

# Mesure de la pollution particulaire au voisinage de fours électriques à arc pour la production de l'acier

**Measurement of particulate pollution in the vicinity of electric arc furnaces in the steel industry**

A. Borroni (\*), F. Ferrario (\*\*), B. Mazza (\*), G. Nano (\*)

*Four electric arc furnaces used for steel production and corresponding to different plant and operations types were investigated.*

*Pollution in the furnace areas was determined and the occupational risk assessed, and we investigated possible relationships between dust emissions and various furnace operations.*

*In all cases dust deposits were composed mainly of the following compounds: ferric oxide, lime, silica, magnesia and carbonaceous residues, which amount to 90-94 % of total dust weight.*

*The airborne pollution was measured in various places inside and outside the working cab: in most areas the ventilation ensured a low pollution level; however, it is not sufficient for significantly reducing the pollution in areas such as tapping and furnace door. Personal samplings indicate concentrations close to the airborne values in the dirtiest places.*

*An occupational risk does exist for some jobs of short duration, specifically for the operators. People who control the operations and drive the equipment, however, are exposed to lower dust concentrations.*

*The risk was assessed on the basis of total dust concentration and in some specific plants, of lime and lead emissions: we found significant exposures to these compounds for furnace workers and cranemen, while concentrations of more toxic metals (Ni, Cr, Mn, Cd) used in carbon or low-alloy steel production were not excessively high.*

Iron and steel industry / Steel works / Arc furnace / Dust / Sampling

**Quatre fours électriques à arc utilisés pour la production de l'acier et présentant différentes modalités d'installation et de fonctionnement ont fait l'objet de ce travail métrologique. On a caractérisé la pollution dans la zone du four, déterminé les niveaux de pollution et recherché l'existence d'un lien entre l'empoussièrement et les modalités opérationnelles des fours. Pour toutes les situations, les dépôts sont essentiellement constitués d'oxyde de fer, de chaux, de silice, de composés de magnésium et de résidus carbonés.**

**La pollution particulaire ambiante a été mesurée en différents endroits à l'intérieur et à l'extérieur de la cabine de travail. La ventilation permet de maintenir un faible niveau d'empoussièrement. Elle est cependant insuffisante pour réduire l'empoussièrement dans certaines aires de travail (coulée, porte du four).**

**Les mesures individuelles se rapprochent des mesures d'ambiances dans le cas des zones les plus polluées. Le risque professionnel existe pour les travaux de courte durée effectués dans le cadre de tâches opérationnelles. Les ouvriers chargés du contrôle des opérations et de la manœuvre des installations sont exposés à des niveaux de pollution plus faibles.**

**Le risque est déterminé à partir de la concentration en poussières et (dans certaines installations) à partir de l'intensité des émissions anormalement élevées de chaux et de plomb; on ne remarque pas de niveaux d'exposition élevés en ce qui concerne les métaux les plus toxiques (Ni, Cr, Mn, Cd) dans la production de l'acier de base ou de qualité.**

Sidérurgie / Aciérie / Four électrique / Four à arc / Poussière / Prélèvement

## 1. INTRODUCTION

La quantité d'acier fabriquée au four électrique ne cesse d'augmenter dans les pays membres de la CEE. En 1975, la quantité d'acier ainsi produite représentait 18 % de la production européenne. En 1985, le pourcentage atteignait 30 % soit 45 500 000 tonnes,

pour 480 fours électriques installés. En Italie, la quantité d'acier produite électriquement est de 12 000 000 tonnes en 1986 ce qui représente plus de 50 % de la production nationale. Dans ce pays, 130 fours électriques

(\*) Dipartimento di Chimica Fisica Applicata, Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, Milano (MI), Italia  
(\*\*) Ecolab s.r.l. coop., Vignate (MI), Italia

TABLEAU I

**Principales caractéristiques d'installation et de fonctionnement des fours pendant les périodes d'échantillonnage** — Main installation and operation characteristics of furnaces during the sampling periods

Four	1	2	3	4
<b>Chargement</b>				
nombre des paniers	2-3	3	3	2-3
charbon (kg/t acier liquide)	20	—	—	5
chaux (kg/t acier liquide)	30	12	12	50
<b>Four électrique</b>				
capacité nominale (t)	70	60	60	70
puissance nominale (MVA)	74	15	15	30
brûleurs : nombre x puissance (MW)	2 x 3	—	—	2 x 3
cuve refroidie	oui	non	oui	oui
voûte refroidie	oui	non	non	oui
temps moyen de coulée à coulée (min)	105	185	200	105
productivité (t acier liquide/h)	35	20	19	35
produit : aciers courants	*	*	*	*
aciers au carbone	*	—	—	—
aciers alliés	*	—	—	—
aciers pour traitement thermique	—	*	*	—
<b>Structure</b>				
largeur de la travée (m)	25	14	14	18
hauteur de la travée (m)	14	16	16	15
position du four :	surélevé	—	—	—
à terre	—	*	*	*
par rapport à la travée :	—	*	*	—
au bord	—	—	—	*
centre	—	—	—	—
coupole ouverte	oui	non	non	non
isolement autour de l'atelier	partiel	non	non	oui
<b>Système de captage des émissions</b>				
débit d'aspiration primaire (000 Nm <sup>3</sup> /h)	86	25	20	62
débit d'aspiration secondaire (000 Nm <sup>3</sup> /h)	—	—	—	400

sont installés, dont 80 sont continuellement en exercice. Les sidérurgistes italiens (procédés à chaud) sont actuellement 60 000 dont 8 000 sont exposés aux nuisances considérées dans cet article; il s'agit d'ouvriers chargés de la fusion et du coulage de l'acier dans des unités de production localisées principalement en Lombardie.

Notre étude a pour objet la caractérisation de la pollution dans la production de l'acier au four électrique et la détermination des niveaux des différents polluants.

Le cycle de production comprend :

— le chargement de la ferraille (2-3 paniers) : après contournement de la voûte, la ferraille est introduite dans le four au moyen de paniers suspendus à un pont roulant. Le four est ensuite refermé;

— la fusion : l'énergie nécessaire à la fusion de la ferraille est fournie par un arc électrique; on peut également utiliser des matériaux combustibles et du laitier synthétique (insufflation de charbon en poudre et de chaux). Le rôle essentiel de ce dernier est de protéger les parois du four de l'irradiation;

— l'affinage : l'acier fondu est amené à la composition requise par l'adjonction d'additifs et de ferro-alliages et par l'insufflation d'oxygène qui est réalisée par introduction d'une lance à travers la porte du four;

— la coulée : le perçage du canal de coulée permet de transvaser l'acier du four dans la poche dans laquelle on ajoute des substances correctives de la composition;

— la remise en état : on contrôle le revêtement du four et on procède à l'injection de poudre réfractaire.

Ce procédé de production donne lieu à des émissions largement fluctuantes dans le temps et par conséquent à une diffusion hétérogène des polluants dans l'ambiance de travail.

Les conditions de travail dans les fonderies de fonte et d'acier font l'objet de publications [1 à 7] : il s'agit de conditions fondamentalement différentes tant pour le cycle que pour les caractéristiques de fonctionnement. Le niveau de pollution a été rarement étudié.

Le tableau I résume les principales caractéristiques des installations et du fonctionnement des fours examinés. Elles ont été maintenues constantes

au cours des mesures de la pollution ambiante.

Les deux fours situés au rez-de-chaussée (installations 2 et 3) fonctionnent avec une puissance spécifique limitée (0,25 MVA/t), sans brûleurs et sans emploi de laitier synthétique. Ils ont une production limitée (20 t/h). Ils sont anciens et seront rapidement remplacés.

Dans les installations 1 et 4, les innovations les plus courantes ont été introduites (systèmes mécanisés pour la charge d'additifs, brûleurs auxiliaires, enveloppes refroidies et emploi de laitier synthétique). Les rendements horaires sont assez élevés en raison de la mise en jeu de puissances spécifiques (moyennes-hautes (0,5 – 1,0 MVA/t)).

En ce qui concerne le four 4, l'atelier a été complètement isolé par des cloisons et équipé au-dessus du four de hottes pour le captage des fumées secondaires.

## 2. METHODES

### DE PRELEVEMENT

### ET D'ANALYSE

#### 2.1. Stratégie de prélèvement

Le tableau II résume les objectifs de l'étude et la méthodologie adoptée pour y parvenir.

On pratique des prélèvements atmosphériques à des points fixes (pompes TECORA mod. CTE série Ecol et Crami mod. Simplex B) et en même temps des prélèvements individuels (Du Pont mod. P-4000A et Alfa 1). Ces derniers concernent les opérateurs de four, les contrôleurs de qualité et les grutiers. Les poussières sont prélevées par filtration sur des membranes (Millipore MEC,  $d = 0,8 \mu$ ) de 47 mm (captage à des points fixes) et 20 mm (captage individuel) de diamètre, en utilisant des porte-membranes à cône ouvert et en adoptant des débits de

TABLEAU II

**Objectifs de l'étude de pollution particulaire, méthodologie adoptée et paramètres physico-chimiques mesurés** – Objectives of dust pollution study, adopted methodology and physical-chemical measured parameters

Objectifs	Méthodologie	Paramètres
Caractéristiques de la pollution	Prélèvement sur filtre membrane Prélèvement des dépôts	Composition chimique Granulométrie
Mesure de la pollution ambiante	Prélèvements fixes	Concentration Composition Silice libre
Relation entre pollution et cycles de fonctionnement	Prélèvements séquentiels fixes	Concentration
Mesure de l'exposition des travailleurs	Prélèvements individuels	Concentration Composition

prélèvement de 10 à 2,5 l/min respectivement. Dans ces conditions, les vitesses de captage des principaux composants de la pollution particulaire (oxydes de fer de masse volumique 5000 kg/m<sup>3</sup>) sont de 0,13 – 0,15 m/s et répondent aux bonnes pratiques d'échantillonnage [8, 9].

Les points fixes de prélèvement (identifiés dans la figure 1 pour le four 1) ont été choisis pour caractériser au mieux la pollution en provenance du four et de ses équipements.

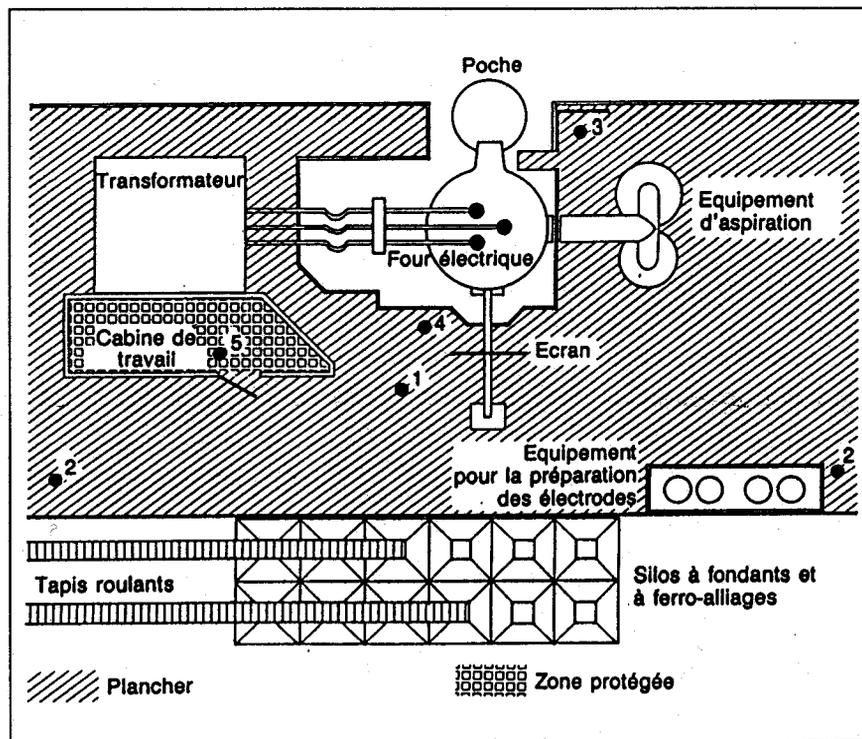
Il s'agit :

1. du centre du plancher pour étudier la variation temporelle de la pollution particulaire au cours du cycle de production ;
2. du bord du plancher pour étudier l'étendue spatiale de la zone concernée par la retombée des poussières ;
3. de la zone de coulée pour évaluer le niveau d'exposition des ouvriers qui y travaillent pendant les courtes périodes de coulée et de remise en état du four ;
4. de la porte du four pour évaluer le niveau d'exposition des sidérurgistes qui travaillent pendant les brèves périodes d'affinage et de remise en état ;
5. de la cabine de travail pour vérifier que celle-ci garantit un niveau de protection correct au personnel qui y travaille sans interruption pendant la fusion.

Les prélèvements individuels concernent les opérateurs qui travaillent dans les endroits 1-5 et exécutent les opérations suivantes :

1. – signaux au grutier après le chargement de la ferraille et pendant les manœuvres de déplacement des matériaux auxiliaires,  
– préparation et placement de la lance qui insuffle l'oxygène et de celle qui insuffle le charbon en poudre,  
– contrôle du procédé métallurgique pendant l'affinage ;

2. – allongement des électrodes,  
– préparation et dosage des fondants (chaux, calcaire, fluorine) et des ferro-alliages (FeSi, FeMn, FeCr, etc.) en l'absence d'un système de chargement mécanisé,  
– approvisionnement et préparation du réfractaire (oxyde de magnésium) ;
3. – perçage (frappement du trou de coulée) avec la lance à oxygène,  
– adjonction des correctifs dans la poche de coulée (en l'absence d'une installation mécanisée),  
– fermeture du trou de coulée par du réfractaire et réparation du canal de coulée ;
4. – chargement des additifs dans le four (en l'absence d'une installation mécanisée),  
– décrassage du laitier dans le baquet,  
– prélèvement des échantillons d'acier,  
– mesure de la température de l'acier avec un thermocouple,  
– réparation du revêtement du four par injection de poudre réfractaire ;



**Fig. 1. Points fixes de prélèvement pour la pollution particulaire et les dépôts :** point 1 : centre du plancher (Plancher); point 2 : extrémité du plancher (Plancher éloigné); point 3 : plate-forme de la coulée (Coulée); point 4 : porte du four; point 5 : cabine de travail (Cabine) - Fixed positions of the airborne and deposited dust sampling : position 1 : middle of the stage; position 2 : edge of the stage; position 3 : tapping platform; position 4 : furnace door; position 5 : working stand

5. - contrôle et réglage du courant et du voltage,

- manœuvre du four et des équipements auxiliaires (chargement des fondants et des ferro-alliages, aspiration, etc.).

Pour chaque four, on a effectué simultanément 5-6 séries de prélèvements à des points fixes et de prélèvements individuels.

Le nombre des prélèvements à des points fixes (115, distribués uniformément entre les 4 installations) a été suffisant pour caractériser la distribution spatiale de la pollution et mettre en relation les phases du cycle au niveau de la pollution.

Le nombre de prélèvements individuels (95) nous a permis d'évaluer le niveau d'exposition des travailleurs et sa variabilité en fonction de l'apport technologique à l'installation et de la tâche.

La durée des prélèvements correspond au cycle complet de coulée (« tap to tap ») qui se répète en séquence sans interruption; les prélèvements à points fixes et individuels ont une durée identique, comprise entre 100 et 200 minutes.

## 2.2. Méthodes d'analyse

Le poids de la poussière déposée a été mesuré par pesage des filtres membranes avant et après le prélèvement au moyen d'une balance Mettler HL52. Avant le pesage, les membranes ont été conditionnées.

L'analyse de la composition des poussières a été effectuée en trois étapes :

- la silice cristalline (quartz) a été analysée par diffraction des rayons X (appareil Rigaku mod. D Max - II 13);

- les métaux ont été analysés par spectrométrie ou émission de plasma (appareil SMI mod. Spectraspan IV) après dissolution des échantillons par attaque acide;

- le résidu insoluble a été identifié comme dépôt carboné.

Par convention, le calcul de la concentration de chaque composant repose sur la complète oxydation des éléments constituants.

## 3. RESULTATS ET DISCUSSION

### 3.1. Dépôts de poussières

Les résultats sont présentés dans le tableau III et à la figure 2 : on a relevé des traces de cadmium, d'étain et de cuivre (moins de 0,05 %) à tous les points de prélèvement.

On retrouve dans les dépôts cinq constituants (oxydes de fer sous forme de  $Fe_2O_3$ . $FeO$ , chaux, silice amorphe et cristalline, oxyde de magnésium, résidus carbonés) qui représentent 90-94 % du poids total. Ceci est valable pour chaque four, toutefois l'analyse des dépôts met en évidence l'influence de l'équipement utilisé.

La variation des dépôts en fonction de la localisation a été étudiée en comparant les valeurs moyennes des concentrations aux différents points de prélèvement par le test t de Student (niveau de confiance = 95 %).

La fraction d'oxydes de fer déposée dans le milieu de travail est quasiment constante. On a constaté une différence entre l'intérieur de la cabine et l'extérieur mais aucune différence statistiquement significative ne peut être mise en relation avec la forte variabilité des dépôts extérieurs à la cabine.

Il n'y a pas de différence remarquable en ce qui concerne les pourcentages de chaux et de dépôts carbonés.

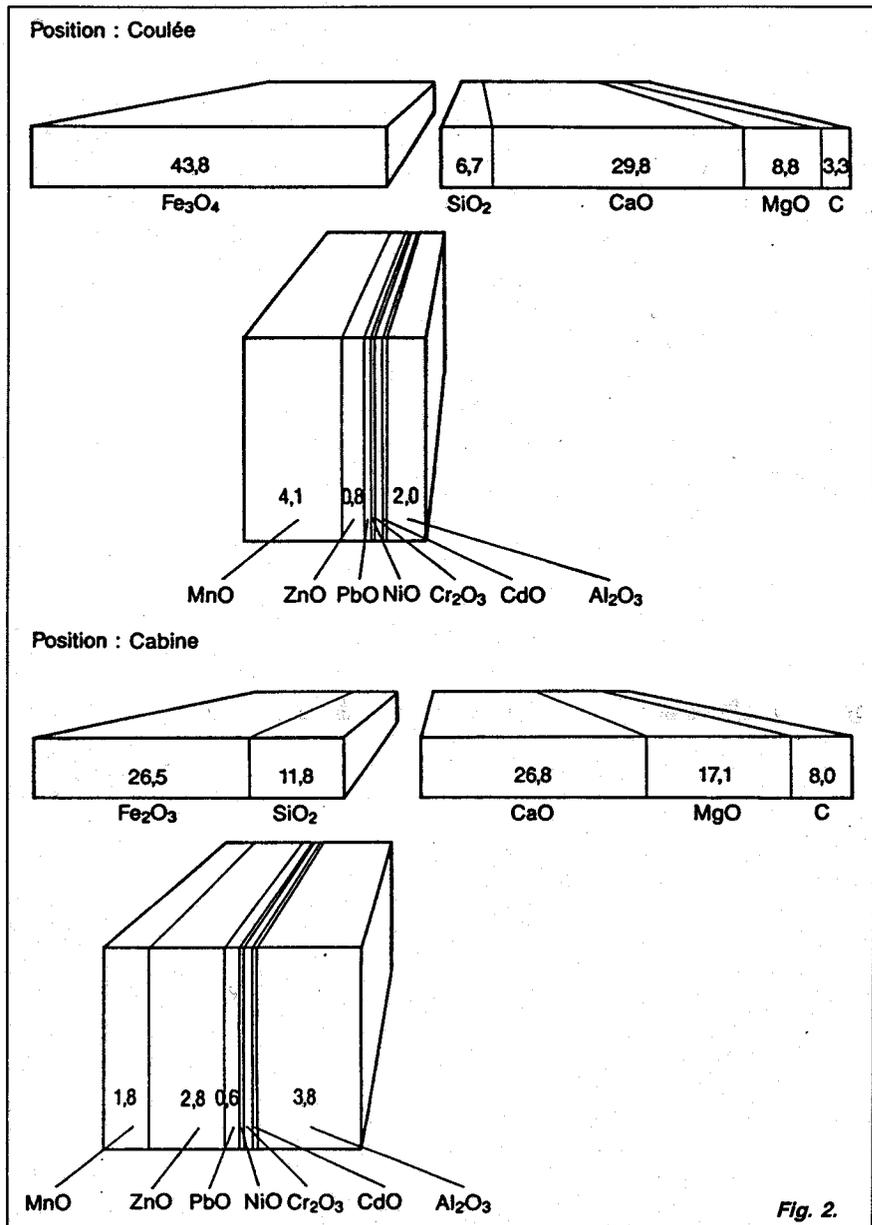


Fig. 2.

TABLEAU III

**Analyse des dépôts de poussières (% en poids : valeur moyenne  $\pm$  écart quadratique moyen) dans différents endroits à proximité des quatre fours** - Analysis of the deposited dust (% in weight : mean  $\pm$  standard deviation) in different areas near the four furnaces

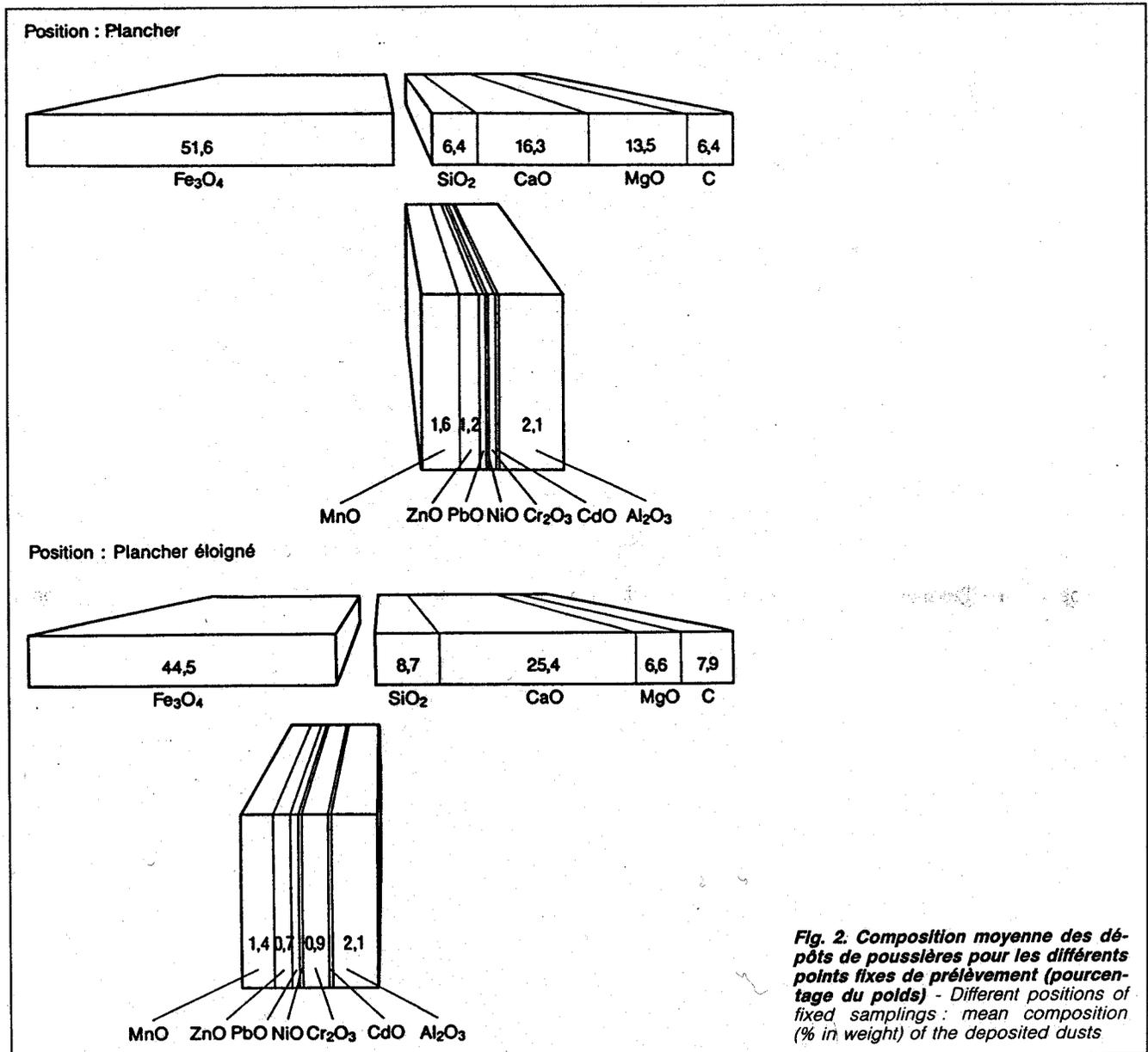
(Cd < 0,0005 mg/m<sup>3</sup> - Cu < 0,0005 mg/m<sup>3</sup> - Sn < 0,0005 mg/m<sup>3</sup>)

Constituants	Plancher	Plancher éloigné	Coulée	Cabine
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .FeO	51,6 $\pm$ 6,0	44,5 $\pm$ 25,6	43,8 $\pm$ 24,8	26,5 $\pm$ 5,0
MnO	1,6 $\pm$ 0,6	1,4 $\pm$ 1,1	4,1 $\pm$ 3,8	1,8 $\pm$ 0,1
ZnO	1,2 $\pm$ 0,4	0,7 $\pm$ 0,2	0,8 $\pm$ 0,4	2,8 $\pm$ 1,1
PbO	0,3 $\pm$ 0,1	0,4 $\pm$ 0,1	0,2 $\pm$ 0,1	0,6 $\pm$ 0,2
NiO	<0,05	<0,05	<0,05	0,1 $\pm$ 0,0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2 $\pm$ 0,0	0,9 $\pm$ 0,5	0,2 $\pm$ 0,1	0,2 $\pm$ 0,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,1 $\pm$ 0,8	2,1 $\pm$ 0,8	2,0 $\pm$ 1,3	3,8 $\pm$ 0,9
SiO <sub>2</sub>	6,4 $\pm$ 2,8	8,7 $\pm$ 1,6	6,7 $\pm$ 0,4	11,8 $\pm$ 4,0
CaO	16,3 $\pm$ 6,4	25,4 $\pm$ 18,0	29,8 $\pm$ 22,1	26,8 $\pm$ 4,5
MgO	13,5 $\pm$ 2,1	6,6 $\pm$ 5,0	8,8 $\pm$ 0,8	17,1 $\pm$ 2,5
C	6,4 $\pm$ 4,2	7,9 $\pm$ 7,6	3,3 $\pm$ 0,6	8,0 $\pm$ 1,2

La silice amorphe et cristalline est en proportion constante (6-8 %). On note cependant une valeur significative ( $p < 0,05$ ) pour l'enrichissement en cabine.

Au contraire, les dépôts d'oxyde de magnésium sont hétérogènes : on observe des différences significatives ( $p < 0,03$ ) entre les endroits à proximité du four et ceux qui en sont éloignés d'une part et entre l'intérieur de la cabine et l'extérieur d'autre part.

En ce qui concerne les autres constituants, on trouve un dépôt élevé d'oxyde de manganèse à la coulée et des dépôts minimes de plomb, de nickel et de chrome (il en est de



**Fig. 2. Composition moyenne des dépôts de poussières pour les différents points fixes de prélèvement (pourcentage du poids)** - Different positions of fixed samplings : mean composition (% in weight) of the deposited dusts

même pour le cadmium, le cuivre et l'étain dont la proportion est si faible qu'on peut à peine la déterminer analytiquement).

On a recherché un lien éventuel entre la composition des dépôts et quelques variations de fonctionnement des fours : on n'a pas mis en évidence de relations significatives entre la consommation de chaux et de charbon et les dépôts, ni entre la composition des dépôts et les modalités d'utilisation de la masse à projection.

### 3.2. Pollution particulaire ambiante

Le tableau IV présente les données sur l'empoussièremment à point fixe (les données ont été regroupées four par four).

On suppose que la distribution log-normale est celle qui représente le mieux les concentrations de polluants relevées dans le milieu de travail [10]. Les différents groupes de déterminations sont donc caractérisés par GM (moyenne géométrique), indice de la concentration de tendance, exprimé en  $\text{mg}/\text{m}^3$  et par GSD (déviation géométrique standard), indice de la dispersion des concentrations autour de la valeur centrale.

On a examiné les fluctuations de l'empoussièremment en fonction des différentes solutions technologiques en comparant les moyennes par le test t de Student (niveau de confiance = 95 %) : on ne remarque aucune variation statistiquement significative si l'on change la puissance spécifique (MVA/t de capacité) et l'aspiration spécifique ( $\text{Nm}^3/\text{h} \times \text{t}$ ) des fours [11].

Le four équipé d'isolement et d'aspiration secondaire, tout en présentant des valeurs moyennes d'empoussièremment plus élevées que celles des autres fours, est caractérisé par des fluctuations plus limitées autour de la concentration moyenne, en raison d'une homogénéisation de la pollution dans l'atelier.

#### Isolement partiel ou absent

Prélèvements = 82  
GM = 1,6  $\text{mg}/\text{m}^3$   
GSD = 2,53

#### Isolement complet

Prélèvements = 22  
GM = 1,8  $\text{mg}/\text{m}^3$   
GSD = 1,96

TABLEAU IV

### Évaluation de l'empoussièremment ambiant à proximité des fours – Environmental dust evaluation near the furnaces

Installation	Zone	Nombre de prélèvements	GM ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	GSD
Four 1	Toutes	42	1,8	2,82
Four 2	Toutes	22	1,3	2,10
Four 3	Toutes	18	1,3	2,36
Four 4	Toutes	22	1,8	1,96
Four 1	Plancher	6	1,9	1,67
Four 2	Plancher	5	1,2	1,73
Four 3	Plancher	5	0,7	3,53
Four 4	Plancher	5	0,8	1,37
Four 1	Coulée	6	12,8	2,94
Four 2	Coulée	6	1,4	1,92
Four 3	Coulée	7	2,1	1,87
Four 4	Coulée	5	4,5	1,52

Pour la zone de coulée, on observe des différences significatives ( $p < 0,02$ ) entre les fours : en particulier, les installations qui ont une capacité et une productivité plus grandes (four 1 et 4) présentent des valeurs d'empoussièremment plus élevées.

On a procédé ensuite à l'analyse des échantillons prélevés par les capteurs fixes, en les rassemblant par points de prélèvement (tableau V et fig. 3).

La zone de coulée présente des concentrations plus élevées (comparaison des moyennes par le test t de Student :  $p < 0,02$ ) par rapport aux autres endroits contrôlés (plancher, cabine), pour lesquels on ne relève

aucune différence significative de contamination.

Dans la cabine, on a trouvé des concentrations plus élevées que celles mesurées au niveau du plancher, bien qu'il s'agisse d'une pièce isolée qui devrait être en principe moins empoussiérée.

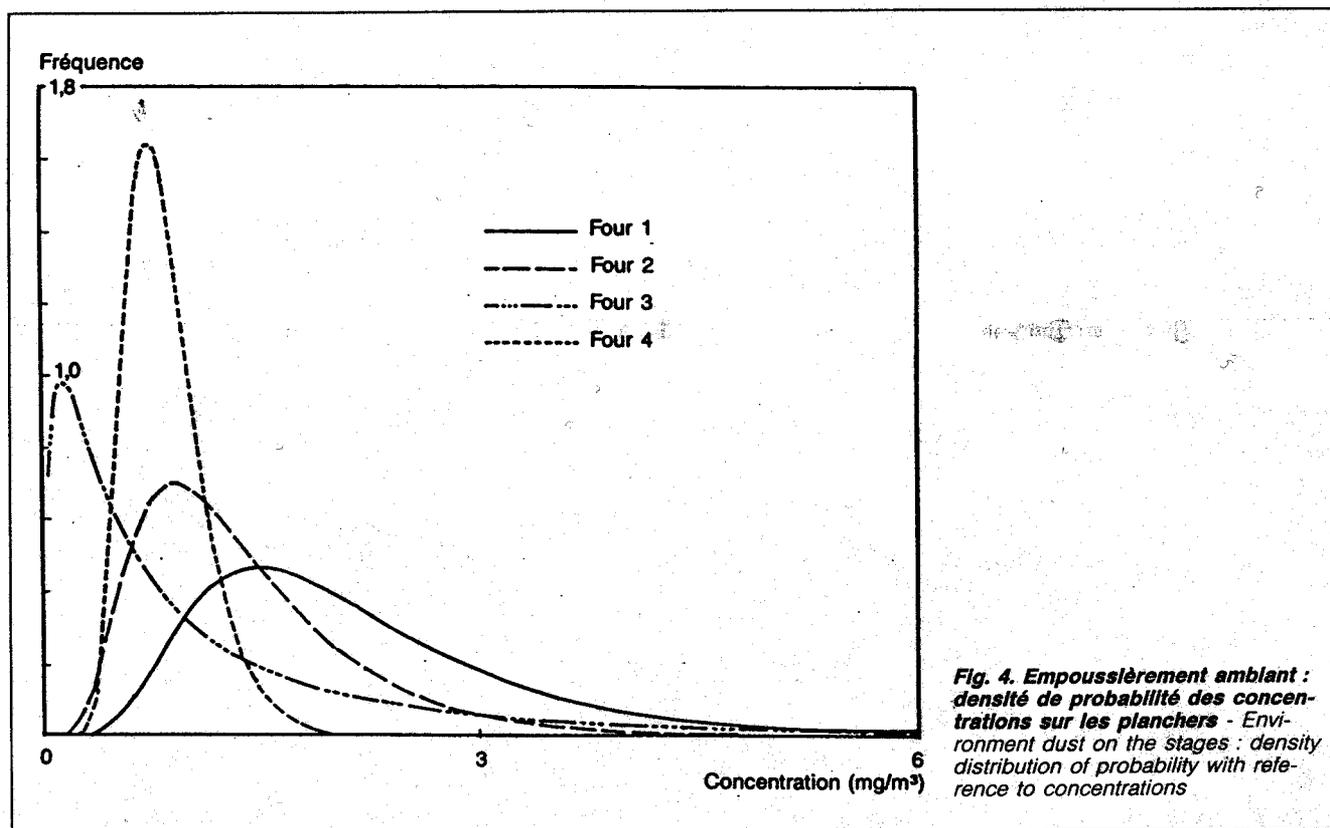
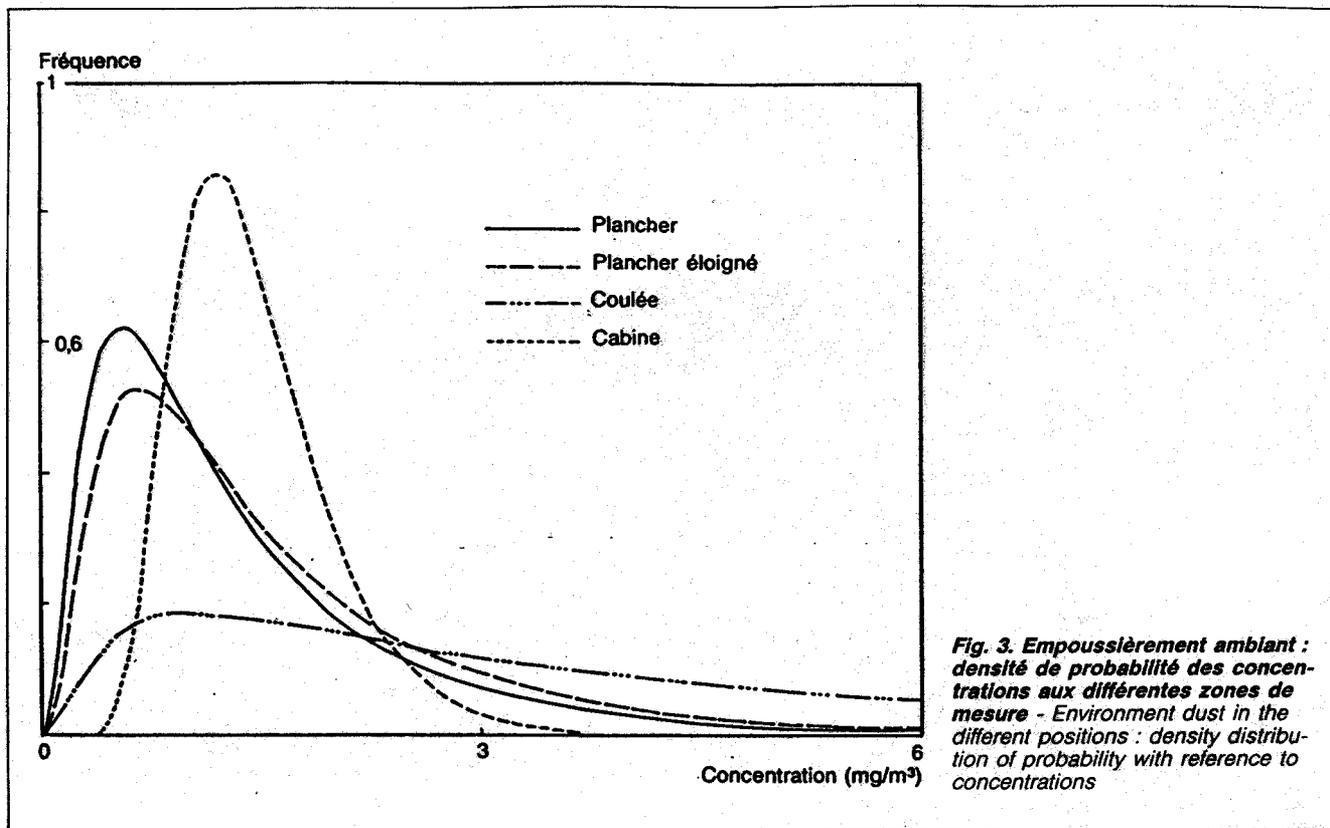
En ce qui concerne la quantité de poussière relevée sur les planchers (fig. 4), on n'observe pas de différences significatives entre les valeurs qui caractérisent les différents fours.

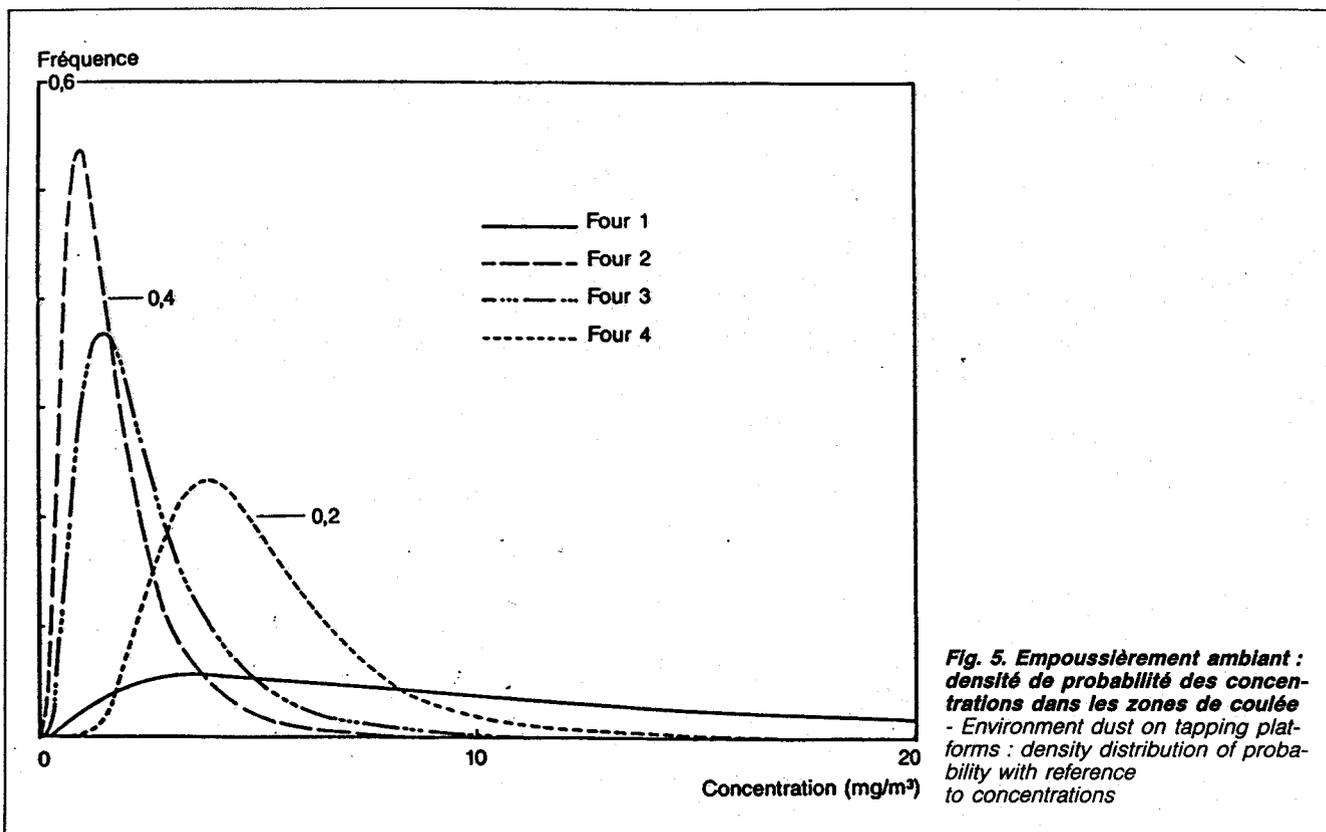
L'installation avec isolement complet autour de l'atelier (four 4) présente une quantité de poussière plus faible et

TABLEAU V

### Évaluation de l'empoussièremment ambiant dans différentes zones de mesure – Environment dust evaluation in different areas

Position	Nombre de prélèvements	GM ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	GSD
Plancher	21	2,1	2,21
Plancher éloigné	21	1,3	2,20
Coulée	24	3,5	3,00
Cabine	25	1,4	1,42





**Fig. 5. Empoussièrement ambiant : densité de probabilité des concentrations dans les zones de coulée** - Environment dust on tapping platforms : density distribution of probability with reference to concentrations

TABLEAU VI

**Évaluation de l'empoussièrement au niveau du plancher (four 1) pendant les différentes phases du cycle de production -**

Dust evaluation on the stage (furnace 1) during the different periods of the working cycle

Phase	Nombre de prélèvements	GM (mg/m <sup>3</sup> )	GSD
Fusion	10	1,6	1,91
Affinage	4	2,0	1,19
Coulée et rétablissement	5	3,3	1,53

TABLEAU VII

**Composition des dépôts de poussières et des poussières ambiantes (% en poids) dans les différentes zones (moyenne arithmétique ± écart quadratique moyen; p = niveau de signification du test de corrélation) -**

Composition of the deposited and airborne dust (% in weight) in the different areas (arithmetic mean ± standard deviation; p = significance level of the correlation test)

Constituant	Poussières	Plancher	Coulée	Cabine
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .FeO	Sédimentées	51,6 ± 6,0	43,8 ± 24,8	26,5 ± 4,9
	Ambiantes	15,9 ± 5,0 p < 0,01	12,9 ± 5,0 p < 0,04	13,7 ± 1,7 p < 0,01
MnO	Sédimentées	1,6 ± 0,6	4,1 ± 3,8	1,8 ± 0,1
	Ambiantes	2,1 ± 1,4	5,7 ± 4,7	2,4 ± 1,4
CaO	Sédimentées	16,3 ± 6,4	29,8 ± 22,1	26,8 ± 4,5
	Ambiantes	30,2 ± 9,1 p < 0,01	43,8 ± 18,5	36,5 ± 7,2 p < 0,02
SiO <sub>2</sub>	Sédimentées	6,4 ± 2,8	6,7 ± 0,4	11,8 ± 4,0
	Ambiantes	15,9 ± 10,0	8,0 ± 8,5	11,3 ± 9,0
MgO	Sédimentées	13,5 ± 2,1	8,8 ± 0,7	17,1 ± 2,5
	Ambiantes	11,6 ± 7,1	8,9 ± 2,9	11,8 ± 4,2 p < 0,03

surtout plus homogène sur le plancher : l'aspiration secondaire par les hottes, dans ce cas, atteint le même débit de ventilation générale assuré par la circulation naturelle dans les ateliers ouverts, tandis qu'elle n'est pas efficace pour ce qui concerne les émissions localisées et discontinues, comme on peut le déduire par l'examen des concentrations dans la zone de coulée (fig. 5).

**3.3. Pollution suivant les phases du cycle de production**

Pour le four 1, on a étudié la diffusion des poussières en effectuant des prélèvements ambiants sur le plancher à chaque phase de travail, pendant plusieurs cycles complets (tableau VI).

On a vérifié que les phases de fusion étaient plus sensibles au type de ferraille employée et à la discontinuité de l'émission (chargement de la corbeille, début de la fusion, etc.). La phase d'affinage présente une grande régularité : le procédé a lieu à bain fondu. La coulée et le rétablissement sont responsables d'une importante

émission de poussières, parce que ces phases ne bénéficient pas de l'effet de dilution de l'air produit par l'aspiration, le conduit d'aspiration des fumées primaires étant détaché. Pour la même raison, l'émission de la poche de coulée a aussi des conséquences sur le plancher du four.

Néanmoins, les valeurs d'empoussiè-  
rement ne sont pas statistiquement  
différentes.

### 3.4. Relation entre dépôts et pollu- tion ambiante

On a recherché une relation entre la pollution sédimentée et ambiante en comparant, par le test t de Student, les valeurs moyennes de concentration des composants principaux de la poussière prélevée au même endroit. Dans le tableau VII, on a indiqué la composition du dépôt et celle de l'aérosol; la différence est significative ( $p < 0,05$ ).

On remarque des différences signifi-  
catives pour les oxydes de fer et la  
chaux (zone de plancher et de cabine)  
et l'oxyde de magnésium (seulement  
pour la zone de cabine).

### 3.5. Prélèvements Individuels

Les échantillons obtenus pendant le cycle complet de production sont présentés séparément pour chaque four dans le tableau VIII.

L'exposition individuelle n'est pas si-  
gnificativement différente entre les dif-  
férents fours et n'est pas corrélée  
avec les facteurs examinés : puis-  
sance spécifique, productivité, aspira-  
tion spécifique.

On a soumis à un test d'analyse de  
variance les résultats relatifs à l'expo-  
sition des ouvriers du four 4 en  
regroupant ceux-ci selon les tâches  
(tableau IX et fig. 6) :

- coordination de la production et  
contrôle de la qualité;
- manœuvre du four (chef du four);
- exécution (personnel affecté au  
four).

TABLEAU VIII

### Concentrations mesurées (GM et GSD) par prélèvement individuel et intervalles de confiance au seuil de probabilité de 95 % - Measured concentrations by personal samplings and confidence intervals at the probability level 95 %

(Cd < 0,0005 mg/m<sup>3</sup> - Cu < 0,0005 mg/m<sup>3</sup> - Sn < 0,0005 mg/m<sup>3</sup>)

Composants : Installation	Nombre prél.	GSD	Lim. inf. (mg/m <sup>3</sup> )	GM (mg/m <sup>3</sup> )	Lim. sup. (mg/m <sup>3</sup> )
Poussières	76	1,90	0,9	3,3	11,6
Four 1		2,10	0,9	3,8	16,3
Four 2		1,71	1,1	3,1	8,9
Four 3		1,96	0,8	2,9	10,8
Four 4		1,85	1,0	3,4	11,3
Ponts roulants		2,30	0,2	0,9	4,6
Oxydes de fer exprimés en Fe	71	2,24	0,042	0,205	0,996
Four 1		1,58	0,081	0,198	0,485
Four 2		1,81	0,061	0,194	0,620
Four 3		1,82	0,073	0,236	0,762
Four 4		1,46	0,140	0,294	0,617
Oxyde de manganèse exprimé en Mn	71	3,09	0,005	0,043	0,392
Four 1		2,71	0,013	0,090	0,635
Four 2		3,46	0,003	0,031	0,352
Four 3		2,89	0,003	0,022	0,173
Four 4		2,12	0,015	0,065	0,283
Oxyde de zinc exprimé en Zn	61	2,44	0,016	0,090	0,517
Four 1		1,54	0,012	0,028	0,065
Four 2		2,70	0,011	0,080	0,559
Four 3		2,52	0,015	0,090	0,552
Four 4		1,63	0,040	0,104	0,217
Oxydes de plomb exprimé en Pb	71	2,85	0,005	0,036	0,280
Four 1		2,22	0,005	0,022	0,107
Four 2		2,50	0,006	0,039	0,233
Four 3		2,19	0,010	0,045	0,207
Four 4		1,48	0,020	0,044	0,095
Oxyde de nickel exprimé en Ni	70	2,74	< 0,001	0,001	0,007
Composés du chrome exprimés en Cr	71	2,21	0,001	0,004	0,019
Oxyde d'aluminium exprimé en Al	71	1,77	0,010	0,032	0,098
Four 1		1,95	0,008	0,031	0,115
Four 2		1,70	0,011	0,030	0,084
Four 3		1,73	0,009	0,026	0,077
Four 4		1,64	0,018	0,047	0,124
Silicates et silice exprimés en Si	71	2,33	0,009	0,045	0,236
Four 1		2,20	0,015	0,072	0,338
Four 2		2,36	0,009	0,045	0,241
Four 3		2,78	0,006	0,047	0,348
Four 4		2,01	0,008	0,033	0,130
Oxyde, hydroxyde, carbonate de calcium exprimés en Ca	71	2,22	0,090	0,430	2,053
Four 1		2,56	0,091	0,572	3,610
Four 2		1,65	0,136	0,365	0,977
Four 3		1,64	0,164	0,434	1,146
Four 4		1,49	0,246	0,538	1,176
Oxyde de magnésium exprimé en Mg	71	2,30	0,028	0,145	0,742
Four 1		2,41	0,024	0,134	0,751
Four 2		1,99	0,041	0,157	0,605
Four 3		2,49	0,019	0,114	0,680
Four 4		2,12	0,035	0,154	0,672

TABLEAU IX

**Évaluation de l'empoussièrement en fonction des différentes tâches exécutées au four 4** - Dust evaluation for different jobs at furnace 4

Tâche	Nombre de prélèvements	GM (mg/m <sup>3</sup> )	GSD
Contrôle du four	5	2,2	1,37
Manœuvre du four	5	3,0	1,47
Attachés au four	10	4,7	1,96

On remarque que l'intensité et la variabilité de l'exposition est moins importante pour les fonctions de contrôle et de manœuvre, que pour les tâches d'exécution : on relève une différence significative ( $p < 0,02$ ) entre l'exposition associée au contrôle et à la manœuvre et celle due à des fonctions d'exécution.

L'exposition individuelle à l'empoussièrement a été comparée à celle relevée en même temps aux points fixes, en construisant des profils spaciaux de concentration suivant les typologies installées (fig. 7).

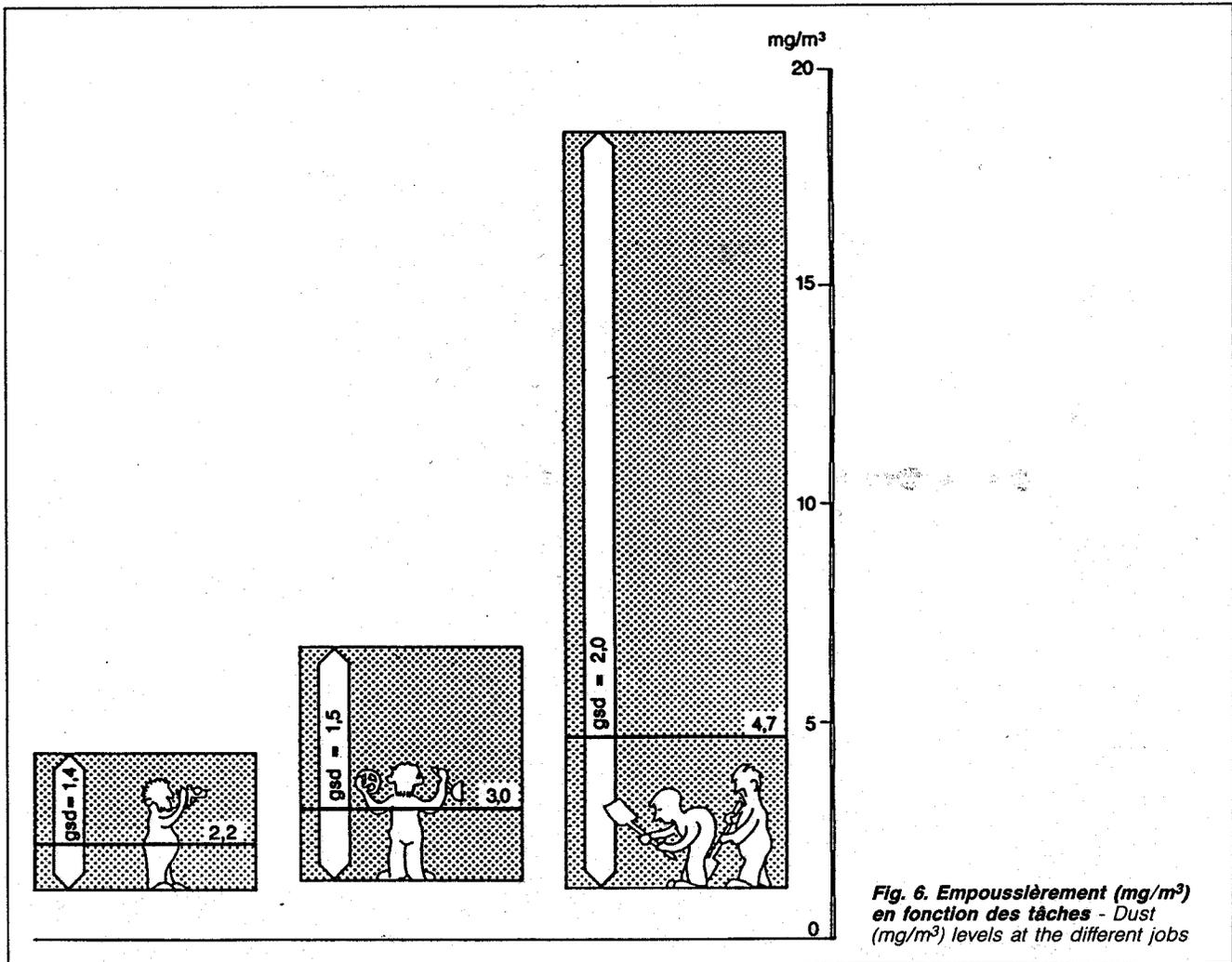
La pollution relevée dans les installations modernisées (four 1 et 4) diffère

peu de celle des fours anciens (four 2 et 3).

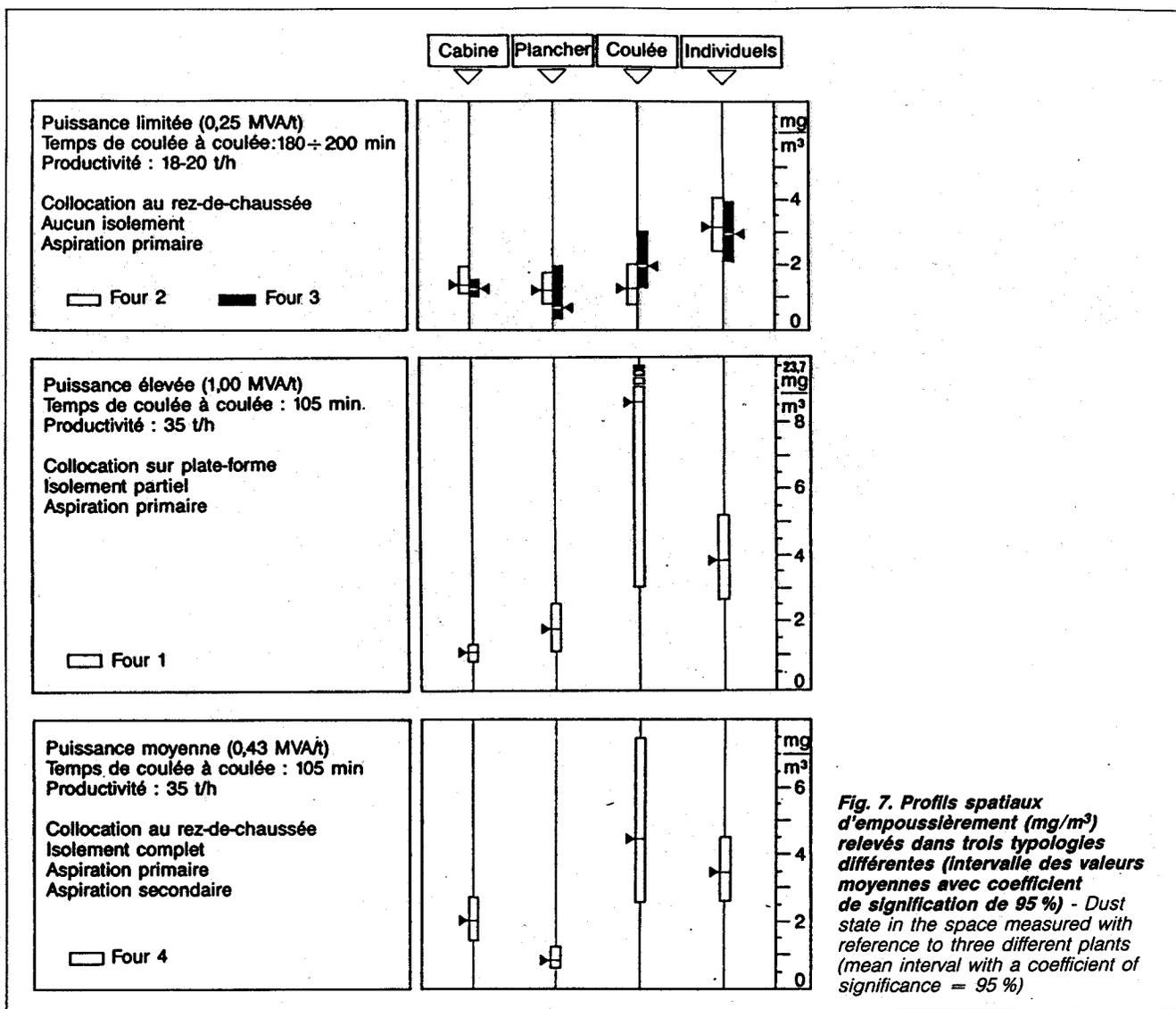
En effet, la réduction des temps du cycle implique une répétition plus fréquente de toutes les manœuvres et de toutes les opérations polluantes qui nécessitent une mécanisation et une automatisation poussées.

Les concentrations individuelles, relatives à l'ensemble des fours, sont nettement supérieures à celles déterminées par les capteurs fixes et sont moins uniformes, aussi bien au niveau du plancher que de la cabine.

En conséquence, l'exposition des sidérurgistes préposés au four, qui effectuent des interventions de courte durée (transport de ferro-alliages, rétablissement de la digue, extraction du baquet, chargement des additifs dans le four et dans la poche de



**Fig. 6. Empoussièrement (mg/m<sup>3</sup>) en fonction des tâches - Dust (mg/m<sup>3</sup>) levels at the different jobs**



**Fig. 7. Profils spatiaux d'empoussièrement (mg/m<sup>3</sup>) relevés dans trois typologies différentes (Intervalle des valeurs moyennes avec coefficient de signification de 95 %) - Dust state in the space measured with reference to three different plants (mean interval with a coefficient of significance = 95 %)**

coulée, perçage, réparation réfractaire) mais dans des endroits insuffisamment protégés, est mieux évaluée par les capteurs fixes situés sur les surfaces occupées pendant la plus grande partie du cycle (cabine, plancher).

L'exposition individuelle à chacun des éléments est proche de celle mesurée aux points fixes les plus pollués; même dans ce cas, les échantillonnages effectués au niveau du plancher et dans la cabine ne donnent pas une indication valable de l'exposition des

travailleurs qui effectuent des interventions sur l'installation.

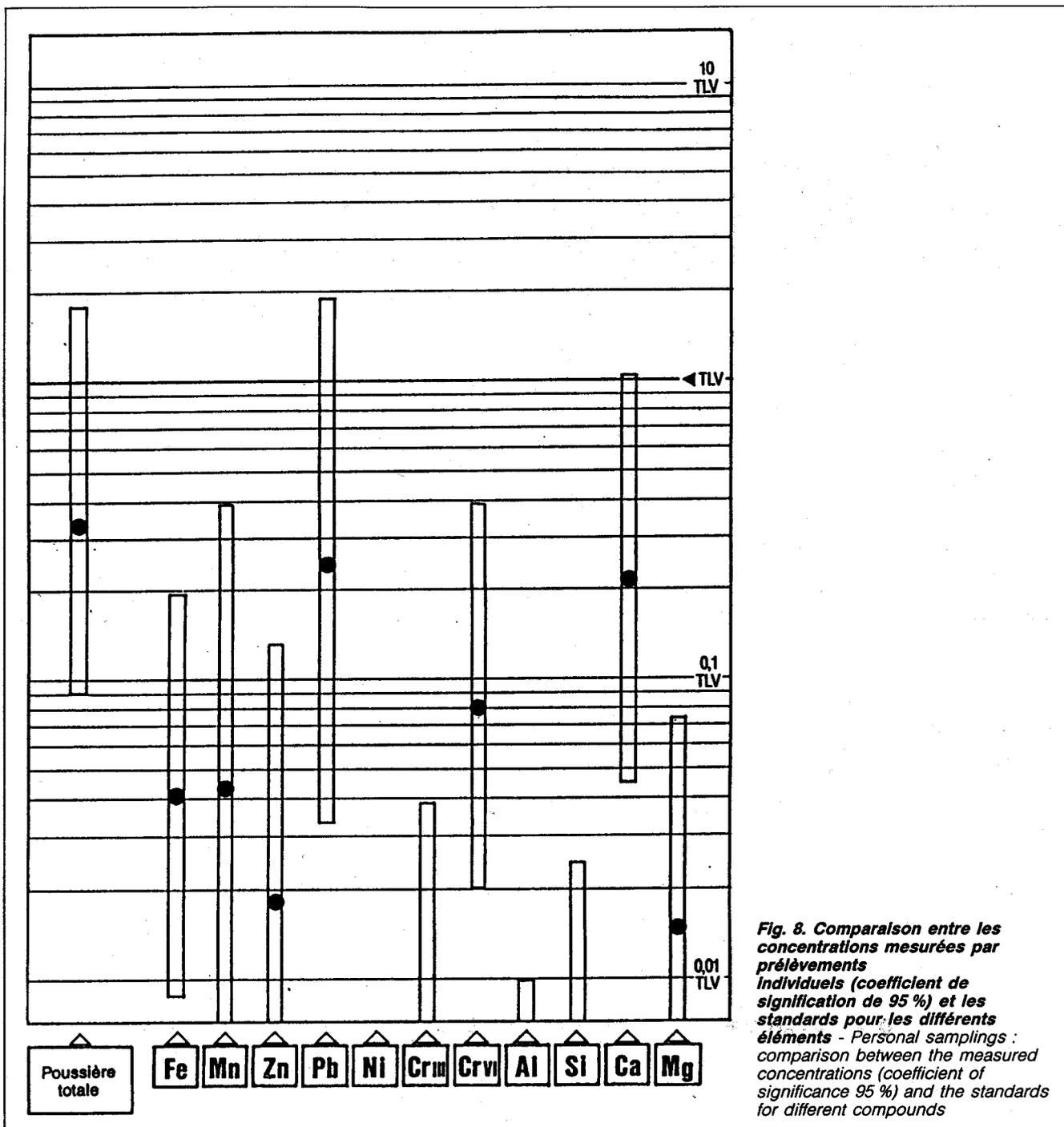
Pour estimer le risque spécifique lié à chaque élément composant de la poussière, dans la figure 8, on compare les concentrations mesurées (voir le tableau VIII) avec les standards d'hygiène industrielle (TLV-TWA ACGIH 1988-89 - tableau X).

Les concentrations ont été mesurées sur des périodes de 100 à 200 minutes, qui correspondent à la durée des cycles successifs de coulée: par conséquent les concentrations mesu-

rées sont représentatives de l'exposition pendant la totalité du travail.

Pour les poussières, le plomb et le calcium, c'est-à-dire les éléments pour lesquels on prévoit un possible dépassement des standards, on a distingué les concentrations en fonction de chacune des installations (fig. 9).

On a trouvé des expositions appréciables au manganèse (0,200-0,500 mg/m<sup>3</sup>) pour quelques-uns des travailleurs chargés de l'opération d'adjonction en poche de coulée et de l'opération de coulée.



**Fig. 8. Comparaison entre les concentrations mesurées par prélèvements individuels (coefficient de signification de 95 %) et les standards pour les différents éléments - Personal samplings : comparison between the measured concentrations (coefficient of significance 95 %) and the standards for different compounds**

On a mesuré une pollution de fond par le nickel et le chrome à peine appréciable analytiquement, pouvant atteindre 0,015 mg/m<sup>3</sup> à la coulée [12]. Il est important de préciser que les types d'installation examinés concernent la production d'un acier de base ou de qualité, qui contient une proportion faible de nickel et de chrome en alliage (Ni maximum 0,15 %, Cr maximum 0,30 %).

L'exposition individuelle au plomb est extrêmement variable, puisqu'il s'agit

d'installations qui utilisent de la ferraille différemment polluée. Il faut donc considérer séparément chaque four et chaque cycle de production et vérifier la diffusion de ces oxydes lorsqu'il n'y a pas d'aspiration secondaire même dans des endroits éloignés de l'installation de fusion [12].

Pour, les travailleurs à terre et les grutiers, nous avons trouvé des expositions supérieures à 0,150 mg/m<sup>3</sup> durant certains cycles.

Le dépassement du standard pour le calcium (considéré comme oxyde) est dû au système d'adjonction inadéquat installé au four 1.

Pour la silice libre cristallisée (quartz), on a relevé des teneurs comprises entre 1 et 3 % : dans tous les fours considérés, on emploie des matériaux réfractaires sans silice ou à basse teneur en silice.

La pollution de fond est due probablement à l'emploi de sable lors des

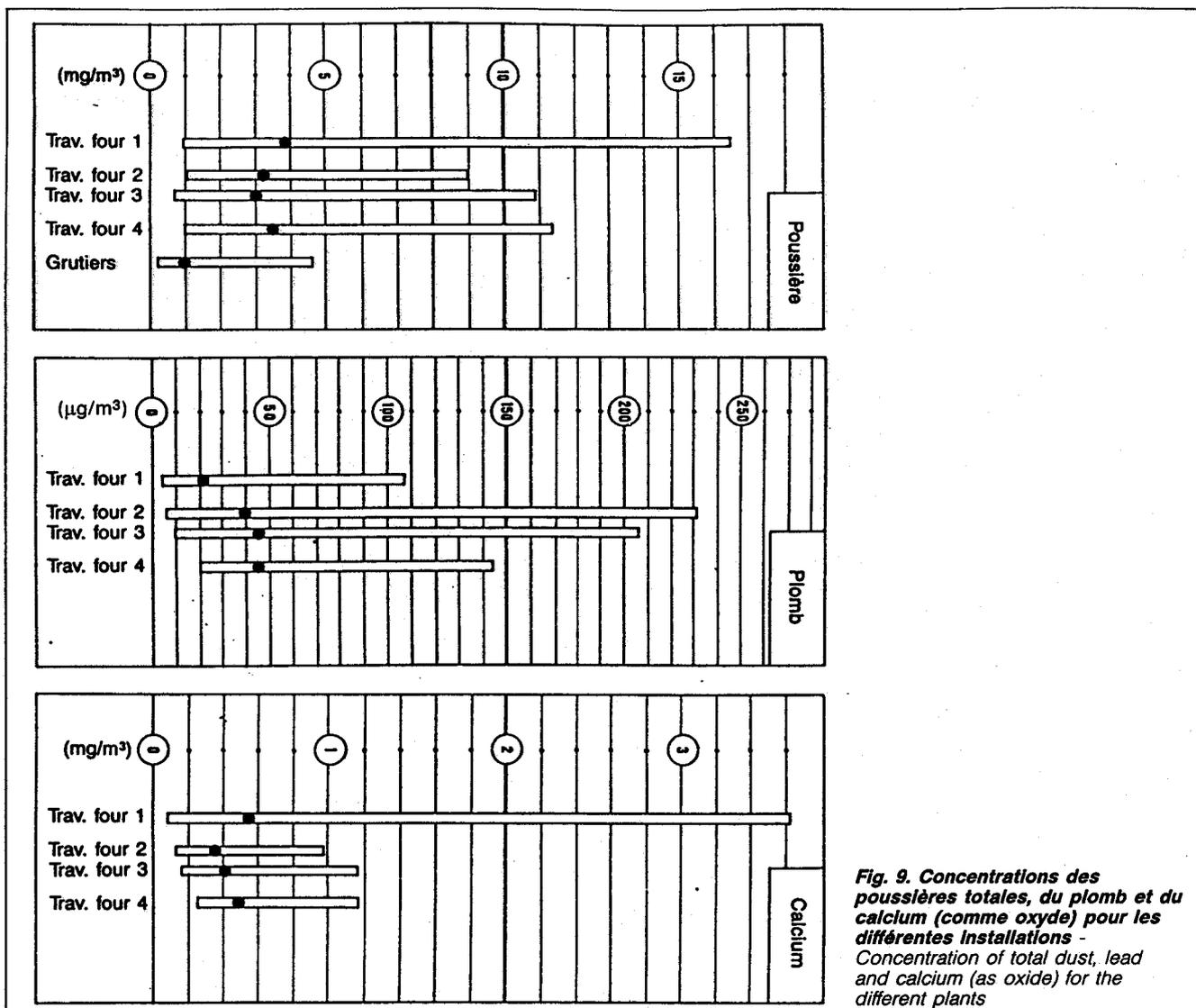


Fig. 9. Concentrations des poussières totales, du plomb et du calcium (comme oxyde) pour les différentes installations - Concentration of total dust, lead and calcium (as oxide) for the different plants

TABLEAU X

Standards d'hygiène industrielle (TLV-TWA ACGIH 1988-89) - Standards (TLV-TWA ACGIH 1988-89) for occupational safety

Élément	Forme	TLV-TWA (mg/m <sup>3</sup> )	Notes
Poussière	totale	10	(1)
Fe	comme oxyde Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5	
Mn	comme fumées	1	
Zn	comme fumées	5	
Pb	comme fumées ou poussières	0,15	
Ni	comme métal	1	(2)
Cr	comme métal et composés (III) comme composés (VI) insolubles	0,5 0,05	(2)
Al	comme métal ou oxyde	10	
Si		10	(1)
Ca	comme oxyde comme hydroxyde comme carbonate ou silicate	2 5 10	
Mg	comme oxyde (fumées)	10	

(1) avec silice libre cristallisée < 1 %

(2) IARC groupe 1 (cancérogène humain certain).

opérations de réfection effectuées dans les aires adjacentes.

### 3.6. Métaux traceurs de la pollution

On a sélectionné les valeurs relatives à l'ensemble des points de mesures et à l'ensemble des conditions de fonctionnement des fours et, pour celles-ci, on a calculé les coefficients de corrélation linéaire entre la concentration de la poussière totale et celle de chacun des éléments, et également entre celles des différents éléments : les valeurs de corrélation les plus élevées sont présentées sur la figure 10.

La pollution ambiante est caractérisée soit par la présence d'éléments qui ont peu de rapport avec les concentrations de la poussière totale, soit par la présence de calcium, magnésium, manganèse et fer qui contribuent fortement à l'empoussièrement.

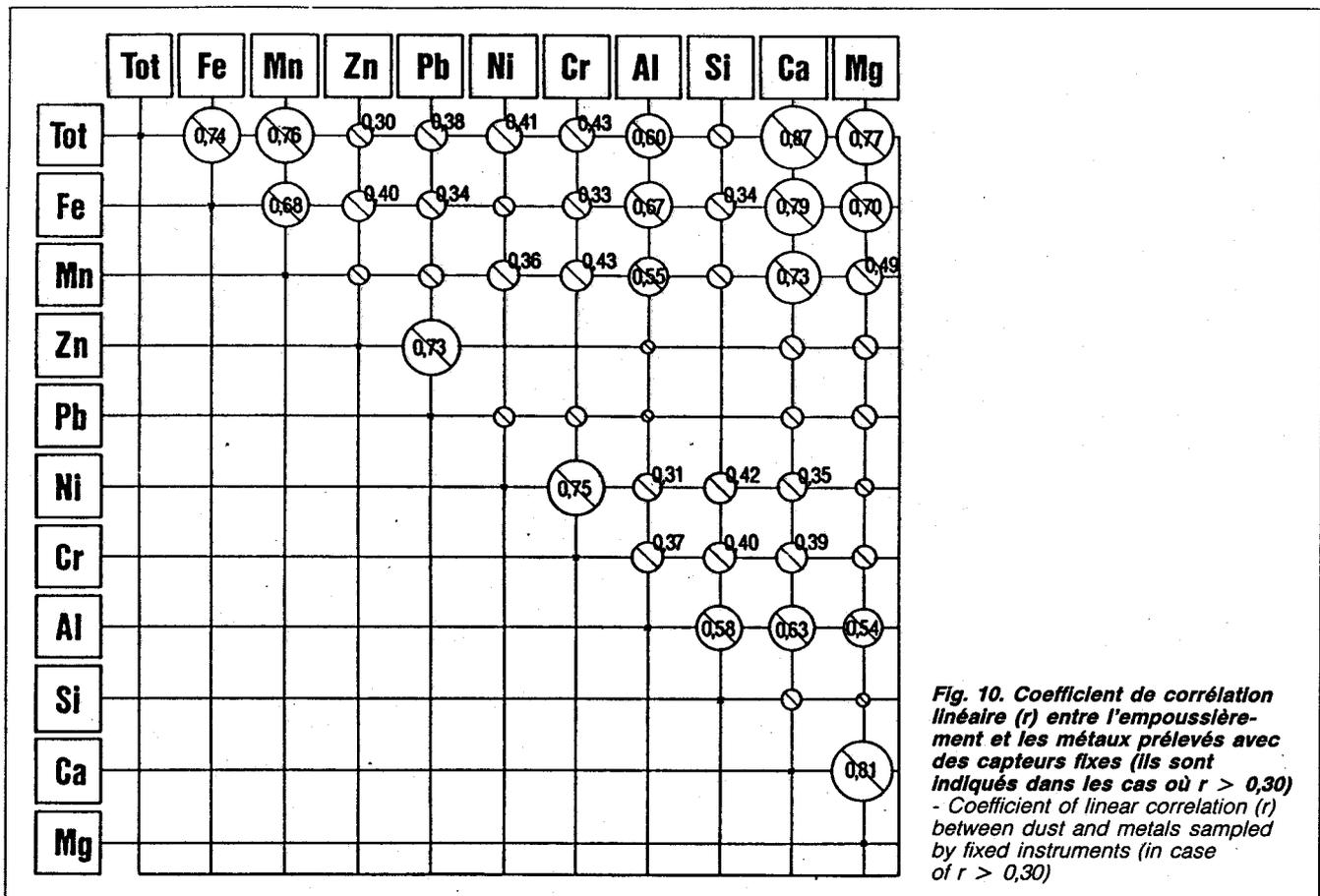


Fig. 10. Coefficient de corrélation linéaire (r) entre l'empoussièrément et les métaux prélevés avec des capteurs fixes (ils sont indiqués dans les cas où  $r > 0,30$ ) - Coefficient of linear correlation (r) between dust and metals sampled by fixed instruments (in case of  $r > 0,30$ )

En plus des corrélations spécifiques qui existent entre les éléments susmentionnés (qui peuvent être considérés comme des métaux-guide de la pollution), on a relevé des corrélations assez étroites entre plomb et zinc (qui sont présents dans la ferraille et sont émis pendant les premières minutes de la fusion) et aussi entre chrome et nickel qui forment l'alliage et proviennent de l'évaporation du bain fondu; on peut affirmer que ces couples de métaux ont les mêmes sources et la même dispersion.

En ce qui concerne les quatre éléments identifiés comme éléments traceurs, on a recherché une différence éventuelle du coefficient de corrélation en fonction des points fixes de prélèvement (tableau XI). Les valeurs de r, qui se rapportent à la corrélation entre l'empoussièrément total et les quatre composés, sont particulièrement élevées pour la zone de coulée.

Cela concorde d'ailleurs avec ce qu'on a déjà mis en évidence (tableau V) : la diversité de la zone de coulée

du point de vue de la concentration de la poussière peut être également remarquée pour les concentrations de fer, manganèse, calcium et magnésium (tableau XII).

Ceci montre, entre autres, que la pollution ambiante au voisinage des postes de travail du four est déterminée par des sources spécifiques pour ce qui concerne aussi bien les éléments dispersés que les foyers de l'émission.

Dans l'ensemble, on relève donc une corrélation assez faible entre l'empoussièrément et les éléments et entre les différents éléments. Ce n'est pas le cas dans d'autres environnements (milieu urbain, etc.) où la pollution est provoquée par plusieurs sources éloignées l'une de l'autre et distribuées donc d'une façon pratiquement uniforme [13].

Les prélèvements individuels, comme on pouvait s'y attendre d'ailleurs, montrent des coefficients de corrélation entre l'empoussièrément total et les éléments constituants, qui sont

TABLEAU XI

Coefficient de corrélation linéaire (r) entre empoussièrément et métaux pour les points fixes de prélèvement - Fixed samplings : linear correlation coefficient (r) between dust and metals

Élément/élément	Plancher Plancher éloigné	Coulée	Cabine
Poussière/Fe	0,48	0,92	0,34
Poussière/Mn	0,51	0,85	0,21
Poussière/Ca	0,64	0,97	0,64
Poussière/Mg	0,66	0,95	0,42

TABLEAU XII

**Évaluation de la pollution par les éléments guidés aux points fixes de prélèvement : GM (mg/m<sup>3</sup>) et GSD. Indication du niveau de signification de la corrélation relative à quatre métaux** – Parameters (GM and GSD) of pollution leading metals : level of significance resulting from correlation test for four metals

Zone	Nombre de prélèvements	Fer		Manganèse		Calcium		Magnésium	
		GM	GSD	GM	GSD	GM	GSD	GM	GSD
Plancher	21	0,081	1,42	0,008	2,19	0,152	1,65	0,042	2,05
Coulée	21	0,162	2,35	0,056	4,62	0,424	4,40	0,091	3,22
Cabine	23	0,081	1,92	0,010	2,02	0,172	1,62	0,056	2,54
Position/Position									
Plancher/Coulée		p < 0,04		p < 0,01		p < 0,04		p < 0,01	
Cabine/Coulée		p < 0,04		p < 0,01		p < 0,05			

dans l'ensemble plus faibles que ceux obtenus pour les prélèvements à points fixes : ce résultat est attribuable aux caractéristiques répétitives de ces derniers.

#### 4. CONCLUSION

Les enquêtes ont mené à une définition de la pollution due à la poussière au voisinage des fours électriques; on relève dans tous les cas que les plus hautes concentrations des poussières particulaires se retrouvent dans les fours avec la productivité la plus élevée et que les zones de coulée sont les plus poussiéreuses.

Les installations les plus récentes prévoient l'isolement complet des ateliers et l'aspiration des fumées secondaires. Il s'agit de solutions adoptées dans le but de protéger des poussières (et du bruit) les ateliers adjacents et le milieu extérieur.

De bonnes solutions technologiques (comme dans le cas du four 4) peuvent assurer un niveau de ventilation générale comparable à celui des ateliers traditionnels ouverts et permettent d'éviter les pics de pollution.

Mais l'exposition professionnelle dans les installations les plus modernes ne change pas : d'une part, les

fours les plus obsolètes nécessitent des interventions répétées dans des endroits pas du tout protégés et selon des modalités rudimentaires; d'autre part, la technologie récente fait appel à des équipements mécanisés et automatisés, surtout pour aider les opérations de manutention et d'affinage. Mais les opérations les plus polluantes (chargement, coulée) et les émissions qui sont difficilement réduites par les équipements les plus adéquats se répètent avec une cadence plus rapprochée : le cycle de travail dure environ une heure au lieu de deux à trois heures, il y a quelques années.

Pendant l'usinage des aciers courants et de qualité (alliages de base), les poussières totales, la dispersion de la chaux employée comme additif, le plomb présent en quantité extrêmement variable comme polluant dans la ferraille peuvent faire courir un risque respiratoire.

#### Bibliographie

1. HERNBERG S. – The Finnish foundry project. Background and general methodology. *Scand. J. Work Environ. & Health*, 1976, 2, suppl. 1, pp. 8-12.

2. SILTANEN E. et al. – Dust exposure in Finnish foundries. *Scand. J. Work Environ. & Health*, 1976, 2, suppl. 1, pp. 19-31.
3. TOSSAVAINEN A. – Metal fumes in foundries. *Scand. J. Work Environ. & Health*, 1976, 2, suppl. 1, pp. 42-49.
4. GERHARDSSON G. – Dust prevention in Swedish foundries. *Staub Reinhalt. Luft*, 1976, 36, pp. 433-439.
5. An evaluation of occupational health hazards control technology for the foundry industry. Cincinnati (OH), National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), DHEW Publication n° 79-114, 1978.
6. MOSHER G.E. – Nickel and chromium exposures in foundries melting/pouring alloys containing low or trace levels of nickel or chrome. *Am. Foundrymen's Soc. Trans.*, 1980, 88, pp. 515-518.
7. BLOT W. et al. – Lung cancer among long-term steel workers. *Am. J. Epidemiology*, 1983, 117, pp. 706-716.
8. AGARVAL J.K., LIU B.Y.H. – A criterion for accurate aerosol sampling in calm air. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1980, 41, pp. 191-197.
9. BORRONI A., GINO G., MAZZA B., NANO G. – Velocità ottimale di prelievo degli inquinanti particolati. *AES*, 1982, 10, pp. 56-81.
10. LEIDEL N.A., BUSCH K.A., LYNCH J.R. – Occupational exposure sampling strategy manual. Cincinnati, NIOSH, 1977.
11. BIANCHI P., PARODI G., ROSSI P., ZIVERI M. – Optimisation de la technologie et de l'environnement du four UHP de l'usine de Campi de la Nuova Italsider. *Rev. Mét. – CIT*, 1985, 82, pp. 679-689.
12. APOSTOLI P., DAL FARRA M., MARENELLI G. – Rischio da piombo e altri materiali nelle acciaierie elettriche di seconda fusione. *Lav. Um.*, 1983, 31, pp. 20-25.
13. D'INNOCENZIO F. – Andamento annuale delle ricadute di metalli e di polvere in un'area urbana. *Acqua Aria*, 1986, 4, pp. 361-363.

Reçu le 28.08.1987, accepté après révision le 12.01.1989