



Environnement  
Canada

Environment  
Canada

Service de la  
protection de  
l'environnement

Environmental  
Protection  
Service

*E. Fedida*  
à remettre à Elie Fedida

128 824

# Les émissions de polluants atmosphériques et les techniques antipollution dans l'industrie des ferro-alliages et dans les industries connexes

TD  
182  
R46  
3/AP/81/  
5F  
ex.1

analyse économique et technique  
Rapport SPE 3-AP-81-5F

Commission générale de l'assainissement de l'air

81

## SÉRIE DE RAPPORTS DU SERVICE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Les rapports d'analyse économique et technique portent sur les revues de l'état des connaissances, les relèves de bibliothèques, les inventaires industriels ainsi que leurs recommandations connexes dans les cas où celles-ci n'impliquent aucune recherche expérimentale. Ces analyses sont entreprises, soit par un organisme extérieur, soit par le personnel du Service de la protection de l'environnement.

Les autres catégories de la série de rapports du S.P.E. comprennent les groupes suivants: règlements, codes et accords; politique et planification; développement technologique; surveillance; guides de formation; rapports et exposés à des enquêtes publiques et impacts environnementaux.

Les demandes relatives aux rapports du Service de la protection de l'environnement doivent être adressées au Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, K1A 1C8, Canada.

7 D 182  
R.46  
3/AP/81/5F  
ex.1

# 128824.

**Les émissions  
de polluants atmosphériques  
et les techniques antipollution  
dans l'industrie  
des ferro-alliages  
et dans les industries  
connexes**

K.H. Mah

Service de la protection de l'environnement  
Direction générale de l'assainissement de l'air  
Direction de l'évaluation technique  
Division des mines, des minéraux et de la métallurgie

EPS 3-AP-81-5F  
Août 1982

Environnement Canada

Publication distribuée  
par le Service de la protection de l'environnement  
Ministère de l'Environnement  
Ottawa  
K1A 1C8

Édition française  
*Air Pollution Emissions and control Technology:  
Ferroalloy Production and Allied Industries* ©1981  
préparée par le Module d'édition française  
Ministère de l'Environnement

Rapport EPS 3-AP-81-5F

N° de catalogue En 46-3/81-5F  
ISBN: 0-662-91733-2

©  
Ministre des Approvisionnements et Services  
1982

## NOTE PRÉLIMINAIRE

Il incombe au gouvernement fédéral de publier des lignes directrices nationales sur l'émission des polluants atmosphériques, quelle qu'en soit la source. Une étape importante dans l'élaboration de ces lignes directrices est la préparation d'une étude technique de l'industrie ou du secteur commercial considéré. L'étude englobe un profil géographique de l'activité commerciale ou industrielle, une description des principaux procédés utilisés, la caractérisation des émissions et sources d'émissions, ainsi qu'une évaluation des techniques et des mesures antipollution.

La présente publication est le résultat d'une étude de ce type, et elle vise deux grands objectifs. Le premier consiste à fournir les données fondamentales nécessaires à l'élaboration de lignes directrices fédérales pour les nouvelles sources d'émissions. En proposant des lignes directrices nationales, le gouvernement veut des taux d'émissions bas dans le cas des nouvelles usines grâce à l'application des techniques antipollution les plus récentes au moment même de la construction de l'usine, de façon à dégrader le moins possible la qualité de l'air et à procurer aux futures générations de Canadiens une protection efficace de leur milieu.

Le second objectif est de constituer une source d'information sur les techniques antipollution applicables, aux fins d'utilisation par des organismes provinciaux et municipaux dans le cadre de leurs programmes antipollution pour les sources d'émission déjà existantes. Les usines déjà construites, même si elles ne sont pas visées comme telles par les présentes lignes directrices devraient néanmoins être astreintes individuellement à certaines mesures antipollution, en fonction des besoins locaux. Cela permettrait aux organismes provinciaux de lutte contre la pollution d'évaluer les facteurs variables, comme la densité industrielle, la nature et les quantités d'émissions d'une usine donnée, les facteurs météorologiques et topographiques, la faisabilité technique et les conditions socio-économiques locales.

Le présent rapport constitue une étude technique du secteur des ferro-alliages et des industries connexes.

## RÉSUMÉ

Le présent rapport contient les données techniques relatives à la production des ferro-alliages et aux industries connexes, une évaluation des émissions en 1975, ainsi qu'une évaluation des mesures antipollution qui pourraient être mises en oeuvre dans les installations nouvelles ou existantes de ce secteur.

Ces industries produisent des ferro-alliages (y compris du silicium et du carbure de calcium), de l'alumine fondue et du carbure de silicium. Les ferro-alliages servent surtout à fabriquer les aciers spéciaux; l'alumine fondue et le carbure de silicium sont largement utilisés comme abrasifs agglomérés ou appliqués, ainsi que dans la fabrication de produits réfractaires.

On a calculé que les émissions industrielles de matières particulaires et de dioxyde de soufre atteignaient respectivement 31 300 et 9 956 tonnes en 1975, 11 251 et 8 434 tonnes en 1979. La diminution est en partie attribuable aux dépenses considérables faites par les usines de ferro-alliages du Québec et celles d'alumine fondue de l'Ontario pour réduire la pollution atmosphérique. Aucune mesure correctrice n'a été prise par les usines de carbure de silicium, et il en est de même pour une fonderie de ferro-alliages au Québec.

## ABSTRACT

This report provides the technical background for the ferroalloy production and allied industries. It includes emission data for 1975 as well as an assessment of available control strategies that could be applied to both new and existing operations in these industries.

The industries produce ferroalloys (including silicon metal and calcium carbide), fused alumina and silicon carbide. Ferroalloys are mainly used in alloying steel, while fused alumina and silicon carbide are extensively used in bonded abrasives and coated abrasives. The major non-abrasive use is in the production of refractories.

Emissions of particulates and sulphur dioxide from the industries during 1975 were calculated at 31 300 tonnes and 9 956 tonnes respectively. Estimates for 1979 were 11 251 tonnes and 8 434 tonnes respectively. The reductions are partly attributable to large expenditures in air pollution control invested by Quebec ferroalloy plants and Ontario fused alumina plants. One ferroalloy smelting furnace in Quebec and the silicon carbide plants still remain uncontrolled.

## TABLE DES MATIÈRES

	Note préliminaire	
	Résumé/Abstract	
	Liste des figures	
	Liste des tableaux	
	Facteurs de conversion au système métrique	
	Glossaire	
<b>1</b>	<b>Introduction</b>	
1.1	Portée de l'étude	1
1.2	But de l'étude	1
1.3	Sources d'information	1
<b>2</b>	<b>Description de l'industrie</b>	
2.1	Taille	2
2.2	Emplois	2
2.3	Répartition géographique	2
2.4	Produits	2
<b>3</b>	<b>Les procédés industriels</b>	
3.1	Information générale	6
3.1.1	Ferro-alliages	6
3.1.2	Alumine fondue	6
3.1.3	Carbure de silicium	6
3.2	Schéma de fonctionnement	6
3.3	Étapes du procédé	7
3.3.1	Matières premières	7
3.3.2	Séchage des matières premières	7
3.3.3	Concassage et criblage	7
3.3.4	Frittage des fines de minerai et de coke	7
3.3.5	Préparation des charges et chargement du four	7
3.3.6	Fonctionnement des charges et chargement du four	10
3.3.7	Évacuation du produit du four	17
3.3.8	Broyage et préparation des produits	17
<b>4</b>	<b>Types d'émissions</b>	
<b>5</b>	<b>Données nationales sur les émissions de particules</b>	21
5.1	Émissions attribuables à des procédés industriels canadiens	21
5.2	Données recueillies au moyen des questionnaires de 1976	21
<b>6</b>	<b>Techniques antipollution</b>	
6.1	Information générale	27
6.2	Installations existantes	27
6.2.1	Stockage des matières premières	27
6.2.2	Séchage des matières premières	27
6.2.3	Concassage et criblage du minerai trop gros	27
6.2.4	Frittage des fines de minerai et de coke	27
6.2.5	Fonctionnement des fours	27

## VI

6.2.6	Étape de la coulée	28
6.2.7	Étape du moulage	30
6.2.8	Broyage et préparation des produits	30
6.3	Nouvelle technique	30
6.3.1	Ferro-alliages et alumine fondue	30
6.3.2	Carbure de silicium	35
6.4	Évaluation des techniques antipollution	35
6.4.1	Généralités	35
6.4.2	Meilleure technique applicable	35

### Références Bibliographie

Annexe 1	Facteurs d'émission de particules dans le cas de fours ouverts, sans équipement antipollution	40
Annexe 2	Intervalles de variation des facteurs d'émission dans le cas d'émissions épurées de particules	41
Annexe 3	Normes d'émission de particules provenant de l'industrie des ferro-alliages dans divers pays pour différentes années	42
Annexe 4	Composition des ferro-alliages, de l'alumine fondue et du carbure de silicium	43

## LISTE DES FIGURES

1	Usines canadiennes de ferro-alliages, d'alumine fondue et de carbure de silicium en 1975	4
2	Schéma de fonctionnement pour la fabrication de ferro-alliages, indiquant les points d'émission	8
3	Schéma de fonctionnement pour la fabrication d'alumine fondue	9
4	Schéma de fonctionnement pour la fabrication de carbure de silicium	9
5	Coupe transversale verticale d'un four à arc immergé pour ferro-alliages, et installations auxiliaires	11
6	Four ouvert	12
7	Four semi-étanche	12
8	Four étanche	13

9	Système d'épuration de fumées, grande vitesse, pour four à arc immergé	29
10	Dépoussiéreurs à sacs filtrants avec montage de refroidissement pour four à arc immergé	29
11	Modèle du corps d'un four Elkem à deux composantes	31
12	Épurateur Aronetics (à mélange vapeur-eau)	33
13	Four vertical à cuve avec four de ferromanganèse haute teneur	34

### LISTE DES TABLEAUX

1	Capacité et production des usines canadiennes de ferro-alliages en 1975	3
2	Capacité et production des usines canadiennes d'alumine fondue et de carbure de silicium en 1975	3
3	Types de ferro-alliages, d'abrasifs et de matières réfractaires produits au Canada en 1975	5
4	Les émissions de particules selon l'étape du procédé, dans les usines canadiennes de ferro-alliages et dans les secteurs connexes	20
5	Émissions de particules, dues à des procédés industriels en 1976	22
6	Évaluation des émissions de particules solides et de dioxyde de soufre pour 1975, attribuables aux usines canadiennes de ferro-alliages et aux industries connexes	23
7	Évaluation des émissions de particules pour 1975, pour chaque étape industrielle, par les usines canadiennes de ferro-alliages et les industries connexes	27
8	Évaluation des facteurs d'émission moyens de particules solides et de dioxyde de soufre en 1975, pour chaque étape des procédés, en ce qui concerne les usines canadiennes de ferro-alliages et des industries connexes	25
9	Évaluation des émissions de particules et de dioxyde de soufre provenant des usines canadiennes de ferro-alliages et des industries connexes en 1979	26

## FACTEURS DE CONVERSION AU SYSTÈME MÉTRIQUE

---

Unités impériales	(multipliées par)	Unités SI
British thermal unit (Btu)	1054	Joule (J)
British thermal unit (Btu)	0,293	Watt (W)
Pied cube (pi <sup>3</sup> )	0,0283	Mètre cube (m <sup>3</sup> )
Degré Farenheit	5/9 (°F-32)	Degré Celsius (°C)
Pied (pi)	0,3048	Mètre (m)
Pouce (po)	0,0254	Mètre (m)
Pouce (po)	2,54	Centimètre (cm)
Pouce d'eau	248,8	Pascal (Pa)
Livre (lb)	0,4536	Kilogramme (kg)
Tonne, courte	0,9072	Tonne

---

## GLOSSAIRE

**Brassage:** moyen par lequel la partie supérieure de la charge du four est remuée. Celle-ci se trouve ainsi relâchée et permet la libre circulation des gaz vers le haut.

**Chambre de filtration:** grande enceinte logeant les filtres en tissu destinés à épurer les courants gazeux provenant d'un four ou d'une source d'émission, et servant à récupérer les oxydes métalliques et d'autres matières en suspension dans les gaz.

**Chargement:** processus par lequel les matières brutes (charge) sont introduites dans le four.

**Coulée:** procédé par lequel le laitier ou le produit est retiré des fours à arc électrique immergé.

**Cyclone:** séparateur par inertie, sans pièces mobiles; il sépare les particules de matière du gaz porteur en transformant la vitesse d'un courant d'entrée en un double vortex confiné à l'intérieur du cyclone.

**Dépoussiéreur à sacs filtrants:** appareil utilisant des sacs filtrants faits de fibres synthétiques, naturelles ou de verre, disposés dans une chambre de filtration, pour éliminer des particules de matières solides dans un courant d'air ou un autre gaz.

**Dépoussiéreur par voie humide:** appareil qui utilise un liquide pour éliminer ou aider à éliminer des dispersions solides ou liquides dans un gaz porteur.

**Électrofiltre:** séparateur de poussières utilisant un champ électrostatique haute tension, formé par des électrodes négative et positive; l'électrode positive attire et ramasse les particules portées par le gaz.

**Ferro-alliage:** matière intermédiaire utilisée comme additif ou charge dans la fabrication d'acier et d'autres métaux. Dans le passé, ces matières étaient des alliages ferreux, d'où leur nom. Mais aujourd'hui le terme a vu son sens élargi pour englober des produits comme le calcium, le silicium, le carbure de calcium, etc., qui sont produits de la même façon que les vrais ferro-alliages.

**Flux (ou fondant):** matière (ou mélange de matières) qui, en entrant en contact avec d'autres composés, amène ceux-ci à fusion à une température plus basse que leur température normale de fusion.

**Four à arc immergé:** dans les fours de réduction pour ferro-alliages, les électrodes s'enfoncent en général très profondément dans les charges. Cette expression est utilisée pour les fours dont les charges sont presque totalement du type résistance.

**Four Acheson:** four à résistance électrique, utilisé pour chauffer un mélange de sable et de coke par application d'une tension à un noyau de graphite traversant le centre du four en forme d'auge.

## X

**Four étanche:** four électrique comportant un couvercle refroidi à l'eau à sa partie supérieure, pour limiter l'admission de l'air de combustion des gaz du procédé de réduction. Les électrodes peuvent être munies de manchons (joints étanches fixes), la charge étant introduite à travers des orifices dans la voûte du four, ou encore par des espaces autour des électrodes.

**Four Higgins:** four cylindrique, à creuset et à chargement discontinu, avec revêtement réfractaire; il sert à faire fondre des mélanges de bauxite, de copeaux d'acier et de coke grâce à l'énergie d'un arc électrique.

**Four ouvert:** four électrique où la surface de la charge est exposée à l'atmosphère, et dont les produits gazeux sont brûlés au contact de l'air.

**Frittage:** formation de grandes particules, de conglomérats ou de masses à partir de petites particules par chauffage seul ou par chauffage et compression, de telle façon que certains constituants des particules s'unissent, se fondent ou se lient ensemble.

**Laitier:** matière plus ou moins fondue et vitrifiée, séparée du minerai au moment de la réduction du métal.

**Laveur à Venturi:** appareil d'épuration des gaz dans lequel le liquide injecté dans l'étranglement d'un ajutage de Venturi sert à débarrasser le gaz traversant l'ajutage de ses particules solides.

**m<sup>3</sup>:** mètre cube de gaz à la température et à la pression ambiantes.

**m<sup>3</sup> standard:** mètre cube standard. Volume de gaz mesuré à des conditions normales, soit 101,35 kilopascals de pression et 25 °C.

**Micron:** unité de mesure égale à 1/25 000<sup>e</sup> d'un pouce, ou un millionième d'un mètre; souvent représenté par la lettre grecque  $\mu$ .

**Oxydes de métaux alcalins, alcalino-terreux, etc.:** famille d'oxydes, tels les oxydes de calcium, de magnésium, de sodium, etc.

**Pare-étincelles:** dispositif installé au-dessus de la partie supérieure du four et en face de l'appareil d'épuration des gaz, pour éliminer les jets d'étincelles.

**Période de coulée:** laps de temps pendant lequel le produit ou le laitier coule du four à arc immergé.

**Poche (de coulée):** contenant à revêtement réfractaire, dans lequel est versé du métal en fusion à partir d'un four.

**Réaction endothermique:** réaction dans laquelle il y a absorption de chaleur.

**Réaction exothermique:** réaction dans laquelle il y a dégagement de chaleur.

**Séparateur de poussières:** appareil éliminant les particules solides dans un courant gazeux.

**Séparateur mécanique:** séparateur de poussières, comme un cyclone, un séparateur par centrifugation, etc.

## **1 INTRODUCTION**

### **1.1 Portée de l'étude**

La présente étude décrit les techniques d'assainissement de l'air dans les usines fabriquant des ferro-alliages (y compris le silicium et le carbure de calcium), de l'alumine fondue et du carbure de silicium. Les points suivants sont examinés: taille et situation géographique des usines; produits; importance relative des industries concernées pour l'économie canadienne; procédés; techniques de réduction des émissions. Le coût de la lutte contre la pollution est évalué d'après les données fournies dans la documentation, auxquelles s'ajoutent les renseignements obtenus de divers secteurs industriels.

### **1.2 But de l'étude**

La Direction générale de l'assainissement de l'air a élaboré des lignes directrices nationales au sujet des émissions provenant des industries des ferro-alliages et des industries connexes, en fixant des limites d'émission à l'intention des nouvelles usines. Ces lignes directrices renferment également des données pour l'évaluation des moyens de réduction des émissions par les usines déjà existantes, ainsi que des renseignements techniques et industriels utiles en vue de l'élargissement des lignes directrices.

### **1.3 Sources d'information**

La principale source d'information a été le questionnaire de 1976 s'adressant aux fabricants de ferro-alliages et aux industries connexes. Parmi les autres sources d'information, on peut citer la Bibliothèque scientifique nationale, des journaux techniques, des publications des fabricants sur leurs équipements et l'EPA étatsunienne.

Il y a eu des échanges avec des organismes de réglementation provinciaux, avec le Conseil national de recherches du Canada, ainsi qu'avec les ministères fédéraux suivants: Énergie, Mines et Ressources; Industrie et Commerce; Statistique.

## 2 DESCRIPTION DE L'INDUSTRIE

### 2.1 Taille

Les tableaux 1 et 2 présentent les chiffres de capacité et de production de 17 usines canadiennes en 1975. À l'époque de l'étude, plusieurs de ces usines étaient encore loin de leur capacité nominale en raison de la faible demande en ferro-alliages par l'industrie de l'acier. La production totale des 17 usines en 1975 était de 276 944 tonnes de ferro-alliages, 120 899 tonnes d'alumine fondue et 97 353 tonnes de carbure de silicium. En 1976, une nouvelle usine québécoise ayant une capacité nominale de 50 803 tonnes par année de silicium et de ferrosilicium fut mise en service avec trois fours à arc électrique immergé (70 mégawatts).

### 2.2 Emplois

En 1975, ces usines employaient 2 623 personnes. À ce nombre, vinrent s'ajouter 240 employés en 1976 au moment de la mise en service d'une nouvelle usine de ferro-alliages au Québec.

### 2.3 Répartition géographique

Toutes les usines canadiennes de ferro-alliages et les industries connexes sont situées en Ontario et au Québec (figure 1). Presque toutes les usines se trouvent près de sources d'énergie électrique peu coûteuse et près des principaux marchés, ce qui abaisse les coûts de fabrication et de transport.

### 2.4 Produits

Le tableau 3 donne la liste des types de ferro-alliages, d'abrasifs et de produits réfractaires fabriqués au Canada en 1975. La valeur de la production dépassait 200 millions de dollars.

Les ferro-alliages produits au Canada sont surtout destinés aux aciers spéciaux. L'addition de ferro-alliage améliore les propriétés de l'acier, comme leur solidité et leur résistance à la corrosion et à la chaleur. Les ferro-alliages sont également employés dans les fonderies. Le silicium sert surtout dans les alliages d'aluminium, mais on le retrouve aussi dans les lubrifiants de type silicone, les fluides hydrauliques, les résines, les matières plastiques, les émaux et les caoutchoucs. Enfin, on le trouve dans d'autres applications, comme dans les alliages ferreux et non ferreux et dans le raffinage. Le silicium purifié est utilisé comme semi-conducteur dans les circuits électroniques, et le carbure de calcium est employé principalement dans la fabrication de l'acétylène. Les principaux abrasifs et produits réfractaires sont l'alumine fondue et le carbure de silicium. Ils sont beaucoup utilisés dans les abrasifs agglomérés ou appliqués, et comme grenailles pour le travail de nombreux matériaux métalliques et non métalliques. En dehors des abrasifs, c'est à la fabrication de produits réfractaires que servent surtout les ferro-alliages.

Tableau 1  
Capacité et production des usines canadiennes de ferro-alliages en 1975

	Capacité du four (mégawatts)		Production (t*/an)
	Nominale	Réelle	
Québec	231	182	239 794
Ontario	20	18	37 150
	<u>251</u>	<u>200</u>	<u>276 944</u>

\*t: tonne = 2 204,6 lb = 1,10 t courte = 1 000 kilogrammes

Tableau 2  
Capacité et production des usines canadiennes d'alumine fondue et de carbure de silicium en 1975

	Capacité du four (mégawatts)		Production (t*/an)	
	Nominale	Réelle	Produit primaire	Produit secondaire ferrosilicium
Alumine fondue				
Ontario	81,8	69,2	106 374	10 679
Québec	4,9	4,9	14 515	1 724
	<u>86,7</u>	<u>74,1</u>	<u>120 889</u>	<u>12 403</u>
Carbure de silicium				
Ontario			31 951	
Québec			65 402	
			<u>97 353</u>	

\* t: tonne = 2 204,6 lb = 1,10 t courte = 1 000 kilogrammes

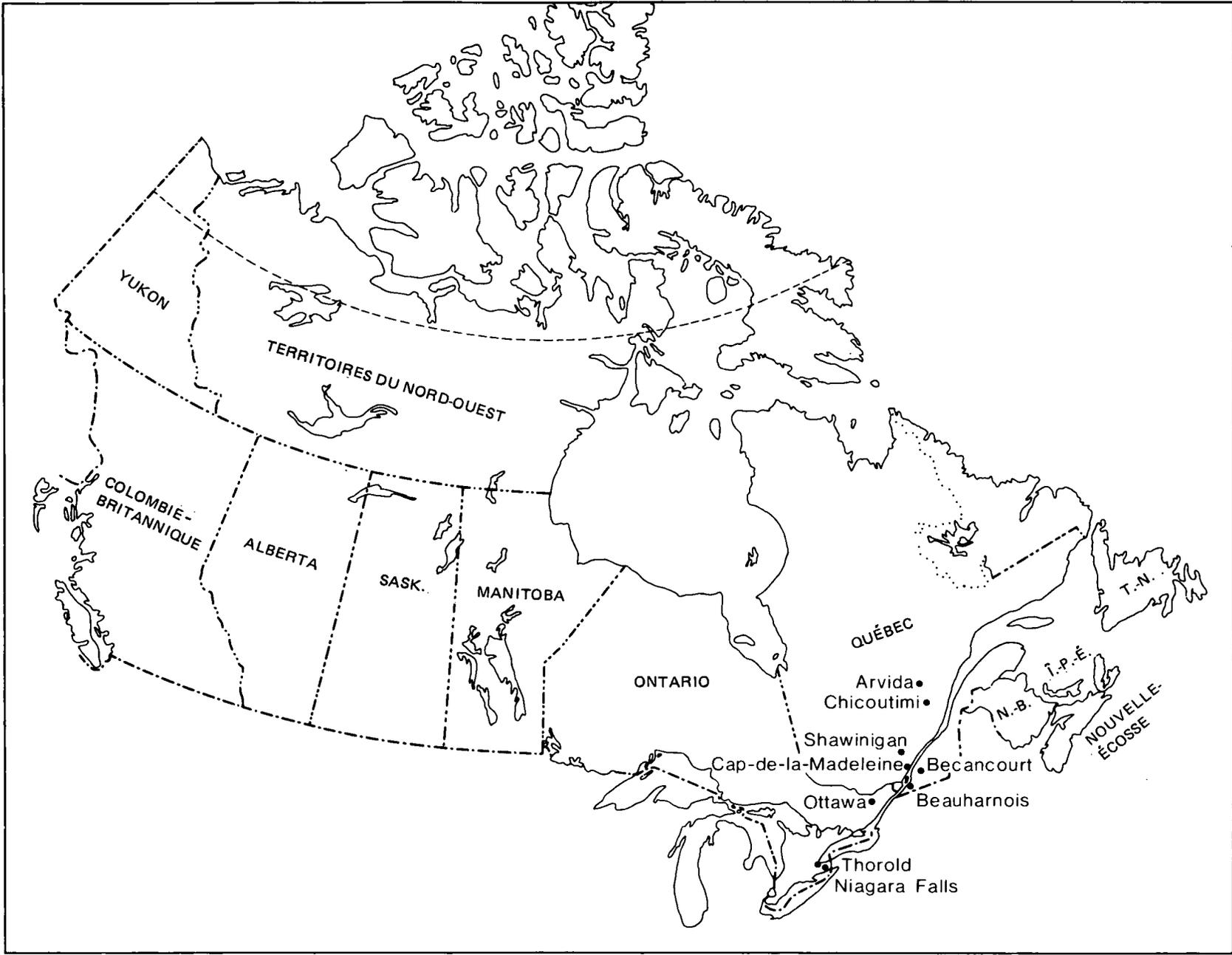


Figure 1 Usines canadiennes de ferro-alliages, d'alumine fondue et de carbure de silicium en 1975

Tableau 3  
Types de ferro-alliages, d'abrasifs et de matières  
réfractaires produits au Canada en 1975 (en tonnes)

Ferro-alliages		
Ferromanganèse	FeMn	51 710
Silicomanganèse	SiMn	22 680
Ferrosilicium	FeSi	95 244*
Silicium métallique	Si	3 433
Carbure de calcium	CaC <sub>2</sub>	117 936
Autres		861
Total		291 864
Abrasifs et matières réfractaires		
Alumine fondue	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	116 983
Zircone-alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ZrO <sub>2</sub>	3 906
		120 889
Carbure de silicium	SiC	97 353
Total		218 242

\* Inclut 12 403 tonnes de ferrosilicium, produit secondaire (12 à 16 % de silicium), lors de la production d'alumine fondue

### 3 LES PROCÉDÉS INDUSTRIELS

#### 3.1 Information générale

**3.1.1 Ferro-alliages (1, 2).** - Quatre principales techniques ou installations sont utilisées pour la production des ferro-alliages: a) haut-fourneau; b) four électrique de fusion; c) alumino-silicothermie; d) dépôt galvanique. Au Canada on emploie soit la fusion électrique, soit la méthode thermique, mais le principal procédé de fabrication utilise les fours à arc électrique immergé, dont traite essentiellement le présent rapport. Les principaux produits du four de fusion d'arc électrique sont les suivants: ferrosilicium, silicium métallique, ferromanganèse, silicomanganèse et carbure de calcium. Leur production atteignait 288 303 tonnes<sup>1</sup> en 1975. Tous ces produits sont fabriqués dans des fours ouverts et dans des fours étanches, les uns et les autres présentant des avantages et des inconvénients. Le four ouvert offre une grande flexibilité, et il peut être transformé de façon à passer de la production d'un type ou d'une famille de ferro-alliages à l'autre. Le four étanche présente une flexibilité moindre, mais il pollue moins l'atmosphère. Il nécessite un prétraitement de la charge, comme le séchage des matières brutes et le frittage (ou sintérisation) des fines de minerai et de coke.

En 1975, la production par le procédé de réduction thermique atteignait 861 tonnes des produits suivants: ferrotungstène, ferromobium, ferromolybdène, ferrovanadium et alliages à base de nickel.

**3.1.2 Alumine fondue (3, 4).** - Les fours Higgins et les fours de fusion servent à la production d'oxydes d'aluminium fondus. Les deux types de fours emploient l'énergie électrique pour faire fondre la charge. Le four Higgins est du type à creuset, à charges, alors que le four de fusion est plutôt un four culbutant ouvert classique, à arc immergé. Le four de fusion est plus avantageux, car il peut fonctionner en continu et possède une capacité de fusion beaucoup plus grande. Il permet donc des économies non négligeables sur le plan des frais d'exploitation (moins de main-d'oeuvre et économie d'énergie) et des coûts en équipement. En 1975, la production totale des usines d'alumine fondue atteignait 120 889 tonnes<sup>2</sup>.

**3.1.3 Carbure de silicium (5, 6).** - Le carbure de silicium est fabriqué dans un four à résistance électrique, de forme rectangulaire en auge, mesurant généralement 12 m de longueur, 2,5 m de hauteur et 2,5 m de largeur. Le four est appelé Acheson, du nom d'Edward Goodrich Acheson qui fabriqua les premiers cristaux de carbure de silicium dans un four électrique à l'extrémité d'une électrode de carbone en 1891. Depuis cette époque, la technique de fabrication du carbure de silicium est presque demeurée inchangée au Canada. Jusqu'ici, au Canada, aucun équipement antipollution n'a été installé pour l'épuration des gaz s'échappant du four. En 1975, la production de carbure de silicium de qualité abrasive (> 95 p. cent de SiC) et de qualité métallurgique (90 à 95 p. cent de SiC) atteignait 97 353 tonnes.

#### 3.2 Schéma de fonctionnement

Les figures 2, 3 et 4 présentent des schémas de fonctionnement types pour les trois procédés de fabrication.

<sup>1</sup> Cela inclut 12 403 tonnes de ferrosilicium, produit secondaire, obtenu dans le procédé de fabrication d'alumine fondue.

<sup>2</sup> Cela n'inclut pas les 12 403 tonnes de ferrosilicium, produit secondaire.

### 3.3 Étapes du procédé

**3.3.1 Matières premières.** - La plupart des installations de fusion ou de réduction sont proches de sources d'électricité peu coûteuse, ainsi que des principaux marchés. Le manganèse, le quartz, la bauxite et d'autres minerais oxydés, généralement sous forme concentrée, ainsi que d'autres matières brutes, comme la chaux et le charbon/coke, sont habituellement transportés jusqu'aux aires (intérieures ou extérieures) de stockage de l'usine, en attendant d'être utilisés.

**3.3.2 Séchage des matières premières.** - Les minerais et le coke réducteur sont en général séchés dans des sécheurs rotatifs séparés, de façon à faire baisser leur teneur en humidité résiduelle à environ 3 à 4 p. cent. Cette baisse est nécessaire si on veut alimenter de façon régulière les fours à arc électrique immergé, semi-étanches ou étanches. On réduit ainsi les risques dans le cas d'un four fonctionnant en continu, advenant un éboulement suivi d'un chargement soudain d'une grande quantité de mélange froid. Dans la fabrication de matières abrasives et réfractaires, seul le coke servant de réducteur est séché.

**3.3.3 Concassage et criblage.** - Pour un fonctionnement efficace et sûr des fours à arc électrique immergé, étanches ou semi-étanches, le minerai sec trop gros est broyé et trié selon sa taille, puis dirigé vers des silos de stockage. Le minerai a généralement une grosseur de 7,6 x 2,5 cm et de 2,5 x 0,6 cm, le coke dépassant habituellement 0,6 cm. Les fractions de minerai et de coke inférieures à 0,6 cm sont transportées jusqu'à l'unité de frittage, où elles sont agglomérées.

**3.3.4 Frittage des fines de minerai et de coke.** - Ce procédé n'est utilisé que dans la fabrication de ferro-alliages avec un four semi-étanche ou étanche à arc électrique immergé. Le minerai et le coke menu (ou fines) alimentent par gravité un broyeur, pour être ensuite mélangés avec des fines de recirculation et de l'eau; ce mélange est envoyé dans la machine de frittage. Cette dernière, à tirage en bas, et avec la charge portée par un convoyeur sans fin (fait de grilles liées les unes aux autres) utilise des brûleurs alimentés au mazout pour agglomérer les fines particules du mélange de charge. Les fines dans la charge, en plus de fournir de l'énergie, donnent un produit dur et poreux. Après combustion complète et refroidissement, le produit de frittage est évacué et broyé, puis séparé au crible en trois fractions: a) les éléments inférieurs à 0,6 cm sont renvoyés au broyeur; b) s'ils ont entre 0,6 cm et 1,9 cm, ils servent de couche pour la sole, le surplus étant transféré dans un silo; c) les fractions entre 7,6 cm et 1,9 cm sont stockées dans un silo pour être utilisées ultérieurement comme mélange de charge dans l'alimentation du four.

**3.3.5 Préparation des charges et chargement du four.** - Le mélange des silos de stockage est divisé en charges dans une trémie peseuse. Le mélange est déchargé sur un convoyeur, puis déposé dans une trémie de compensation pour vérifier le poids total des charges. Ensuite, le mélange est déversé dans les godets d'un monte-charge, d'où il passe dans les silos de chargement du four. Les matières préalablement mélangées sont introduites dans le four à arc, en-dessous des silos. Dans la fabrication du carbure de silicium, le mélange est chargé sur le lit horizontal du four en forme d'auge à l'aide d'une chargeuse ou d'un convoyeur roulant ouvert, avec système de chute.

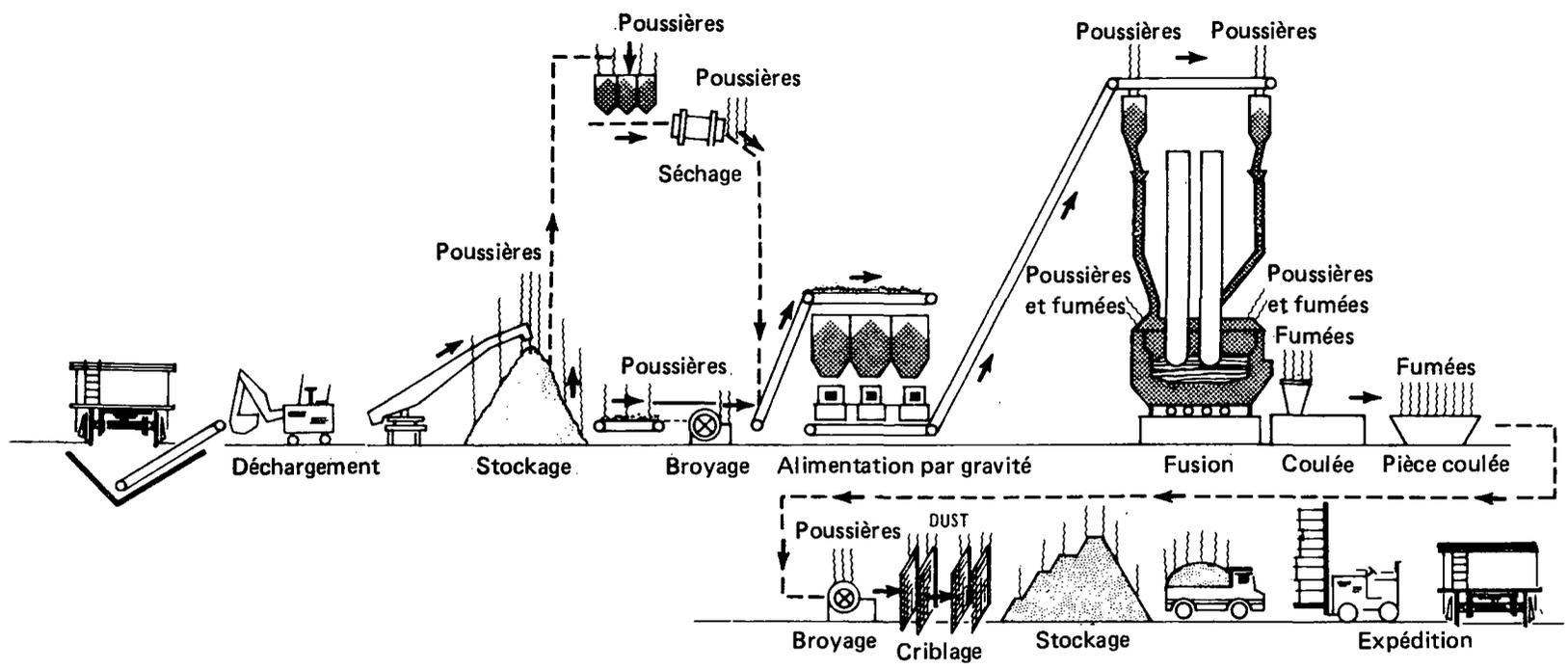


Figure 2 Schéma de fonctionnement pour la fabrication des ferro-alliages, indiquant les points d'émission possibles

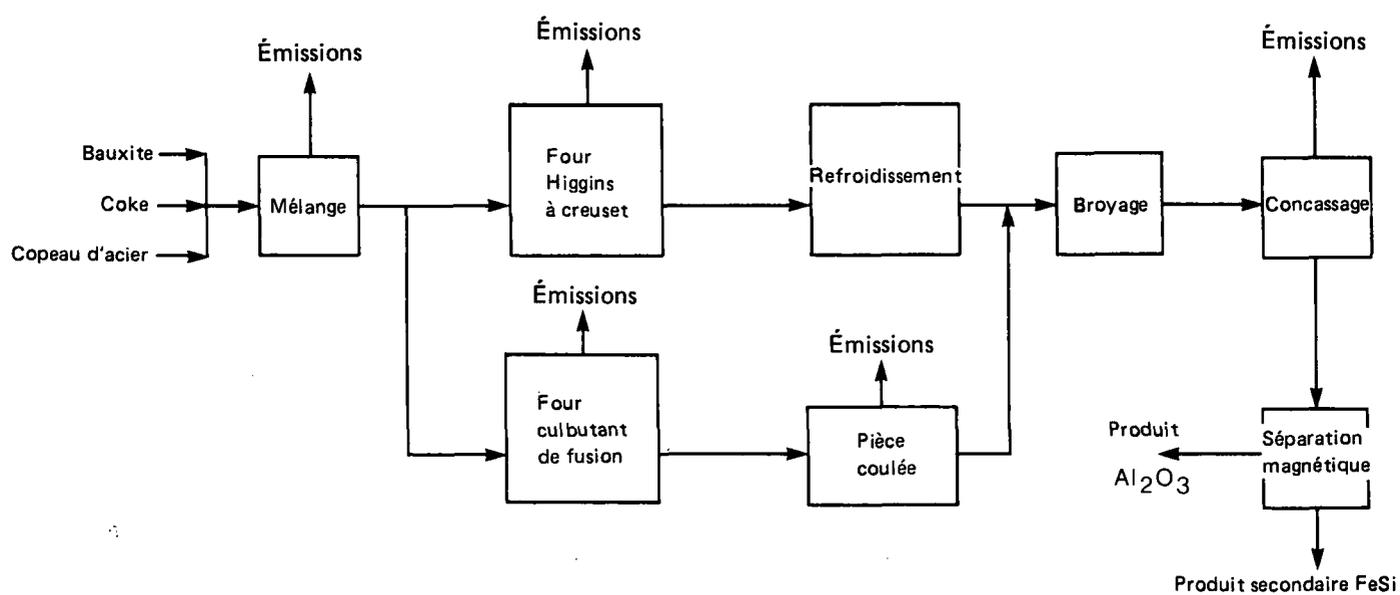


Figure 3 Schéma de fonctionnement pour la fabrication d'alumine fondue

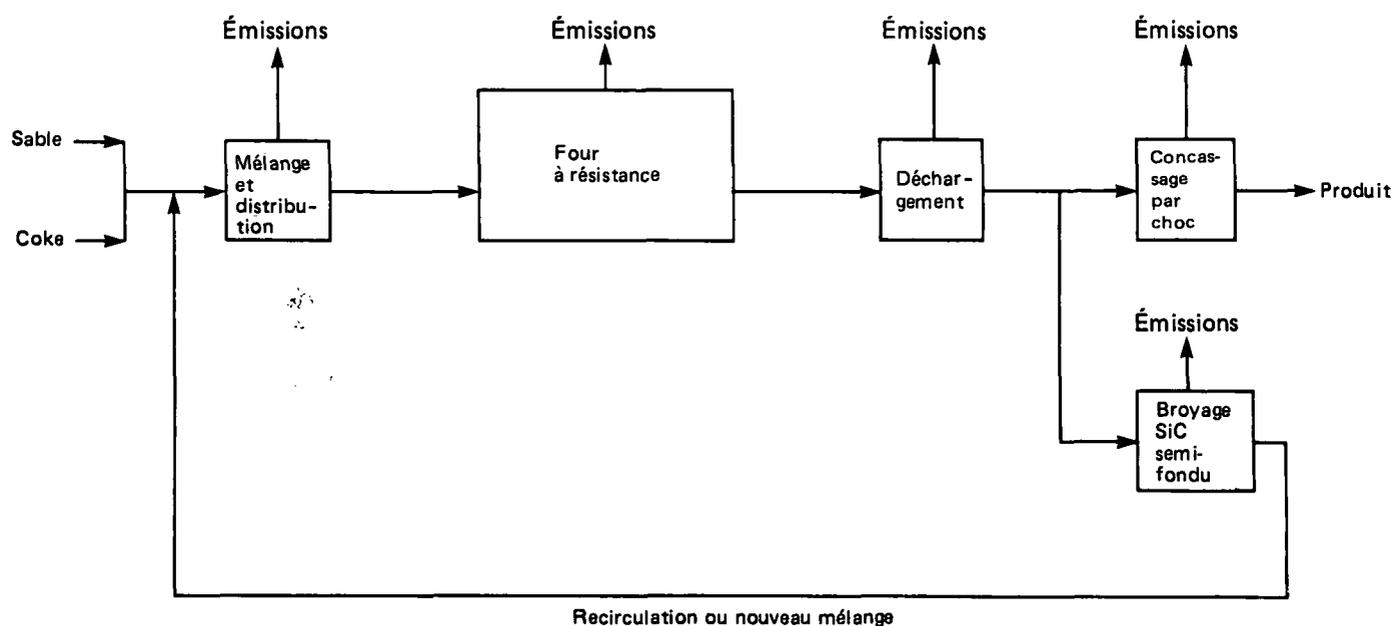


Figure 4 Schéma de fonctionnement pour la fabrication de carbure de silicium

### 3.3.6 Fonctionnement du four

3.3.6.1 Fusion électrique (1). - Les fours ouverts ainsi que les fours semi-étanches ou étanches à arc immergé peuvent servir à la fusion des ferro-alliages. La figure 5 montre un four type à arc immergé. Il est constitué d'un creuset à revêtement réfractaire haute température, avec un trou de coulée à la base du four, par lequel le métal fondu et le laitier s'écoulent à intervalles réguliers. Au-dessus de la sole, pendent verticalement des électrodes, généralement trois, disposées en delta. Les électrodes de carbone, par un système de plaques de contact, de portes-électrodes autorisant des déplacements verticaux et de barres omnibus raccordées aux transformateurs du four, convertissent l'énergie électrique en énergie thermique au sein même de la charge du four.

Les électrodes pénètrent à l'intérieur de la charge du four, à une profondeur de 0,9 à 1,5 m. Celle-ci varie continuellement selon les besoins, grâce à des dispositifs d'entraînement mécanique ou hydraulique, de façon à maintenir une charge électrique constante. Le four à arc immergé classique utilise du carbone pour réduire les oxydes métalliques dans la charge, et produit en continu de grandes quantités de monoxyde de carbone, de fumées de métal surchauffé, ainsi que d'autres gaz à partir des matières volatiles et de l'humidité présentes dans la charge du four. Les gaz chauds de réaction s'élevant à travers la charge du four entraînent de fines particules à partir des zones à haute température de la charge (2 200-2 800 °C) à l'intérieur du four.

Dans les fours ouverts, le monoxyde de carbone brûle avec l'air amené par la partie supérieure du foyer, ce qui donne un grand volume de gaz à haute température. Dans les fours semi-étanches ou étanches, presque tout le monoxyde de carbone et les autres gaz sont entraînés ultérieurement comme source de chaleur pour les procédés, comme le séchage des matières brutes, ou encore il est brûlé dans les gaz s'échappant de la cheminée.

Voici une description détaillée des trois types de fours à arc immergé.

Fours ouverts. - La figure 6 montre un four ouvert. Il comporte une hotte à refroidissement par eau, normalement à 1,8 à 2,4 m au-dessus du bord du creuset du four. L'ouverture verticale est nécessaire pour le brassage de la charge. Le brassage empêche la formation de croûte et de ponts qui nuiraient à la descente uniforme de la charge à l'intérieur du four; le brassage évite également que ne soient endommagées les composantes du four. La grande ouverture entre le creuset et la hotte du four permet à l'air ambiant d'entrer largement sous la hotte, ce qui a comme effet de diluer les gaz de dégagement de 50 à 1. L'entrée d'air ambiant peut être réduite en diminuant l'ouverture entre la hotte et le four, soit par addition d'un bord à la hotte, soit par le montage de rideaux de chaînes sur le périmètre de la hotte.

Fours semi-étanches. - La figure 7 montre un four semi-étanche. Ce type de four comporte un couvercle à refroidissement par eau, qui scelle presque complètement le four, mais laisse un espace autour des trois électrodes pour le chargement des matières brutes. Les gaz et les fumées produits par le four sont entraînés du dessous du couvercle, à travers une ou plusieurs conduites, jusqu'à un dispositif d'épuration des gaz. Il entre très peu d'air ambiant dans un four semi-étanche. Les gaz provenant de ce type de four sont riches en monoxyde de carbone et peuvent être employés comme combustible. Cependant, les matières de charge ne ferment que partiellement les anneaux autour des électrodes qui peuvent donc laisser passer des émissions. Ces dernières sont généralement contenues et recueillies en maintenant une pression légèrement négative dans le four, ou en installant des hottes autour des électrodes.

Comme ils ne permettent aucun brassage, les fours semi-étanches n'ont jamais été utilisés au Canada pour la production de silicium ou d'alliages qui en contiennent plus de 75 p. cent.

Fours étanches. - Un four étanche, comme celui de la figure 8, comporte une voûte refroidie à l'eau qui scelle complètement le four. Comme il n'y a pas d'autres ouvertures

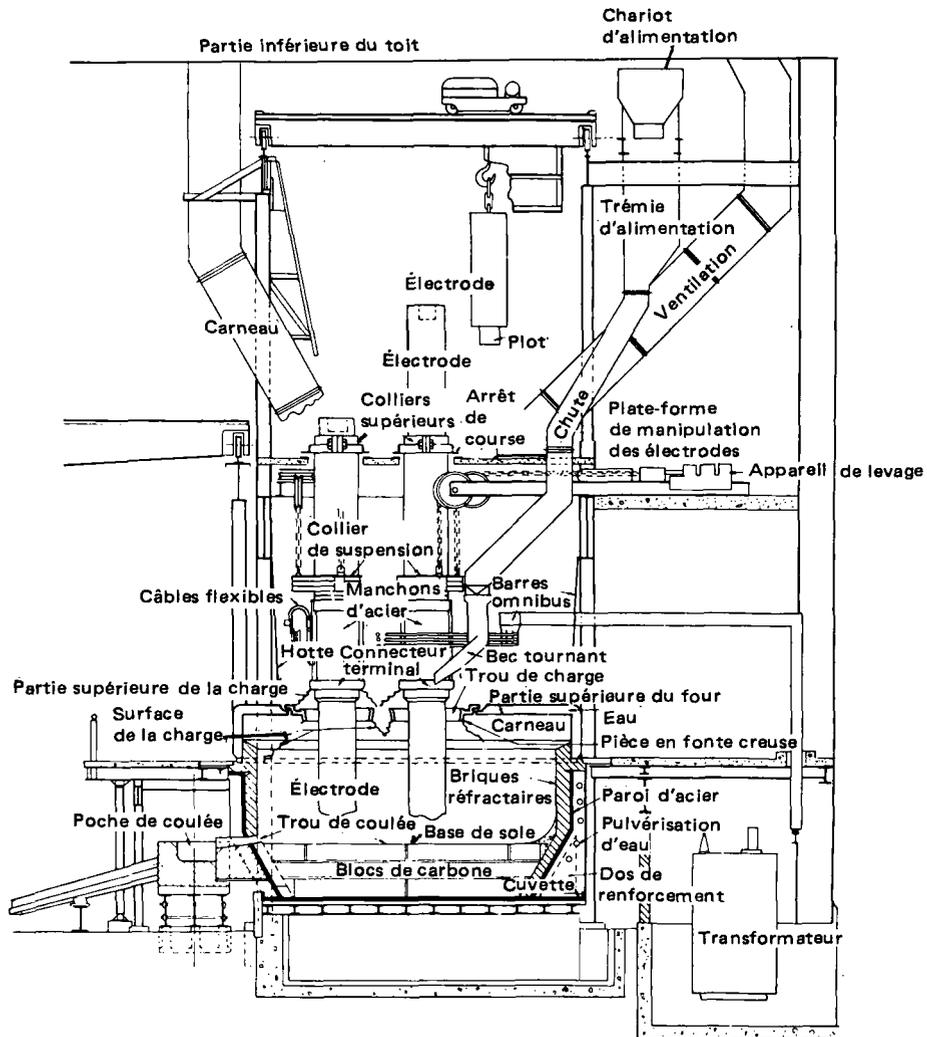


Figure 5 Coupe transversale verticale d'un four à arc immergé pour ferro-alliages, et installations auxiliaires (hommage d'Union Carbide Metals Co.)

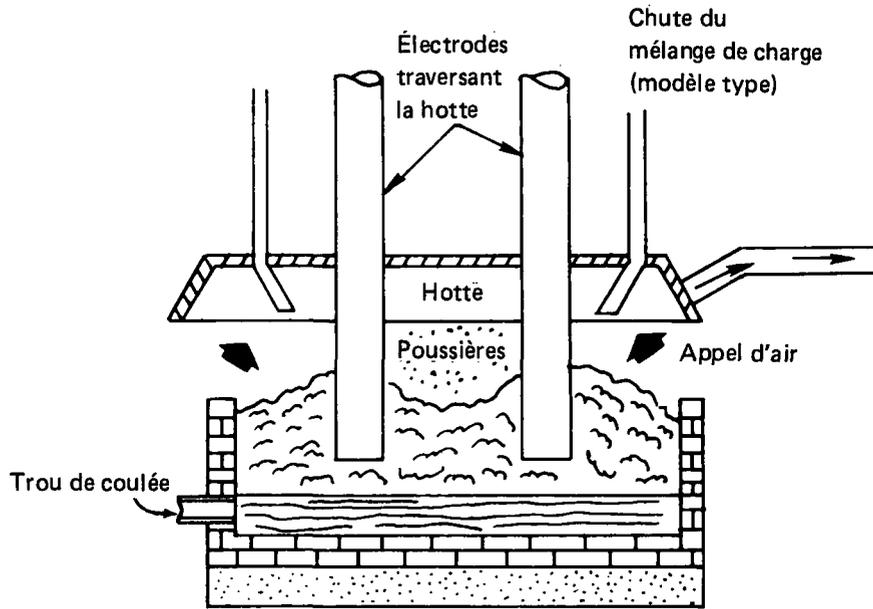


Figure 6 Four ouvert

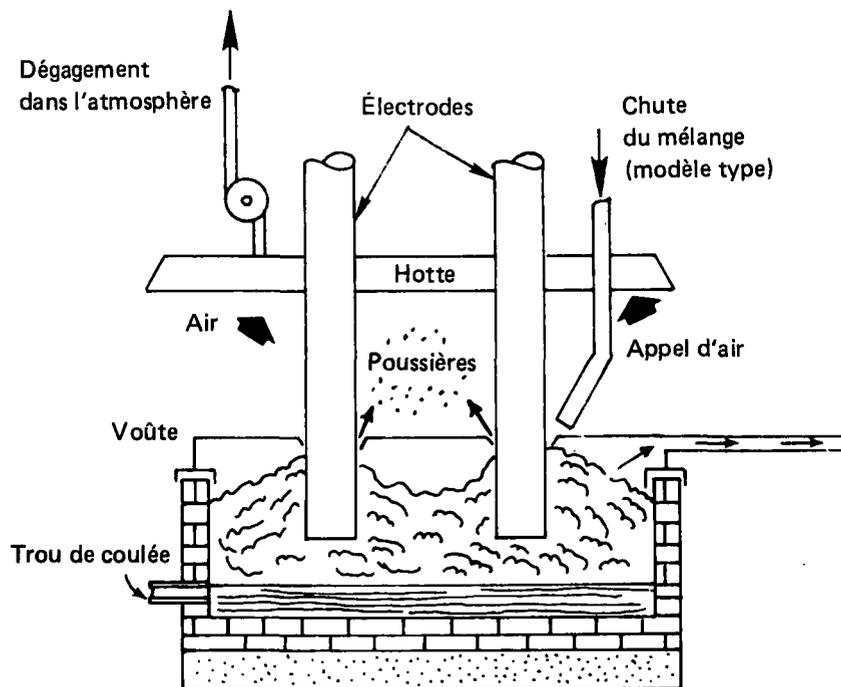


Figure 7 Four semi-étanche

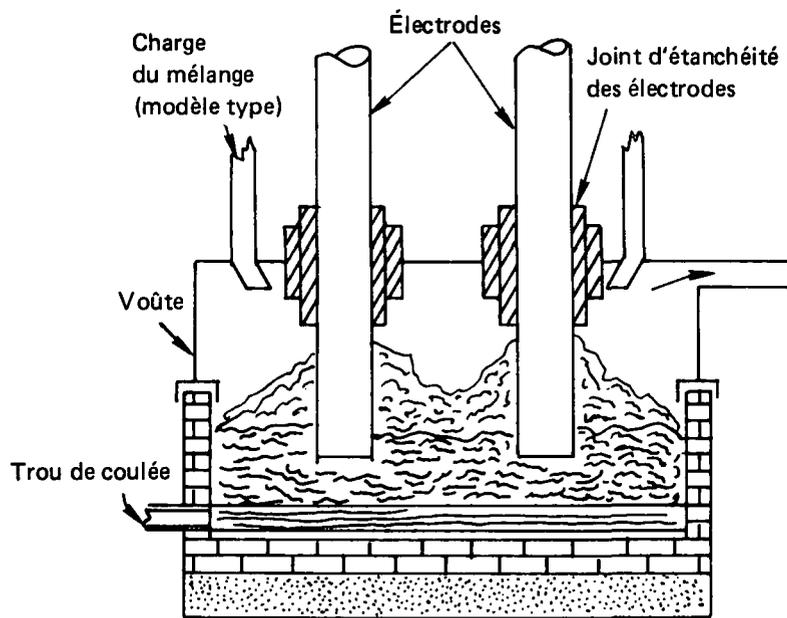


Figure 8 Four étanche

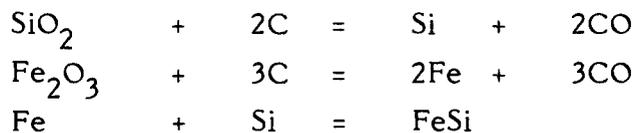
que celles qui apparaissent sur la figure, il ne peut y avoir brassage comme le requiert la fabrication du silicium et des alliages de ferro-silicium à plus de 75 p. cent de silicium. En rendant étanche la partie supérieure du four, y compris l'espace autour des électrodes, les chutes pour la charge et les ouvertures, tous les gaz du four peuvent être recueillis sans qu'il ne s'échappe de fumée et sans qu'il n'y ait entrée d'air dans le four, ce qui augmenterait le volume des gaz. Les gaz de sortie du four, principalement le monoxyde de carbone, peuvent servir comme combustible.

La préparation de l'alimentation des fours étanches utilisés pour la fabrication de ferro-alliages, comme le ferro-manganèse et le silico-manganèse, requiert les procédés suivants pour la préparation de l'alimentation: séchage; broyage des minerais trop gros; frittage du minerai et du coke menus pour favoriser la descente uniforme de la charge et le dégagement homogène des gaz, requis pour que le four fonctionne sans heurts.

3.3.6.2 Procédés pour les ferro-alliages. - Les principaux procédés canadiens pour les ferro-alliages s'appliquent aux produits suivants: a) alliages au silicium; b) alliages au manganèse; c) carbure de calcium. Ces procédés sont décrits ci-dessous.

Procédés de l'alliage au silicium (7). - La charge du four est constituée de minerai de silice et de matières réductrices comme le coke et le charbon de bois. Pour la fabrication de silicium, on emploie du quartzite de haute pureté (99 p. cent de  $\text{SiO}_2$ ), alors que la production de ferro-silicium nécessite du quartz, de la ferraille et du minerai de fer.

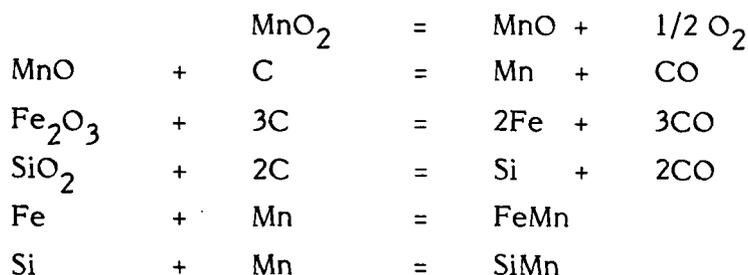
Étant donné que la silice est exposée à la rupture en certains points de transition avant sa fusion à environ 1 723 °C (3 133 °C) et que les gradients thermiques sont très prononcés dans un four de fusion à arc immergé, des fumées de silice risquent d'être produites par une ou plusieurs réactions secondaires pendant la transformation du quartz inférieur (25 à 573 °C) en quartz supérieur (573 à 867 °C), puis en tridymite (867 à 1 470 °C), et enfin en cristobalite (1 470 °C à 1 723 °C). Ainsi, la fusion et l'agglomération de la charge de matières brutes sont caractéristiques dans les procédés de fabrication du silicium et du ferro-silicium supérieur. Ces procédés sont également caractérisés par des souffles de gaz à haute température, généralement au voisinage des électrodes. Les jets de gaz chauds provenant des zones à haute température du four, à la pointe des électrodes, peuvent endommager les composantes du four. Dans la fabrication du silicium, il peut aussi y avoir accumulation de carbure de silicium sur la sole, ce qui augmente les émissions, puisque les électrodes sont plus hautes dans le four. Les procédés de fabrication nécessitent l'utilisation de fours ouverts pour permettre le brassage de la charge, sa descente uniforme et un dégagement uniforme des gaz formés par la réduction du minerai. Les fours semi-étanches ou étanches n'ont pas été utilisés: en effet, comme il ne peut y avoir brassage, un certain danger pourrait en résulter. Contrairement à d'autres procédés pour ferro-alliages, les procédés pour alliages au silicium ne produisent pas de laitier. Les processus généraux de fabrication peuvent être résumés comme suit:



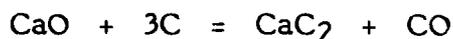
Procédé de fabrication d'alliages au manganèse (8, 9, 10). - Le ferromanganèse et le silicomanganèse sont produits au Canada dans des fours à arc électrique immergé, semi-étanches, étanches ou ouverts. Vu que les minerais de manganèse contiennent une quantité considérable d'eau ainsi que des oxydes supérieurs qui libèrent de l'oxygène

lorsqu'ils sont chauffés à des températures inférieures à 1 000 °C, les fours pour la fabrication d'alliages au manganèse peuvent être soumis à des conditions très rudes. Un dégagement soudain de gaz peut résulter en une éjection d'une partie du mélange du four. De plus, les fours pour le silicomanganèse sont exposés aux bouillonnements du laitier, ce dernier risquant de recouvrir la surface supérieure de la charge, avec comme conséquence une alimentation irrégulière en mélange et une ascension non uniforme des gaz. Les fours semi-étanches et étanches requièrent donc la préparation de l'alimentation, c'est-à-dire le séchage, le concassage des minerais de grande taille et le frittage des fines de minerai et de coke pour favoriser la descente uniforme de la charge et le dégagement régulier des gaz, processus, répétons-le, essentiels pour un bon fonctionnement du four et pour l'obtention de la qualité désirée de produit en fonctionnement continu.

Comme le laitier du four à ferromanganèse contient jusqu'à 40 p. cent de manganèse, il est utilisé ultérieurement pour l'obtention de silicomanganèse, lequel est habituellement intégré dans les procédés industriels de fusion du ferromanganèse. Le laitier obtenu à partir du procédé du silicomanganèse est jeté comme déchet. Les processus généraux de fabrication des alliages au manganèse peuvent être résumés par les réactions suivantes:



Procédés de fabrication du carbure de calcium (1, 4, 11). - Le carbure de calcium ( $\text{CaC}_2$ ) est fabriqué par chauffage de chaux vive ( $\text{CaO}$ ) et de carbone à des températures d'environ 2 000 à 2 200 °C dans un four à arc électrique immergé, où la chaux est réduite par le coke en carbure de calcium et en monoxyde de carbone suivant la réaction:



Le coke métallurgique, le coke de pétrole ou l'antracite sont employés comme source de carbone. Le carbure fondu provenant du four est déversé dans des wagons de refroidissement ou dans des convoyeurs à godets, où il se solidifie. Le carbure de calcium à l'état final est réduit dans un broyeur à mâchoires puis dans un broyeur à cônes pour l'obtention de la taille voulue.

3.3.6.3 Aluminothermie, calciothermie, magnétothermie. - Le smeltage thermique consiste à réduire les oxydes métalliques à l'aide de métaux réducteurs, comme l'aluminium, le calcium ou le magnésium, et à former des oxydes de ces métaux réducteurs. La réaction est suffisamment exothermique, et la composition du mélange de réaction est conçue pour permettre à l'énergie thermique obtenue de fondre les produits de réaction. Le métal se sépare du laitier en raison de l'écart entre les masses spécifiques de ces corps. Dans les cas où la chaleur de réaction n'est pas suffisante pour une séparation efficace du métal et du laitier, il est possible de recourir à des activateurs thermiques comme le chlorate de sodium ou le peroxyde de baryum, lesquels donnent une réaction exothermique avec l'aluminium. En raison de son faible coût par équivalent chimique, de son bas point d'ébullition, de sa grande chaleur de formation, et enfin de la température de fusion relativement basse (2 045 °C) de son oxyde, l'aluminium est le principal métal réducteur utilisé dans ce procédé de fabrication.

Au Canada, cette réduction ne se fait pas en continu. Les réactifs consistent en poudre d'aluminium grossière mélangée avec un oxyde métallique et un peu de fluorine ou un autre fondant pour aider à la séparation du métal et du laitier. La réaction se fait dans un creuset en acier, de 0,9 à 1,2 m de diamètre et de 1,2 m de hauteur, recouvert d'une couche de laitier provenant des réactions précédentes, ou encore dans un puits à lit de sable quartzeux et à parois en acier avec revêtement réfractaire. On amorce la réaction en disposant une petite fraction de la charge dans le contenant et en l'enflammant à l'aide d'une amorce constituée d'une fine poudre d'aluminium et de chlorate ou de peroxyde de baryum. Une fois que la réaction est déclenchée, le reste de la charge est introduit par le haut. La réaction complète est terminée en 10 à 20 minutes ou moins, mais il faut des heures avant que le creuset et son contenu soient refroidis à la température où le laitier peut être détaché du métal sans risque d'oxydation. Bien que la masse de la charge n'excède généralement pas 5 tonnes, il y a dégagement de quantités assez grandes de fumée.

Au Canada, les ferro-alliages suivants sont obtenus par des procédés thermiques: ferrocolumbium, ferromolybdène, ferrotungstène, ferrovanadium et alliages à base de nickel.

3.3.6.4 Procédé de fabrication de l'oxyde d'aluminium fondu (3, 4). - L'oxyde d'aluminium fondu, avec comme produit secondaire le ferrosilicium, est fabriqué par fusion de charges constituées d'un mélange de bauxite<sup>1</sup>, de copeaux d'acier et de coke dans un four Higgins ou dans un four de fusion. En présence de carbone, la silice contenue dans le minerai de bauxite est réduite, et le silicium résultant se combine au fer pour former du ferrosilicium.

Dans le four Higgins, les électrodes sont abaissées jusqu'à un point situé juste au-dessus du niveau de la charge. Il fonctionne de façon discontinue et peut recevoir environ 10 tonnes de charges constituées approximativement de 90 p. cent de bauxite, de 6 p. cent de copeaux d'acier et de 4 p. cent de coke, pendant que la fusion progresse à une température d'environ 2 000 °C au centre du four. Après un temps de fusion d'à peu près 18 heures, le creuset du four est déplacé jusqu'à une zone de travail voisine où il refroidit. La pièce est coulée environ 5 heures plus tard. Un cycle de fusion, de refroidissement et de redémarrage des fours s'étale sur environ 24 heures.

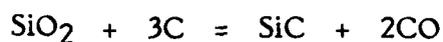
Dans le four de fusion, le mélange de matières brutes est chargé de façon intermittente dans le four, le produit fondu étant déversé dans des pots récepteurs toutes les trois heures environ. Le four de fusion ressemble au four classique à arc immergé utilisé pour la fabrication des ferro-alliages, excepté qu'il ne comporte pas de trou de coulée dans sa partie inférieure. Le sommet du four est ouvert, de façon que le produit fondu puisse être déversé par basculement du four.

→ 3.3.6.5 Procédé de fabrication du carbure de silicium (3, 4, 6). - Le carbure de silicium est produit par chauffage d'un mélange de charge, constitué de sable (environ 60 p. cent) et de coke de pétrole (environ 40 p. cent) dans un four à résistance électrique (Acheson). La tension est appliquée à un noyau de graphite traversant le centre d'un four horizontal en forme d'auge, comportant des sections latérales amovibles de briques réfractaires ainsi que des extrémités réfractaires fixes qui supportent les bornes des électrodes de carbone. La chaleur produite entraîne la formation de cristaux de carbure de silicium à des températures de 2 400 à 2 500 °C. D'ordinaire, la chauffe dure environ

<sup>1</sup> Le minerai est principalement constitué d'oxyde d'aluminium hydraté ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) et d'impuretés, comme la silice libre ( $\text{SiO}_2$ ), l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) et l'oxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ).

36 heures; la température du noyau central atteint 2 400 à 2 500 °C à la fin des trois premières heures, le noyau du four étant maintenu à cette température durant les 33 heures qui suivent. Après le cycle, le courant est coupé et on laisse refroidir le four pendant 24 heures au plus, avant que les parois latérales soient retirées pour mettre à nu une couche cylindrique de cristaux de carbure de silicium tout autour du noyau. Après un refroidissement supplémentaire, qui peut durer 4 ou 5 jours, le produit du noyau est cassé manuellement en morceaux, puis réduit en pièces de 2,5 cm ou moins par broyage (percussion). Cependant, la période de refroidissement peut être abrégée pour préparer le four en vue d'un autre cycle. Une couche de carbure de silicium partiellement transformée sur la paroi externe du produit du noyau est recyclée dans le procédé.

Diverses additions sont faites pour améliorer le procédé; de la sciure est souvent ajoutée pour créer une certaine porosité et ainsi libérer le monoxyde de carbone gazeux de la réaction chimique de base:



La figure 4 illustre un procédé de fabrication type.

**3.3.7 Évacuation du produit du four.** - La plupart des fours à arc électrique immergés sont soumis de façon intermittente à des coulées s'étalant sur des périodes de 1,5 à 5 heures. L'alliage et le laitier<sup>1</sup> fondus sont recueillis par un trou de coulée à la partie inférieure du four, dans des poches à revêtement réfractaire. Le laitier est écumé à travers la rigole prévue à cet effet. Le ferro-alliage est ensuite coulé dans des moules. Après refroidissement suffisant et solidification, la pièce coulée est retirée du moule, classée dans sa catégorie et chargée sur des bennes chaudes, où l'alliage est conservé pour traitement ultérieur.

Pendant le raffinage d'oxyde d'aluminium fondu dans des fours Higgins à creuset, celui-ci est déplacé jusqu'à une zone voisine pour refroidissement après un temps de fusion d'environ 18 heures. Le ferrosilicium, produit secondaire magnétique formé durant le procédé de fusion se dépose au fond du corps ainsi moulé. Celui-ci, généralement d'un poids de 5 à 6 tonnes, est formé approximativement 5 heures plus tard. Lorsque la fusion a lieu dans un four de fusion, le produit fondu est déversé dans des bacs environ toutes les 3 heures par basculement du four ouvert. Les pièces coulées ou les lingots, qu'ils proviennent des fours Higgins ou des fours de fusion, sont réduits en morceaux à l'aide de masses de 3 000 lb (1 700 kg) sur un terrain voisin, avant leur réduction finale en taille et la séparation magnétique du ferro-silicium de l'alumine.

→ Dans la fabrication du carbure de silicium, le produit réduit du lit du four est déchargé par déversement. Le produit du noyau est broyé manuellement en morceaux, avant d'être transféré dans la section de concassage pour une réduction supplémentaire de taille.

**3.3.8 Broyage et préparation des produits.** - Les pièces coulées ou lingots de ferro-alliages et d'alumine, après avoir été fractionnés en morceaux, sont encore réduits davantage par des broyeurs à mâchoires. Les ferro-alliages sont classés par catégories de taille au moyen d'un criblage, alors que les pièces coulées d'alumine sont réduites en morceaux de 2,5 cm ou moins. Le ferrosilicium, produit secondaire libéré, est séparé du produit primaire, l'oxyde d'aluminium, par séparation magnétique.

Dans le procédé de fabrication du carbure de silicium, le produit du noyau, après avoir été cassé manuellement en morceaux, est ultérieurement réduit par percussion, à

---

<sup>1</sup> Il n'y a pas production de laitier dans les procédés pour alliages au silicium.

l'aide d'un concasseur, en fragments de 1 pouce ou moins. Les produits triés sont directement préparés pour l'expédition à partir de la décharge du convoyeur, ou déversés dans des silos de stockage. Les couches externes du noyau, constituées de carbure de silicium semi-réduit, sont renvoyées au four.

#### 4 TYPES D'ÉMISSIONS

Le principal problème de pollution causé par les installations de fabrication de ferro-alliages, d'alumine fondue et de carbure de silicium est l'émission de grandes quantités de particules au cours des procédés de fusion ou de réduction dans le four. Les émissions de particules varient beaucoup d'un procédé à l'autre, selon les types et les qualités des ferro-alliages, des abrasifs et des matières réfractaires. Le four classique à arc électrique immergé et le four à résistance électrique (Acheson) produisent eux aussi des quantités considérables de monoxyde de carbone. Dans le four ouvert et dans le four à résistance, presque tout le monoxyde de carbone brûle avec l'air entrant au niveau de la partie supérieure de la charge, alors que dans les fours étanches ou semi-étanches le monoxyde de carbone se trouve complètement ou partiellement retiré du four sans combustion avec l'air. Ce monoxyde de carbone est ultérieurement brûlé dans la cheminée, ou épuré pour être utilisé comme combustible dans le séchage des matières brutes. De grandes quantités de fumée et de particules de poussières sont également émises au cours d'autres phases du procédé. Les sources sont, par ordre d'importance: a) coulée, moulage et déchargement hors du four; b) préparation des matières brutes; c) réduction de taille et préparation du produit pour l'expédition. Le tableau 4 donne la liste des sources possibles d'émissions de particules pendant la fabrication.

**Tableau 4**  
**Les émissions de particules selon l'étape du procédé, dans les usines canadiennes de ferro-alliages**  
**et dans les secteurs connexes**

Étape du procédé	Procédé et type d'émissions		
	Ferro-alliages	Alumine fondue	<u>Carbure de silicium</u>
1) Préparation des matières brutes			
a) Transport des matières brutes et chargement dans le sécheur	Minerai Coke	Coke de pétrole	Coke de pétrole
b) Séchage	Minerai Coke	Coke de pétrole	Coke de pétrole
c) Broyage et tri du minerai trop gros	Minerai	Non applicable	Coke de pétrole
d) Frittage de mélange de minerai broyé et de coke menu	Minerai Coke	Non applicable	Non applicable
2) Fonctionnement du four			
a) Chargement des matières préalablement mélangées dans le four	Minerai Coke	Minerai Coke de pétrole	Sable Coke de pétrole
b) Gaz* libérés du four	Coke Oxydes métalliques	Coke de pétrole Oxydes métalliques	Coke de pétrole Carbure de silicium Silice Certains oxydes de métaux alcalins et alcalino-terreux
c) Évacuation du produit du four	Oxydes métalliques	Oxydes métalliques	Carbure de silicium
3) Triage et préparation des produits pour expédition	Poussières de ferro-alliages	Poussières d'alumine fondue	Poussières de carbure de silicium

\* Émissions gazeuses contenant des composés sulfurés, ainsi que du monoxyde de carbone et des hydrocarbures non brûlés (NAP -)

x ?

?

?

## 5 DONNÉES NATIONALES SUR LES ÉMISSIONS DE PARTICULES

### 5.1 Émissions attribuables à des procédés industriels canadiens

Un relevé à l'échelle nationale des émissions de polluants atmosphériques pour 1976 indiquait que les usines de ferro-alliages et les industries connexes étaient responsables de la présence de 33 060 tonnes de particules de matières dans l'air (12). Il y a donc eu une réduction de 3 341 tonnes par rapport à 1974, année du dernier relevé national. Le tableau 5 présente une répartition des émissions par industrie. On y constate que l'industrie des ferro-alliages et les industries connexes contribuaient pour environ 2,8 p. cent aux émissions totales de particules attribuables à des procédés industriels canadiens.

### 5.2 Données recueillies au moyen des questionnaires de 1976

Les renseignements recueillis dans les questionnaires de la Direction générale de l'assainissement de l'air en 1976 ont servi à rassembler des données sur les émissions de particules de matières et de bioxyde de soufre par l'industrie canadienne des ferro-alliages et les industries connexes en 1975, année prise comme année de base. Ces renseignements sont donnés au tableau 6. Les tableaux 7 et 8 présentent la répartition des émissions et des facteurs d'émission selon le type de procédé.

Les procédés de fusion et de réduction en four représentaient environ 97 p. cent de la quantité totale de particules de matières (31 300 tonnes<sup>1</sup>) émise par l'industrie canadienne des ferro-alliages et les secteurs connexes en 1975. La source la plus importante de ces émissions de fusion, comme le montre le tableau 7, se situe au Québec, où plus de 86 p. cent des ferro-alliages sont produits. Les hauts niveaux d'émission s'expliquent par l'absence de tout équipement antipollution dans les fours électriques en 1975. Le bioxyde de soufre (9 956 tonnes) provient surtout du coke utilisé dans les procédés de fusion et de réduction.

Les facteurs d'émission pour divers procédés sont donnés au tableau 8. C'est en Ontario qu'on retrouvait les moyens antipollution les plus efficaces pour les fours à arc électrique servant aux ferro-alliages et à l'alumine de fusion. L'étude a démontré qu'aucun four à résistance (Acheson), où s'effectue la réduction électrique du carbure de silicium, ne dispose d'équipement antipollution, principalement parce que ces fours sont démodés et qu'ils ne peuvent pas s'adapter aux moyens de réduction des émissions.

Depuis 1976, les usines de ferro-alliages du Québec et celles d'alumine fondue de l'Ontario ont consacré de grosses sommes d'argent à la lutte contre la pollution. Ces usines doivent, conformément aux directives des organismes de réglementation provinciaux pour l'environnement, installer des équipements antipollution pour réduire les émissions. Il en est résulté que tous les fours de fusion en Ontario et au Québec disposent maintenant de moyens antipollution, excepté un four de fusion pour ferro-alliages au Québec. Cependant, les usines de carbure de silicium ne sont toujours pas équipées de tels moyens. Le tableau 9 donne les évaluations des émissions pour 1979.

<sup>1</sup> L'augmentation des émissions en 1976 par rapport à 1975 (33 060 contre 31 300 tonnes) fut principalement due à la plus grande production de ferro-alliages, d'alumine fondue et de carbure de silicium en 1976.

Des dépoussiéreurs à sacs filtrants ont été installés dans les usines du Québec et de l'Ontario dans le but d'épurer les émissions. Ces dépoussiéreurs permettent de réduire au minimum les émissions de particules, attribuables aux procédés de fusion électrique. La baisse des émissions de bioxyde de soufre a été obtenue grâce à l'élimination du soufre élémentaire utilisé dans le procédé de la seule usine d'alumine fondue en Ontario.

Tableau 5  
Émissions de particules, dues à  
des procédés industriels en 1976 (12)

Industrie	Émissions de particules	
	(tonnes)	(%)
Fabrication de ferro-alliages et secteurs connexes	33 060	2,8
Extraction et enrichissement du minerai de fer	329 714	27,6
Production d'amiante	86 703	7,3
Fabrication de ciment	68 466	5,7
Moulage et manipulation du grain	55 034	4,6
Traitement de la pierre, du sable et du gravier	36 476	3,0
Production de métaux primaires non ferreux	58 058	4,9
Transformation de produits minéraux	56 145	4,7
Extraction minière et carrières de pierres	123 514	10,4
Pâtes pour papier d'emballage	98 577	8,3
Production de fer et d'acier	48 536	4,1
Production d'asphalte	37 304	3,1
Raffinage du pétrole	12 729	1,1
Fabrication de coke métallurgique	7 313	0,6
Autres	140 724	11,8
<b>Total</b>	<b>1 192 353</b>	<b>100,0</b>

**Tableau 6**  
**Évaluation des émissions de particules solides et de dioxyde**  
**de soufre pour 1975<sup>a</sup> attribuables aux usines canadiennes**  
**de ferro-alliages et aux industries connexes**

	Nombre d'usines	Production		Émissions (tonnes)	
		(tonnes)	(%)	Particules	SO <sub>2</sub>
<b>Ferro-alliages</b>					
Ontario	2	37 150 <sup>b</sup>	13,4	55	738
Québec	4	239 795	86,6	24 382	1 717
	<u>6</u>	<u>276 945</u>	<u>100,0</u>	<u>24 437</u>	<u>2 455</u>
<b>Alumine fondue</b>					
Ontario	4	117 052	87,8	2 934	1 674
Québec	1	16 239	12,2	1 492	41
	<u>5</u>	<u>133 291<sup>c</sup></u>	<u>100,0</u>	<u>4 426</u>	<u>1 715</u>
<b>Carbure de silicium</b>					
Ontario	3	31 951	32,8	774	1 484
Québec	3	65 402	67,2	1 663	4 302
	<u>6</u>	<u>97 353</u>	<u>100,0</u>	<u>2 437</u>	<u>5 786</u>
<b>Total</b>	<b>17</b>	<b>507 589</b>		<b>31 300</b>	<b>9 956</b>

a Chiffres correspondant à un fonctionnement normal, d'après des données recueillies par les questionnaires de la Direction générale de l'assainissement de l'air, en 1976

b Inclut les 861 tonnes produites par les procédés de réduction alumino-thermique

c Inclut le ferrosilicium, produit secondaire (Ontario - 10 679 tonnes, Québec - 1 724 tonnes)

**Tableau 7**  
**Évaluations des émissions de particules pour 1975, pour chaque étape**  
**des procédés, attribuables aux usines canadiennes de ferro-alliages**  
**et aux industries connexes**

	Émissions (tonnes)						Total	
	Séchage	Broyage	Calcina- tion et frittage	Préparation des charges et chargement	Fusion et réduction	Tri du produit	tonnes	%
<b>Ferro-alliages</b>								
Ontario	1			3	51	0	55	0,2
Québec	30		330	203	23 776	43	24 382	99,8
% du total	0,1		1,4	0,8	97,5	0,2		100,0
<b>Alumine fondue</b>								
Ontario	21	13		20	2 875	5	2 934	66,3
Québec				1	1 487	4	1 492	33,7
% du total	0,5	0,3		0,5	98,5	0,2		100,0
<b>Carbure de silicium</b>								
Ontario	21	13			738	2	774	31,8
Québec	117	32			1 510	4	1 663	68,2
% du total	5,6	1,9			92,2	0,3		100,0

**Tableau 8**  
**Évaluation des facteurs d'émission moyens de particules solides**  
**et de dioxyde de soufre en 1975, pour chaque étape des procédés,**  
**en ce qui concerne les usines canadiennes de ferro-alliages et les industries connexes**

	Facteurs d'émission moyens (kg/1 000 kg)							
	Séchage	Broyage	Calcina- tion et frittage	Préparation des charges et chargement	Fusion et réduction	Tri du produit	Total des particules	Total du SO <sub>2</sub>
<b>Ferro-alliages</b>								
Ontario	0,02			0,08	1,4	0,01	1,5	19,9
Québec	0,13		1,38	0,84	99,2	0,18	101,7	7,2
<b>Alumine fondue</b>								
Ontario	0,18	0,1		0,17	24,6	0,04	25,1	14,3
Québec				0,06	91,6	0,25	91,9	2,5
<b>Carbure de silicium</b>								
Ontario	0,66	0,42			23,1	0,07	24,3	46,4
Québec	1,78	0,49			23,1	0,07	25,4	65,8

Tableau 9  
 Évaluation des émissions de particules et de  
 dioxyde de soufre provenant des usines canadiennes  
 de ferro-alliages et des industries connexes en 1979

	Émissions (tonnes)					
	Particules			Dioxyde de soufre		
	Ontario	Québec	Total	Ontario	Québec	Total
Ferro-alliages	55	8 096	8 151	738	1 717	2 455
Alumine fondue	402	1 492	1 894	152	41	193
Carbure de silicium	774	1 663	2 437	1 484	4 302	5 786
<b>Total</b>	<b>1 231</b>	<b>11 251</b>	<b>12 482</b>	<b>2 374</b>	<b>6 060</b>	<b>8 434</b>

## 6 TECHNIQUES ANTIPOLLUTION

### 6.1 Information générale

La présente étude a révélé une grande variabilité des émissions de particules en fonction des diverses phases des procédés industriels. Par exemple, il n'existe aucun moyen de réduction des émissions des fours à résistance (Acheson), alors que d'autres fours sont équipés de dispositifs d'épuration à haut rendement. L'étude montre que les moyens classiques, comme les séparateurs mécaniques, utilisés avec des laveurs de gaz à haut rendement et des dépoussiéreurs à sacs filtrants, peuvent réduire les émissions de polluants à un niveau très bas. La section 6.2 décrit plus en détail les diverses techniques et méthodes pouvant être appliquées dans les nouvelles usines et les installations déjà existantes. Les émissions provenant d'opérations autres que celles de la fusion peuvent être efficacement réduites à l'aide de systèmes recueillant les poussières, qu'il s'agisse d'équipements réguliers comme les séparateurs mécaniques et les laveurs à Venturi, ou encore les dépoussiéreurs à sacs filtrants.

### 6.2 Installations existantes

**6.2.1 Stockage des matières premières.** - La plupart des matières premières sont généralement stockées à l'air libre. Les fines de minerai, ainsi que les particules de sable et de coke qui n'ont pas été tassées ou pressées dans les stocks de réserve à l'air libre, peuvent être entraînées par le vent. Pour éviter ces émissions de poussières, on recourt habituellement à la pulvérisation d'eau.

**6.2.2 Séchage des matières premières.** - Les <sup>Séchoirs</sup> sècheurs, généralement de type rotatif, sont le plus souvent alimentés au mazout. Pour réduire les émissions à des niveaux acceptables, on fait passer dans des dépoussiéreurs à sacs filtrants les grands volumes d'air chaud dégagés par le sécheur, qui entraînent avec eux de fines particules de poussières et de coke.

**6.2.3 Concassage et criblage du minerai trop gros.** - Le minerai trop gros est concassé, tamisé et transporté pour être chargé sous forme de mélange dans les silos de stockage du four. Des dépoussiéreurs à cyclone et (ou) des dépoussiéreurs à sacs filtrants permettent d'éliminer les particules grossières dans les émissions provenant du concassage et du criblage.

**6.2.4 Frittage des fines de minerai et de coke.** - Le coke menu et les poussières de minerai provenant du séchage, du concassage et du criblage sont renvoyés en continu dans le broyeur pour être mélangés avec les fines de recirculation et l'eau. Le mélange est introduit dans un dispositif de frittage, soit un convoyeur avec grillage, à tirage en bas, la charge reposant sur un lit roulant fait de grilles liées les unes aux autres. Des épurateurs par voie humide ont permis de réduire efficacement les émissions de poussières. D'autres appareils, comme les dépoussiéreurs à sacs filtrants, peuvent eux aussi être très efficaces dans l'élimination de la poussière.

#### 6.2.5 Fonctionnement des fours

**6.2.5.1 Fours semi-étanches et étanches (13, 14, 15, 16).** - Dans les fours semi-étanches et étanches utilisés pour la fabrication des alliages au manganèse (silicomanganèse, ferromanganèse, etc.), du carbure de calcium et du ferrosilicium contenant jusqu'à 50 p. cent de silicium, l'appareil antipollution le plus couramment

employé est le laveur à Venturi à grande vitesse. La figure 9 montre un système type d'ajutage à Venturi à grande vitesse. Le volume des gaz de combustion dégagés par un four semi-étanche ou étanche est relativement petit, en comparaison de celui des gaz libérés par un four ouvert, étant donné que très peu d'air ambiant pénètre dans le four. Le gaz épuré contient une forte teneur en monoxyde de carbone (supérieure à 40 p. cent en volume), qui peut être employé comme combustible ( $11,17 \times 10^6$  joules par  $m^3$  standard de CO) dans le traitement préalable, ou encore brûlé à la torche. L'emploi de dépoussiéreurs à sacs filtrants risque de poser des problèmes de fonctionnement en raison des dangers d'explosion du gaz à haute teneur en monoxyde de carbone, et de la possibilité de colmatage de la couche filtrante par les matières organiques présentes dans les émissions. Pour toutes ces raisons, les dépoussiéreurs à sacs filtrants ne sont pas utilisés dans les fours semi-étanches ou étanches en Amérique du Nord.

**6.2.5.2 Fours ouverts (13, 14, 17, 18, 19).** - En raison des énormes volumes de gaz libérés par les fours ouverts, les dépoussiéreurs à sacs filtrants ont été préférés aux séparateurs. Les systèmes à sacs filtrants sont précédés d'épurateurs primaires multiclones ou de pare-étincelles et de surfaces de transfert thermique. Les épurateurs primaires éliminent les particules de matières surchauffées de grande taille, qui sont parfois éjectées de la charge de matières premières, et les surfaces de transfert thermique refroidissent les gaz chauds avant qu'ils ne pénètrent dans le dépoussiéreur (moins de 260 °C), pour un fonctionnement sûr et sans heurts. On utilise le plus souvent de la fibre de verre traitée (260 °C étant la température maximale de fonctionnement) comme médium de la couche filtrante. Ces dépoussiéreurs sont en général conçus pour fonctionner à de faibles rapports air/tissu (0,43 à 0,61 mètre cube par mètre carré de tissu), étant donné que la fumée du four renferme un pourcentage élevé de particules inférieur à un micron, et qu'il peut y avoir accumulation d'une forte charge électrostatique sur les filtres avec, comme résultat, leur colmatation. La figure 10 présente un système type de dépoussiéreur à sacs filtrants.

Les électrofiltres sont peu employés en Amérique du Nord (pas du tout au Canada) en partie à cause de la forte résistivité électrique des fumées de ferro-alliages, qui limite le rendement de ces appareils si la température et la teneur en humidité du gaz du four ne sont pas maintenues dans des limites appropriées, par humidification avec de l'eau par exemple.

**6.2.5.3 Fours à résistance (Acheson).** - La plupart des émissions se produisent pendant la période d'amorçage, lorsque la tension appliquée à la charge du four provoque la formation de particules de carbure de silicium à 2 400 ou 2 500 °C, ainsi que dans les 20 premières minutes après l'ouverture des portes latérales du four en vue du refroidissement du produit réduit. Au Canada, aucun four à résistance ne dispose de moyens pour réduire les émissions. Les gaz du four contenant des particules de matières, du monoxyde de carbone, du méthane et des composés sulfurés gazeux sont libérés dans l'atmosphère extérieure par un dispositif dans le toit de l'immeuble.

**6.2.6 Étape de la coulée.** - Comme dans la plupart des fours à arc électrique, on procède à intervalles réguliers à des coulées pendant des périodes de 1,5 à 5 heures; il se produit des émissions par le trou de coulée durant 10 à 20 p. cent du temps de fonctionnement du four.

Dans les fours ouverts, une hotte installée directement au-dessus du trou et de la poche de coulée sert à capter et à diriger les fumées du four vers le dépoussiéreur à sacs filtrants ou vers le laveur à Venturi utilisés pour le four.

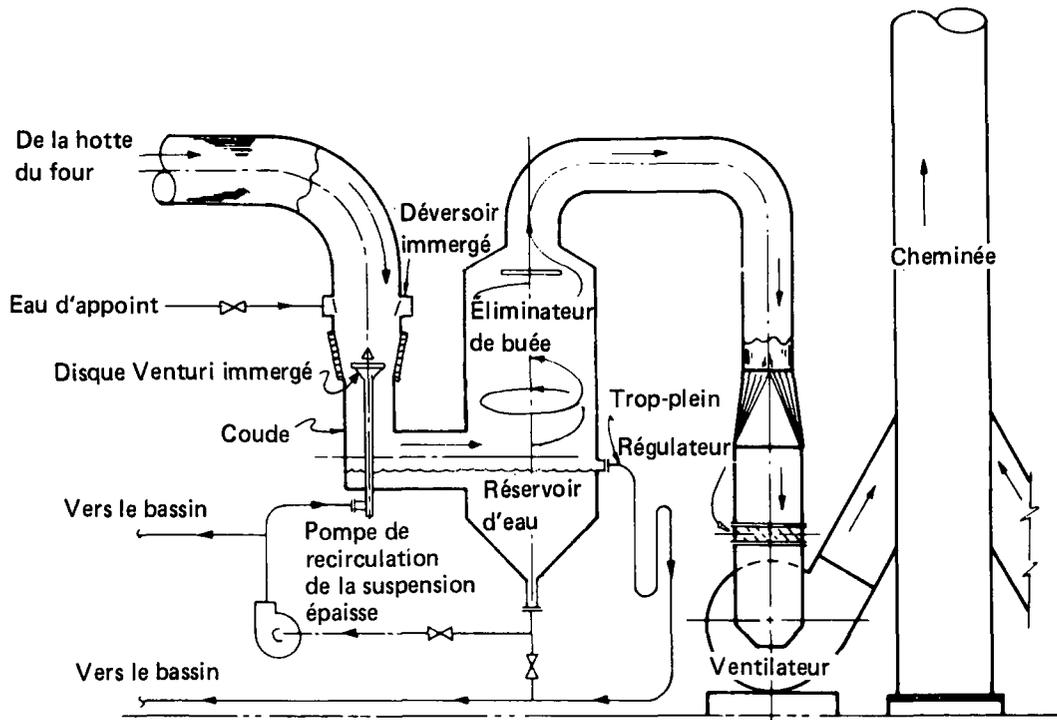


Figure 9 Système d'épuration de fumées, à grande vitesse, pour four à arc immergé

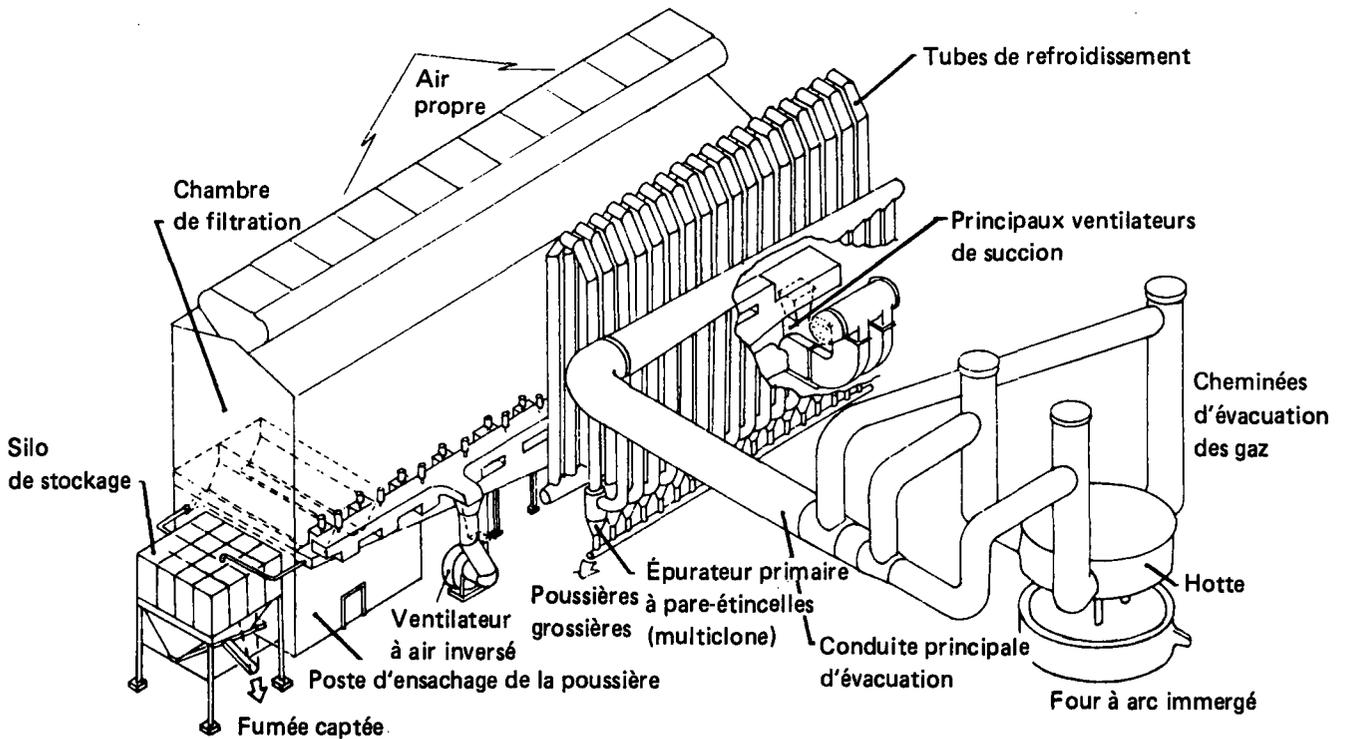


Figure 10 Dépoussiéreur à sacs filtrants avec montage de refroidissement pour four à arc immergé

Dans les fours étanches ou semi-étanches, une hotte à fumée, montée directement au-dessus du trou et de la poche de coulée, sert à capter et à diriger les fumées vers un système séparé d'épuration des gaz. Lorsqu'un dépoussiéreur à sacs filtrants est employé pour la réduction des émissions, le gaz chaud est refroidi par dilution dans l'air avant de pénétrer dans l'appareil.

**6.2.7 Étape du moulage.** - L'étape du moulage représente une autre source de fumées. Dans les usines modernes, une hotte sert à capter et à diriger les fumées vers un système de dépollution. L'appareil préféré est le dépoussiéreur à sacs filtrants, en raison du grand volume d'air qui peut le traverser.

**6.2.8 Broyage et préparation des produits.** - Des dépoussiéreurs à cyclone et/ou des dépoussiéreurs à sacs filtrants éliminent efficacement les poussières produites par les broyeurs à mâchoires, le criblage des pièces d'alliage coulées, et la réduction par percussion des cristaux de carbure de silicium.

### 6.3 Nouvelle technique

**6.3.1 Ferro-alliages et alumine fondue.** - La fusion dans le four est la principale source d'émissions de particules et de gaz au cours de la fabrication de ferro-alliages, d'abrasifs et de matières réfractaires. Le fonctionnement du four peut être modifié de façon à diminuer la quantité des émissions devant être captées, ou à abaisser les volumes de gaz dégagés, ce qui permet de réduire la taille de l'équipement antipollution requis. Le volume des gaz libérés peut être sensiblement réduit (par un facteur supérieur à 20) par diminution de l'ouverture entre la hotte et le four. D'un autre côté, un four complètement étanche abaissera au minimum le volume de gaz libérés. Cependant, au Canada et aux États-Unis, le four étanche n'est pas employé pour la fabrication d'alliages à haute teneur en silicium ( $\geq 75$  p. cent de teneur en silicium), car il y a risque de formation de ponts, de souffles à haute température, et de sérieuses difficultés d'épuration peuvent se présenter. Néanmoins, l'URSS et le Japon exploitent depuis 1971 un four étanche (12 MW), produisant du FeSi à 75 p. cent (15, 20). Le four étanche japonais est muni de dispositifs de décrassage, fixes et mobiles, et il n'y a donc pas de problème d'accumulation de poussières. De plus, le four japonais utilise des boulettes de minerai de fer au lieu de la ferraille employée au Canada et aux États-Unis. Au Canada, dans le cas des fours étanches pour la fabrication de ferromanganèse à haute teneur en manganèse, on traite préalablement le mélange de charge (8), ce qui comprend le séchage et le broyage-triage du mélange ainsi que le frittage des fines. Les gaz d'échappement à haute température (environ  $240 \text{ m}^3$  standard/mn ou  $8\,500 \text{ pi}^3$  standard/mn) du four à 30 MW sont épurés par un laveur à Venturi à grande vitesse. Le gaz propre, riche en monoxyde de carbone (40 à 70 p. cent) est récupéré pour servir de combustible dans les sécheurs de minerai et de coke; il peut aussi être dirigé vers la cheminée à torche.

Elkem Spigerverket, un des plus grands fabricants norvégiens d'alliages au silicium, a mis au point un four à double rotation pour le ferrosilicium, où les interventions requises pour faire descendre la charge et pour améliorer la circulation des gaz sont éliminés (figure 11). La grande innovation est le four à double corps utilisant le principe de la double rotation. Le corps du four est donc divisé en deux parties. La partie supérieure, constituée par une forme polygonale relativement étroite, appelée anneau Krogsrud, oscille par rapport au corps principal du four à la base. La double rotation imprime une force à la charge dans deux directions: radiale, vers l'intérieur à partir de la circonférence; axiale, vers le bas à partir du centre.

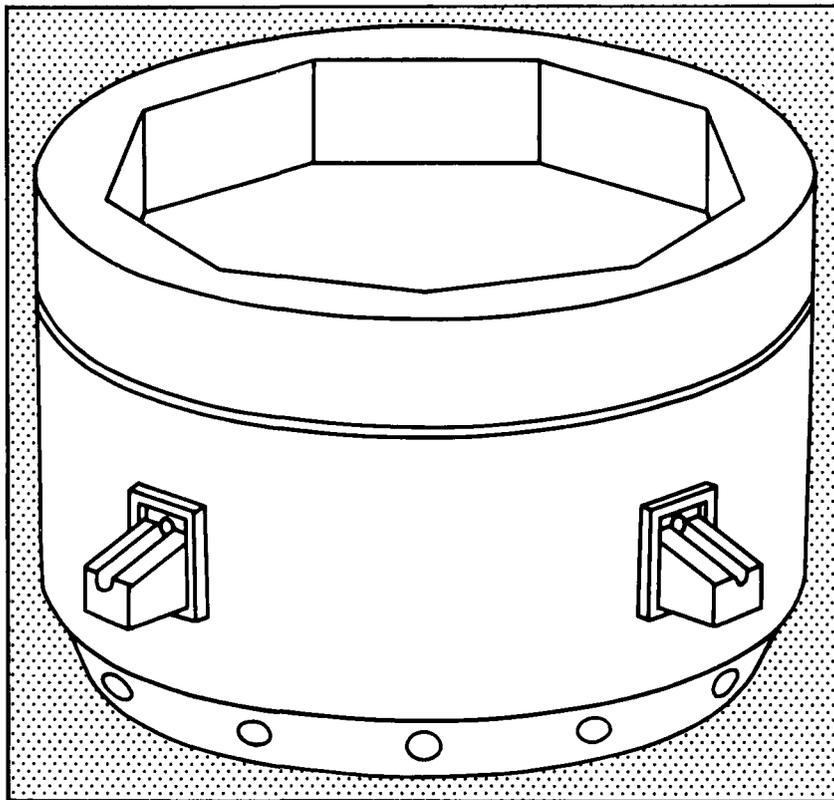


Figure 11 Modèle du corps d'un four Elkem à deux composantes  
(reproduit avec l'autorisation de la revue *Engineering and Mining Journal*,  
McGraw-Hill, New York, oct. 1978)

Au niveau du plan diviseur, là où l'anneau et le corps se déplacent à différentes vitesses, la charge est soumise à de puissantes forces de cisaillement qui produisent un mélange poreux, propre et non collant. Le gaz se répartit sur la surface de la charge de façon plus uniforme que dans un four classique, ce qui produit des températures plus basses et plus stables. La double rotation permet également à la charge de descendre dans le four de façon plus régulière. La conception de ce four évite d'autres problèmes, comme la formation de croûte, de poches, ainsi que les souffles dus à des températures inégales et les pertes de silicium.

En plus de l'élimination du brassage, le four à double rotation présenterait les avantages suivants: combustion réduite du monoxyde de silicium à la surface; meilleure récupération du silicium; et, dans le cas d'un four complètement étanche, une atmosphère moins polluée dans l'usine autour du four étanche, ainsi que des coûts moindres pour l'épuration des gaz.

Trois fours de ce type sont en service en Norvège: deux fours ouverts (10 MW et 30 MW) et un four fermé de 8,5 MW, produisant du ferrosilicium à 75 p. cent. Le four fermé permettrait une récupération de 90 à 92 p. cent du silicium, sans aucun changement dans la qualité (24).

On a mis au point de nouveaux appareils antipollution permettant de réduire les coûts de la lutte contre la pollution et d'augmenter l'efficacité (1, 18, 21). L'un de ces appareils utilise la chaleur perdue d'un four ouvert pour alimenter en énergie le système d'épuration des gaz sans le recours aux ventilateurs aspirants (figure 12). Le four ouvert type est équipé d'un système d'épuration Aronetics. À mesure que les gaz chargés de poussières (590 à 650 °C) quittent le four, un échangeur de chaleur transfère l'énergie thermique du gaz à l'eau sous haute pression. À mesure que l'eau chauffée à haute pression (2 500 kPA de pression absolue à 204 °C, ou 370 lb/po<sup>2</sup> de pression absolue à 400 °F) sort à grande vitesse (110-370 m/s) de la buse chaude pour entrer dans la conduite mélangeuse, il se forme un mélange à deux phases (vapeur-eau). Pendant la progression de ce mélange le long de la section droite du Venturi, les gaz chargés de poussières se combinent au mélange vapeur-eau. En même temps, le transfert de la quantité de mouvement du mélange vapeur-eau au courant gazeux du four provoque une hausse de pression dans la conduite mélangeuse, ce qui produit la force nécessaire pour que les fumées venant du four pénètrent dans le mélange vapeur-eau. Avec un four pour le silico-manganèse, on aurait atteint un rendement d'épuration de 92,6 à 97,6 p. cent (1). Un autre système de ventilation aspirante aère la section de coulée et entraîne les fumées de celle-ci vers la partie supérieure de la hotte du four où elles renforcent l'air de combustion pour brûler le monoxyde de carbone libéré par le four, en le transformant en gaz carbonique. Des améliorations apportées dans le système d'épuration ont porté le taux de rendement à plus de 99 p. cent.

Un autre système de réduction des émissions a été mis au point au Japon; il consiste en un four vertical à cuve accompagnant un four étanche (1, 9). Ce four, qui est suivi d'un système d'épuration par voie humide pour l'élimination dans le courant gazeux des particules de taille inférieure à un micron, pré-chauffe simultanément le mélange alimentant le four et recueille et recharge l'effluent de poussières, ce qui permet des économies appréciables d'énergie et de matières (figure 13). Les poussières sont captées par collision avec le mélange d'alimentation à mesure que le courant de gaz chaud est aspiré du four. Selon un rapport, environ 80 à 90 p. cent de la poussière contenant 32,5 p. cent d'oxyde de manganèse (MnO), provenant d'un procédé pour ferromanganèse à haute teneur en manganèse, seraient retenus dans le mélange d'alimentation et retournés au four.

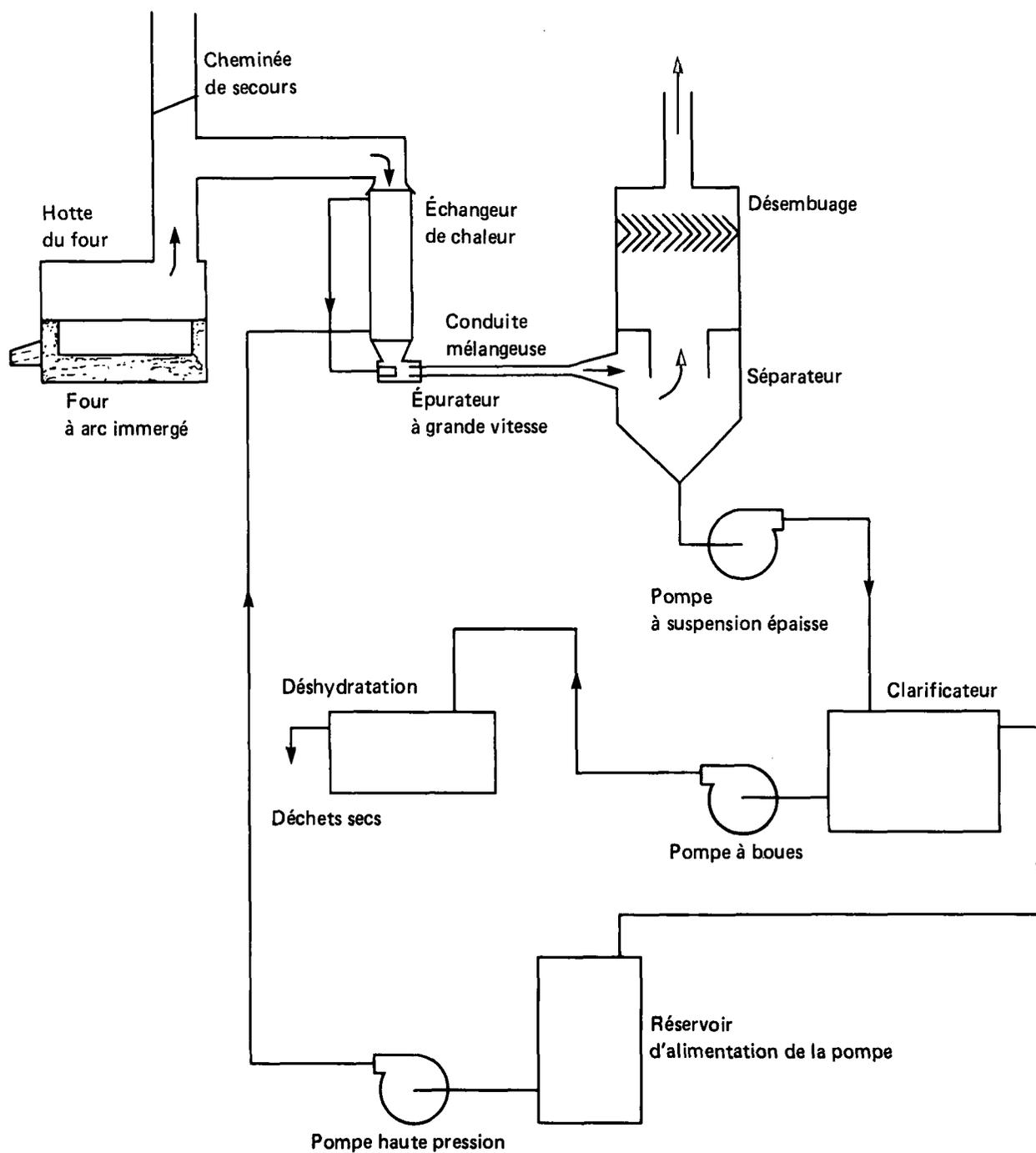


Figure 12 Épurateur Aronetics (à mélange vapeur-eau)

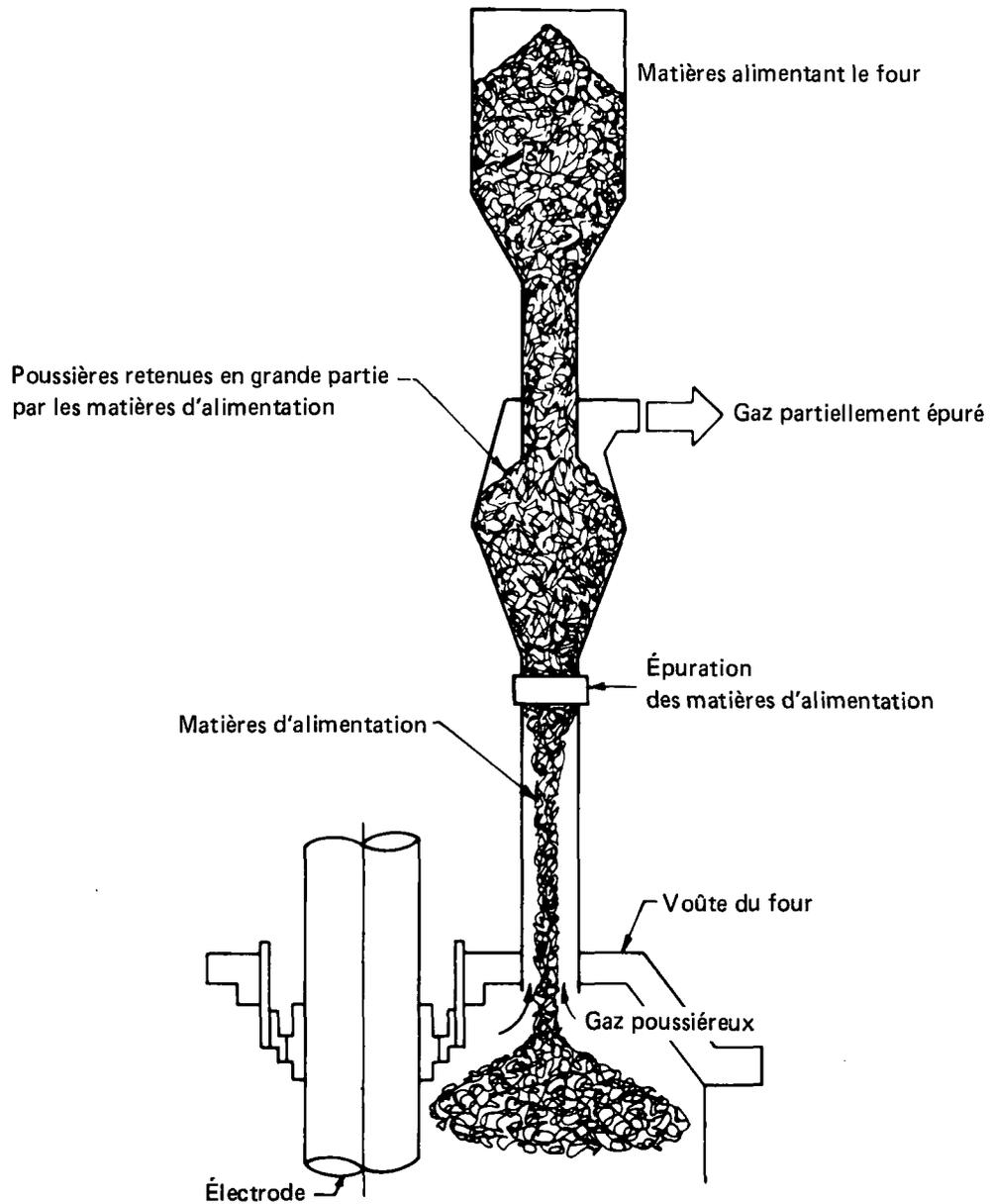


Figure 13 Four vertical à cuve avec four de ferromanganèse haute teneur

**6.3.2 Carbure de silicium.** - Les nouvelles techniques de fabrication et d'épuration dans le cas du carbure de silicium sont conçues de façon à séparer les différentes phases de production, afin que les émissions puissent être épurées individuellement, comme suit: 1) mélange et chargement; 2) chauffe (réduction électrique du dioxyde de silicium en carbure de silicium par le carbone); 3) ouverture des portes; 4) déchargement.

La technique de séparation permet de réduire considérablement les volumes de gaz libérés par le procédé de fabrication, qui devraient être épurés par un équipement classique, comme les dépoussiéreurs à sacs filtrants et les laveurs à Venturi.

Aux États-Unis, une compagnie utilise un four qui ressemble à un wagon plat de chemin de fer, avec une base en béton et des raccords d'électrodes à chaque extrémité, de sorte que le four puisse être déplacé d'une section à l'autre en suivant les diverses étapes de la fabrication. Comme le procédé se fait à l'air libre, les émissions provenant de la réduction ne sont pas épurées. Cependant, les émissions produites lorsqu'on ouvre les portes et pendant la phase de déchargement, opérations effectuées à l'intérieur d'un bâtiment, sont captées et aspirées dans un laveur à Venturi.

Une autre compagnie, ESK Inc., a récemment commencé la production de carbure de silicium dans ses nouveaux fours de l'usine de Kennepin, dans l'Illinois (25). Ces fours sont construits et exploités à ciel ouvert. Après le chargement du mélange dans le four, qui a une longueur d'environ 34 m, une largeur de 21 m et une hauteur de 6 m, une couverture de plastique est disposée sur l'ensemble de la charge, le tout étant scellé le long du périmètre de celle-ci. Au cours du procédé, le gaz libéré est capté sous la couverture de plastique et dirigé par un tuyau jusqu'à un système à torche qui brûle le gaz pauvre en calories (capacité thermique d'environ  $11,17 \text{ J/m}^3$  ou  $300 \text{ Btu/pi}^3$  (26). On prévoit à l'avenir recueillir et transporter ce gaz par une conduite pour être brûlé dans l'usine thermique de l'endroit.

Les légères poussières produites pendant l'ouverture des portes et le déchargement, effectués au même endroit, sont éliminées par pulvérisation d'eau.

## 6.4 Évaluation des techniques antipollution

**6.4.1 Généralités.** - Les émissions de particules varient beaucoup, principalement selon le type de four ainsi que selon la catégorie et la qualité de ferro-alliage ou d'alumine fondue. Le taux d'épuration des émissions, en ce qui a trait aux particules dans le cas de fours ouverts, semi-étanches et étanches, varierait de 92 à 99 p. cent, le type de dépoussiéreur déterminant ce pourcentage. Les dépoussiéreurs primaires utilisés pour l'épuration des gaz d'échappement des fours sont habituellement des épurateurs par voie humide (en général des laveurs à Venturi à grande vitesse), des dépoussiéreurs à sacs filtrants et des électrofiltres. Dans la pratique, les épurateurs primaires mécaniques (comme les multiclones, les pare-étincelles et les chambres de sédimentation), en plus de chauffer les surfaces de transfert (c'est-à-dire les refroidisseurs à tube en U), sont employés avant les dépoussiéreurs à sacs filtrants dans les fours ouverts. Les épurateurs primaires éliminent les particules surchauffées, et les surfaces de transfert thermique refroidissent les gaz chauds avant de pénétrer dans les dépoussiéreurs à sacs filtrants, ce qui permet un fonctionnement sûr et efficace. D'un autre côté, les laveurs cycloniques, les laveurs à Venturi à faible vitesse ou les tours de refroidissement par évaporation servent à conditionner les gaz d'échappement pour permettre à l'électrofiltre d'atteindre un rendement maximal.

**6.4.2 Meilleure technique applicable.** - On a décrit dans le présent chapitre les techniques de réduction des émissions utilisées par certaines usines. L'élimination des particules émises au cours des procédés de séchage, de broyage et pendant le transport est

réalisée par les cyclones à haut rendement ou par des dépoussiéreurs à sacs filtrants. Les émissions produites par les opérations de frittage et de fusion électrique peuvent être éliminées à l'aide de laveurs à Venturi à haut rendement ou de dépoussiéreurs à sacs filtrants.

Les émissions de dioxyde de soufre par les procédés de fusion et de réduction électriques sont minimisées grâce à l'emploi de coke à faible teneur en soufre.

**RÉFÉRENCES\***

1. Dealy, James O. and Killin, Arthur M., "Engineering and Cost Study of the Ferroalloy Industry". U.S. Environmental Protection Agency, Publication EPA-450/2-74008, May 1974.
2. Belitskus, David, "Aluminothermic Production of Metals and Alloys". Journal of Metals, January 1972.
3. "Abrasives: Uses Widening But Improved Quality Moderating Demand". Industrial Minerals, July 1971.
4. Shreve, R. Norris, "Chemical Process Industries". Third Edition, McGraw-Hill, Toronto, 1967.
5. Research and Development Division of Carborundum Co., "Facts About Silicon Carbide". Industrial Heating, May 1954.
6. Duncan, C.E., "Report on Visits to Silicon Carbide, Steel and Industrial Waste Plants in the U.S.A.". June 26, 1975.
7. Fairchild, W.T., "Electric Furnace Manufacture of Silicon Metal". Journal of Metals, August 1970.
8. Ratzloff, R.G., "Construction and Operation of a New Ferromanganese Facility". AIME Electric Furnace Conference, Pittsburgh, 1974.
9. Tanabe, I., "Preheating of Ore for a Ferromanganese Furnace - A Recent Trend in Japan". Journal of Metals, May 1968.
10. Hooper, R.T., "The Production of Ferromanganese". AIME Proceedings of Electric Furnace Conference, 1967.
11. Scherrer, R.E., "Air Pollution Control for a Calcium Carbide Furnace". AIME Electric Furnace Conference, December 1969.
12. Air Pollution Control Directorate, "A Nationwide Inventory of Emissions of Air Contaminants (1976)". Environmental Protection Service, Department of the Environment, Ottawa, Ontario. Report EPS-3-AP-80-1, January 1981.
13. Person, R.A., "Control of Emissions from Ferroalloy Furnaces". AIME Electric Furnace Proceedings, 1969.
14. Rentz, O., Siebert, G. and Stracke, R., "Reducing Fume Emissions by Improving Furnace Operation, by Feed Pretreatment". AIME Electric Furnace Proceedings, Vol. 30, Chicago, 1972.

---

\* Liste reproduite de l'édition anglaise.

15. Soloskenko, P.S., "75% Ferrosilicon Melted in Enclosed Electric Furnaces". *Steel* 1973, (8), pp. 727-28.
16. Lopyszynski, T.W., Trunzo, J.P. and Wilbern, W.L., "Design and Operation of a 45 MW 50 Percent Ferrosilicon Furnace". *AIME Electric Furnace Proceedings*, Vol. 30, Chicago, 1972.
17. Meredith, W.R., "Operation of a Baghouse Collecting Silica Fume". *AIME Electric Furnace Proceedings*, Vol. 30, Chicago, 1972.
18. Fegan, G.J., "Cleaning Ferroalloy Furnace with High Energy Scrubbers". *AIME Electric Furnace Proceedings*, Vol. 30, Chicago, 1972.
19. Sherman, P.R. and Springman, E.R., "Operating Problems with High Energy Wet Scrubbers on Submerged Arc Furnaces". *AIME Electric Furnace Proceedings*, Vol. 30, Chicago, 1972.
20. Mobley, C.E. and Hoffman, A.O., "A Study of Ferroalloy Furnace Product Flexibility". U.S. Environmental Protection Agency, Publication EPA-650/2-75-063, July 1975.
21. McCain, Joseph D., "Evaluation of Aronetics Two-Phase Jet Scrubber". National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Publication PB-239 422, December 1974.
22. Denizeau, J. and Goodfellow, H.D., "Environmental Legislation Approaches and Engineering Design Considerations for Ferroalloy Plants". The Fourth International Clean Air Congress, Tokyo, 1977.
23. Rudolph, J.L., Harris, J.C., Grosser, Z.A. and Levins, P.L., "Ferroalloy Process Emissions Measurement". U.S. Environmental Protection Agency, Publication EPA-600/2-79-045, February 1979.
24. "New Norwegian Ferrosilicon Furnace Offers Cheaper, Cleaner Process". *Engineering and Mining Journal*, October 1978.
25. "ESK's SIC Unit Starts Up". *Industrial Minerals*, August 1979.
26. Personal communications with officials of the Illinois State Environmental Protection Agency.

**BIBLIOGRAPHIE\***

Yocom, J.E. and Chapman, S., "The Collection of Silica Fume with a Venturi Scrubber". The Journal of the Air Pollution Control Association, Vol. 4, No. 3, November 1954.

Dawn, T.E. and Wise, W.H., "Comparative Operating Characteristics of Large vs Small Ferroalloy Units". AIME Proceedings of Electric Furnace Conference, 1964.

Fairchild, W.T. and Ralya, E.C., "Assembly Line Processing of Silvery Pig Iron". AIME Electric Furnace Proceedings, Vol. 30, Chicago, 1972.

Resig, J.V., "Ferrosilicon Crushing, Sizing and Storage Systems". AIME Electric Furnace Proceedings, Vol. 30, Chicago, 1972.

Ferrari, R., "Experiences in Developing an Effective Pollution Control System for a Submerged Arc Ferro-alloy Furnace Operation". AIME Proceedings of Electric Furnace Conference, 1967.

Tanaka, S. and Lieben, J., "Manganese Poisoning and Exposure". Arch Environ Health, Vol. 19, November 1969.

Brown, D.D., "Manganese". Department of Energy, Mines and Resources, Canada Mineral Yearbook 1971, Reprint No. 26.

Asnesen, A.G. and Asphang, B., "Computer Control of a 39 mva Electric Furnace Making High Carbon Ferromanganese". AIME Electric Furnace Proceedings, Vol. 30, Chicago, 1972.

Scott, J.W., "Design of a 35 000 KW High Carbon Ferrochrome Furnace Equipped with an Electrostatic Precipitator". AIME Electric Furnace Proceedings, 1971.

Meintjes, J., "Dealing with Dust and Fume from Electric Furnaces at Rand Carbide Ltd., Withbank". The South African Mechanical Engineer, November 1970.

"Bauxite and Alumina Offer more than Aluminum". Industrial Minerals, October 1974.

"Silica: World Production, Consumption and Trade". Industrial Minerals, May 1976.

Metal Bulletin's First International Ferro-Alloys Conference, Zurich, 1977, Metal Bulletin Ltd., London, 1978.

---

\* Liste reproduite de l'édition anglaise.

Annexe 1  
Facteurs d'émission de particules dans le cas de fours ouverts sans  
équipement antipollution

Produit	Facteur d'émission		
	kg	kg	kg
	Tonnes de produit	Tonnes de charge	MW-h
Alliages au silicium			
Si	600	123	39
FeSi 75 p. cent	458	102	47
FeSi 50 p. cent	223	90	40
Fonte grise riche en silicium (FeSi 15-22 p. cent)	58	32	20
Alliages au manganèse			
FeMnSi	158	37	26
SiMn	110	36	23
FeMn	168	42	28
Alumine fondue	92		
Carbure de silicium	25		

Annexe 2  
Intervalles de variation des facteurs d'émission dans le  
cas d'émissions épurées de particules

Produit	Type de four	Facteur d'émission	
		kg	
		Tonnes de produit	
Alliages au silicium			
Si	Ouvert	24	à 5,3
FeSi 50 p. cent	Ouvert	9,0	à 0,2
Alliages au manganèse			
FeMn	Fermé	0,14	à 0,04
SiMn	Fermé	0,14	
Autres			
CaC <sub>2</sub>	Ouvert	1,1	
Alumine fondue	Ouvert	7,4	à 0,6

Annexe 3  
Normes d'émission de particules provenant de l'industrie des ferro-alliages  
dans divers pays pour différentes années

Pays	Normes d'émission		Application
Québec	Si FeSi (65-95%Si) CrSi	10 kg/tonne 7,5 kg/tonne 7,5 kg/tonne	1979
USA	Si, FeSi SiMn, FeMn	0,45 kg/MW-h (nouvelle usine) 0,23 kg/MW-h (usine existante)	1976
Suède	FeSi  SiMn Si	10 kg/tonne (nouvelle usine; moyenne mensuelle) 15 kg/tonne (usine existante; moyenne mensuelle) 0,3 kg/tonne (moyenne mensuelle) 300 mg/Nm <sup>3</sup> (moyenne mensuelle)	1977
Norvège	FeSi	100 mg/Nm <sup>3</sup>	1979
Suisse	FeSi	70 mg/Nm <sup>3</sup>	1975

mg/Nm<sup>3</sup> = milligrammes par mètre cube à la pression et à la température normales



## Annexe 4 (suite)

	Pourcentage									
	Mn	Fe	C	Si	Al	Ca	V	Ti	W	Cb
Ferrotitane			0,10 max.					70		
Ferrocolumbium		35								55 60
Ferrotungstène Haute pureté									77 - 83	
Faible teneur en molybdène									76 - 84	
Haute teneur en molybdène									76 - 84	
Ferrovandium							52 - 57 70 - 75			
Silicomanganèse 3 p. cent de la teneur en C	65 - 68		3	12 - 14,5						
2 p. cent de la teneur en C	65 - 68		2	15 - 17,5						
1,5 p. cent de la teneur en C	65 - 68		1,5	18 - 20						
Faible teneur en C	65 - 68									
Haute teneur en C	73									
Carbure de calcium			26 - 32			44 - 53				
Alumine fondue				0,3 - 0,7	50 - 52					
Alumine-zircone				0,4	37 - 39			1,5 - 2,6		18 - 20
Carbure de silicium			27 - 29	63 - 68				1		

a *American Metal Market*, 3 février 1972

b D'après des données obtenues par les questionnaires de la Direction générale de l'assainissement de l'air en 1976

Canada

Rég. Québec Biblio Env. Canada Library



38 701 836