minières ont sur l'environnement des impacts très différents eux aussi. L'extraction souterraine en roche dure affecte beaucoup moins l'environnement que l'exploitation à ciel ouvert. Dans ce dernier cas il faut surtout envisager la formation de poussière due aux opérations d'explosion et de terrassement, ainsi que le déboisement. On peut y remédier en partie en arrosant les zones à poussières et en appliquant un programme approprié de reconstitution et de revégétation du sol.

Des problèmes plus graves se posent dans les gisements alluviaux, notamment en Asie du Sud-Ouest où les exploitations minières occupent le sol en concurrence avec d'autres activités - agriculture, sylviculture, élevage. Jusqu'à présent, les zones d'extraction n'ont guère été récupérées. En principe on peut remettre les déblais dans la mine et commencer immédiatement la fertilisation et la revégétation (de préférence en légumineuses) et obtenir ainsi une récupération totale des terrains miniers. Or, la difficulté que présente cette solution est que les gisements alluviaux ne sont jamais totalement épuisés et qu'on peut en reprendre l'exploitation de temps à autre selon les fluctuations des cours de l'étain et la situation des approvisionnements mondiaux. 85/

7.1.2 Lutte contre la pollution pendant le traitement du minerai

Dans le cas des gisements alluviaux, la séparation du minerai, la cassitérite, d'avec sa gangue est une opération purement mécanique qui n'entraîne pas de grands problèmes de pollution chimique mais nécessite l'élimination d'une grande quantité de résidus, d'où crassiers et entassements peu esthétiques et cours d'eau boueux. Ce problème ne peut être résolu qu'en partie avec un plan approprié d'utilisation et de gestion des sols associé à des programmes de récupération.

L'élimination des résidus est aussi le principal problème qui se pose lors du traitement des minerais de roche dure. En plus de la simple séparation par gravité, le minerai est parfois traité par flottation de la gangue. En pareil cas l'eau qui sert à l'opération non seulement contient une forte proportion de solides en suspension, mais aussi peut être contaminée par des agents chimiques. Il faut alors la recycler et traiter l'excédent à la chaux pour neutraliser les produits chimiques en solution qui pourraient présenter un danger, avant de la rejeter dans l'environnement.

7.1.3 Lutte contre la pollution pendant la fusion de concentrés d'étain à haute teneur

Les gaz qui sortent du four de fusion des concentrés et du four de fusion des scories contiennent de grandes quantités de poussières (par

85/ "Lead-Zinc-Tin" '80", Colloque mondial TMS-AIME sur la métallurgie et l'environnement, J. Harris : The Problem of Tin, AIME, New York 1979.

ex. 50-150 g/Nm³ du gaz dans la fusion au four électrique) 86/. Ces gaz sont refroidis à l'eau ou bien en passant par des chaudières de récupération de chaleur. On les envoie ensuite aux appareils de captage des poussières qui sont généralement des épurateurs Venturi ou des épurateurs filtrants à compartiments multiples qui recueillent la plus grande partie des poussières. L'élimination définitive peut se faire au moyen de précipitateurs électrostatiques. Les fonderies d'étain ont toujours veillé à ce que l'émission de particules soit très faible, car la poussière contient une part importante du total de l'étain traité (jusqu'à 10 pour cent de la charge des deux fours) qui peut être récupérée et recyclée.

Les gaz de fusion sont aussi riches en CO et en H₂ car il faut maintenir en tout temps une atmosphère réductrice dans les fours. C'est pourquoi les gaz sont expulsés au lieu de les laisser simplement s'échapper par une cheminée. Selon la composition de la charge, les gaz peuvent aussi contenir des quantités variables de SO₂, mais le plus souvent trop faibles pour permettre la conversion en acide sulfurique et le SO₂ est rejeté dans l'environnement.

7.1.4 Lutte contre la pollution pendant la fusion de concentrés d'étain à basse teneur

Les minerais pauvres sont souvent des minerais en roche dure contenant de grandes quantités de pyrites. La plus grande partie de leur teneur en soufre se dégage alors pendant l'opération préliminaire de grillage. Si l'on utilise des appareils à foyers multiples, le SO₂ produit ne se prête pas à la conversion en acide sulfurique, ce qui peut soulever le problème d'environnement qui accompagne toujours les émissions de SO₂. On ne peut obtenir des teneurs en SO₂ plus fortes qu'avec des fours de grillage plus modernes ou en ayant recours au fumage du minerai. On peut alors utilement faire fonctionner une installation de conversion en SO₄H₂.

L'opération de lixiviation qui accompagne souvent le grillage peut entraîner la contamination de la liqueur de lixiviation par des éléments tels que l'arsenic, le plomb et le bismuth. On les récupère par précipitation à la chaux pour les retraiter ensuite. Les problèmes d'environnement et les techniques de lutte concernant l'opération de fusion proprement dite sont les mêmes que ceux qui viennent d'être décrits. L'opération de fumage des scories peut aussi donner lieu à des émissions. Les vapeurs et les poussières qui se dégagent sont précieuses en raison de leur teneur en métal (environ 50 pour cent d'étain). Le gaz d'échappement peut aussi contenir des quantités récupérables de SO₂ (par exemple, 8 pour cent dans le four moderne SIROSMELT) 87/ qui peuvent être traitées dans une installation de conversion en acide sulfurique.

86/ "Lead-Zinc-Tin '80", Colloque mondial TMA-AIME sur la métallurgie et l'environnement, F. Oberbeckmann and M. Porten : Tin Smelting at Berzelius, Duisburg, AIME, New York, 1979.

87/ "Lead-Zinc-Tin '80", Colloque mondial TMA-AIME sur la métallurgie et l'environnement, K. Foo and J. Floyd : Development of the Matte Fuming Process for Tin Recovery from Sulphide Materials, AIME, New York, 1979.

7.1.5. Lutte contre la pollution pendant le raffinage d'étain brut

La plupart des opérations de raffinage de l'étain ne présentent que très peu de dangers pour l'environnement, à l'exception toutefois de l'extraction de l'arsenic au moyen d'aluminium. Bien que l'arsine ne se forme que si l'AlAs obtenu entre en contact avec de l'eau, de nombreuses fonderies préfèrent aujourd'hui, pour éviter tout incident utiliser le sodium plutôt que l'aluminium pour cette opération. Dans l'électrolyse acide, le bain contient des acides phénoliques ou crésol-sulfoniques qui pourraient en principe provoquer des émissions et des vapeurs dangereuses. On y pare d'ordinaire en abaissant les températures et en assurant une bonne aération. Avec des bains alcalins, le procédé a un meilleur rendement car il admet une plus forte teneur en impuretés de l'étain brut, mais l'électrolyse doit s'effectuer à une température de 80°C et les problèmes d'émission risquent de s'aggraver. Il faut alors assurer une bonne aération et monter des hottes.

7.2 Réaménagement d'installations existantes pour réduire la pollution

Les usines qui traitent des concentrés plus riches n'ont guère de problèmes d'émission car on récupère déjà près de 100 pour cent des poussières et fumées afin de recycler leur contenu en étain. De plus, les émissions de SO₂ sont habituellement très faibles. Les usines qui traitent des concentrés d'étain plus pauvres (depuis le traitement du minerai jusqu'au métal) ont éprouvé le besoin d'améliorer leur productivité et de réduire la quantité de déchets rebutés. Vu le faible rendement du procédé traditionnel de concentration de la cassitérite, on a généralement eu tendance à rééquiper les installations existantes de fours de fumage de concentrés d'étain qui peuvent donner un concentré à qualité moyenne (40-50 pour cent Sn) avec un rendement dépassant 90 pour cent. En comparaison, le traitement minéral peut donner des concentrés un peu plus riches (environ 60 pour cent d'étain) mais avec un rendement beaucoup plus faible (environ 50 pour cent). 88/ Les conséquences sont non seulement économiques mais aussi environnementales, car il y a beaucoup moins de résidus à éliminer. Dans certains cas, le fumage peut même remplacer entièrement le traitement du minerai. 89/ Le procédé présente l'inconvénient de donner du SO₂. D'autre part, si l'on emploie les techniques appropriées, la teneur en SO₂ sera suffisamment élevée pour permettre la conversion en acide sulfurique.

7.3 Coût de la lutte contre la pollution

Dans le cas des fonderies d'étain le matériel servant au dépoussiérage des gaz d'échappement peut aussi bien être considéré comme matériel de production que comme matériel antipollution, vu la richesse en étain des poussières. Les chiffres concernant le coût des installations de dépoussiérage ont déjà été présentés au chapitre sur le cuivre, ainsi que ceux relatifs au coût de l'extraction du SO₂.

88/ "Lead-Zinc-Tin'80", Colloque mondial TMS-AIME sur la métallurgie et l'environnement, T.R.A. Davey : Advances in Lead, Zinc and Tin Technology-Projections for the 1980's. AIME, New York, 1979.

89/ "Lead-Zinc-Tin'80", Colloque mondial TMS-AIME sur la métallurgie et l'environnement, S. Pearce : Development in the Smelting and Refining of Tin, AIME, New York, 1979.

Le tableau 7.1 donne une comparaison des principales caractéristiques des différents fours à étain. Les chiffres de ce tableau peuvent servir à évaluer le rendement de chaque type de four et par conséquent les coûts environnementaux y relatifs (d'après une première estimation de la dimension des appareils d'épuration des gaz et de leur coût de fonctionnement).

Tableau 7.1
Comparaison entre les fours à étain

	Rotatif	À réverbère	Electrique
Temps de fusion (h/t de charge)	0,7	0,48	0,48
Températures en °C	1 100	1 350	1 580
Débit (t/m ² jour)	1,36	1,0	6,6
Fonctionnement du jour (jours par an)	300	300	330
Vie du réfractaire (mois)	8	8	36
		2 ans: murs et toit	
Fuel (litres/heure)	200	200	---
Réducteurs (kg/t de métal)	330	370	220
Consommation d'énergie (kWh/t de métal)	208	126,9	1 580
Eau de refroidissement (m ³ /t de métal)	5,88	0,2	18
Rendement en étain (pourcentage)	98,5-99,0	99,0	99,5
Gaz perdus (M ³ /t de charge)	6 500	16 000	250
Poussière, maxi. (pourcentage)	10	10	5

Source : "Lead-Zinc-Tin'80", Colloque mondial TMS AIME sur la métallurgie et l'environnement, F. Oberbeckmann and M. Porten : Tin Smelting at Berzelius, Duisburg, AIME, New York, 1979.

7.4 Normes d'émission

Les types de polluants émis par les fonderies d'étain varient selon la technique employée et la teneur en polluants du concentré traité. Le tableau 7.2 donne les limitations d'émissions gazeuses des polluants en cause (tels que SO₂, CO, As, Pb et particules). 90/

90/ Environmental Guidelines, Office of Environmental Affairs, Banque mondiale, juillet 1984.

Tableau 7.2
Directives pour les niveaux d'émission de gaz des
fonderies d'étain

Anhydride sulfureux (SO₂)		
A l'intérieur de la clôture de l'usine	Moyenne arithmétique annuelle	100 microg/m ³
	Pointe maximale en 24 heures	1 000 microg/m ³
A l'extérieur de la clôture de l'usine	Moyenne arithmétique annuelle	100 microg/m ³
	Pointe maximale en 24 heures	500 microg/m ³
Particules	Moyenne géométrique annuelle	75 microg/m ³
	Pointe maximale en 24 heures	260 microg/m ³
Oxyde de carbone (CO)	Moyenne maximale en 8 heures	10 microg/m ³
	Moyenne maximale en une heure	40 microg/m ³
Plomb (en Pb)		
A l'intérieur de la clôture de l'usine	Moyenne en 24 heures	0,008 mg/m ³
A l'extérieur de la clôture de l'usine	Moyenne en 24 heures	0,004 mg/m ³
Arsenic (en As)		
A l'intérieur de la clôture de l'usine	Moyenne en 24 heures	0,006 mg/m ³
A l'extérieur de la clôture de l'usine	Moyenne en 24 heures	0,003 mg/m ³

Source : Environmental Guidelines, Office of Environmental Affairs, Banque mondiale, juillet 1984.

7.5 Protection de la santé du personnel

L'inhalation d'étain élémentaire ne produit aucun effet sur l'être humain. ^{91/} L'exposition prolongée aux poussières et vapeurs d'oxyde d'étain peut donner une stannose, pneumoconiose bénigne qui se traduit par de petites ombres sur l'image radiographique du poumon. Ce trouble peut se manifester après une exposition prolongée (au moins 3 à 5 ans) mais n'entraîne aucune atteinte à la fonction pulmonaire à condition que d'autres agents, tels que la silice, ne soient pas présents dans la poussière inhalée. Plus de 200 cas de stannose ont fait l'objet de

^{91/} "Etain et organostanniques" Critères d'hygiène de l'environnement 15, OMS, Genève, 1980.

publications. 92/, 93/, 94/ L'exposition du personnel aux vapeurs d'étain ou d'oxyde d'étain a le plus souvent lieu lors d'opérations telles que l'ensachage des concentrés, le mélange de charges de fours, le vidange des fours, et le nettoyage périodique des sacs filtrants. Quelques opérations de raffinage peuvent aussi émettre des vapeurs d'étain. On a signalé qu'aucun cas de stannose n'avait été constaté chez des ouvriers exposés à des poussières d'oxyde d'étain d'une concentration de 10 mg/m³ pendant dix ans. Néanmoins, la concentration maximale généralement admissible de SnO₂ dans l'environnement de travail est estimée à 2 mg/par mètre cube d'air. 95/

92/ Schuler, P., E. Cruz, C. Guijon, V. Maturana and A. Valenzuela, Stannosis, Benign Pneumoconiosis Owing to Inhalation of Tin Dust and Pume, II, Clinical Study, Ind. Med. Surg. 27 : 432-435, 1958.

93/ Robertson, A.J. and P.H. Whitaker, Radiological Changes in Pneumoconiosis due to Tin Oxide, J. Fac. Radiol., 6 : 224-233, 1957.

94/ Pendergrass, E.P. and A.W.Pryde, Benign Pneumoconiosis due to Tin Oxide, J. Ind. Hyg. 30 : 119-123.

95/ "Etain et organostanniques" Critères d'hygiène de l'environnement 15, OMS, Genève, 1980.

8. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

a) Les industries des métaux non ferreux dont il est question ici sont une source importante de pollution de l'environnement. L'étendue de l'impact qu'elles exercent sur ce dernier dépend pour beaucoup de la nature du métal traité, de l'emplacement de l'usine ou de la mine, de la technique adoptée et du système de lutte contre la pollution appliqué.

b) Les activités minières ne peuvent guère ne pas nuire à l'environnement surtout lorsqu'elles sont situées au voisinage de zones peuplées. Dans l'exploitation à ciel ouvert les déblais sont souvent entassés sur des terrains de décharge voisins de la mine. Ces matériaux doivent, chaque fois qu'il est possible, être réemployés comme remblais ou conservés pour servir plus tard à la restauration de la zone minière suivie de reboisement.

c) L'extraction en carrière et l'exploitation des placers alluviaux d'étain notamment en Asie du Sud-Est, doivent être immédiatement suivies d'opérations de remblayage visant à restaurer les zones exploitées en carrière alors même qu'elles se poursuivent plus loin. La revégétation éventuellement suivie d'activités agricoles ou autres peut alors commencer dans les quelques années qui suivent.

d) L'extraction souterraine exerce probablement sur l'environnement un impact plus restreint que les autres types d'opérations minières. Elle comporte, elle aussi, le problème de l'élimination des gangues, mais il peut parfois être résolu au moyen d'opérations de remblayage.

e) Les activités minières entraînent aussi des poussières, du bruit, et des émissions nocives de vapeurs consécutives aux explosions. Les émissions de poussières doivent être combattues en arrosant les zones où elles se produisent (débris de minerais dans les tailles, entonnoirs d'explosions), en goudronnant les routes d'accès et en employant des méthodes propres à réduire les poussières soulevées par les explosions (par ex. jets de vapeur produisant un brouillard). On arrive à réduire le bruit et la poussière aux abords de la mine en plantant des lignes d'arbres ou en construisant des écrans avec les déblais. Il faut si possible assurer une aération ou bien tenir compte des vents dominants dans le choix de l'emplacement des explosions afin de favoriser la dispersion des vapeurs nocives qu'elles produisent.

f) Dans les régions non arides, la contamination des eaux de la mine peut porter gravement atteinte à l'environnement. L'eau qui sert aux opérations minières (par exemple, pour le forage dans les mines souterraines) ou l'eau de ruissellement (notamment dans les mines à ciel ouvert) peut être contaminée par des substances chimiques présentes à l'origine dans le sol. Cela peut donner des eaux très acidulées dans les mines à ciel ouvert ou des eaux alcalines en sous-sol. Il peut aussi y avoir des métaux en solution. Il faut a) estimer à l'avance la nature et la quantité des polluants que contient l'eau de la mine, b) estimer le courant d'eau produit, c) recueillir l'eau avant qu'elle s'échappe dans l'environnement, d) construire des installations de traitement des eaux capables d'extraire les solides en suspension, de neutraliser l'acidité ou l'alcalinité excédentaires, de précipiter les métaux en solution avant le rejet de l'eau dans l'environnement.

g) La poussière se produit aussi pendant certaines opérations de traitement du minerai telles que le chargement, le déchargement, le transport, le concassage et le broyage. Il faut en réduire la quantité par l'aspersion d'eau. En cours de transport, il faut maintenir la teneur en humidité du minerai à un niveau qui empêche la formation de poussière. Afin de réduire la concentration de poussière dans les zones de traitement, il faut définir l'opération génératrice de poussière et la confiner dans des locaux ou des espaces appropriés, le matériel doit être couvert hermétiquement et l'aération locale assurée. Ces recommandations doivent être observées de façon encore plus rigoureuse lorsque le minerai contient des métaux lourds tels que le plomb, le cadmium ou l'antimoine qui constituent à eux seuls une menace pour la santé.

h) Pour concentrer le métal des minerais sulfurés (nickel, cuivre, plomb, zinc et étain) il faut procéder à la flottation. Cette opération exige de grandes quantités d'eau que contaminent des quantités variables d'agents de flottation. Ces agents sont souvent très toxiques et contiennent des cyanures. En conséquence, il faut faire de grands efforts pour recycler le plus possible l'eau de flottation (après séparation des résidus). Chaque fois qu'il est possible, il faut utiliser des agents de flottation moins toxiques et des recherches doivent être poursuivies en vue de leur élaboration.

i) L'élimination des résidus après concentration du minerai peut gravement endommager l'environnement vu la quantité de résidus que produit l'industrie et leur teneur en polluant qui résulte d'opérations antérieures (telles que la flottation). La façon la plus sûre d'éliminer ces résidus consiste à les mettre en décharge dans des zones soigneusement choisies que l'on recouvrira ensuite de végétation. Les zones de décharge doivent être éloignées des sources d'eau et impropres à l'infiltration (c'est-à-dire que le fond de la décharge doit être en argile naturelle ou en matériaux étanches artificiels).

j) La concentration de la plupart des minerais oxydés et notamment de la bauxite pour la production d'alumine exige une opération de lixiviation. On emploie l'alcali (dans la bauxite et parfois le nickel) et les acides - pour d'autres nickels et les minerais de cuivre et de zinc. La gangue qui n'a pas été solubilisée lors du traitement est enlevée et doit être éliminée, ce qui retombe souvent sur l'environnement vu le contenu résiduaire alcalin ou acide des résidus. La mise en décharge dans des bassins fermés est là encore la méthode d'élimination la plus acceptable, souvie ou non d'une neutralisation à la chaux dans le cas des résidus acides. De nombreuses usines d'alumine ont déjà recours à la mise en décharge totale des résidus du traitement et de ceux de la bauxite (boues rouges) dans des bassins qui sont une partie intégrante de l'installation. Cette technique doit être adoptée chaque fois qu'il est possible. Il est établi que le rejet des boues rouges en mer porte un préjudice grave à la vie aquatique. Il faut le plus tôt possible la remplacer par des procédés plus respectueux de l'environnement.

k) Le procédé pyrométallurgique de fusion qui sert à obtenir le métal brut (nickel, cuivre, plomb et zinc) à partir du concentré de minerai sulfuré comporte l'enlèvement du soufre présent à l'origine dans ce dernier sous la forme d'anhydride sulfureux gazeux (SO₂). Rejeté dans l'atmosphère, le SO₂ peut donner de l'acide sulfurique ce qui entraîne dans l'environnement des conséquences bien connues sur la santé humaine, la végétation et les bâtiments sous forme de pluie acide. La teneur en anhydride sulfureux des gaz qui s'échappent du four de fusion du minerai et la quantité de ces gaz dépendent pour beaucoup de la technique employée. Les usines anciennes émettent souvent des gaz plus abondants à basse teneur en SO₂, dont l'extraction n'est pas économiquement viable. Les usines plus modernes émettent des gaz plus riches en SO₂, qu'il est alors possible d'extraire et de convertir en acide sulfurique qu'on vend ensuite. Il est donc à recommander que les usines qui émettent des gaz à teneur en SO₂ suffisamment forte soient équipées (si elles ne le sont pas déjà) d'une installation de conversion du SO₂ en acide sulfurique. Les usines plus anciennes devront ou bien disparaître peu à peu ou être modernisées par l'adoption d'un matériel capable de donner des gaz propres à la conversion en acide sulfurique.

l) Les fonderies produisent aussi de grandes quantités de poussières et de vapeurs qui peuvent s'échapper avec les gaz. Il est recommandé que les nouvelles usines soient équipées de dispositifs de dépoussiérage à grand rendement et d'en munir aussi les usines plus anciennes. Cette mesure peut aussi présenter un avantage économique car les poussières recueillies contiennent souvent des oxydes métalliques qui peuvent être recyclées vers le four de fusion.

m) Les émissions des électrolyses d'aluminium contiennent des polluants, les fluorures. Les électrolyses d'autres métaux tels que l'étain et le cuivre peuvent, elles aussi, émettre des brouillards contenant des polluants. Il est recommandé d'équiper ces usines d'installations d'aération comportant des dispositifs de captage des particules.

n) Il y a depuis quelques années plusieurs nouveaux procédés de fusion pyrométallurgique du nickel, du cuivre, du plomb, du zinc et de l'étain. Ils offrent plusieurs avantages : récupération accrue du métal, plus forte teneur en anhydride sulfureux des gaz émis et par conséquent possibilité de le convertir en acide sulfurique, réduction de la quantité de poussières et de vapeurs, meilleur rendement énergétique et possibilité de fondre des minerais complexes. Les considérations d'environnement doivent jouer un rôle décisif dans le choix des procédés de fusion des usines nouvelles. Il est recommandé aux pays d'adopter des normes environnementales plus rigoureuses et de les appliquer plus strictement.

o) Le recyclage et la refusion de plusieurs déchets métalliques est déjà largement pratiquée pour le plomb, l'aluminium, le cuivre et, dans une moindre mesure, l'étain, le zinc et le nickel. On s'attend à ce que la proportion des métaux obtenus par retraitement des déchets augmente sensiblement dans un proche avenir en conséquence de la hausse du coût de la production primaire et de l'économie de frais d'énergie que procure la production secondaire.