

COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE DU CHARBON ET DE L'ACIER  
HAUTE AUTORITÉ

*Recherches sur l'injection d'hydrocarbures  
dans les hauts fourneaux*

Essais d'injection de fuel liquide léger  
dans le haut fourneau n° 4 de Seraing  
marchant avec une charge préparée  
(40% et 100% d'agglomérés)

(Rapport intérimaire)

Mai 1961

ESSAIS D'INJECTION DE FUEL AU HAUT FOURNEAU 4 DE SERAING  
DE LA S.A. COCKERILL - OUGREE A LIEGE

Rapport partiel et provisoire

par

E. NOEL  
Ingénieur en Chef  
S.A. Cockerill-Ougrée

J. MOLDEREZ  
Ingénieur  
S.A. Cockerill-Ougrée

A. POOS  
Ingénieur  
C.N.R.M.

I.- Introduction

Le Comité Directeur de l'Association Internationale pour les Recherches au Bas Fourneau d'Ougrée (A.I.R.B.O.) a déjà publié les résultats des essais d'injection de fuel-oil par les tuyères principales qui ont été réalisées au Bas Fourneau à Ougrée.

Notre but était de voir l'intérêt de l'application de cette nouvelle technique à un haut fourneau du type tel qu'il est utilisé couramment dans les pays d'Europe Occidentale, c'est à dire un fourneau de dimensions moyennes, équipé de tuyères de secours.

Ces essais ont été faits d'une part avec une charge qui est typique pour la pratique actuelle du haut fourneau en Belgique et au Grand Duché de Luxembourg, c'est-à-dire composée de 40 % d'aggloméré et de 60 % de minettes, et d'autre part avec une charge de composition telle qu'elle sera utilisée probablement dans l'avenir et comportant plus de 90 % d'aggloméré.

Ces essais ont débuté en avril 1960 au Haut Fourneau 4 de l'usine de Seraing de la S.A. Cockerill-Ougrée et ont été continués jusqu'à ce jour.

Cette recherche a été réalisée grâce à l'aide financière de la C.E.C.A. (Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier).

II.- Bases théoriques relatives à la détermination des conditions de l'injection

Le but de la recherche était de déterminer avec une précision suffisante la diminution de

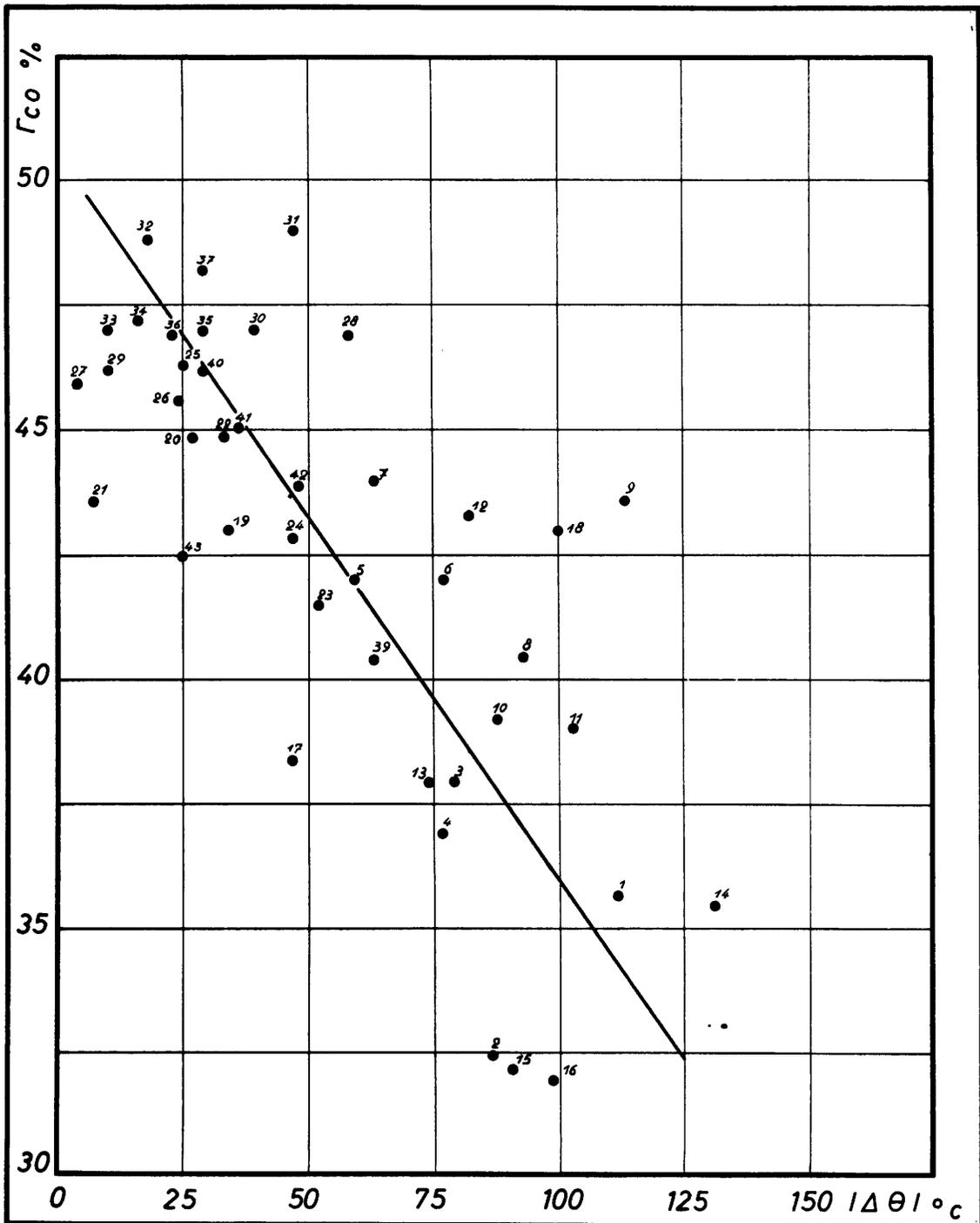


Fig. 1 - Valeurs de  $r_{CO}$  en fonction de la différence entre la température réelle du vent et la température idéale calculée pour une humidité donnée.

la mise au mille de coke et l'accroissement de la production pour une quantité déterminée de fuel-oil injecté et pour le cas d'un fourneau marchant déjà à des conditions optima de production et de consommation de coke.

#### a) Profil thermique dans le fourneau

Toutes les injections, par exemple les injections d'hydrocarbures, l'humidification du vent, l'enrichissement du vent en oxygène, de même que la température du vent, ont une influence fondamentale sur la grandeur et la forme de la zone d'oxydation aux tuyères ainsi que sur la distribution des températures à l'intérieur du fourneau en général.

Récemment encore de nombreuses investigations dans ce domaine ont été réalisées.

Il est bien connu que pour un fourneau et une charge donnés il est nécessaire d'avoir une distribution et un profil thermique bien déterminés si on veut obtenir des performances optima du haut fourneau.

Chaque facteur perturbant ces conditions idéales entraîne une détérioration des résultats; pour cette raison, chaque injection d'hydrocarbures doit généralement être compensée par des moyens appropriés de manière à maintenir les conditions d'opération idéales, par exemple par un enrichissement du vent en oxygène ou un accroissement de la température du vent.

Des injections faites sous des conditions qui ne tiennent pas compte des facteurs mentionnés ci-dessus, ne permettent pas de tirer le profit maximum que l'injection pourrait donner.

Cette considération théorique semble être confirmée par les résultats obtenus durant un essai réalisé en 1959 par le C.N.R.M. sur un haut fourneau de production.

Pendant une période d'essais d'environ dix mois réalisée à ce fourneau, la température du vent, de même que l'humidité du vent ont varié dans des limites très larges et, intentionnellement, il n'y avait pas de relation entre ces deux variations.

Entre les différentes périodes, nous avons trouvé un changement très important dans la réduction indirecte par le CO, variation se situant entre 32 et 48 %.

En admettant que pendant les périodes où la réduction était la plus élevée, on avait atteint les conditions de marche optimum, nous avons trouvé que ces conditions étaient les suivantes:

température du vent: 825° C

humidité du vent: 15g/m<sup>3</sup>n.

Sachant qu'un accroissement de l'humidité du vent de 1g/m<sup>3</sup> devait être accompagné par une augmentation de la température du vent de 6,5° C il nous était possible de calculer une température de vent idéale pour chacune des périodes.

Nous avons calculé pour chacune des périodes la valeur absolue de la différence entre température réelle et température idéale calculée comme indiqué ci-dessus.

La fig. 1 montre cette différence en fonction du taux de réduction indirecte r<sub>CO</sub>.

Il s'ensuit que pour les périodes où cette différence est minimum, la réduction indirecte avait les valeurs les plus élevées et que le r<sub>CO</sub> diminue linéairement pour les différences croissantes. Ce diagramme peut être considéré comme confirmation expérimentale de la théorie qu'une déviation des conditions idéales entraîne une détérioration de la réduction indirecte et par suite de la mise au mille de coke et de la marche du fourneau en général.

Tenant compte de cela, nous avons projeté nos injections de fuel-oil de manière à maintenir constantes les conditions aux tuyères. La meilleure façon d'arriver à cela consiste à mesurer d'une manière continue la température de combustion aux tuyères et de régler la quantité de fuel-oil injectée ainsi que la température et la teneur en oxygène du vent, de manière à maintenir cette valeur à un niveau constant. Cependant des instruments appropriés permettant un réglage n'étaient pas disponibles à ce moment. Pour cette raison, les rapports quantité de fuel-oil

injectée à augmentation de température du vent ou enrichissement du vent en oxygène ont été calculés sur la base d'une température théorique de combustion aux tuyères constante, en admettant que les gaz sortant de la zone de combustion sont formés d'un mélange de CO, de H<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub>.

Nous savons très bien qu'un tel calcul nécessite certaines hypothèses non contrôlables telles que:

- choix d'une température de préchauffage du coke,
- forme inchangée de la zone d'oxydation,
- omission des pertes thermiques aux tuyères etc...

et que, par suite, il existe une certaine différence entre la température de combustion réelle et la température théorique calculée; cependant, ces calculs donnent une bonne approximation de la réalité.

#### b) Production du fourneau

En Belgique et en Europe occidentale en général, on recherche normalement les conditions de marche optima, c'est-à-dire la production la plus élevée possible tout en ayant la mise au mille la plus basse.

Ainsi, dans le but d'évaluer les possibilités d'augmentation de production qu'on peut obtenir par une injection de fuel-oil, nous devons d'abord déterminer les conditions de marche optima pour le haut fourneau et la charge en question.

Jusqu'à présent, l'allure du fourneau a été généralement exprimée en tonnes de coke par jour et par m<sup>2</sup> de surface de creuset. Dans le cas d'injections, cette définition de l'allure n'est plus applicable. Le facteur déterminant, limitant l'allure du fourneau, est la vitesse des gaz ascendants; si cette vitesse dépasse une certaine valeur (qui dépend principalement des propriétés chimiques et physiques et notamment de la granulométrie de la charge), les particules fines, par exemple, peuvent être fluidisées dans la partie inférieure du fourneau et le contact gaz/matières sera rapidement affecté.

On constate la formation de passages préférentiels avec comme conséquence une diminution de la réduction indirecte et une dégradation des échanges thermiques. Dès lors, nous exprimons l'allure du fourneau en m<sup>3</sup> de gaz/tonne/heure. Dans le cas d'une marche classique du fourneau, les deux définitions sont pratiquement équivalentes. En effet, la quantité de gaz aux tuyères est directement proportionnelle à la quantité de coke brûlé aux tuyères. Dans le cas d'une injection (par exemple d'une injection de fuel-oil) par contre, une fraction importante de ce gaz est introduite par les tuyères et la quantité de coke brûlé aux tuyères ne représente plus l'allure du fourneau.

De ceci, on peut déduire que l'allure exprimée en m<sup>3</sup> de gaz aux tuyères par heure a une très grande influence sur les performances du haut fourneau et pour cette raison demande un contrôle sévère pendant les périodes d'essais.

Considérons un fourneau marchant à allure optimum et sans injection. Si nous injectons maintenant du fuel-oil, deux cas peuvent se présenter:

1°- l'injection de fuel-oil n'affecte ni la distribution des températures et des gaz, ni l'échange thermique entre gaz et matières....

Dans ce cas, le volume optimum de gaz aux tuyères est le même avec ou sans injection. La production de fonte pourrait donc seulement être augmentée s'il était possible de diminuer la quantité de gaz aux tuyères par tonne de fonte.

2°- suivant la deuxième hypothèse on pourrait admettre que la quantité importante d'hydrogène introduite dans les gaz aux tuyères par l'injection de fuel-oil change la viscosité du gaz, les phénomènes d'échanges thermiques, le mécanisme de réaction et le profil thermique du fourneau. Dans ce cas, il serait possible que la quantité de gaz aux tuyères optimum soit déplacée vers

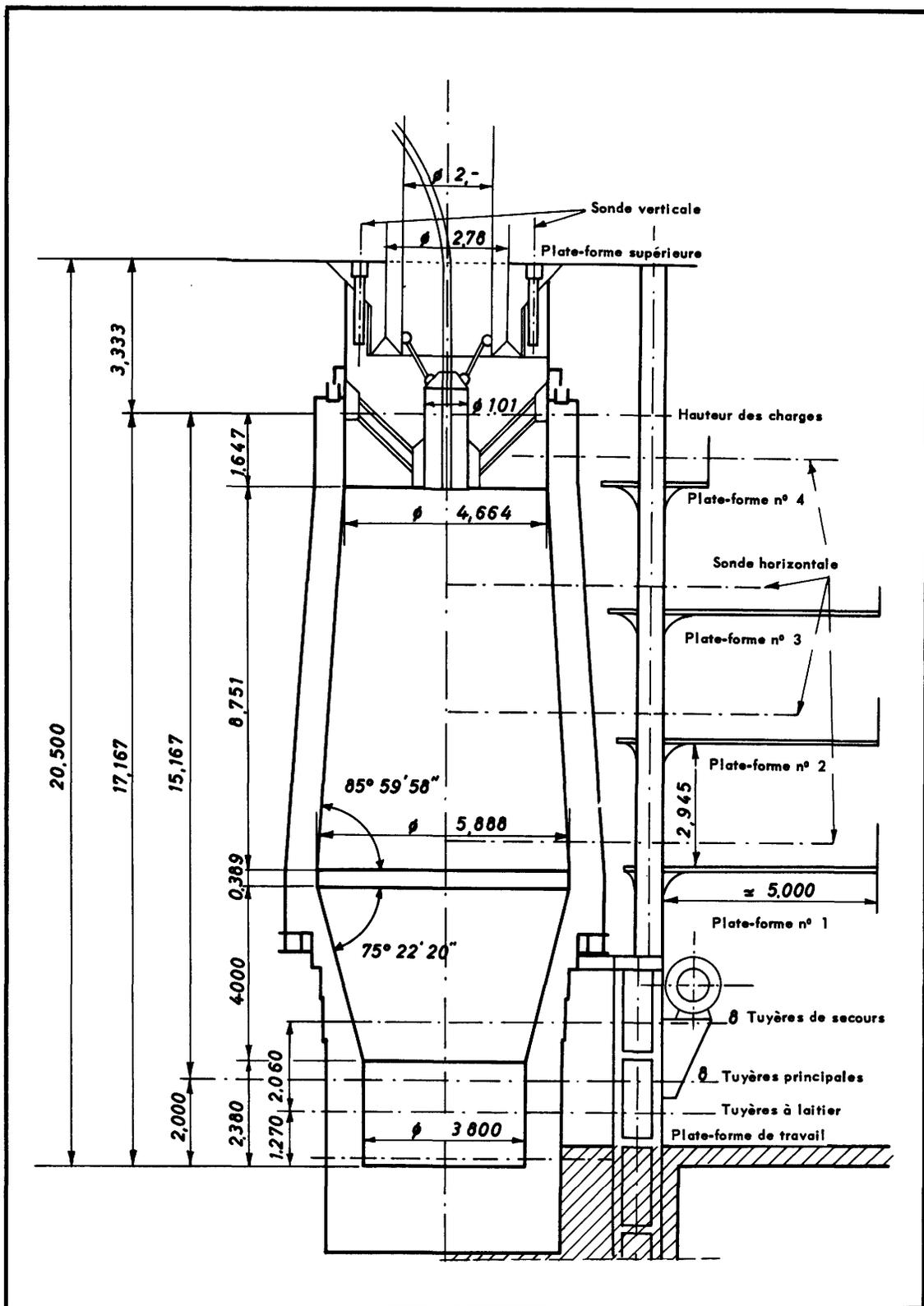


Fig. 2 - Haut fourneau n° 4 de l'usine de Seraing

des valeurs plus élevées. On pourrait désigner ce phénomène par "création d'une zone de réserve" par l'injection du fuel-oil.

Dans le cas de la seconde hypothèse, l'augmentation de production serait plus grande que dans le cas de la première hypothèse.

A côté de l'augmentation de production provenant d'une diminution de la quantité de gaz par tonne de fonte, il y aurait un accroissement supplémentaire de production dû à une allure gaz aux tuyères plus élevées.

### III.- Conditions d'essai

Pendant toute la durée de l'essai, notre préoccupation principale était de respecter le plus strictement possible les mêmes conditions d'essais et de maintenir constants tous les facteurs qui ne faisaient pas l'objet de la recherche, notamment la composition de la charge et de la fonte de même que l'allure du fourneau.

Il ne s'agissait pas d'obtenir des résultats d'une précision scientifique; nous n'avons pas essayé de faire du travail de laboratoire au haut fourneau, mais cela nous semblait néanmoins essentiel pour pouvoir donner avec une approximation satisfaisante la diminution de la mise au mille de coke et le gain de production que pouvait amener une injection de fuel-oil.

Ces renseignements sont d'une importance primordiale pour n'importe quel utilisateur futur de cette nouvelle technique, pour lui permettre d'évaluer les avantages économiques d'une marche de haut fourneau avec une injection de fuel-oil.

Nous avons naturellement saisi l'occasion de réaliser un certain nombre de mesures spéciales avec le but d'avoir des informations supplémentaires pouvant nous aider à établir l'influence de l'injection de fuel-oil sur les mécanismes des réactions dans le haut fourneau.

#### a) Le haut fourneau

Les essais d'injection de fuel-oil ont été réalisés au haut fourneau 4 de l'usine de Seraing de la S.A. Cockerill-Ougrée (fig. 2).

C'est un fourneau de diamètre de creuset de 3,8 m et équipé d'un système de chargement à simple cloche.

Le fourneau est équipé de huit tuyères principales d'un diamètre de 150 mm et de huit tuyères de secours d'un diamètre de 100 mm.

Pour les essais à 40 % d'aggloméré dans la charge, le diamètre des tuyères de secours avait été réduit à 80 mm, mais il a dû être ramené à 100 mm pour les périodes avec enrichissement en oxygène et pour celle avec 90 % d'aggloméré.

Pendant deux périodes d'essais, le fourneau marchait avec seulement quatre tuyères de secours et pour une autre période toutes les tuyères de secours avaient été supprimées. Ces trois dernières périodes avaient été réalisées dans le but de déterminer si l'injection de fuel facilitait la marche du fourneau à un point tel qu'il serait possible d'obtenir une marche normale sans l'utilisation des tuyères de secours. Cependant, après quelques jours de marche sans tuyères de secours, des accrochages sévères se sont formés.

#### b) Equipement d'injection

La fig. 3 montre la disposition du tableau de contrôle des tuyauteries pour le fuel-oil et l'air comprimé, ainsi que du réservoir de stockage, des pompes et des filtres pour le fuel-oil.

L'air comprimé est soutiré du circuit de l'usine. Il est filtré, son débit est mesuré par diaphragmes et les débits total et instantané sont enregistrés. A partir de l'entrée du tableau de contrôle on a une tuyauterie individuelle pour chacune des tuyères d'injection. Sur ces conduites individuelles on mesure par un débitmètre du type "Rotamètre" la quantité passant dans chaque injecteur; le débit étant réglé manuellement.

Le fuel-oil est amené par camions et stocké dans un réservoir d'une capacité de 50 m<sup>3</sup>,

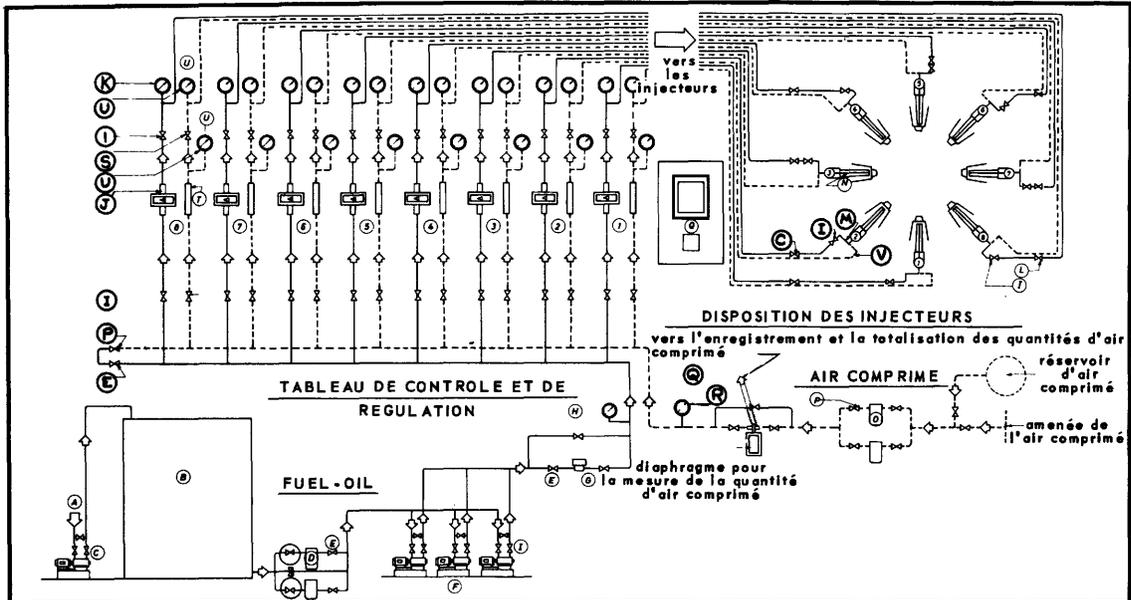


Fig. 3 - Disposition du tableau de contrôle et équipement d'injection du fuel-oil

- |   |  |
|---|--|
| A. Amenée de fuel-oil   | L. Valve de contrôle du fuel-oil, (Dia. 1/2 <sup>e</sup> )     |
| B. Réservoir de stockage de fuel-oil, (capacité 50 m <sup>3</sup> ) | M. Flexibles métalliques pour fuel-oil                         |
| C. Valve de contrôle du fuel-oil, (Dia. 3 <sup>e</sup> )            | N. Injecteur   |
| D. Filtre   | O. Filtre  |
| E. Valve de contrôle du fuel-oil, (Dia. 1 1/2 <sup>e</sup> )        | P. Pointeau pour régler l'air comprimé, (Dia. 2 <sup>e</sup> ) |
| F. 3 pompes à huile, capacité 750 l/h, avec by-pass incorporé       | Q. Totalisateur de débit avec enregistrement                   |
| G. Totalisateur de débit  | R. Manomètre, 0-8 kg/cm <sup>2</sup>                           |
| H. Manomètre, 0-20 kg/cm <sup>2</sup>                               | S. Valve à air comprimé, (Dia. 1/2 <sup>e</sup> )              |
| I. Valve de contrôle du fuel-oil, (Dia. 1/2 <sup>e</sup> )          | T. Rotamètre à air comprimé (Débit instantané)                 |
| J. Rotamètre à fuel-oil (Débit instantané)                          | U. Manomètre à air comprimé                                    |
| K. Pression du fuel-oil à l'injecteur                               | V. Flexible métallique pour air comprimé                       |

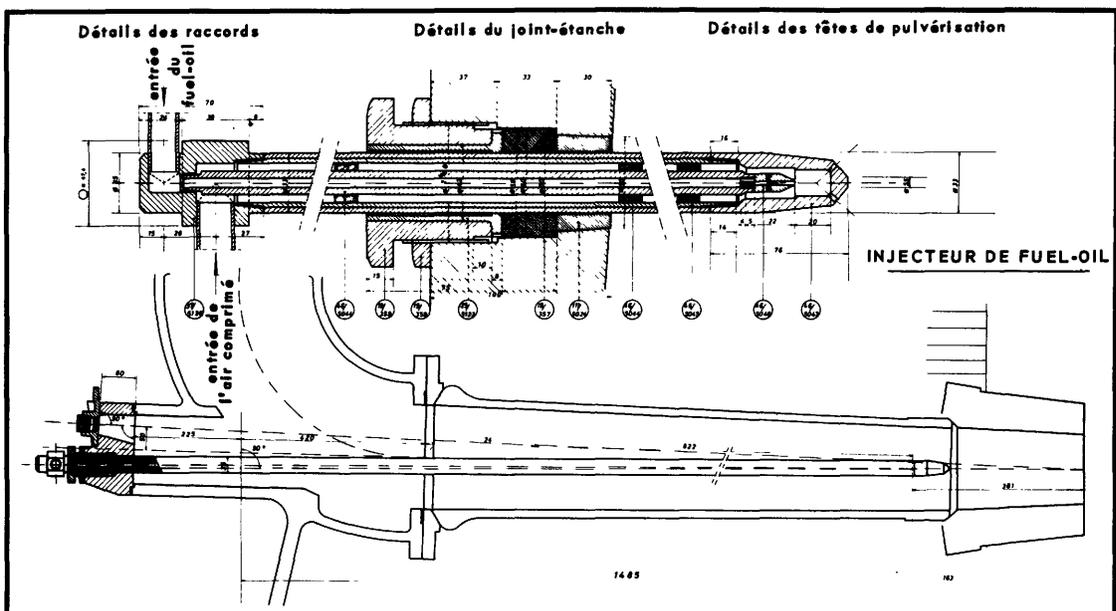


Fig. 4 - Croquis de l'injecteur de fuel-oil et position de l'injecteur dans les tuyères principales du haut fourneau



injecteurs ont dû être remplacés pendant cette période; la détérioration de ceux-ci a toujours été provoquée par des causes extérieures, indépendantes de l'injection de fuel-oil.

La fig. 4 montre le détail de construction de l'injecteur ainsi que sa position dans la tuyère principale du haut fourneau.

Les fig. 5, 6 et 7 montrent différents types de têtes utilisés pour l'atomisation du fuel-oil par l'air comprimé. Quelques unes de ces têtes d'atomisation ont été développées et essayées à la Fondation de Recherches Internationales sur les flammes à IJmuiden, par MM. KISSEL & VAN LANGEN.

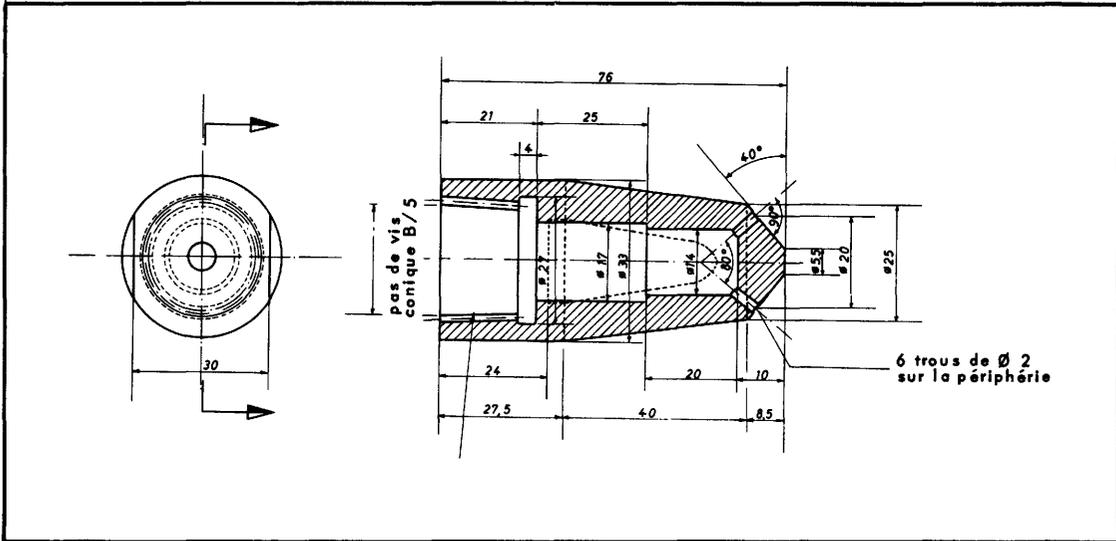


Fig. 6 - Tête de pulvérisation pour l'injecteur d'air comprimé

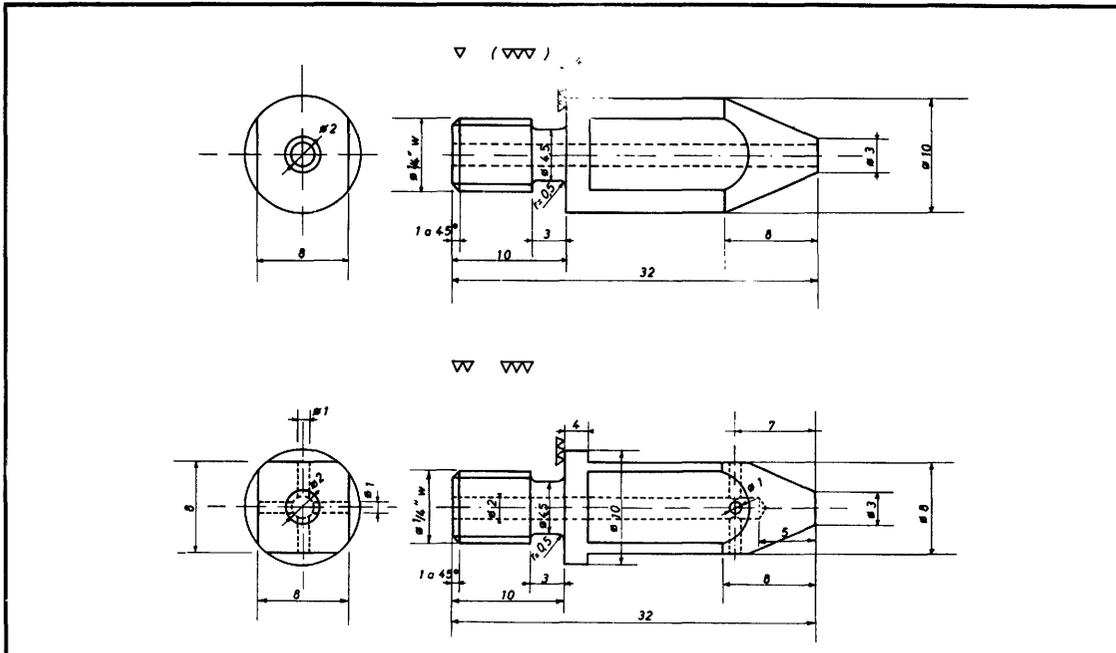


Fig. 7 - Têtes de pulvérisation pour l'injecteur de fuel-oil

A l'usine de Seraing, nous n'avons jamais constaté la formation de noir de carbone ni aucun autre signe de combustion incomplète du fuel-oil.

#### d) La charge

Une partie des périodes d'essais a été réalisée avec une charge composée de 58% de minette avec une teneur en Fe d'environ 28 à 30 % et de 40 % d'aggloméré avec une teneur en Fe d'environ 46 %.

La minette était un mélange de minerais calcaireux et siliceux proportionnés de manière à obtenir un rapport  $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$  dans le laitier d'environ 1,4 à 1,5.

Le fourneau étant chargé à la main, des pailles de laminoirs, (environ 3%), ont été utilisées pour rendre étanche la cloche et protéger ainsi les ouvriers contre les émanations de gaz toxiques.

TABLEAU 1

	Humidité	Fe <sub>total</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O comb	CO <sub>2</sub>	S
	%	%	%	%	%	%	%	%
Aggloméré	-	45.0	14.0	12.0	5.5	-	0.5	0.06
Minette calcaireuse	6,5	28.0	23.5	8.2	3.6	6.5	20.5	0.25
Minette siliceuse	9,5	30.0	13.2	15.5	4.5	7.4	12.?	0.30

TABLEAU 2

	1		2		4		5		6		7		8	
	kg	%												
Min. calcaireuse	1412	51.5	1446	50.3	1422	48.6	1368	47.0	1278	45.2	1293	44.8	1311	43.4
Min. siliceuse	127	4.6	161	5.6	231	7.9	263	9.0	305	10.8	330	11.4	361	12.0
Aggloméré	1115	40.6	1175	40.8	1189	40.6	1196	41.0	1159	41.0	1176	40.7	1248	41.4
Pailles de lam.	90	3.3	95	3.3	86	2.9	88	3.0	86	3.0	88	3.1	95	3.2
Scories Martin	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Castine	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Poids tot. lit de fusion	2744	100	2877	100	2928	100	2915	100	2828	100	2887	100	3015	100
Rendement brut	-	36.44	-	34.76	-	34.15	-	34.30	-	35.36	-	34.64	-	33.16

	2 bis 1		2 bis 2		10		11		12		13	
	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
Min. calcaireuse	1449	47.7	1457	48.2	1354	46.3	25	1.1	-	-	-	-
Min. siliceuse	321	10.6	225	9.1	299	10.2	4	0.2	-	-	-	-
Aggloméré	1178	38.8	1196	39.6	1183	40.4	2034	89.2	2093	90.6	2070	90.4
Pailles de lam.	89	2.9	89	2.9	90	3.1	74	3.2	75	3.2	76	3.3
Scories Martin	-	-	-	-	-	-	71	3.1	60	2.6	60	2.6
Castine	-	-	-	-	-	-	74	3.2	82	3.5	83	3.6
Poids tot. lit de fusion	3037	100	2926	100	2926	100	2282	100	2310	100	2289	100
Rendement brut	-	32.9	-	33.1	-	34.2	-	43.8	-	43.2	-	43.7

La seconde partie de l'essai a été réalisée avec une charge composée de 90 % d'aggloméré, 3 % de pailles de laminoirs, 4 % de scories Martin et 3 % de castine. En effet, comme le Si de la fonte était limité à environ 0,4 % et que la basicité de l'aggloméré était de 1,1 à 1,2, il était nécessaire d'ajouter au lit de fusion une certaine quantité de castine et de scories Martin pour obtenir une basicité suffisante du laitier et assurer par là une teneur raisonnable en S de la fonte.

Le tableau I donne les analyses moyennes des minerais et de l'aggloméré.

Le tableau II donne la composition du lit de fusion pour chacune des périodes d'essais.

#### aa) Coke

Le coke utilisé était un coke métallurgique tel qu'il est couramment produit aux fours à coke de Seraing, avec l'analyse moyenne suivante :

Humidité	C fixe	Cendres	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	S
2,75 %	88,50 %	9,5 %	0,50 %	0,50 %	1,0 %	0,75 %

Le coke est amené aux trémies de stockage du haut fourneau au moyen de courroies transporteuses.

Le coke enfourné est pesé et criblé sur des cribles vibrants à trous ronds d'un diamètre de  $1\frac{1}{4}$ .

#### bb) Fuel-oil

Pour ces essais, on a injecté du fuel-oil léger d'une densité de 0,86 et de la composition suivante :

C fixe	H <sub>2</sub>	S	Chaleur de décomposition
86,0 %	13,0 %	0,9 %	500 Kcal/kg

Nous avons choisi ce type de fuel-oil en raison de sa fluidité.

Un préchauffage n'était pas nécessaire dans ce cas; ceci a largement simplifié la construction de l'installation expérimentale d'injection.

#### cc) Durée des périodes d'essais

Comme notre programme prévoyait un nombre important de périodes d'essais, la durée de chacune des périodes était forcément limitée.

D'un autre côté, après chaque changement dans les conditions de travail du fourneau, il était nécessaire d'attendre que le fourneau soit revenu à l'équilibre avant de commencer la période d'essais suivante. Pour cette raison, nous avons choisi le mode opératoire suivant :

La durée d'une période d'essai était fixée à environ 12 jours, mais elle était chaque fois précédée d'une période que nous avons appelée "période de régulation" et durant laquelle le fourneau pouvait s'adapter aux nouvelles conditions de travail.

### IV. - Déroulement des essais

La première période de référence a débuté le 24 avril 1960 et le 5 juin 1960, nous avons injecté du fuel-oil pour la première fois.

Le tableau III donne les conditions d'essais pour les différentes périodes réalisées.

Comme le fourneau marchait d'une manière très régulière, nous avons essayé d'éliminer les tuyères de secours. Pendant toute la durée de la période 6, le fourneau n'a travaillé qu'avec 4 tuyères de secours et comme les résultats obtenus étaient encourageants, nous avons essayé de supprimer toutes les tuyères de secours pour la période 7. Ceci a cependant affecté la marche du fourneau et durant la période 8, quatre tuyères de secours ont été à nouveau ouvertes.

Après cette période 8, nous avons projeté de passer à une charge à 90 % d'aggloméré avec

TABLEAU 4

PERIODES			Référence	Référence	4 b	5	6 b	7 b
			160 t coke	190 t coke				
DATES			27/4 au 7/5	9/5 au 25/5	11/6 au 2/7	3/7 au 16/7	24/7 au 6/8	14/8 au 27/8
Poids total lit de fusion	kg		2744	2877	2928	2915	2828	2887
Poids total lit de fusion	kg		2683	2776	2841	2812	2744	2787
Poids de coke	kg		789	836	718	732	723	737
Poids de fuel-oil	kg		-	-	61	62	63	58
Prod. fonte/heure	kg		8450	9393	8359	9249	9617	9556
Consommation coke/h	kg		6667	7852	6002	6854	6952	7044
Rendement net	%		37.27	36.02	35.20	35.20	36.44	35.88
Temp. du vent chaud	°C		710	697	810	817	821	823
Temp. gaz de gueulard	°C		105	127	104.5	121.7	100	95
Pression du vent chaud	mmHg		281	342	278	325	319	338
Fonte :	Si	%	0.33	0.38	0.35	0.30	0.35	0.37
	S	%	0.071	0.064	0.065	0.080	0.043	0.055
	P	%	1.85	1.86	1.84	1.80	1.81	1.80
	Mn	%	0.31	0.34	0.34	0.31	0.36	0.31
	C	%	3.41	3.44	3.41	3.45	3.61	3.67
	Temp.	°C	1397	1399	1405	1384	1395	1390
Laitier :	CaO	%	46.09	46.18	45.22	45.78	44.38	45.15
	SiO <sub>2</sub>	%	30.70	30.70	31.79	31.60	32.45	31.50
	MgO	%	3.90	3.85	4.04	3.89	3.35	4.05
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	15.80	16.46	15.93	16.83	16.54	16.15
	FeO	%	1.05	0.85	0.80	0.90	0.90	1.00
	P	%	0.133	0.082	0.093	0.16	0.090	0.056
	Mn	%	0.40	0.38	0.37	0.37	0.35	0.37
	S	%	0.917	0.939	0.807	0.89	0.921	0.970
	CaO/SiO <sub>2</sub>		1.50	1.50	1.42	1.45	1.37	1.43
	Temp.	°C	1480	1483	1495	1483	1502	1466
Gaz gueul.	CO <sub>2</sub>	%	13.76	12.96	14.07	13.02	13.61	12.91
	CO	%	26.64	27.15	25.71	24.46	26.06	26.96
	CH <sub>4</sub>	%	-	-	-	-	-	-
	H <sub>2</sub>	%	1.72	1.85	3.63	3.72	3.77	3.77
	CO <sub>2</sub> /CO		0.516	0.477	0.547	0.492	0.522	0.478
	Pci	Kcal/m <sup>3</sup>	855	876	886	910	904	931
Nbre de tirages	avec chute		5	24	2	4	1	7
	sans chute		-	15	-	4	-	2
Chutes en plein vent			2	8	1	5	1	9

8 b	10 b	11	12 b	13 a	2 bis 1	2 bis 2
4/9 au 17/9	30/10 au 12/11	13/11 au 26/11	4/12 au 10/12	11/12 au 17/12	9/10 au 15/10	16/10 au 22/10
3015	2926	2282	2310	2289	3037	3017
2849	2835	2192	2240	2219	2948	2949
794	754	712	620	626	875	864
64	63	-	50	49	-	-
9994	9391	11098	11227	12210	9014	9487
7934	7081	7902	6961	7643	7887	8197
35.10	35.27	45.64	44.64	45.06	33.92	33.90
809	754	7707	822	795	736	718
130	93	220	227	218	99	90
339	295	305	279	269	320	320
0.44	0.37	0.67	0.47	0.40	0.51	0.45
0.070	0.075	0.114	0.115	0.128	0.09	0.09
1.78	1.81	1.78	1.82	1.80	1.81	1.81
0.32	0.33	0.43	0.36	0.31	0.32	0.29
3.62	3.36	3.48	3.28	3.30	3.37	3.29
1385	1358	1383	1362	1341	1375	1349
45.06	45.08	40.67	44.73	40.04	44.52	44.10
32.10	32.04	33.29	31.94	32.90	31.80	33.00
3.74	4.18	4.60	3.96	3.96	4.03	4.01
16.26	15.87	17.55	15.00	15.00	16.10	27.17
0.95	0.41	1.08	1.05	1.05	0.56	1.51
0.083	0.03	0.02	0.11	0.11	0.05	0.08
0.40	0.57	0.47	0.42	0.42	0.38	0.49
1.01	1.05	0.845	2.33	0.54	1.12	1.70
1.40	1.41	1.22	1.17	1.22	1.40	1.34
1436	1444	1475	1434	1431	1478	1462
12.05	14.13	12.68	12.98	12.67	12.93	13.30
27.26	26.60	26.27	25.57	26.02	27.52	27.09
-	-	-	--	-	-	-
3.76	0.50	1.27	2.63	2.41	2.01	0.47
0.442	0.531	0.483	0.508	0.487	0.497	0.491
938	895	826	840	848	883	869
7	3	5	-	-	1	5
-	4	-	-	-	-	2
4	-	-	-	1	3	2

injection de fuel-oil et, durant la période 9, le pourcentage d'aggloméré dans la charge a été progressivement augmenté.

TABLEAU 3

	- ENFOURNEMENT - MARCHÉ - - ENFOURNEMENT - MARCHÉ -	TUYÈRES DE SECOURS OUVERTES	ALLURE DE MARCHÉ CORRESPONDANT A ENVIRON	
Période I	40 % aggloméré - Période de référence	8 tuyères, Ø 80 mm	160 t coke/ 24 h	25.000 Nm <sup>3</sup>
Période II	40 % aggloméré - Période de référence	8 tuyères, Ø 80 mm	190 t coke/ 24 h	30.000 Nm <sup>3</sup>
Période III	40 % aggloméré - Période de régulation pour fuel-oil	8 tuyères, Ø 80 mm	160 t coke/ 24 h	25.000 Nm <sup>3</sup>
Période IV	40 % aggloméré + fuel-oil	8 tuyères, Ø 80 mm	160 t coke/ 24 h	25.000 Nm <sup>3</sup>
Période V	40 % aggloméré + fuel-oil	8 tuyères, Ø 80 mm	190 t coke/ 24 h	30.000 Nm <sup>3</sup>
Période VI	40 % aggloméré + fuel-oil	4 tuyères, Ø 80 mm	190 t coke/ 24 h	30.000 Nm <sup>3</sup>
Période VII	40 % aggloméré + fuel-oil	0 tuyères ouvertes	190 t coke/ 24 h	30.000 Nm <sup>3</sup>
Période VIII	40 % aggloméré + fuel-oil	4 tuyères, Ø 100 mm		33.000 Nm <sup>3</sup>
Période IX	Période de régulation pour 90 % agglo. (perturbée: accrochages)	8 tuyères, Ø 100 mm		
Période X	40 % aggloméré + fuel-oil + enri- chissement du vent en oxygène	8 tuyères, Ø 100 mm		30.000 Nm <sup>3</sup>
Période XI	90 % aggloméré - Période de référence sans fuel-oil	8 tuyères, Ø 100 mm	190 t coke/ 24 h	
Période XII	90 % aggloméré + fuel-oil	8 tuyères, Ø 100 mm		29.000 Nm <sup>3</sup>
Période XIII	90 % aggloméré + fuel-oil	8 tuyères, Ø 100 mm		31.000 Nm <sup>3</sup>

Pendant la première semaine de la période 9, le pourcentage moyen d'aggloméré dans la charge s'élevait à environ 64 % et pour la seconde semaine de cette période il était à 78,8 %.

Les performances du fourneau se sont détériorées et des sondages dans la cuve ont montré des accrochages sévères. Cela étant, toutes les tuyères de secours ont été ouvertes à un diamètre de 100 mm et les accrochages ont dû être éliminés au moyen d'explosifs.

Comme nous n'étions plus certains que le profil du fourneau était le même qu'avant la période perturbée, nous avons décidé de refaire une des périodes de référence, c'est-à-dire la période 2. Cette nouvelle période de référence, qui a été désignée par le n° 2 bis, a montré que les conditions initiales avaient été rétablies et que les essais pouvaient être continués.

A la suite de cette nouvelle période de référence, nous avons réalisé la période 10 qui était une période à 40 % d'aggloméré; mais l'injection de fuel était accompagnée d'un enrichissement du vent en oxygène.

Les essais avec 90 % d'aggloméré dans la charge ont ensuite recommencé. Pendant cette période, pratiquement 100 % du Fe provenait de l'aggloméré mais le poids de l'aggloméré enfourné ne représentait qu'environ 90 % du poids total de la charge.

Comme déjà mentionné précédemment, une certaine quantité de pailles de laminoirs, de scories Martin et de castine a dû être ajoutée à la charge.

Cette fois-ci le passage de 40 à 90 % d'aggloméré n'a pas été réalisé progressivement sur une période de deux ou trois semaines tel que nous l'avions essayé durant la période 9, mais le changement a été fait sur quelques heures. La marche du fourneau n'a jamais été perturbée et on n'a constaté aucune formation d'accrochages.

La période 11 était une période avec 90 % d'aggloméré, sans injection de fuel-oil et sert de période de référence pour tous les essais avec 90 % d'aggloméré dans la charge.

La période 12 a été réalisée sous les mêmes conditions que la période 11, mais avec une injection de 60 kg de fuel-oil par tonne de fonte.

La période 13 était identique à la période 12, mais l'allure du fourneau était plus élevée.

Nous avons projeté une période n° 14 pendant laquelle on devait injecter le maximum possible de fuel-oil en augmentant simultanément la température du vent et en ajoutant éventuellement une certaine quantité d'oxygène au vent.

Cependant, au milieu de la période 13, les essais ont été interrompus par une grève et le fourneau a été arrêté pendant quelques semaines.

Au début de février 1961, les essais ont été repris et les dernières périodes d'essais sont en cours.

#### V.- Résultats des essais

Le tableau IV donne les principaux résultats bruts relevés au fourneau.

Les injections de fuel-oil n'ont jamais présenté aucune difficulté et la marche du fourneau était très régulière; il semble même que le nombre de chutes et de tirages était plus faible pendant les périodes avec injection. L'injection de fuel-oil n'a pas permis de diminuer la pression du vent pour une quantité de vent donnée, mais pour une allure donnée, la marche du fourneau semble plus facile avec le fuel-oil.

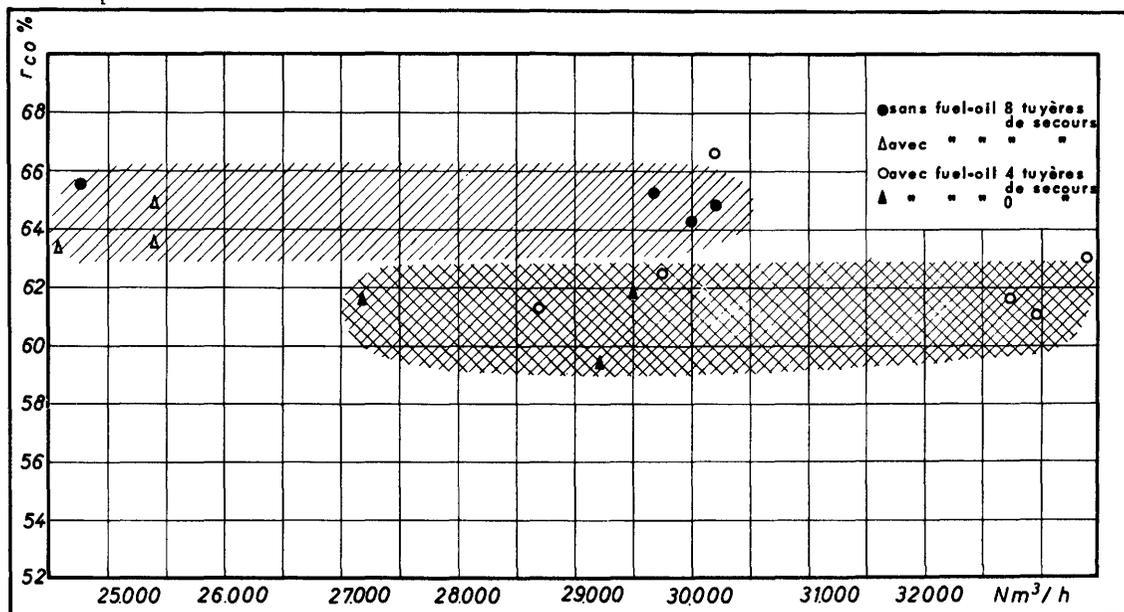


Fig. 8 - Rapport entre la réduction indirecte et l'allure gaz aux tuyères

La qualité de la fonte s'est légèrement améliorée durant les périodes avec injection. Pour les périodes à 40 % d'aggloméré, par exemple, la teneur en carbone de la fonte a augmenté et, quoique la basicité du laitier n'ait pas changé, la teneur en soufre de la fonte était plus basse pendant les périodes avec injection. (voir tableau V).

La température du gueulard a très peu varié et il n'y a pas de relation entre l'injection du fuel-oil et la variation de la température du gueulard.

La mise au mille de coke a considérablement diminué. Comme l'analyse des minerais a légèrement varié d'une période à l'autre, malgré des précautions qui avaient été prises, le rende-

ment du lit de fusion n'était pas absolument constant pour toutes les périodes. Pour cette raison, les mises au mille de coke doivent être corrigées pour être ramenées aux mêmes conditions avant de faire une comparaison.

Ceci, de même que l'augmentation de production obtenue, seront discutés dans le chapitre suivant.

TABLEAU 5

		Valeurs moyennes périodes à 40% d'aggloméré, sans fuel	Valeurs moyennes périodes à 40% d'aggloméré, avec fuel	Valeurs moyennes périodes à 90% d'aggloméré, sans fuel	Valeurs moyennes périodes à 90% d'aggloméré, avec fuel
Si fonte	%	0.425	0.360	0.67	0.43
C fonte	%	3.338	3.518	3.48	3.29
S fonte	%	0.079	0.063	0.114	0.121
CaO/SiO <sub>2</sub> laitier	%	1.43	1.42	1.22	1.20

#### VI.- Bilans thermiques

En vue de déterminer et de contrôler les performances du fourneau, ainsi que pour calculer les corrections des mises au mille de coke pour les différentes périodes et la diminution de mises au mille à attribuer à l'injection de fuel-oil, des bilans thermiques ont été calculés pour toutes les périodes d'essais.

Le tableau VI donne les principaux résultats de ces calculs, les corrections à apporter, ainsi que les mises au mille corrigées et le gain de coke par kg de fuel injecté.

Ces bilans ont été calculés suivant une méthode qui a été développée au C.N.R.M. (1) et perfectionnée ultérieurement.

Les trois premières lignes de ce tableau donnent les valeurs du taux de réduction  $r_{CO}$ ,  $r_{H_2}$ , et  $r_{CO+H_2}$  où

$r_{CO}$  = le pourcentage d'oxygène réduit par le CO

$r_{H_2}$  = le pourcentage d'oxygène réduit par l'hydrogène

$r_{CO+H_2}$  = le taux de réduction indirecte total

Nous avons introduit ces nouvelles notions parce que, pour deux raisons, il nous semblait intéressant de faire une distinction entre la réduction indirecte par le CO et celle par le H<sub>2</sub>:

a) du point de vue thermique, il y a une différence entre ces deux types de réduction indirecte; ainsi, par exemple, la réduction indirecte de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> par le CO est légèrement exothermique, tandis que celle par le H<sub>2</sub> est endothermique.

b) cette manière de procéder nous permet de déterminer si l'accroissement de la réduction indirecte est uniquement due à la réduction indirecte supplémentaire par l'hydrogène ou si, en plus, le H<sub>2</sub> a un effet catalytique sur la réduction indirecte par CO.

Le taux de réduction indirecte par l'hydrogène, pour les périodes avec injection de fuel-oil s'élevait en moyenne à 10 % de l'oxygène total réduit; le pourcentage d'hydrogène, utilisé comme agent réducteur, s'élevait à 30 - 35 % de l'hydrogène total injecté aux tuyères (H<sub>2</sub> de l'humidité du vent et du coke inclus).

La fig.8 montre la relation entre la réduction indirecte par le CO et l'allure gaz aux tuyères.

(1) A. POOS et A. DECKER - Bilans thermiques et consommations de coke au haut fourneau - Revue universelle des Mines, janvier 1959.

RESULTATS DES BILANS THERMIQUES ET CORRECTIONS DE L'ALLURE COKE

TABLEAU 6

	1	2	2 bis	Valeurs moyen. 2 + 2 bis	4	5	6	7	8 b 1	8 b 2	10	11	12	13	
Réduction indirecte r CO	%	65,6	65,3	64,2	-	63,2	63,1	61,8	61,1	63,0	61,4	67,8	63,8	59,8	58,5
Réduction indirecte r H <sub>2</sub>	%	0,5	5,0	-	-	8,9	9,2	12,8	12,2	8,7	7,3	7,9	6,0	11,7	12,5
Réduction indirecte r (CO + H <sub>2</sub> )	%	66,1	70,3	64,2	-	72,1	72,3	74,6	73,3	71,7	68,7	75,7	69,8	71,5	71,0
°/∞ coke en kg coke normal (85% C)/ kg t fonte	Kg	806	844	884	-	732	762	729	741	775	817	767	724	631	637
Correction de °/∞ coke pour Si fonte		+ 0,7	-	-3,4	-	+ 0,7	+ 2,6	+ 0,7	-	-3,3	-1,5	-	-	-6,2	-1,1
Correction de °/∞ coke pour temp. du vent		+ 1,6	-	+ 9,0	-	+ 4,3	+ 2,6	+ 5,1	+ 7,8	+ 6,4	-5,4	-17,9	-	+ 3,5	+ 1,9
Corresp. de °/∞ coke pour compos. de la charge		+ 55	-	-25	-	-2	-18	-4	-6	-27	-29	+ 16	-	-	-
°/∞ coke corrigée en kg de coke normal (85% C)/ t. fonte kg	kg	863	844	865	855	735	749	731	743	751	781	765	724	-	-
Quantité de fuel-oil en kg/t fonte	kg	0	0	0	0	61	65	63	58	62	66	63	0	0	0
Gain en kg de coke/t fonte	kg	-	-	-	-	129	106	124	112	104	74	90	-	-	-
Gain en kg de coke/kg de fuel-oil (y compris gain dû à l'augmentation de la température du vent).	kg	-	-	-	-	2,10	1,62	1,96	1,92	1,67	1,11	1,42	-	> 1,6	> 1,6

Il n'y a pratiquement pas de différence entre les périodes avec injection et celles sans injection et l'hypothèse d'un effet catalytique de l'hydrogène sur la réduction par CO ne semble pas être confirmée.

Cette fig. 8 montre que pour les périodes avec huit tuyères de secours, la réduction indirecte par CO était meilleure que pour les périodes pendant lesquelles on avait supprimé 4, ou les 8 tuyères, de secours.

La ligne 4 donne la quantité de fuel injecté et la ligne 5 donne la mise au mille de coke exprimée en kg de coke normal (coke à 85 % C sur humide).

Les lignes suivantes du tableau donnent les corrections de la mise au mille de coke telles que nous les avons calculées, de même que les mises au mille de coke corrigées.

La diminution totale de la consommation de coke, ainsi que le gain en kg de coke par kg de fuel-oil, celui provenant de l'augmentation de la température du vent étant inclus (100° C pour 60 kg de fuel-oil).

Le gain calculé par tonne de fonte et par kg de fuel-oil injecté, y compris celui provenant de l'augmentation de la température du vent, varie entre 1,7 et 2,1 kg coke normal/kg fuel; toutefois pour les périodes 8 à 10 on a obtenu un gain inférieur à ces valeurs, mais au cours des périodes 8b<sub>1</sub>, 8b<sub>2</sub>, 9a et 9b, la réduction indirecte a diminué d'une manière constante, de même que le gain de coke provenant de l'injection de fuel-oil. Ceci peut s'expliquer par une détérioration lente de la marche du fourneau par suite de l'élimination des tuyères de secours, et comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, que pendant la période 9 on a constaté de sévères accrochages. Pour la période 10, le gain calculé par kg de fuel-oil injecté s'élève seulement à 1,42 kg de coke (période avec fuel-oil + enrichissement du vent en oxygène).

Pour les périodes à 90 % d'aggloméré dans la charge, nous ne disposons pas encore de toutes les données nécessaires pour déterminer avec précision le gain de coke par kg de fuel-oil.

D'après les données que nous possédons actuellement, nous pouvons cependant admettre que dans ce cas, le gain est supérieur à 1,6 kg de coke normal/kg de fuel-oil injecté (y compris le gain provenant de l'augmentation de la température du vent).

Le taux de réduction indirecte par CO pour les périodes à 90 % d'aggloméré est plus bas que pour les périodes à 40 % d'aggloméré; ceci pourrait s'expliquer par la présence de 10 % d'additions et notamment de scories Martin et de castine dans la charge.

#### *Augmentation de production*

Comme nous l'avons déjà mentionné dans l'introduction, l'injection de fuel-oil pourrait donner une augmentation de production par deux voies différentes :

a) l'injection de fuel-oil a comme conséquence une diminution de la quantité de gaz aux tuyères par tonne de fonte, et par suite, une augmentation de la production de fonte correspondante pour une quantité constante de gaz aux tuyères par heures.

Le tableau VII montre que l'augmentation de la production ainsi obtenue était plutôt insignifiante et n'a jamais dépassé 2 à 3 % pour une injection d'environ 60 kg de fuel-oil par tonne de fonte.

b) si, par contre, le fuel-oil crée en plus une zone de réserve dans le fourneau, et permet ainsi d'accroître l'allure de ce dernier (exprimée en m<sup>3</sup> de gaz de tuyères par heure) on obtiendra un gain supplémentaire de production qui pourrait être plus importante. Une série d'essais qui a pour but de vérifier cette hypothèse est en cours actuellement.

#### VII.- Résultats des mesures spéciales

Durant les essais, nous avons réalisé de nombreuses mesures spéciales en vue d'assembler le plus d'informations possible et, dans ce but, différents dispositifs spéciaux ont été construits.

Comme le rôle de l'hydrogène est très important dans le cas d'injections de fuel-oil, le bi-

TABLEAU 7

	Allure gaz aux tuyères, m <sup>3</sup> /h	%	Production t/heure	%
<u>AVEC 40 % D'AGGLOMERE DANS LA CHARGE</u>				
Période 1 (sans fuel-oil)	24.730	100,00	8.336	100,00
Moyenne périodes 3 + 4 (avec fuel-oil)	25.460	102,95	8.540	102,44
Moyenne périodes 2 + 2 bis (sans fuel-oil)	29.870	100,00	9.318	100,00
Moyenne périodes 5 + 6 + 7 (avec fuel-oil)	29.320	98,16	9.474	101,70
Période 8 (avec fuel-oil)	33.110	110,84	9.994	107,25
Période 10 (avec P <sub>2</sub> et fuel-oil)	29.400	98,32	9.511	102,90
<u>AVEC 90 % D'AGGLOMERE DANS LA CHARGE</u>				
Période 11 (sans fuel-oil)	28.670	100,00	11.098	100,00
Période 12 (avec fuel-oil)	28.150	98,18	11.109	100,10
Période 13 (avec fuel-oil)	30.620	106,80	12.210	110,00

lan hydrogène nécessiterait un contrôle spécial. Un appareillage permettant de déterminer la quantité d'eau contenue dans le gaz de gueulard fut construit.

Ceci a permis d'établir un bilan matière pour l'eau et de vérifier par ce moyen la précision du bilan de l'hydrogène.

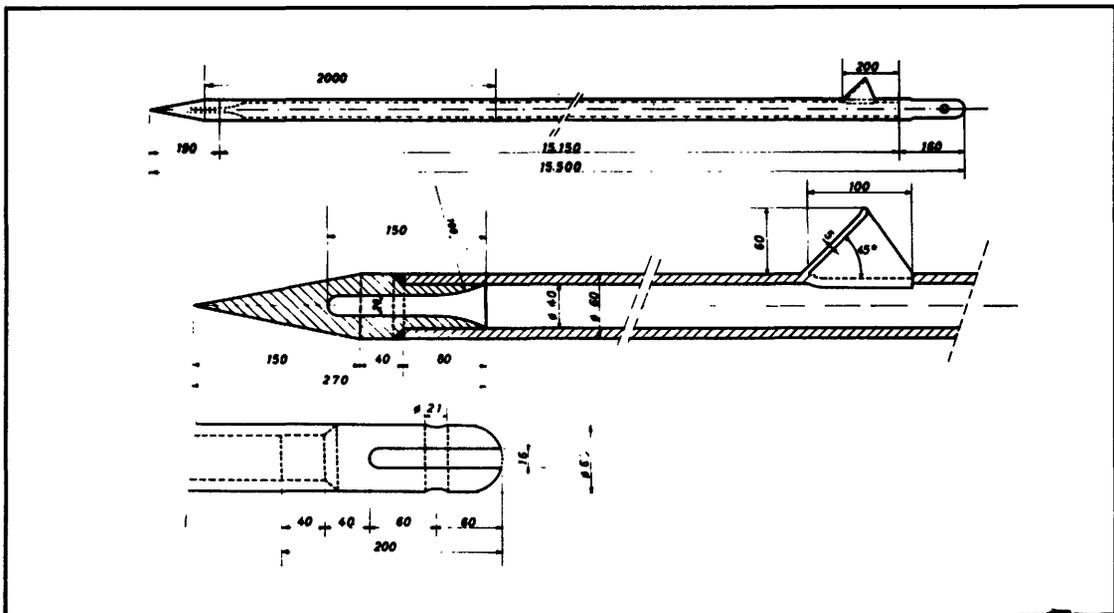


Fig. 9 - Sonde verticale pour mesure de la température

L'analyse gaz déterminée au moyen d'un appareil "Orsat" a été vérifiée par un chromatographe "Perkin Elmer". Comme ce dernier est étalonné avec un gaz étalon, les résultats obtenus étaient complètement indépendants de ceux obtenus par l' "Orsat" et une erreur éventuelle pouvait être décelée.

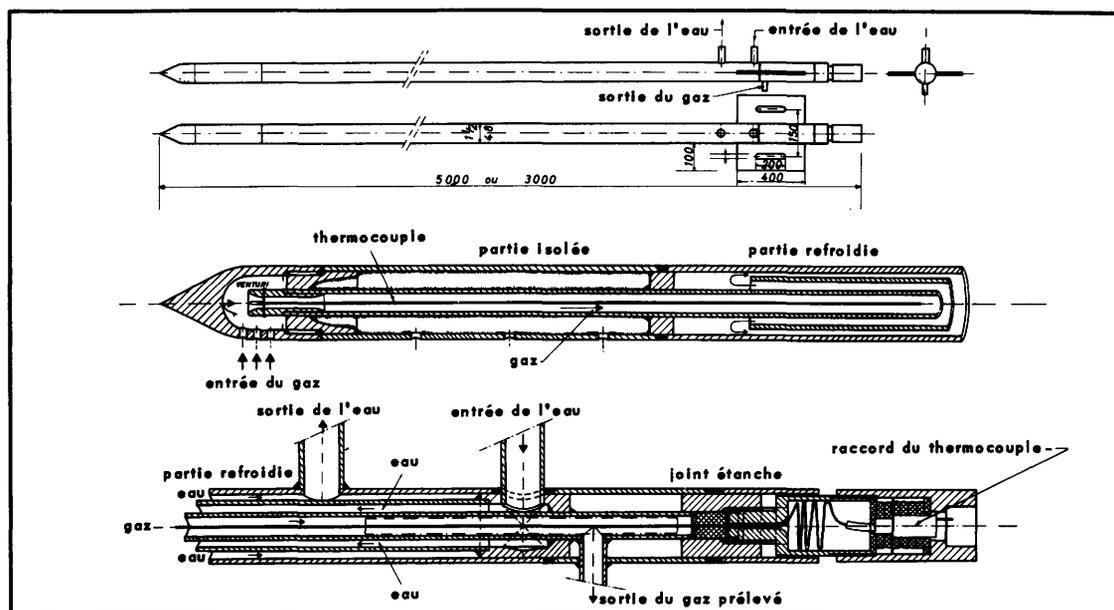


Fig. 10 - Sonde horizontale pour prélever des échantillons de gaz et mesurer la température

Les injections ont été réalisées sous des conditions basées en partie sur des considérations théoriques de manière à maintenir les considérations initiales de répartition des températures et du gaz.

Des sondages effectués à l'intérieur de la cuve du fourneau, moyennant des sondes verticales et horizontales, ont permis de mesurer la température et de prélever des échantillons de gaz à différents niveaux et cela sur tout le rayon du fourneau.

A la fig. 2, qui donne le profil du fourneau, on montre l'emplacement des différentes sondes, dont les croquis sont donnés aux figures 9 et 10.

Les sondes horizontales ont été construites suivant le principe des pyromètres à aspiration, de manière à permettre simultanément le prélèvement d'échantillons de gaz et la détermination de sa température exacte. Les figures 11 et 12 donnent en exemple quelques courbes relevées. Les courbes obtenues semblent indiquer que pour les quantités de fuel-oil injectées et les conditions de marche et d'injection choisies, un changement important n'a pas eu lieu.

### VIII.- Conclusions

Depuis juin 1960, du fuel-oil léger a été injecté au haut fourneau 4 de l'usine de Seraing de la Société Cockerill-Ougrée. Cette injection a été réalisée moyennant des injecteurs placés dans les tuyères principales. Le fuel-oil a été pulvérisé à l'aide d'air comprimé, qui a servi en même temps pour le refroidissement des injecteurs.

Une partie des périodes d'essais a été effectuée avec un lit de fusion composé de 40% d'aggloméré et 60% de minettes et l'autre partie de 90% d'aggloméré et 10% d'additions diverses.

L'appareillage d'injection a donné entière satisfaction, et pendant les huit mois de marche aucun ennui mécanique grave ne s'est présenté.

L'injection de fuel-oil avait une influence favorable sur la marche du fourneau et la qualité de la fonte. On a constaté une diminution importante de la mise au mille de coke allant jusqu'à 2,200 kg de coke par kg de fuel-oil (y compris l'effet dû à l'augmentation de la température du vent).

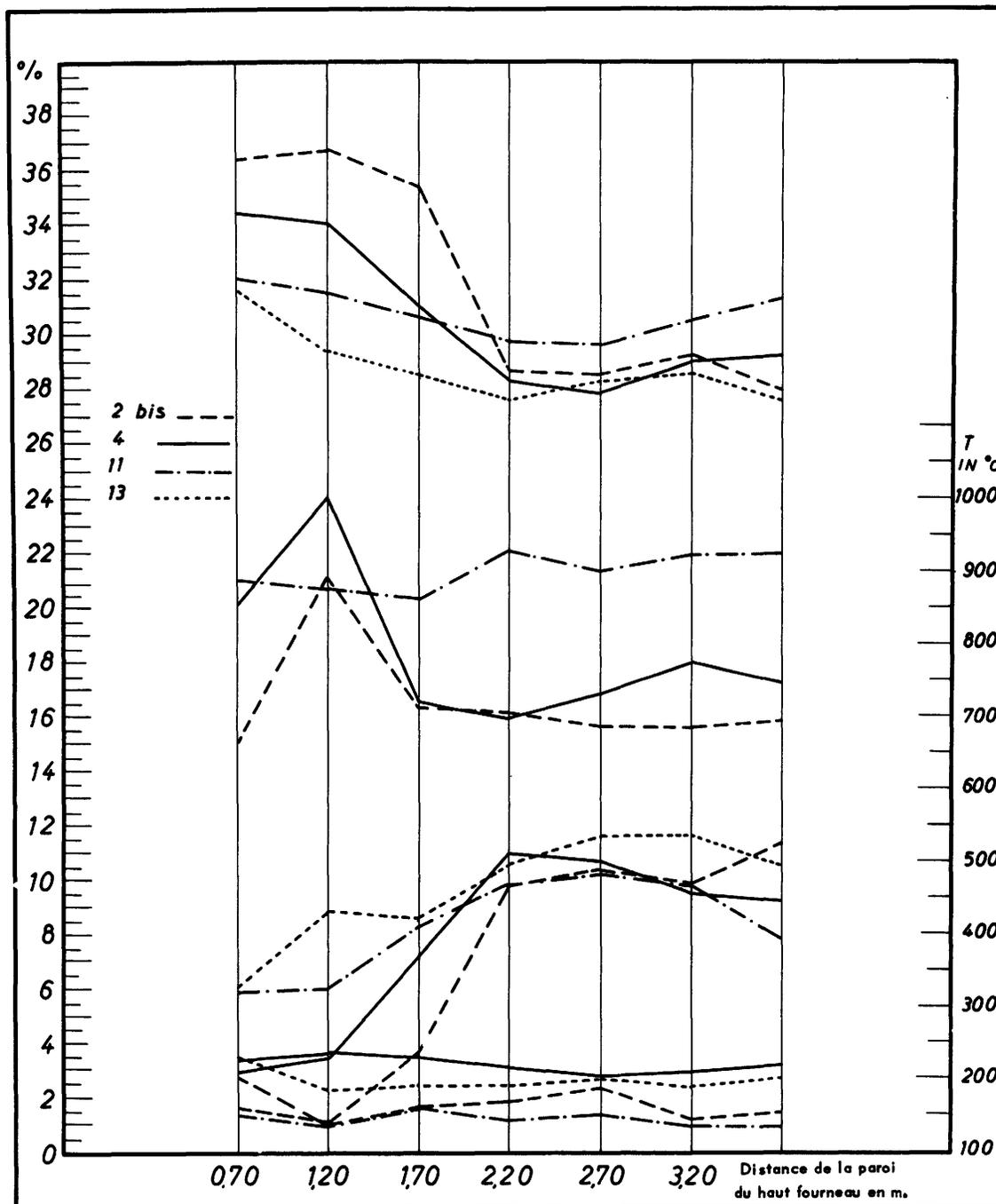


Fig. 11 - Distribution de la température et analyse du gaz sur le diamètre du Haut fourneau au niveau de la plate-forme n° 2

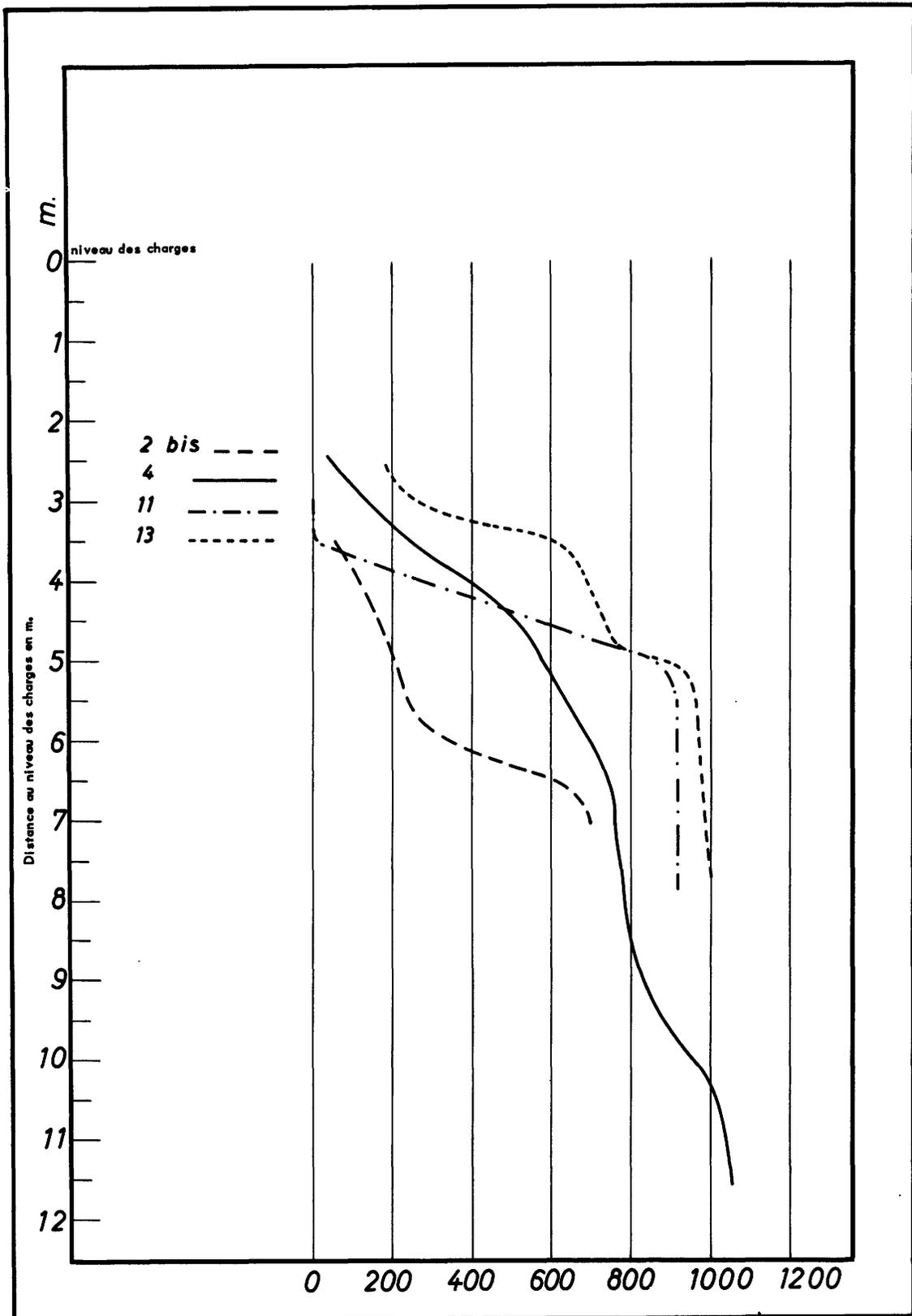


Fig. 12 - Distribution de la température suivant la verticale

Les résultats disponibles à ce jour ne permettent pas encore de donner une réponse définitive au sujet des possibilités d'accroissement de la production.

Différentes mesures spéciales ont été réalisées dans le but de rassembler des informations supplémentaires sur le mécanisme de l'injection de fuel-oil dans le fourneau et pour contrôler les résultats obtenus.

#### *REMERCIEMENTS*

*Les auteurs désirent remercier la Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier, dont le support financier a rendu cette recherche possible.*

*Ils remercient également la S.A. Coeckerill-Ougrée et le Centre National de Recherches Métallurgiques qui ont permis la publication de ces résultats.*

*Un remerciement spécial est adressé à Monsieur SAVAGE, Chef de Service des Hauts Fourneaux de Seraing, pour ses avis pratiques autorisés et les discussions utiles qu'ils ont eues avec lui.*

SERVICE DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES  
LUXEMBOURG/BRUXELLES

7626 / 61