

**Zeitschrift:** Plan : Zeitschrift für Planen, Energie, Kommunalwesen und Umwelttechnik = revue suisse d'urbanisme

**Herausgeber:** Schweizerische Vereinigung für Landesplanung

**Band:** 26 (1969)

**Heft:** 5

**Artikel:** Lutte contre la pollution de l'atmosphère par les fours électrométallurgiques

**Autor:** Muhlrاد, W.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-782986>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 16.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Lutte contre la pollution de l'atmosphère par les fours électrométallurgiques

L'électrométallurgie couvre une grande variété de procédés métallurgiques de fusion, craking ou de synthèse qui s'opèrent à très haute température. Ils s'accompagnent de ce fait de formation de vapeurs métalliques et ces produits de sublimation en se condensant et en s'oxydant forment des nuages qui sont d'autant plus gênants que les particules solides sont d'une extrême finesse. Ainsi, le diamètre moyen des particules de  $\text{SiO}_2$  produites dans les fours de ferro-silicium est de l'ordre de 0,2 à 0,3 micron et leur surface spécifique est d'environ 18 m<sup>2</sup> par g.

A titre de comparaison, nous citerons les poussières émises par les fours à clinker dont la dimension moyenne est de l'ordre de 10 à 12 microns et la surface spécifique de 0,5 à 0,6 m<sup>2</sup> par g. Cependant, ces poussières sont déjà considérées comme très fines.

Parmi les nombreuses sources d'émission de fumées susceptibles de polluer l'atmosphère, celles découlant de l'électrométallurgie sont donc des plus gênantes non pas par le poids de poussières émises ou leur nature toxique, mais surtout en raison de la très grande finesse des particules qui colorent abondamment le panache étant donné leur grande surface d'absorption ou de réflexion de lumière. En outre, leur pouvoir de décantation est extrêmement faible et elles restent par conséquent longtemps en suspension dans l'atmosphère, contribuant ainsi à la formation de brouillards gênants pendant les périodes de faible vent et plus particulièrement durant les périodes d'inversion.

D'une façon générale, les poussières produites par sublimation et condensation sont de forme sphérique et leurs dimensions peuvent varier de quelques millièmes à quelques dixièmes de micron. La grosseur dépend essentiellement des conditions dans lesquelles s'opère la condensation.

Les considérations théoriques et l'expérience pratique montrent que les particules de condensation sont d'autant plus fines que le refroidissement et la condensation de la vapeur sont plus brutaux. En effet, en l'absence de noyaux de condensation préexistants, le processus de condensation passe par la formation préalable de noyaux dont le diamètre n'est que de quelques millièmes de micron, et la vitesse de formation des noyaux est d'autant plus grande que le rapport entre la tension de vapeur à la température initiale de sublimation et la tension de vapeur à la température finale de condensation est plus grand.

Lorsque le temps de refroidissement est plus court que le temps de formation des noyaux, ceux-ci gardent leurs dimensions initiales; par contre lorsque le

refroidissement est progressif, les premiers noyaux formés ont la possibilité de grossir. Ainsi, les dimensions des particules d'oxyde de fer produites à l'oxycoupage ou au décriquage sont de quelques millièmes à quelques centièmes de micron, la vapeur de métal formée étant instantanément entraînée par un courant d'air froid. Par contre les particules d'oxyde de fer produites dans les fours à arcs atteignent 0,1 à 0,3 micron. Il s'agit donc d'un refroidissement et d'une condensation progressive des vapeurs métalliques. On pourrait difficilement prévoir la captation de ces particules, par exemple sur les tissus filtrants dont les pores atteignent plusieurs dizaines de microns, si dans la plupart des cas il ne se produisait une agglomération préalable de ces aérosols, agglomération qui peut être provoquée artificiellement et qui se réalise souvent spontanément grâce au mouvement brownien, ce dernier s'exerçant sur les particules de dimensions inférieures à 1 ou 2 microns. La rapidité de l'agglomération est fonction de la probabilité de rencontre qui s'exprime en première approximation par la loi suivante:

$$- \frac{dn}{dt} = Kn^2$$

$n$  = étant le nombre de particules en suspension

$t$  = étant le temps d'action du mouvement.

On constate donc que l'agglomération est d'autant plus active que l'on a affaire à des concentrations en poussières plus élevées d'une part et lorsque celles-ci sont soumises à une action de plus longue durée d'autre part.

Nous rappelons en outre que l'agitation moléculaire augmente avec la température des gaz croissante et, de ce fait, le mouvement brownien en tant qu'agent agglomérant devient beaucoup plus actif aux températures élevées.

La très grande finesse des poussières provenant des procédés métallurgiques rend difficile leur élimination, et les moyens dont disposent les techniciens sont de ce fait limités et relativement coûteux.

La nature et la finesse des aérosols produits sont très différents suivant les types de réaction. Le cadre de cet exposé étant trop limité pour les aborder tous, nous nous limiterons aux deux applications à la fois les plus représentatives et les plus fréquentes, à savoir:

- les fours à arcs des aciéries,
- les fours de ferro-silicium.

Nous n'aborderons pas les problèmes tels que fours à carbure, fours à ferro-manganèse, fours d'électrolyse d'aluminium qui constituent pourtant des sources de pollution très gênantes; d'ailleurs dans ce dernier cas la gêne provient beaucoup plus de la présence dans les gaz de composés fluorés sous forme gazeuse que des poussières et cette application a fait l'objet de nombreuses réalisations et de publications.

## Fours à arcs

Les techniciens trouveront dans les revues techniques de nombreuses publications parues ces dernières années qui abordent tous les aspects de ce problème. Nous nous contenterons donc d'en rappeler ici les points essentiels. Les fours à arcs produisent par tonne d'acier entre 6 et 9 kg de poussières qui, dans une proportion de 10 à 15 %, sont d'origine mécanique (comprises entre 1 et 50 microns), les 85 à 90 % de particules restantes sont plus petites que 1 micron et sont le résultat de la condensation et de l'oxydation des produits sublimés.

La quantité et la finesse des poussières évoluent avec le cycle opérationnel: elles sont plus fines, mais peu abondantes pendant la phase de fusion et plus abon-

carbures lorsque la charge contient des copeaux huilés.

Les fumées produites à l'intérieur du four doivent donc être évacuées et captées afin d'éviter leur dispersion naturelle dans les zones de travail. Deux solutions peuvent être prises en considération:

1. Evacuation des fumées par des hottes placées au-dessus des portes de chargement et autour du passage des électrodes, solution admise comme valable pour des fours de petites dimensions: moins de 5 t de charge. Le four est dans ce cas en légère surpression et en atmosphère réductrice, c'est d'ailleurs la raison pour laquelle ce procédé de captation a la préférence dans les aciéries produisant des aciers spéciaux (généralement fours de petites dimensions).
2. Evacuation des fumées produites par un quatrième trou pratiqué dans la voûte, solution qui est généralement admise dans tous les pays industriels pour des fours de moyennes et grandes dimensions, dépassant 10 t de charge. Ce trou est alors coiffé par une buse d'aspiration droite ou coudée, fixée sur la voûte et refroidie par une chemise d'eau. Le

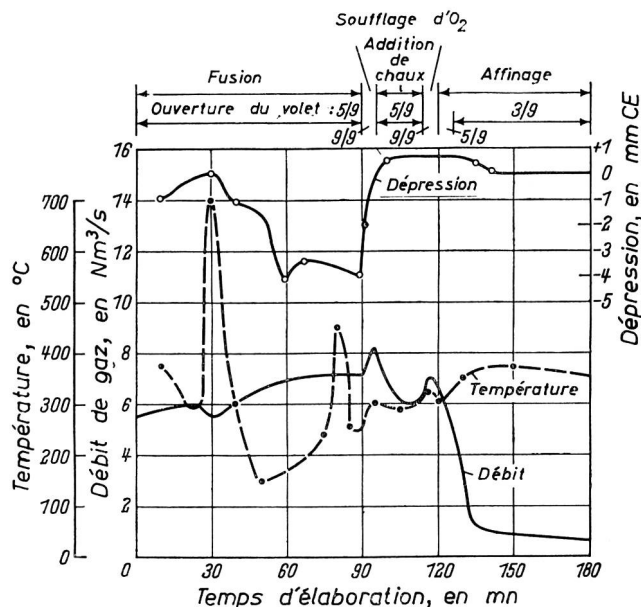


Fig. 1. Débit et température des gaz à l'entrée du carneau de fumées; dépression correspondante à l'intérieur du four. Courbes relevées le 27 février 1961 sur le four de 40 t. Coulée d'acier mi-doux

dantes et plus grosses pendant la phase d'affinage à l'oxygène.

Quant à la composition chimique, elle reflète la qualité des charges. Le principal composant est constitué par de l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) produit principalement pendant l'affinage, les autres étant de l' $\text{SiO}_2$  —  $\text{CaO}$  —  $\text{MgO}$  —  $\text{Al}_2\text{O}_3$  —  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ . On y trouve encore du  $\text{PbO}$  et du  $\text{ZnO}$  lorsque la charge contient du fer blanc.

Quant aux gaz produits dans les fours à arcs, il s'agit essentiellement de  $\text{CO}$  —  $\text{CO}_2$  provenant de la décarburation du bain et de la combustion progressive des électrodes. Ils peuvent également provenir du craking du carbonate de calcium introduit dans le four ainsi que des composés fluorés si l'aciériste emploie du spath fluor comme fondant. On peut également trouver dans les gaz de l'hydrogène ou des hydro-

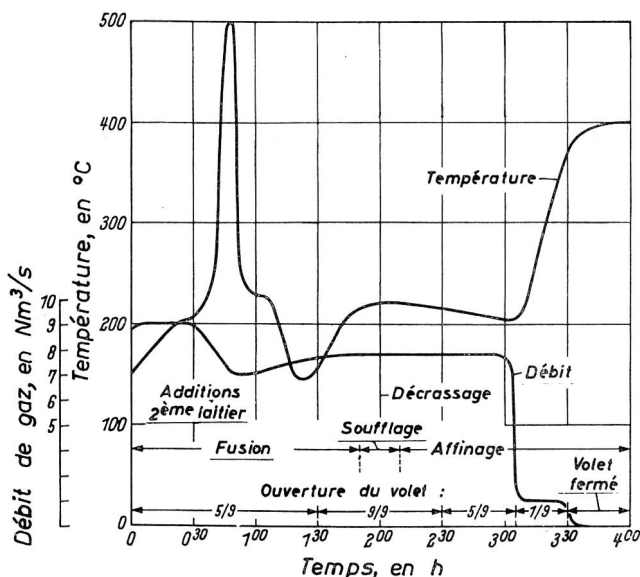


Fig. 2. Débit et température des gaz à l'entrée du carneau de fumées. Mesures du 5 octobre 1961 sur le four de 40 t. Coulée d'acier semi-spécial; durée du cycle de fabrication: 4 heures

four est mis en dépression par un circuit de ventilation et il suffit de créer à l'intérieur du four, au niveau de la voûte, une dépression de 0,5 à 1 mm de CE pour éviter toute émission gênante de fumées autour des portes et des électrodes.

Cette faible dépression doit être contrôlée et maintenue automatiquement; divers procédés de contrôle sont à l'heure actuelle au point permettant d'assurer la captation des fumées durant l'ensemble des cycles opérationnels en réglant le débit de gaz aspirés en fonction de la dépression recherchée dans le four.

La mise en dépression du four à arcs a longtemps été contestée par les métallurgistes qui redoutaient l'usure excessive des électrodes ou du garnissage du four ainsi que des difficultés d'ordre métallurgique.

Toutefois, il est maintenant admis que cette usure peut être raisonnablement limitée lorsque la dépression dans le four est contrôlée et maintenue entre 0,5 et 1 mm de CE. D'ailleurs, lorsque pour des raisons métallurgiques, il est indispensable au cours de certaines phases opérationnelles de créer à l'intérieur du four une atmosphère réductrice, on procède durant ces périodes à la fermeture de l'aspiration: le four se met alors en légère pression et les fumées sortent autour des électrodes et des portes, se dispersant ensuite dans le haut du bâtiment. Toutefois, ces phases sont relativement courtes et correspondent à une faible production de poussières.

Un autre point de controverse concerne la quantité de gaz qui doit être aspirée dans le four pendant les diverses phases d'élaboration des aciers. Le débit de gaz produits dépend essentiellement — pour la phase de fusion — de la nature de la charge et — pendant la phase d'affinage — de la quantité d'oxygène soufflé. Il est possible de faire un calcul précis du débit de gaz produits pendant l'affinage à l'oxygène; par contre ce calcul est pratiquement impossible pour la phase de fusion. On peut l'évaluer d'une façon globale en partant de la composition des charges et en tenant compte de la consommation d'électrodes, mais en fait, la combustion des composés inflammables est, pendant cette période, incontrôlable et la production instantanée peut s'écarter dans des proportions considérables des valeurs moyennes résultant de ce calcul. Ceci est particulièrement apparent lorsque les charges comportent des copeaux huilés ou lorsqu'on procède à la recarburation du bain par addition de carbone sous forme de coke ou anthracite. Nous savons par expérience que durant la phase de fusion, les pointes de production de gaz sont souvent plus importantes que pendant la phase de soufflage à l'oxygène (voir l'exemple des mesures faites sur un four à arcs de 40 t).

La sécurité d'exploitation de l'installation exige que le débit de gaz traités soit suffisant pour brûler presque complètement les composés inflammables, même pendant les pointes. Il doit donc être adapté à ces pointes, c'est pourquoi il est difficile de prendre pour base le calcul théorique et global de gaz produits. Ceci est d'autant plus vrai que le four est en dépression et les entrées d'air parasites dépendent de l'importance du jeu autour des électrodes et autour des portes, ainsi que de la dépression très variable qui règne dans le four (fig. 1 et 2).

Il est donc généralement difficile de déterminer les débits de gaz à traiter dans les installations desservant des fours à arcs et chaque cas doit être examiné soigneusement en prenant en considération:

- la composition de la charge,
- le mode d'introduction dans le four de carbone additionnel,
- la quantité et éventuellement le mode de chargement des copeaux huilés,
- la quantité et le mode d'introduction des calcaires,
- en cas d'utilisation de pellets, la quantité et les modalités de leur introduction dans le four,
- l'étanchéité autour des électrodes et des portes de travail,
- la quantité d'oxygène insufflé et mode d'insufflation avec porte plus ou moins ouverte.

Lorsqu'il s'agit de fours produisant des aciers courants, le débit d'oxygène insufflé pour l'affinage est

généralement de l'ordre de 0,25 à 0,35 Nm<sup>3</sup> par minute par tonne d'acier et dans la plupart des cas, les fumées produites pendant l'affinage sont moins abondantes que celles dégagées pendant la fusion. C'est donc le débit de gaz correspondant à la fusion qui est déterminant pour les installations de dépoussiérage et, d'après notre expérience, ce débit est de l'ordre de 350 à 600 Nm<sup>3</sup>/h par tonne de charge suivant la nature de la charge et les dimensions du four.

Par contre, quand il s'agit de fours produisant des aciers spéciaux ou des aciers inoxydables, les quantités d'oxygène soufflé au moment de l'affinage sont beaucoup plus importantes et peuvent atteindre 1 à 1,4 Nm<sup>3</sup>/min par tonne de charge; dans ce cas, c'est la période d'affinage qui est déterminante pour le débit de gaz à traiter dans l'installation de dépoussiérage; on peut alors le calculer en partant de la quantité d'oxygène soufflé et des hypothèses suivantes; la totalité de l'oxygène soufflé servira pendant les pointes à la production du CO. 25 % du CO produit seront transformés dans le four même en CO<sub>2</sub> par l'oxygène de l'air parasite. On trouvera donc à la sortie du four avant combustion, pour chaque m<sup>3</sup> d'oxygène soufflé, environ 3 Nm<sup>3</sup> de gaz dont la composition sera la suivante: 1,5 Nm<sup>3</sup> de CO

0,5 Nm<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub>

environ 1 Nm<sup>3</sup> de N.

En partant de ce débit et de la composition des gaz évacués du four par le quatrième trou, par m<sup>3</sup> d'oxygène soufflé, il est facile de calculer le débit final après combustion de ces gaz, débit qui devrait tenir compte d'un excès d'air suffisant pour que la température des fumées soit compatible avec la bonne tenue du dispositif de captation prévu.

En première approximation, pour chaque m<sup>3</sup> d'oxygène soufflé, le débit de gaz après combustion sera de l'ordre de 13 à 15 Nm<sup>3</sup>.

Nous avons ainsi défini les conditions d'aspiration des gaz dans un four à arcs et le débit de gaz à traiter dans l'installation de dépoussiérage.

### Choix d'un système de refroidissement et de dépoussiérage des gaz

Quatre types de dépoussiéreurs peuvent être considérés comme valables pour l'équipement des fours à arcs, à savoir:

- le venturi à forte énergie,
- l'électrofiltre sec,
- l'électrofiltre humide,
- le séparateur à tissu filtrant.

Le système de refroidissement qui doit précéder le dépoussiéreur sera évidemment adapté au genre de séparateur et ce dispositif est différent suivant qu'il s'agit d'un procédé sec ou humide.

*Les venturis à haute énergie* sont toujours précédés d'un système de refroidissement par pulvérisation d'eau et les gaz pénètrent dans les venturis saturés à 100 %. Cet état des gaz est favorable au bon fonctionnement des venturis, car tous les laveurs de gaz, quelle que soit leur conception, sont plus efficaces en phase de condensation qu'en phase d'évaporation.

Les venturis sont susceptibles de réaliser une efficacité élevée limitant le résidu à l'échappement à 100/150 mg par Nm<sup>3</sup>, à condition toutefois qu'on les



fasse travailler avec une perte de charge de l'ordre de 900 à 1100 mm de CE.

L'emploi de laveurs de gaz permet parfois de réduire le débit aspiré, car il est possible d'assurer la combustion totale de CO avec un excès d'air limité sous réserve cependant que le refroidisseur et le laveur soient placés à proximité immédiate des fours, ceci afin d'éviter le transport à grande distance des gaz à haute température ou des gaz saturés à 100 %.

L'énergie absorbée par un système de lavage par venturis à haute énergie, compte tenu de la réduction du débit initial et de l'énergie absorbée par le système de pompage, est de l'ordre de 9 à 11 kWh par tonne d'acier produit. Cette consommation est basée sur la durée d'un cycle de fabrication de 4 h.

Lorsque l'eau de lavage est recyclée — et c'est très fréquemment le cas — le pH devient fortement acide et il est indispensable d'exécuter les appareils dans des matériaux anticorrosifs, précaution de rigueur pour l'ensemble du circuit si l'on veut éviter des corrosions rapides et des frais d'exploitation trop élevés. Il est toutefois possible de procéder à la neutralisation du liquide de lavage et au contrôle systématique du pH de façon à maintenir sa valeur à 8 à 9.

Dans les pays où l'énergie électrique n'est pas coûteuse ou lorsqu'on peut se contenter d'un traitement sommaire des boues avant leur rejet, le coût de ce procédé est plus faible que celui des autres systèmes et il bénéficie de l'avantage supplémentaire de son faible encombrement.

*Les filtres électrostatiques secs* ont connu à une certaine époque les faveurs des dirigeants des aciéries électriques. Ils sont toujours précédés d'une tour de refroidissement des gaz par pulvérisation d'eau. Ce procédé est avantageux par la consommation plus modeste d'énergie qui est de l'ordre de 3 kW par tonne d'acier produit. Toutefois, depuis quelques années, ce procédé est de moins en moins utilisé dans les aciéries électriques européennes, son efficacité s'étant révélée dans la pratique capricieuse en raison de la température des gaz très variable et souvent relativement basse. Les quantités d'eau évaporée dans les tours de refroidissement deviennent alors insuffisantes pour conférer à la couche de poussières déposées sur les plaques une résistivité satisfaisante, ce qui se traduit par des baisses d'efficacité.

Par ailleurs, cette solution s'avère plus coûteuse que les séparateurs à tissu filtrant même si l'on tient compte à la fois des dépenses d'énergie et des rechanges nécessités par ces derniers.

*L'électrofiltre du type humide* a été employé dans quelques cas particuliers précisément parce que son efficacité est plus élevée et plus stable que celle des électrofiltres secs. Mais cette solution cumule les inconvénients des procédés humides et des prix élevés, et de ce fait l'utilisation de cet appareil dans l'équipement des fours à arcs sera toujours peu fréquente.

La plupart des équipements sur fours à arcs réalisés en Europe ces cinq dernières années comportent des *séparateurs à tissu filtrant*. Ce procédé permet d'assurer une efficacité voisine de 100 % et de décolorer complètement les fumées résiduelles en ramenant le résidu à l'échappement à moins de 15 à 20 mg par Nm<sup>3</sup>.

Les séparateurs à tissu filtrant doivent être précédés d'un dispositif de refroidissement qui dépend de la qualité du tissu employé et de la limite admise pour la bonne tenue de ce tissu.

Les tissus en fibres de verre siliconé peuvent fonctionner de façon permanente à des températures allant de 250 à 275 °C et dans la plupart des cas, les appareils étant placés à grande distance des fours, le refroidissement naturel dans les gaines de liaison est suffisant pour ne pas avoir à recourir à des refroidisseurs complémentaires, tout au plus est-il nécessaire de prévoir un système de contrôle de la température et une régulation par entrée d'air additionnel lorsque la température à l'entrée du filtre dépasse 300 °C. Ces installations sont donc relativement simples. Toutefois, il y a lieu de prendre en considération la longévité relativement restreinte du tissu de verre siliconé (8000 à 10 000 h). De tels équipements fonctionnent depuis quelques années dans des aciéries suisses; le plus important comporte un filtre à manches en tissu de verre de 2500 m<sup>2</sup> desservant deux fours d'une capacité de 65 et de 35 t; cet équipement est en service à l'aciérie Monteforno.

Depuis quelques années est apparu un nouveau tissu de la famille des polyamides dénommé Nomex qui peut supporter des températures allant jusqu'à 200 °C. Mais il est encore à l'heure actuelle trop cher pour cette application et, de toute façon, un refroidissement complémentaire serait nécessaire; cette solution perdrait donc l'avantage de simplicité par rapport à celle avec tissu de verre, tout en étant plus coûteuse.

La plupart des installations récentes sont pourvues de séparateurs équipés de tissu polyester (Tergal) qui présente de nombreux avantages:

- Il est pratiquement insensible à l'humidité, car il n'absorbe au maximum que 0,4 % de son poids.
- Sa résistance à la rupture et à l'usure est meilleure que celle de toutes les autres fibres.
- Il résiste convenablement à tous les acides en faible concentration.

Toutefois, il ne doit être employé que pour des températures ne dépassant pas de façon continue 120 à 125 °C avec des pointes possibles de courte durée de 135 à 140 °C. Il est de ce fait nécessaire de faire précéder le filtre d'un refroidisseur, les tuyauteries — aussi longues soient-elles — ne permettant pas de ramener en permanence la température des gaz à la limite admissible.

On pourrait prendre en considération le refroidissement par une entrée d'air additionnel, mais il est exclu pour des raisons économiques, car le grossissement du débit de gaz qui en résulte a pour conséquence une augmentation prohibitive du prix de l'installation et de l'énergie absorbée.

Trois types de refroidisseurs sont préconisés par la plupart des constructeurs:

- Refroidisseur tubulaire monté en plein air sans récupération de calories: appareil encombrant et d'une efficacité variable suivant les conditions atmosphériques. Ce procédé devient relativement coûteux lorsqu'il faut ramener la température finale à 120-130 °C.
- Refroidisseur par pulvérisation et évaporation d'eau: procédé qui constitue la solution la plus économique lorsqu'il s'agit de ramener la température des gaz de 250-300 °C à 120-130 °C. On obtient alors un mélange contenant environ 75 à 80 g d'eau par Nm<sup>3</sup> de gaz, ce qui correspond à un point de rosée de 45 °C environ.

Cette teneur en vapeur est suffisamment faible pour que le filtre ne soit pas exposé à des condensations.

Ce type de refroidisseur est également utilisé en combinaison avec les électrofiltres du type sec ou humide.

- Lorsque la température des gaz atteint ou dépasse 400 °C à l'entrée du groupe de dépoussiérage, nous utilisons très souvent des refroidisseurs agissant par accumulation de chaleur: il s'agit de tours renfermant un empilage de briques réfractaires formant les canaux verticaux parcourus par les gaz chauds du haut en bas. Dans le cas des fours à arcs, ce refroidisseur comprend deux compartiments séparés et à tout moment l'un des compartiments fonctionne en chauffage, l'autre étant refroidi par un soufflage d'air à contre-courant. L'inversion de l'emploi des deux compartiments est réalisée automatiquement soit en recourant à des dispositifs de contrôle de la température des gaz à l'entrée du filtre, soit à l'aide de chronorelais réglables. Généralement, cette inversion s'effectue toutes les 12 à 15 min.

Ce dispositif a pour avantage d'assurer le refroidissement intégral des gaz par voie sèche et sans apport de vapeur d'eau. Il est d'un fonctionnement très sûr, parfaitement adapté au traitement des gaz dont la température est variable avec des pointes marquées et fréquentes.

Les prix des trois types de refroidisseurs vont en augmentant dans l'ordre suivant:

refroidisseur par pulvérisation,  
refroidisseur tubulaire,  
accumulateur de chaleur.

Les aciéristes ont donc à l'heure actuelle à leur disposition pour l'équipement des fours à arcs, des procédés humides et secs; le choix se fera en fonction des conditions locales, suivant l'efficacité recherchée, le coût du courant électrique disponible et la nature de l'eau ainsi que des boues susceptibles d'être évacuées ou recyclées.

Toutefois, la tendance actuelle va vers l'utilisation des séparateurs à tissu filtrant qui s'avèrent d'un coût global plus avantageux que les autres solutions, en tenant compte à la fois des frais de réalisation de l'équipement et des frais d'exploitation.

Nous ne sommes pas en mesure de chiffrer le coût de toutes les solutions, et nous nous contenterons d'évaluer celui du dispositif combinant un refroidisseur tubulaire suivi d'un séparateur à tissu filtrant du type le plus courant, c'est-à-dire le Tergal.

Nous prendrons à titre d'exemple un four de 60 t produisant un acier courant. Il nécessite une installation de dépoussiérage traitant 30 000 Nm<sup>3</sup>/h de gaz et comportant un filtre de 1000 m<sup>2</sup> de surface. L'énergie absorbée par tous les organes en mouvement sera de l'ordre de 65 kWh; une telle installation en ordre de marche coûterait à l'heure actuelle environ 500 000 francs suisses.

Le calcul des charges annuelles donne les résultats suivants:

1. Intérêts de l'argent et amortissements: peuvent être estimés actuellement à 12 % des investissements, soit . . . . . 60 000.—
2. Énergie électrique dépensée: sur la base de 6000 h d'exploitation par an et 4 centimes le kWh, la dépense annuelle serait de . . . . 15 500.—

3. Rechanges: sur la base de 20 francs suisses, le m<sup>2</sup> de tissu et une durée moyenne d'un jeu de manches deux ans, la dépense annuelle serait de . . . . . 10 000.—  
Autres pièces de rechange: peuvent être estimées à . . . . . 3 000.—
4. Main-d'œuvre d'entretien: sur la base de 10 h par semaine et 15 francs suisses de l'heure, la dépense annuelle serait de . . . . . 7 500.—
- Total des charges annuelles . . . . . 96 000.—**

se répartissant comme suit:

- intérêts et amortissements . . . . . 62 %
- énergie électrique . . . . . 16,5 %
- rechanges . . . . . 13,5 %
- main-d'œuvre d'entretien . . . . . 8 %

La production annuelle d'un tel four sera de l'ordre de 90 000 t et les charges par tonne d'acier produit seront d'environ 1,1 franc suisse, ce qui est relativement faible par rapport au prix de la tonne d'acier.

Ces charges, qui ont été calculées pour un four de puissance moyenne, auront tendance à diminuer pour des fours de plus grande capacité et à augmenter pour des fours de faibles dimensions.

Sur le plan économique, l'équipement d'un four à arcs d'aciérie ne représente pas une dépense prohibitive étant donné que les charges qui en résultent sont inférieures à 0,3 % du prix de l'acier et qu'elles équivalent à une augmentation du courant consommé de 4 %.

#### Fours à ferro-silicium

Ces fours sont toujours du type ouvert, c'est-à-dire que les fumées aspirées dans la hotte placée au-dessus du bain contiennent un mélange de gaz et d'air additionnel, la température de ce mélange pouvant varier suivant le débit aspiré entre 150 et 300 °C. Les calories perdues dans ces gaz résiduels peuvent être estimées en moyenne à 600-700 calories par kWh d'énergie dépensé et le débit de gaz aspirés dans la hotte est de l'ordre de 9 Nm<sup>3</sup> par h par kWh dépensé. Ainsi pour un four de 10 000 kW, le débit serait de

	Température de fusion	Tensions en mmHg				Température d'ébullition
		1	10	40	100	
		Température °C				
K	62,5	341	443	524	586	774
KCl	—	821	968	1078	1164	1407
Na	97	439	549	633	701	892
NaCl	—	865	1017	1131	1220	1465
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	384	442	481	510	1591
S	115	184	244	288	327	445
Cd	320	394	484	553	611	765
Zn	420	487	593	673	736	907
Ca	805	917	1097	1240	1355	1645
Mg	651	616	737	831	902	1104
Pb	327	976	1164	1312	1424	1750
Sb	629	886	1033	1141	1223	1440
Ag	760	1330	1551	1721	1854	2210
Al	657	1450	1790	1975	2110	2485
Cu	1083	1628	1879	2067	2207	2595
Mn	1207	1292	1505	1666	1792	2151
Si	1240	1640	1890	2080	2225	2650
Fe	1528	1910	2200	2415	2595	3070
Cr	1505	1650	—	—	—	2500
Mo	—	3200	—	—	—	4800
Ti	—	2150	2450	2560	—	(3260)
Tu	2900	—	—	—	—	—

Tableau 1. Tensions de vapeurs en mmHg et températures correspondantes en 0 °C. (Extraits de l'ouvrage de Colin-J. Smithells: Metals Reference Book)

90 000 Nm<sup>3</sup>/h de gaz d'une composition à peine différente de celle de l'air ambiant, le pourcentage de CO<sub>2</sub> étant généralement inférieur à 1,5 %. On y trouvera également des traces de composés sulfureux provenant du carbone utilisé et éventuellement des traces de fluor ou de HF lorsqu'on introduit dans le four du spath fluor comme fondant.

Ces fumées contiennent des poussières dont la formation peut être attribuée à quatre origines:

1. Poussières de charge entraînées par les gaz au passage à travers la matière recouvrant le bain; ces poussières constituent généralement une faible fraction (10 à 30 %) et elles sont relativement grosses (supérieures à 5 ou 10 microns); ces particules se trouveraient déjà en partie dans la charge, mais elles proviennent également de l'éclatement des matières chargées sous l'effet des chocs de température.
2. Formation de sous-oxydes — Le quartz introduit dans le four et mélangé au carbone doit normalement produire du silicium-métal qui s'incorpore dans le bain et du CO ( $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$ ). Si le carbone est insuffisant soit localement par suite d'un mélange mal assuré, soit d'une façon générale par un mauvais dosage, la réduction du quartz devient incomplète et aboutit à la formation de SiO qui, aux températures élevées, se présente sous forme d'un gaz relativement stable ( $\text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{SiO} + \text{CO}$ ); il s'échappe donc du bain et se transforme au contact de l'air en SiO<sub>2</sub> qui se condense pour former des particules solides de forme sphérique et de dimensions variables, depuis quelques centièmes jusqu'à quelques dixièmes de microns.
3. Production de poussières par évaporation des corps. Elle dépend évidemment de la température du bain et de la tension de vapeur des constituants. Nous avons représenté sur le tableau I les températures de fusion et d'ébullition ainsi que quelques tensions de vapeur des principaux corps. Tous les corps groupés en tête du tableau et dont la température d'ébullition est inférieure à celle du bain se retrouveront presque intégralement dans les fumées, mais les autres sont également susceptibles de s'évaporer en partie en fonction de leur tension de vapeur. Si le bain dans lequel les réactions sont endothermiques est à une température de l'ordre de 1900 à 2200 °C — donc généralement inférieure à la température de sublimation des métaux usuels — la température de l'arc est estimée à 3000/3500 °C. Au moment de la fusion de la charge, la puissance de chauffe à l'endroit du contact de l'arc avec la matière introduite peut être considérable et, suivant la conductibilité thermique de la matière, la température superficielle peut être très élevée et se rapprocher de celle de l'arc. A noter que la conduite du four intervient ici d'une façon décisive pour limiter ou amplifier les sublimations par une action rationnelle sur la tension d'alimentation des électrodes, et par un dosage judicieux de la charge afin de favoriser l'épanouissement du courant autour des électrodes.
4. Nous mentionnerons enfin la réaction complémentaire réversible:  

$$\text{Si} + \text{C} \rightleftharpoons \text{SiC}$$
Elle se manifeste par des flammes bleu-éblouissant

de haute température. Le carbure de silicium se forme au voisinage des électrodes, puis se dissocie en émettant des vapeurs de silicium qui brûlent en surface au contact de l'air, produisant du SiO<sub>2</sub>. Il s'agit d'une réaction nuisible à la bonne tenue des électrodes et on cherche toujours à l'éviter.

#### Composition granulométrique des poussières contenues dans les fumées des fours à ferro-silicium

L'examen au microscope électronique montre que ces poussières sont parfaitement sphériques et qu'elles ont tendance à s'agglomérer entre elles pour former des chaînes. A titre d'exemple, nous citerons les résultats de l'analyse d'un échantillon prélevé dans un filtre à manches desservant un tel four.

La particule moyenne se situe entre 0,3 et 0,4 micron.

— particules plus petites que 10 microns	. . .	93 %
— particules plus petites que 3 microns	. . .	88 %
— particules plus petites que 1 micron	. . .	78 %
— particules plus petites que 0,5 micron	. . .	62 %
— particules plus petites que 0,2 micron	. . .	30 %
— particules plus petites que 0,1 micron	. . .	15 %

#### Composition chimique

Les analyses d'échantillons prélevés dans des installations existantes ont donné un pourcentage de silice variable entre 85 et 91 %. Les pertes au feu sont de l'ordre de 4,5 % et les autres composants étaient principalement du Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — MgO — alcalis.

Le professeur Silverman a procédé à des examens spectrographiques et par diffraction aux rayons X. D'après toutes ces études, la silice serait à l'état amorphe et sous forme de SiO<sub>2</sub>; les échantillons examinés ne contenaient que très peu de particules de quartz et il s'agit probablement de particules de charge entraînées avant réaction. Cette constatation est très importante parce que si les fines particules de quartz sont réputées très dangereuses pour les voies respiratoires (danger de silicose), il ne semble pas que la silice à l'état amorphe présente le même caractère de nocivité.

La concentration de poussières dans les gaz évacués du four est très variable suivant l'état d'avancement de la phase d'élaboration de l'alliage; elle dépend d'autre part de la qualité du ferro-silicium fabriqué et de la conduite du four. Nous avons relevé des concentrations allant de 1 à 7 g par Nm<sup>3</sup>. La densité des poussières dépend évidemment de leur tassement: les poussières recueillies dans la trémie d'un filtre à manches accusent un poids spécifique allant de 150 à 250 g par litre.

Le poids de poussières produites dans le four peut également être rapporté à la quantité de ferro-silicium fabriqué; on trouve dans le cas du ferro-silicium à 75 %, environ 100 à 150 kg de poussières par tonne d'alliage produit, représentant 6 à 10 % du quartz chargé.

Voyons maintenant les moyens susceptibles d'être utilisés pour éviter toute pollution gênante de l'atmosphère entourant les usines. Lorsqu'une usine est située dans une plaine loin de tout centre d'habitations important, une bonne dispersion des fumées émises, obtenue par une cheminée relativement haute (deux fois et demie environ la hauteur de l'obstacle le plus élevé situé dans un rayon de 250 m du point



d'émission) pourrait constituer une solution acceptable pour les environs immédiats de l'usine, mais la nouvelle législation en vigueur n'admettra pas cette solution, qui ne serait d'ailleurs d'aucune efficacité pour les usines situées dans les vallées.

Il est donc nécessaire de dépoussiérer les gaz, mais la très grande finesse de ces poussières et leur mouillage très difficile limitent le nombre de solutions pouvant être créditées d'une efficacité satisfaisante.

Les dépoussiéreurs cyclonaires classiques sont susceptibles de capter 15 à 20 % des poussières contenues dans les fumées de fours à ferro-silicium, c'est-à-dire les particules plus grosses que 15 à 20 microns et qui pourraient se décanter à proximité du point d'émission.

On peut également réaliser un dépoussiérage partiel à l'aide des procédés humides classiques relativement économiques (40 à 70 %). Lorsqu'on recherche une efficacité plus élevée, dépassant 90 %, les moyens susceptibles d'être mis en œuvre sont beaucoup plus onéreux et nous citerons :

- le procédé humide du type désintégrateur,
- le procédé humide type venturis à grande vitesse,
- le procédé électrostatique sec,
- le procédé électrostatique humide,
- le séparateur à tissu filtrant.

*Les désintégrateurs* Theisen et Buffalo sont très coûteux en exploitation et il est peu probable que l'on ait recours à ces appareils pour le lavage des gaz des fours de ferro-silicium. Ils sont par contre utilisés pour le lavage des gaz provenant des fours électriques du type fermé et produisant du carbure ou du ferromanganèse.

*Les venturis à grande vitesse* pourront atteindre une efficacité de 90 % à condition qu'on les utilise avec une perte de charge de 1000 à 1200 mm de CE, mais l'énergie dépensée atteint alors des valeurs prohibitives (7 à 8 % de la consommation du four).

De plus, le traitement des boues avant le rejet pose souvent des problèmes difficiles à résoudre, d'autant plus que l'eau de lavage a un caractère fortement acide.

*Electrostatiques secs* — Les appareils électrostatiques secs ne peuvent être pris en considération pour l'équipement des fours à ferro-silicium, tout au moins dans l'état actuel des techniques, en raison de la très haute résistivité électrique de ces poussières ( $10^{12}$  à  $10^{13}$  ohms-cm). Il est en effet connu que lorsque la résistivité dépasse  $10^{10}$  ohms-cm, les appareils s'encrassent et les contre-émissions deviennent inacceptables, réduisant leur efficacité. A noter que la résistivité des dépôts de poussières sur les plaques dépend non seulement de celle des divers composants constituant les poussières, mais également de la nature des gaz remplissant les interstices; elle dépend en outre de la température. En ce qui concerne les fours de ferro-silicium tous ces facteurs jouent dans le sens défavorable. Ceci explique que toutes les tentatives faites avec ce procédé pour l'équipement des fours produisant du ferro-silicium ont abouti à des échecs, l'exploitation de ces appareils devenant très difficile.

Par contre, le procédé électrostatique humide peut être pris en considération, car il n'est pas influencé par la haute résistivité des poussières captées qui sont enlevées des plaques réceptrices par lavage. Ces appareils sont précédés d'un dispositif de refroidissement et de saturation des gaz. Il existe des installa-

tions de ce type en Italie et en Suisse dont l'efficacité varie entre 90 et 97 %, se traduisant par un résidu à l'échappement inférieur à 100 mg/m<sup>3</sup> de gaz. Il s'agit de l'appareil Hydrex de la Sté Elex qui combine dans un caisson commun un premier étage de captation de poussières, de refroidissement et de saturation des gaz constitué par une couche de billes de verre arrosées continuellement et un deuxième étage de captation par procédé électrostatique humide. Il y a lieu de noter des corrosions des premiers appareils mis en service, et ces expériences prouvent qu'il serait nécessaire d'exécuter les électrofiltres humides en matériaux anticorrosifs, mais ceci aboutirait à une augmentation sensible des investissements. Il est également possible de neutraliser l'eau de lavage par addition de produits basiques et de contrôler en permanence le pH de l'eau pour le maintenir au niveau de 8 à 9. Toutefois, ces précautions augmentent de façon non négligeable les frais d'exploitation.

Nous citerons en dernier lieu les *séparateurs à tissu filtrant* qui se sont imposés en France où 5 fours allant de 10 000 à 20 000 kVA ont été équipés de ces appareils, les deux premières installations étant en service depuis 1956. Cette expérience est suffisante pour pouvoir affirmer que cette solution est à l'heure actuelle la plus rationnelle en ce qui concerne l'équipement des fours de ferro-silicium, et ce pour plusieurs raisons :

- Elle permet de décolorer totalement les fumées résiduelles en réduisant la concentration à la sortie à moins de 20 mg par Nm<sup>3</sup> correspondant à un rendement supérieur à 99 %.
- Elle est moins coûteuse en investissements et en charges globales que la solution avec électrofiltre humide, la seule qui est susceptible de lui être opposée.
- Elle permet la récupération des poussières à l'état sec, lesquelles peuvent être — dans certaines proportions — valorisées en tant que charges de certaines qualités de caoutchouc, de matières plastiques, comme produits d'addition dans les stations d'enrobage de charges routières en tant que filler.

Des études sont en cours pour trouver d'autres débouchés possibles en fonction de la composition chimique des poussières récupérées.

Les installations en service se composent d'un système de conditionnement des fumées suivi d'un séparateur à tissu filtrant. Le conditionnement préalable s'impose à la fois pour les gaz et pour les poussières. La température des gaz aspirés dans la hotte est de l'ordre de 200 à 300 °C et il est nécessaire de la ramener à 100-130 °C, limite admissible pour la bonne tenue du tissu utilisé.

Quant aux poussières, leur finesse à l'état naissant est telle que leur captation sur le tissu filtrant se heurtera à des difficultés insurmontables si elles ne sont pas agglomérées préalablement; l'agglomération se produit déjà naturellement par l'action du mouvement brownien, comme déjà signalé dans le chapitre précédent, mais elle n'est pas suffisante et il faut recourir à des procédés artificiels tels que turbulence dans l'écoulement ou injection d'eau.

Pour le refroidissement des gaz, nous avons écarté la solution consistant à additionner de l'air qui devient très onéreuse, car elle augmente à la fois le prix de l'installation de traitement des gaz et l'énergie dépensée.

Nous avons également écarté les échangeurs classiques, car les surfaces d'échange se tapissent rapidement et inévitablement d'une couche de poussières d'un caractère éminemment isolant et réduit de ce fait les coefficients d'échange thermique.

Nous avons également écarté l'emploi du tissu de verre siliconé qui, théoriquement, pourrait fonctionner sans refroidissement préalable. En effet, la nature des poussières est telle qu'il s'avère pratiquement impossible d'enlever la couche déposée sur le tissu par simple soufflage à contre-courant, seul procédé de nettoyage admissible pour les manches en tissu de verre; toute contrainte mécanique est en effet exclue, car elle se traduirait par une réduction inacceptable de la longévité des manches.

Nous avons donc adopté pour cette application le refroidissement des gaz par pulvérisation d'eau. L'injection d'eau est réglée par un système de contrôle de température à l'entrée du filtre, et on obtient généralement à la sortie de cette tour un mélange dont le point de rosée ne dépasse pas 45 °C. Ce point de rosée est suffisamment bas pour que l'on puisse employer des filtres à manches filtrantes sans danger de condensations. En fait, les filtres en service ne sont même pas calorifugés.

D'autre part, les tours de pulvérisation contribuent également à l'agglomération préalable des poussières qui de ce fait sont plus faciles à séparer sur le tissu filtrant.

Quant aux filtres utilisés pour l'équipement des fours à ferro-silicium, ils sont du type à manches en polyester dont le nettoyage est assuré par un soufflage à contre-courant combiné avec vibrations transversales. Le Tergal s'est imposé dans cette application pour ses qualités de résistance à l'humidité et aux hautes températures; son emploi offre une sécurité de fonctionnement appréciable puisqu'il laisse une marge importante entre la température de fonctionnement (100 à 120 °C) et la limite supérieure qui est de 150 °C d'une part, et la limite inférieure qui est celle du point de rosée des gaz (45 °C) d'autre part. Cette marge importante permet donc d'adopter un système de régulation de température très simple et robuste, car une précision de  $\pm 10$  °C est suffisante.

Nous devons insister sur les soins particuliers que l'on doit apporter au système de nettoyage des manches filtrantes. Nous avons en effet affaire à des poussières à très haute résistivité qui sont fortement ionisées et adhérent de ce fait au tissu. De plus, le poids spécifique de ces poussières est très faible (150 à 250 g par l); elles ont donc tendance à former sur le tissu filtrant des couches très épaisses, et si le système de nettoyage n'est pas d'une efficacité suffisante, la perte de charge augmente pour atteindre un niveau prohibitif.

## Coût de l'installation

Le système décrit ci-dessus est relativement coûteux. D'après notre expérience il revient en France actuelle-

ment à 70-80 francs suisses par kW de puissance électrique du four. Cette dépense représente environ 15 à 18 % de la valeur du four proprement dit.

Quant aux dépenses d'exploitation, il y a lieu de prendre en considération l'énergie électrique, les rechanges ainsi que la main-d'œuvre et l'entretien.

En ce qui concerne l'énergie électrique, elle est comprise entre 1,6 et 1,8 % de celle du four proprement dit.

Les dépenses en rechanges sont essentiellement dues au remplacement des manches filtrantes qui, d'après notre expérience, tiennent environ trois ans.

La surface filtrante pour 1000 kW du four est de l'ordre de 300 m<sup>2</sup> dont le prix — à raison de 20 francs suisses le m<sup>2</sup> — est de 6000 francs suisses.

La dépense annuelle en rechanges par kW installé est donc de 2 francs suisses.

On peut résumer comme suit les charges financières annuelles résultant d'une installation de dépoussiérage par séparateur à tissu filtrant, ces charges étant calculées par kW installé:

	Fr. s.
— amortissements et intérêts (total 10 % des investissements) soit . . . . .	8.—
— consommation de courant en admettant une exploitation de 7000 h par an et le prix du courant à 3 centimes . . . . .	35.—
— rechanges de manches . . . . .	2.—
— autres dépenses d'entretien (main-d'œuvre) . . .	1.50
Total	46.50

Ainsi par exemple, l'équipement d'un four de 9000 kVA ou 8000 kW entraînera une charge annuelle de 120 000 francs suisses. Ce four est susceptible de produire environ 6000 t de ferro-silicium à 75 % par an; la charge par tonne de ferro-alliage produit serait donc de 20 francs suisses, ce qui représente environ 2,7 % du prix du produit.

Cette charge doit être comparée à celle résultant de l'emploi d'un *Hydrex*. Un bilan d'exploitation a été publié il y a quelques années et il en ressort une charge de 16 fr. s. 80 par tonne de ferro-silicium à 75 %. Elle paraît donc inférieure à celle du filtre à tissu, mais, comme le fait remarquer l'auteur, cette charge ne tient pas compte des frais résultant du traitement éventuel des boues en vue de leur évacuation et qui entraîne souvent des dépenses importantes. De plus, après un certain temps de fonctionnement, des frais d'exploitation complémentaires ont apparu par suite de corrosions des appareils. En réalité, les charges réelles par tonne de ferro-silicium produit doivent être du même ordre pour les deux procédés décrits.

La dépense est élevée, mais elle est à la mesure des difficultés du problème qui ne peut être résolu à l'aide de moyens simples. Toutefois, ces investissements qui de plus en plus sont imposés par les règlements en vigueur dans les pays industrialisés, peuvent et doivent être atténués par le réemploi des poussières captées par voie sèche qui atteignent environ 100 à 150 kg par tonne de ferro-silicium produit.