

Comité International d'Etudes sur le Rayonnement des Flammes

Accroître à la fois le rendement thermique et la capacité de production des installations de chaudières ou de fours, tels sont les problèmes essentiels qui se posent, en permanence et impérieusement, à la sagacité des ingénieurs thermiciens.

Est-il nécessaire d'insister sur l'ampleur, la complexité et la diversité de tels sujets qui intéressent la métallurgie, la production de l'électricité, l'industrie du ciment, celle du verre, celle des réfractaires, celle du pétrole et beaucoup d'autres encore ?

Devons-nous ajouter qu'une étude méthodique et raisonnée impose une connaissance, de plus en plus approfondie, des mécanismes de la combustion et du chauffage par les flammes ; questions sur lesquelles, nous sommes, à l'heure présente, encore fort incomplètement informés.

Conscients de la nécessité d'étudier scientifiquement les flammes à une échelle proche de la réalité industrielle, les Professeurs RIBAUD, THRING et de GRAAF décidèrent, en 1949, de réunir leurs moyens et leurs efforts et de constituer le « Comité International d'Etudes sur le Rayonnement des Flammes ».

Le Professeur RIBAUD en accepta la présidence.

Simultanément, trois « Comités Nationaux » furent créés, un pour chacun des pays représentés : la France, la Grande-Bretagne, les Pays-Bas.

Successivement, la Suède, les Etats-Unis, le Battelle Memorial Institute formèrent des « Comités Nationaux » et se joignirent aux trois pays fondateurs.

Grâce à l'appui de différents organismes importants, la Belgique, à son tour, par l'intermédiaire de son « Comité National », est affiliée, depuis un an, au « Comité International d'Etudes sur le Rayonnement des Flammes ».

Parmi les promoteurs de cette initiative, il nous plaît de citer :

L'Institut pour l'Encouragement de la Recherche Scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture (I.R.S.I.A.) ;

La Cimenterie Belge (C.I.M.B.E.L.) ;

Le Centre National de Recherches Métallurgiques (C.N.R.M.) ;

Le Groupement des Hauts-Fourneaux et Acières Belges ;

L'Institut National de l'Industrie Charbonnière (Inichar) ;

L'Institut National du Verre ;

L'Union des Exploitations Electriques en Belgique.

A cette occasion, M. MORAY, Secrétaire du Comité Belge, a présenté, successivement à Liège, Bruxelles et Charleroi, une conférence intitulée « Quelques aspects du Rayonnement des Flammes ». Celle-ci vient d'être publiée dans le numéro de janvier de la Revue Universelle des Mines.

Le lecteur, qui désire de plus amples informations, pourra se référer à ce texte où il trouvera, en plus d'une synthèse sur le rayonnement, de nombreux renseignements sur l'organisation, les buts et l'activité du « Comité International ».

La partie la plus importante des travaux est réalisée, à l'échelle semi-industrielle, dans les fours expérimentaux installés aux Acières Royales Néerlandaises d'Ijmuiden ; en outre, le Comité International est en relations permanentes avec le British Iron and teel Research Association (B.I.S.R.A.) ; la British Coal Utilization Research Association (B.C.U.R.A.) ; l'Institut de Recherches de la Sidérurgie (France I.R.S.I.D.) et d'autres institutions scientifiques.

Les études entreprises jusqu'à ce jour, se rapportent principalement aux flammes éclairantes de combustibles liquides ou gazeux. Bien que réalisés d'une manière quelque peu conventionnelle, les essais donnent une idée des caractéristiques respectives des flammes de ces différents combustibles. Elles seront complétées, bientôt, par des recherches sur les flammes de charbon pulvérisé.

Le « Comité International » a montré sa vitalité en publiant dans de nombreuses revues spécialisées (« Chaleur et Industrie », « Journal of the Institute of Fuel », etc.) les résultats de ses travaux et de ses études.

Récemment, le Comité Belge a eu l'occasion de prendre connaissance d'un travail extrêmement intéressant de M. J. H. CHESTERS, Asst. Director of Research des United Steel Companies Ltd à Sheffield, qui, avec beaucoup de sens critique, a mis en parallèle des observations faites sur des fours Siemens Martin de 80 tonnes avec les résultats des mesures effectuées au four d'essais d'Ijmuiden.

C'est à sa bonne obligeance que nous devons l'autorisation de publier cette étude comparative dans les Annales des Mines de Belgique et nous nous faisons un devoir de l'en remercier chaleureusement au nom de nos lecteurs.

Nous remercions également M. MORAY d'avoir bien voulu traduire le texte de M. J. H. CHESTERS et d'avoir facilité ainsi sa diffusion parmi les milieux scientifiques et industriels.

C'est un service de plus que M. MORAY, Secrétaire compétent et dévoué, rend au Comité Belge d'Etudes sur le Rayonnement des Flammes, ainsi qu'à la science et à l'industrie de notre Pays.

J. VENTER.

Comparaison des résultats obtenus au four tunnel expérimental et des données sur fours Siemens-Martin

par J. H. CHESTERS,

Asst. Director of Research, United Steel Companies Ltd, Sheffield,

Traduction par M. MORAY,

Ingénieur Civil des Mines,

Attaché à la S. A. John Cockerill,

Secrétaire du Comité Belge d'Etudes sur le Rayonnement des Flammes.

SAMENVATTING

De auteur vergelijkt de bedrijfsvoorwaarden en de voornaamste resultaten verkregen in de proefoven van Ijmuiden enerzijds met deze verkregen bij proeven op Siemens-Martin ovens van 80 ton met vaste lading anderzijds en trekt enkele voorafgaandelijke conclusies uit de werken van het « Comité International d'Etudes sur le rayonnement des Flammes ». Hij doet de analogieën, zowel als tegenstrijdigheden uitschijnen tussen de uitslagen verkregen in de tunnel-oven van Ijmuiden en deze opgeleverd door de industriële praktijk.

Deze vergelijking wordt aangevuld door de aanhaling van de recente suggesties van de Heer Professor THRING aangaande het meest aangepaste vlamtype te gebruiken bij de lading, de smelting en de raffinage in de Siemens-Martin oven.

De kennis van het vormingsproces van de vlam en van de warmteoverdraging in de industriële ovens vertoont nog menigvuldige leemten.

Onder enige bijzonder omstrede kwesties stelt de auteur voor de respectievelijke voordelen van perslucht en stoom als verstuwingsmiddel voor fuel-oil en het betrekkelijk belang van de convectie en van de straling bij de warmteoverdraging in de Siemens-Martin oven te bestuderen.

Het lijkt eveneens nuttig opzoekingen te ondernemen om de invloed van de voorverwarming der verbrandingslucht, van de recycletie van de verbrandingsgassen enz., te bepalen.

RESUME

L'auteur rassemble, en un tableau comparatif, les conditions de marche et les résultats essentiels obtenus, d'une part, au four d'essais d'Ijmuiden et, d'autre part, au cours de recherches sur fours Siemens-Martin de 80 tonnes opérant en charge solide, et tire quelques conclusions préliminaires des travaux réalisés par le « Comité International d'Etudes sur le Rayonnement des Flammes ». Il met en évidence les analogies, mais aussi les dissemblances entre les données obtenues au four tunnel d'Ijmuiden et celles fournies par la pratique industrielle.

Ce parallèle est complété par le rappel des récentes suggestions de M. le Professeur THRING au sujet des meilleurs types de flamme à utiliser pendant le chargement, la fusion et l'affinage de la coulée au four Siemens-Martin.

Nos connaissances sur le mécanisme de formation de la flamme et sur la transmission de la chaleur dans les fours industriels présentent encore de multiples lacunes.

Parmi quelques questions tout particulièrement controversées, l'auteur propose d'étudier les avantages respectifs de l'air comprimé et de la vapeur comme agent d'atomisation du fuel oil, l'importance relative de la convection et du rayonnement dans le transfert de la chaleur au four Siemens-Martin.

Il paraît encore intéressant d'entreprendre des recherches en vue d'établir l'influence du préchauffage de l'air de combustion, de la recirculation des gaz brûlés, etc.

M. M.

Les données sur le rayonnement des flammes ont été rassemblées avec un large champ d'applications englobant, en particulier, les industries de l'acier, du verre, de l'énergie et du ciment ; toutefois, dans l'analyse ci-dessous, la comparaison sera limitée à l'industrie de l'acier, en particulier aux fours Siemens-Martin de 80 tons ⁽¹⁾ chargés froid, sur lesquels nous disposons de beaucoup de données, par exemple les rapports des essais sur les fours de Templeborough ⁽¹⁾ et les essais sur les fours K et V de la Firme Messrs Samuel Fox & Co. Ltd., rapportés par Halliday ⁽²⁾ au cours du

Symposium de 1948 sur les « Applications modernes des combustibles liquides ».

L'exactitude générale des données expérimentales est considérée comme admise, le but de l'analyse ci-contre étant de voir jusqu'à quel point les résultats sont en accord avec les expériences au four Siemens-Martin et les nouvelles découvertes utilisables.

Par une telle comparaison, le planning du travail futur sera rendu plus efficace, à la fois, en faisant apparaître les anomalies et en constituant un pont entre les données obtenues au four tunnel et la pratique industrielle.

I. — COMPARAISON DU FOUR TUNNEL ET D'UN FOUR SIEMENS-MARTIN DE 80 TONS

Une comparaison préliminaire a été faite au tableau 1 entre les conditions existant dans le four tunnel expérimental et dans un four Siemens-Martin typique de 80 tons ^(*). Tous deux sont chauffés avec de l'huile atomisée à la vapeur. Les points suivants ressortent de cette comparaison :

1. La forme générale du tunnel n'est pas différente de celle d'un four du type « boîte » (box-type) chauffé à l'huile, alors que la hauteur du tunnel est du même ordre que la distance du bain à la voûte dans un four Martin ;
2. Le four Siemens-Martin est approximativement trois fois plus gros si nous prenons comme base, soit le volume, soit la surface de sole ;
3. Le débit maximum du combustible employé dans le four tunnel est d'environ 60 gallons par heure (275 l/h), soit approximativement 1/5 du débit maximum employé dans le four ;
4. La préchauffe de l'air est négligeable dans le four tunnel comparativement aux préchauffes de 1200° C de l'air alimentant les fours Siemens-Martin ;
5. La chaleur dégagée par pied cube est approximativement la moitié de celle dégagée dans

un four Siemens-Martin ; il en est de même si nous prenons comme base de comparaison la surface de sole (gallons par pied carré de surface de sole et par heure) ;

6. Les températures maxima de la maçonnerie sont approximativement de 200° C plus basses que celles d'un four Siemens-Martin ;
7. Le pourcentage de chaleur extrait du combustible et de l'air apportés est du même ordre pour le dernier four tunnel pourvu de fentes à refroidissement d'eau que pour un four Siemens-Martin, c'est-à-dire environ 30 %. En outre, la proportion de la chaleur initiale qui est perdue dans les refroidisseurs à eau est approximativement la même que celle qui est fournie au métal et à la scorie dans un four Siemens-Martin ;
8. Dans la première série d'essais ⁽³⁾, l'excès d'air variait entre 50 et 70 %, c'est-à-dire beaucoup plus grand que ce qui est réalisé normalement dans un four Siemens-Martin ;
9. Dans le four tunnel comme dans le four Siemens-Martin, il existe une recirculation substantielle des gaz brûlés jusqu'à la partie initiale du jet.

II. — CONCLUSIONS PRELIMINAIRES DES ESSAIS SUR LE RAYONNEMENT DES FLAMMES

Une étude préliminaire des résultats des essais suggère un certain nombre de conclusions qui peuvent être comparées avec les faits d'expérience au four Siemens-Martin :

(*) Il s'agit, dans cette publication, de tonnes anglaises.

TABLEAU 1.

COMPARAISON DU FOUR TUNNEL A FLAMME D'IJMUIDEN ET D'UN FOUR SIEMENS-MARTIN CHARGE EN SOLIDE

(Huile atomisée par de la vapeur dans les 2 cas).

	Four Tunnel d'Ijmuiden première série d'essais 1949	Four Siemens-Martin de 80 T
Dimension et volume de la chambre	7,5 m × 2 m × 2 m 24'6" × 6'6" × 6'6"	11,582 m × 3,962 m × 0,850 × 1,829 m 38' × 13' × 0,850 × 6'
Volume	1035 cft = 29,3 m ³	2520 cft = 71,3 m ³
Surface de sole	24'6" × 6'6" = 159 sqft = 14,77 m ²	38' × 13' × 0,850 = 420 sqft = 39,02 m ²
Apport de combustible (huile) 1 gal = 4,5460 l.	Niveau haut = 275 l h = 60,5 gph Niveau bas = 200 l h = 44,0 gph	270 gph (fusion) = 1227 l/hr
Combustible en gal. par pied carré de surface de sole. h et en l par dm ² . h	Niveau haut = 0,38 g. p. h. » = 0,186 l/dm ² . h. Niveau bas = 0,28 g. p. h. » = 0,135 l/dm ² . h.	0,64 g = 2,91 l pied carré = 0,313 l. dm ²
Combustible en gal. pied cube de chambre de combustion et en l par dm ³	Niveau haut = 0,058 g. p. h. » = 0,00939 l/dm ³ . h. Niveau bas = 0,042 g. p. h. » = 0,00683 l/dm ³ . h.	0,106 g = 0,48 l pied cube = 0,0172 l dm ³
Valeur typique du rayonnement en cal/cm ² /sec	10 à 12 (pointe)	17 — 18 Rayonnement calorifique moyen vers le bas et au centre du bain (Déduit de 130.000 chu/pied carré. h)
Recirculation	Importante	Importante
Température de préchauffe de l'air	Environ 100° C	Environ 1200° C
Rentrée d'air	Environ 60 % d'excès d'air au cours des essais avec la quantité d'air au niveau inférieur et 70 % au cours des essais avec la quantité d'air au niveau supérieur.	Environ 20 % d'excès d'air
Température de régime des parois	1400° C	1650° C
Chaleur perdue à la cheminée en %	Approximativement 70 %	Approximativement 70 %
Température apparente maximum de la flamme	Environ : 1550° C	Environ 1850° C

TABLEAU 1 A

Extrait du tableau IV — Projet de rapport.

N° 14 — Mayorcas — 18 mars, 1950.

O = Huile S = Vapeur L = Bas H = Elevé M = Moyen.

Type d'essai	Essai n°	Huile (lts/h)	Huile (gph)	Vapeur (Kg/h)	Vapeur (LB/Gal huile)	Air de combust. (Nm ³ /h)	Air (cft/gal)
O _L -S _H	1	275	60,5	120	4,4	3320	1940
	3	200	44,0	100	5,0	1930	1550
	7	200	44,0	85	4,3	2410	1930
O _H -S _L	12	275	60,5	100	3,6	2660	1550
	39	275	60,5	100	3,6	3320	1940
	40	200	44,0	100	5,0	2410	1930
O _H -S _M	42	275	60,5	85	4,4	2660	1550
O _L -S _M	43	200	44,0	120	4,3	1930	1550

FOUR TUNNEL D'ETUDES
DU RAYONNEMENT.

FOUR SIEMENS-MARTIN

1. — Comparaison de l'atomisation par l'air et par la vapeur.

Comme on peut le voir fig. 3, page 33 (*) et ultérieurement d'après les essais sur les brûleurs (sec. D 3/b/7/2, fig. 4a) l'air donne des niveaux (valeurs) de rayonnement plus élevés que la vapeur, que ceux-ci soient comparés en prenant comme base soit les conditions de l'essai, soit l'égalité de la quantité de mouvement. Dans ce dernier cas, l'amélioration se manifestait surtout dans la première partie de la flamme (fig. 1). La moitié inférieure de cette figure montre que l'amélioration du rayonnement est associée avec une plus grande « émission » (facteur d'émission) jusqu'à la fente 5.

Les essais rapportés par Fisher (4) et Larsen (5), et plus récemment les essais réalisés dans une aciérie britannique sur des combustibles à base de goudron (6), suggèrent tous que l'atomisation par l'air donne une flamme plus violente.

Fisher utilisait de l'air à une pression de 100 lb/pouce carré et à une température de 320° F (160° C); l'air amené au moyen d'un ajutage de 11/16 de pouce avait un débit de 16.700 pieds cubes par heure.

La capacité du four était d'environ 200 tons. Dans ces conditions, il obtint, à la première porte, des maxima de rayonnement plus élevés avec l'air qu'avec la vapeur. Larsen affirme qu'au cours des essais qu'il a faits avec un brûleur de type extrêmement simple (disposition en T), il obtint des lectures aussi élevées qu'avec un autre dispositif, tout spécialement quand il employait de l'air comme agent d'atomisation.

Dans une aciérie britannique, le dégagement de chaleur avec atomisation par air fut si intense qu'on en revint à la vapeur par nécessité, afin d'éviter une usure excessive de la voûte.

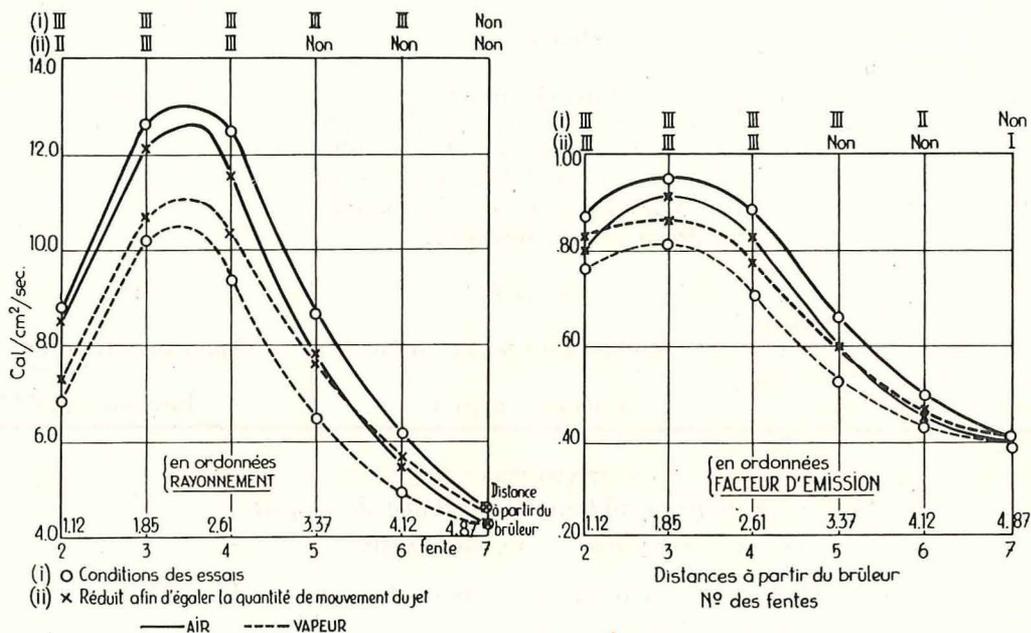


Fig. 1. — Effets comparés de l'atomisation par l'air ou la vapeur.

2. — Comparaison du brai créosote et de l'huile.

Comme l'indique la fig. 2, le brai créosote montre un maximum de rayonnement plus près du brûleur et une valeur maximum de 20 % environ plus élevée que celle obtenue avec de l'huile. En outre,

Hodge (7) montra que les combustibles goudronneux donnent un maximum de rayonnement plus précoce et plus élevé que dans le cas de l'huile (voir fig. 3).

(*) Les références aux pages se rapportent sauf indication contraire, au reprint des publications de l'Institute of Fuel, nov. 1951 et janv. 1952.

Les essais sur fours complètement basiques à Templeborough confirmeraient ce résultat, une allure plus rapide étant obtenue lorsque le brai créosote est substitué à l'huile. Par surcroît, l'efficacité de la

FOUR TUNNEL D'ETUDES
DU RAYONNEMENT

la température des gaz brûlés est d'environ 40° C plus basse dans le cas du brai créosote. La meilleure transmission de chaleur obtenue au moyen du brai créosote est attribuée par Perry (voir publication 4.3) à l'ignition plus précoce du créosote et à la teneur en C plus élevée des flammes de brai.

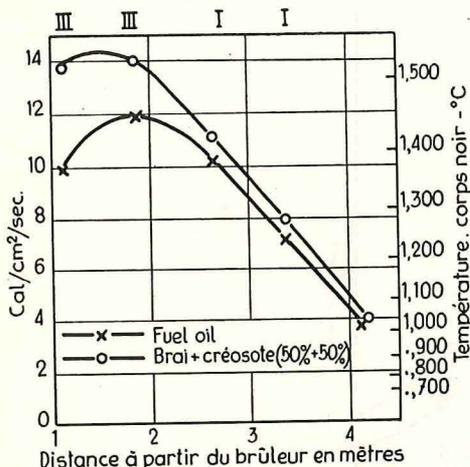


Fig. 2. — Effets comparés de la nature du combustible.

FOUR SIEMENS-MARTIN

chauffe des fours de Templeborough, mesurée en therms par tonne, est quelque peu plus élevée pour le brai créosote que pour les fours chauffés à l'huile.

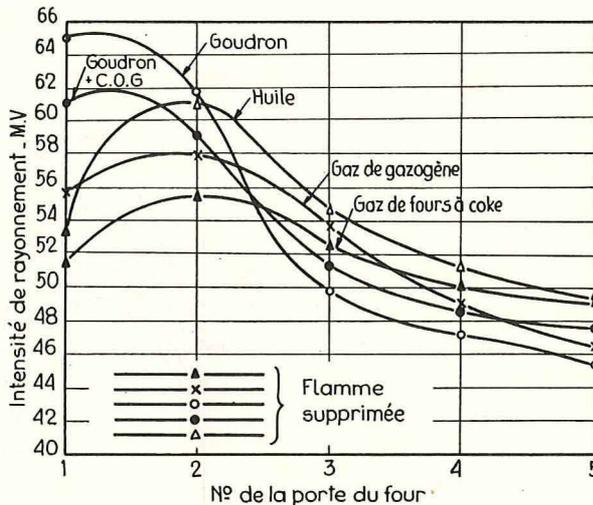


Fig. 3. — Rayonnements caractéristiques de flammes de combustibles pour fours Siemens-Martin.

3. — Excès d'air.

La figure 4 qui est extraite du rapport (3) de « L'Institute of Fuel » montre que l'excès d'air réduit le niveau du rayonnement tout le long de la flamme.

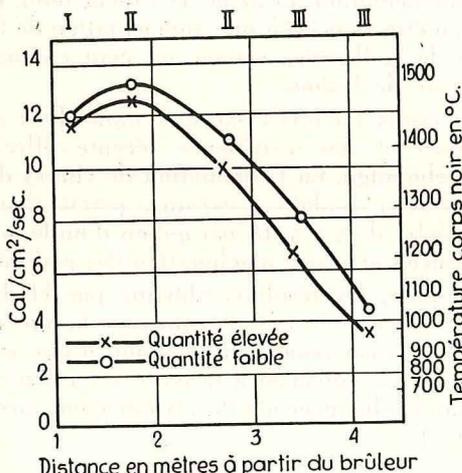


Fig. 4. — Influence de la quantité d'air de combustion.

Les expériences sur fours Siemens-Martin suggèrent, en général, qu'une teneur en oxygène dans les gaz brûlés de l'ordre de 2 % donne des résultats optima. D'autre part, Leckie (3 a) montra, sur son modèle de four à Shelton, que la transmission de chaleur au calorimètre de sole est réduite quand on augmente la quantité d'air à partir de la quantité théorique jusqu'à un excès de 25 et 55 % (fig. 5).

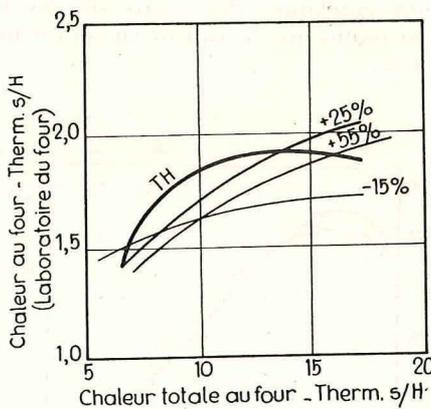


Fig. 5. — Influence du rapport air/gaz sur le transfert de chaleur utilisant un faible orifice à air.

4. — Quantité de combustible.

Le premier groupe d'essais montra qu'une augmentation de la quantité de combustible provoque

L'augmentation du débit d'huile conduit fréquemment à une augmentation de la production,

FOUR TUNNEL D'ETUDES
DU RAYONNEMENT

FOUR SIEMENS-MARTIN

une augmentation générale du rayonnement due, on le présume, à un effet de refroidissement plus faible des parois sur la flamme. Cet effet fut confirmé au cours des essais ultérieurs sur brûleurs (fig. 6.).

mais pas nécessairement à une réduction de la dépense de combustible.

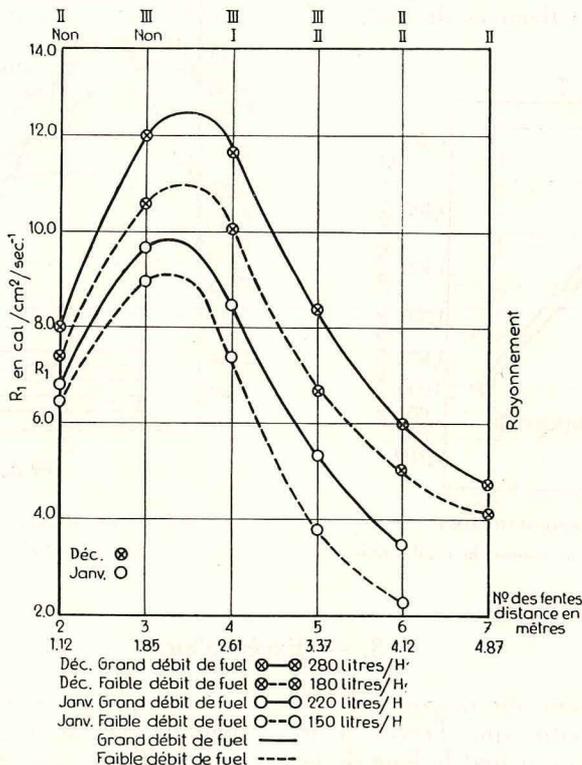


Fig. 6. — Influence de la quantité de fuel.

5. — Quantité d'agent d'atomisation.

Les courbes reproduites dans la fig. 7 et les données correspondantes des essais sur les brûleurs, indiquent toutes que la vapeur en soi est une mauvaise chose.

L'augmentation du débit de vapeur tend, en pratique, à être associée à une augmentation de la puissance de la flamme, comme on peut en juger par la vitesse de fusion.

Les essais factoriels exécutés dans deux aciéries anglaises et une expérience récente effectuée à Templeborough, où l'élimination de chutes de pression dans la conduite à vapeur a permis d'augmenter le débit de 3 à 5 lbs par gallon d'huile, ont tous été associés avec une amélioration des performances.

En outre, les résultats obtenus par Hodge (7) montrèrent que le fait d'augmenter la pression de 50 à 80 lbs par pouce carré conduit à une augmentation du rayonnement à la porte 1, sans provoquer de grands changements de rayonnement aux portes 2, 3 et 4.

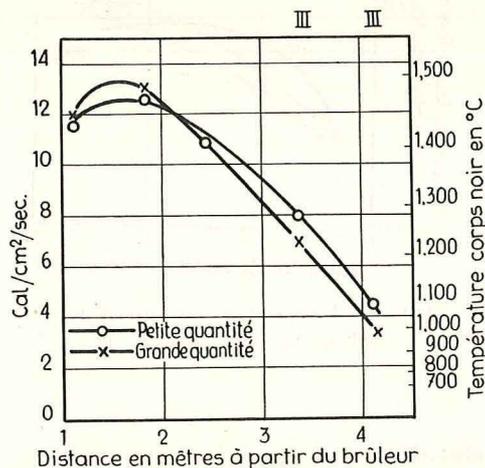


Fig. 7. — Influence produite en variant la quantité d'agent d'atomisation.

FOUR TUNNEL D'ETUDES
DU RAYONNEMENT

FOUR SIEMENS-MARTIN

La fig. 4, page 34 du rapport de l'« Institute of Fuel » (report 3) montre qu'il y a une augmentation du maximum de rayonnement quand on augmente la quantité d'agent d'atomisation, mais qu'après la fente 2 la valeur du rayonnement tombe nettement. Les essais sur brûleurs suggèrent que l'augmentation de la quantité de mouvement, quelle que soit la manière dont elle est obtenue, donne un rayonnement réduit, dû à son tour à une émissivité réduite (fig. 8) (voir discussion plus détaillée dans l'annexe 1).

En outre, l'augmentation de la pression de vapeur de 90 à 100 lbs donna une légère chute du rayonnement.

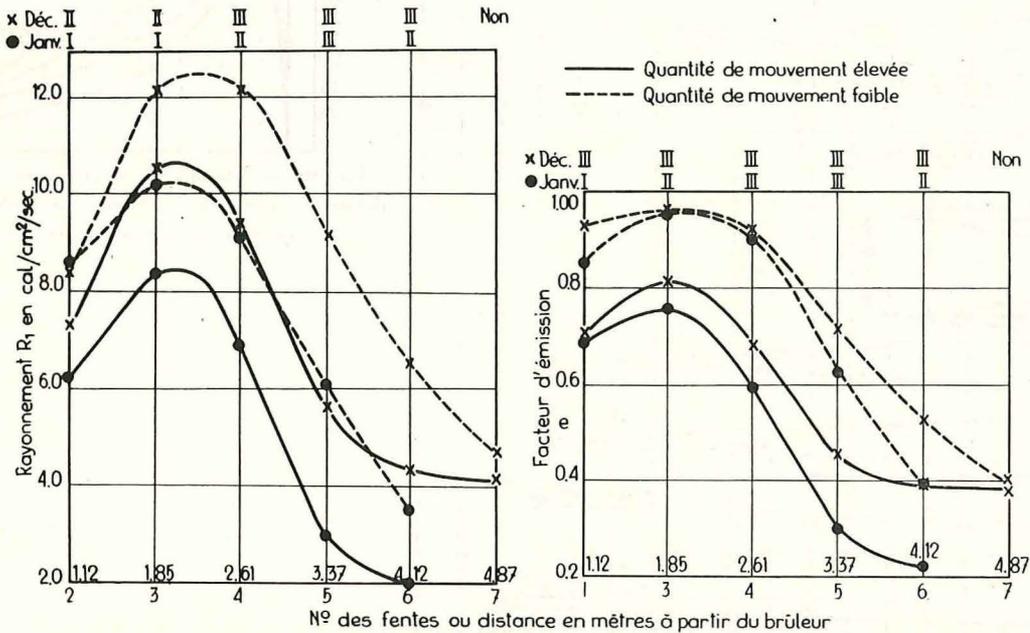


Fig. 8. — Effet de la quantité de mouvement du jet sur R₁ et sur le facteur e.

6. — Distribution du rayonnement.

Toutes les courbes d'Ijmuiden montrent que l'intensité maximum du rayonnement s'élève du bec du brûleur vers la sortie des gaz ; elle atteint un maximum à un tiers du chemin et diminue après.

Fisher (4) (fig. 9) et Hodge (fig. 3) obtinrent des courbes similaires pour le four Martin ; tandis que Stein Callenfels (Conférences de Glasgow), trouva un résultat similaire dans les fours Siemens Martin d'Ijmuiden (fig. 10).

Incidentement, Hodge affirma qu'il existe une relation définie entre un certain type d'intégration des radiations maxima aux cinq portes et des taux correspondants d'allure du four.

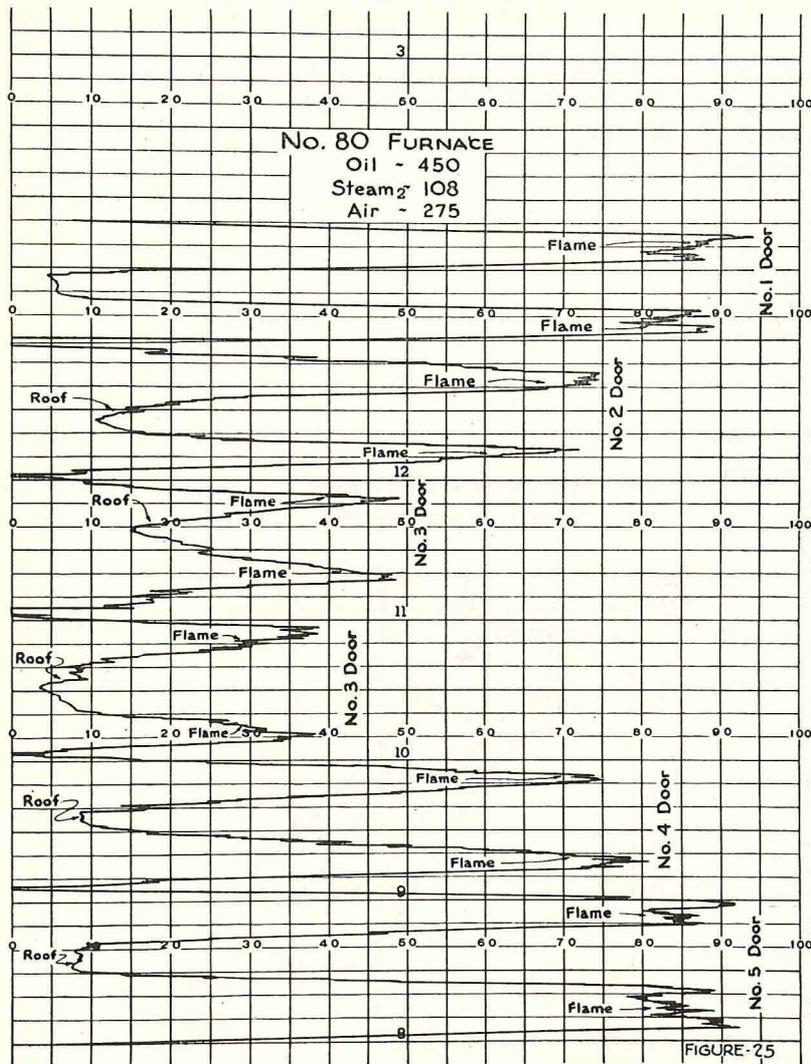


Fig. 9. — Rayonnement aux cinq portes d'un four Siemens-Martin de 200 tons.

FOUR TUNNEL D'ETUDES
DU RAYONNEMENT

FOUR SIEMENS-MARTIN

7. — Types de bruleurs.

On a constaté que des brûleurs de types différents donnent des flammes substantiellement similaires. Dans le document D3/b/7/2, on conclut qu'il faut relativement peu d'énergie de l'agent d'atomisation pour donner de petites gouttes et que de la vapeur additionnelle a simplement comme effet de diminuer la température de la flamme.

Il est suggéré qu'un brûleur soit développé pour assurer une conversion plus efficace de la vapeur en énergie du jet, de telle sorte qu'un jet de quantité de mouvement déterminée puisse être produit avec

un rapport $\frac{\text{vapeur}}{\text{huile}}$ plus faible. Il a été établi que

ceci implique l'élimination de toutes les pertes de pression de vapeur jusqu'au nez du brûleur, la conception de l'appareil doit conduire à une perte minimum d'énergie dans le procédé d'atomisation,

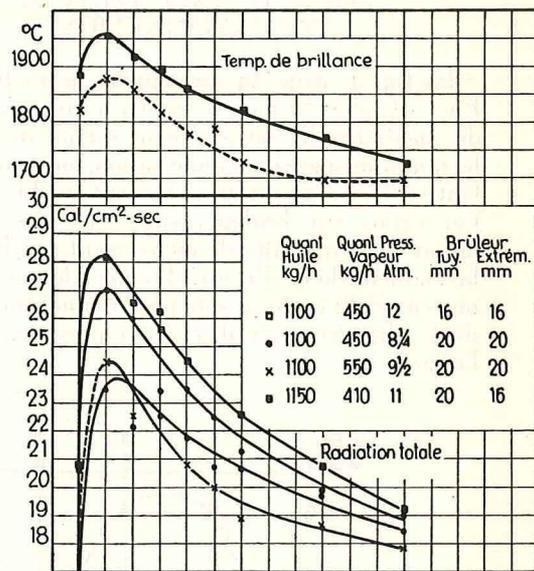


Fig. 10. — Variation du rayonnement de la flamme avec la distance à partir de l'extrémité du brûleur et en fonction du diamètre du gicleur et du débit de vapeur.

FOUR TUNNEL D'ETUDES DU RAYONNEMENT

dans la friction entre vapeur et parois, entre vapeur et huile, et dans l'expansion latérale en dehors de l'ajutage.

Il est même suggéré que des effets également bons peuvent être obtenus avec la moitié des quantités actuelles de vapeur.

III. — UTILISATION AU FOUR SIEMENS-MARTIN DES RESULTATS SUR LE RAYONNEMENT OBTENUS A IJMUIDEN

Dans une publication récente de l'Iron and Steel Institute (9), M. THRING a essayé de calculer le rayonnement de la flamme dans le four Siemens-Martin en prenant comme base les données sur l'émissivité (pouvoir émissif total) déduites des essais d'Ijmuiden.

En faisant certaines hypothèses au sujet de quatre types de flammes dont l'émissivité varie suivant leur longueur, il arrive à suggérer le meilleur type de flamme pour les périodes de chargement, fusion, affinage. Il pose comme principe général que la limite supérieure du taux d'apport de chaleur pour un type donné de flamme est imposée par la surchauffe de la voûte en certains points, tandis que la limite inférieure est fixée par la chute de température de la flamme au-dessous de la température de l'acier à l'extrémité de la flamme. Il arrive aux conclusions suivantes au sujet des types optima de flammes :

1) Chargement :

Pendant cette période, au cours de laquelle l'apport maximum de combustible est limité par la fourniture d'air et de combustible plutôt que par la température de la voûte, il est recommandé d'utiliser des flammes obtenues avec de grands débits et montrant une combustion complète dans le premier tiers du four. Ce sera un avantage si, par surcroît, on peut obtenir une émissivité élevée sur toute la longueur de la flamme. En pratique, le choix se limite entre une combustion rapide, avec une chute de l'émissivité, ou une combustion lente, avec une émissivité maintenue.

2) Fusion.

Là où l'on désire, essentiellement, une fusion rapide, la flamme à combustion retardée et émissivité maintenue est considérée comme la meilleure, mais si l'on a pour objectif une consommation minimum de combustible, une combustion rapide donne des résultats meilleurs. Il en conclut que la longueur optimum de la flamme est, en gros, les $\frac{3}{4}$ de la longueur du four et que la combustion doit évoluer uniformément sur cette distance. Ceci donne un but bien déterminé à la recherche sur l'aérodynamique du mélange et, par conséquent, de la combustion.

Ceci suggère aussi une méthode d'essai quand la combustion dans la flamme s'effectue à la distance optimum, à savoir l'emploi de deux pyromètres de voûte pointés au $\frac{1}{4}$ et au $\frac{3}{4}$ du trajet de

FOUR SIEMENS-MARTIN

à Templeborough, suggèrent que c'est la pression de vapeur derrière l'ajutage final plutôt que devant l'atomiseur qui compte.

la flamme le long du four, la longueur de la flamme étant ajustée jusqu'à ce que les lectures soient les mêmes, la quantité de combustible étant réglée de manière à obtenir deux lectures compatibles avec les températures maxima que la voûte peut supporter.

3) Affinage.

Le but est de maintenir la température dans tout le volume du bain. Il n'y a, en principe, aucun avantage à avoir une haute émissivité pendant la période d'affinage ; par contre, une combustion différée est bien plus importante, car c'est la seule façon d'empêcher que la température de la flamme — pour de faibles apports de combustibles — ne tombe en dessous de la température de l'acier, à l'extrémité de la flamme.

Comme la solution de M. THRING est mathématique et qu'elle a recours en outre à un nombre important de suppositions, on a avancé une autre solution :

- Imaginez deux tunnels à rayonnement semblables à ceux d'Ijmuiden, mais construits l'un à côté de l'autre, ayant une chambre de 13' de largeur, 24' de longueur et 6' de hauteur, séparés par un mur central de 1' d'épaisseur.
- Etendez la longueur de 24' à 38' et enlevez le mur de séparation, ce qui donne une surface de sole de 38' par 13', représentant, sur une base I.S.I. $38' \times 13' \times 0,85 = 420'^2$. Doublez les apports d'huile et de vapeur et réglez la longueur de la flamme de façon qu'elle s'étende jusqu'aux $\frac{2}{3}$ environ de la longueur du four, par exemple en prenant un gicleur de dimension plus grande, pour un flux donné.

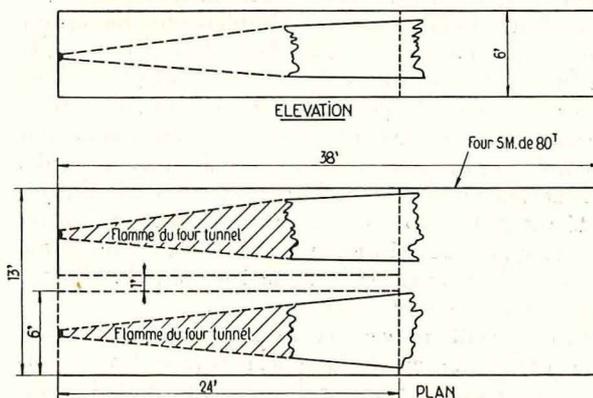


Fig. 11. — Utilisation au four Siemens-Martin des résultats sur le rayonnement obtenus au four tunnel d'Ijmuiden.

- c) Nous obtenons de la sorte, un four Martin, à deux brûleurs jumelés, de 80 tons, et ayant une surface de sole de 420^{m2} et un taux d'alimentation de 240 gallons d'huile à l'heure (cf. fig. 11).
- d) Pour produire de l'acier, nous devons maintenant :
- 1) porter la température de préchauffage de 100° C (par exemple) à 1200°, en installant, par exemple, des empilages et des mécanismes d'inversion ;
 - 2) incliner les brûleurs jusqu'à ce que la flamme frappe la sole.
- On pourrait essayer de calculer l'effet de d / bien qu'il serait nécessaire de faire un certain

nombre de suppositions quant à l'émissivité ; par contre, on ne dispose pas de données qui permettraient de calculer l'effet de d /.

- e) Si nécessaire, on peut imaginer de combiner les deux flammes en une seule ; elle serait alors plus longue que la flamme initiale, pourvu que les sections du gicleur et le débit de vapeur restent inchangés.
- L'examen de ce qui précède suggère que le rayonnement d'un four Martin pourrait être calculé avec relativement peu de données supplémentaires et qu'un effort dans ce sens comblerait une lacune en précisant ces facteurs, comme par exemple le préchauffage et l'angle du brûleur, pour lesquels des données précises restent nécessaires.

IV. — PROGRAMME DES TRAVAUX FUTURS DESTINES A COMBLER LES LACUNES

1) Anomalie concernant la vapeur.

Le point qu'il importe d'éclaircir avant tout est la différence des effets de la vapeur dans le tunnel et dans le four Martin.

Nous suggérons qu'on entreprenne cette question en faisant d'abord un essai du type classique dans le tunnel, en utilisant un brûleur, un combustible et une gamme étendue de valeurs d'huile et de vapeur. Il serait possible, de cette façon, d'obtenir une courbe caractéristique (rayonnement intégré en fonction du débit de vapeur mesuré par gallon) pour certains débits d'huile ; il faut noter, toutefois, qu'il peut être nécessaire, en effectuant ces essais, d'apporter des modifications correspondantes au contrôle de l'air de combustion et au réglage du tirage. Si l'on trouve, par exemple, que la courbe caractéristique a la forme d'une bosse et que, dans les essais exécutés en tunnel, on a travaillé sur le côté descendant alors que, dans les essais correspondants réalisés dans un four Martin, on a travaillé sur le côté ascendant, l'anomalie serait dès lors éclaircie.

2) Convection.

Malgré les affirmations fréquentes suivant lesquelles la convection ne joue qu'un rôle mineur dans le transfert de chaleur dans le four Martin, il se pourrait qu'elle joue un rôle bien plus important que l'appréciation qui en est faite durant la période de fusion des mitrilles. On suggère, dès lors, d'essayer de mesurer la proportion de chaleur susceptible d'être transférée aux mitrilles, par convection, par exemple, en insérant deux rangées de tubes refroidis à l'eau sur le chemin de la flamme, à 8' de l'extrémité du gicleur, ou autrement, en utilisant l'un ou l'autre type modifié de mesureur de flux calorifique capable de distinguer entre le transfert de chaleur par rayonnement et par convection.

On pourrait trouver, par exemple, qu'il se produit une combustion catalytique à la surface des mitrilles entraînant comme résultat un transfert de chaleur par convection plus élevé que celui qui serait obtenu par les méthodes courantes de calcul. On pourrait associer à ces expériences des essais sur

le transfert de chaleur à un mesureur de flux calorifique, exécutés au niveau de la sole en fonction de l'angle du brûleur.

3) Qualité de la vapeur.

La sidérurgie apprécierait de pouvoir disposer de données quantitatives au sujet de l'effet produit sur le rayonnement par le passage de la vapeur humide à la vapeur sèche et de la vapeur sèche à la vapeur surchauffée.

Bien que de nombreux avis aient été émis sur les avantages du surchauffage, on ne dispose jusqu'à présent d'aucuns résultats quantitatifs à ce sujet.

4) Mesureur de puissance dans la flamme.

La création d'un appareil servant à mesurer la puissance de la flamme ou la mise au point d'une technique de mesure capable de fournir un indice simple et valable tant pour le tunnel que pour le four Martin, est indispensable.

5) Standardisation des instruments.

La recherche sur les flammes de four Siemens-Martin serait facilitée et les données recueillies seraient davantage comparables si certains instruments, par exemple les mesureurs de flux calorifique et les pyromètres à aspiration, étaient standardisés et si des dispositions étaient prises pour les fabriquer en série.

6) Recirculation.

Virtuellement, rien n'a été fait, jusqu'à présent, au sujet de l'effet de la recirculation sur le rayonnement de la flamme. Le travail initial devrait être fait sur de petites unités comme cela se fait dans les laboratoires de Delft.

7) Préchauffage de l'air.

L'application du préchauffage d'air au tunnel d'Ijmuiden serait probablement coûteuse, mais il serait intéressant de savoir jusqu'à quel point les données obtenues sans préchauffage peuvent être appliquées aux fours dans lesquels on emploie des préchauffages intensifs. Dans ce cas également, il suffirait d'effectuer le travail initial à une échelle réduite.

TABLEAU II.
(Données extraites des pages 19 et suivantes —
Publication de l'Institute of Fuel, nov. 1951 et janv. 1952).

L = Bas M = Moyen H = Elevé.

Changements		N° des essais considérés	Total des mesures pyrométriques max. aux fentes du four cal/cm ² . sec	Intégration de toutes les mesures pyrométriques	Pyromètre optique Max. °C	Pyromètre à aspiration °C	Mesureur de flux calorifique cal/cm ² . sec	Air en excès %	Appréciation :
Types	Valeurs								
Huile _L - Vap. _M à Huile _L - Vap. _H	(44 G) Flux d'huile bas & Accroissement de vapeur (4,5 → 5,0 LB/G)	45 → 5	42,49 → 54,80	160 → 129	1500 → 1470	1225 → 1178	Fente 2 8,55 → 5,96 Fente 4 8,51 → 6,50	45 ↓ 74	Pire
Huile _H - Vap. _L à Huile _H - Vap. _M	(60,5 G) Flux d'huile élevé & Accroissement de vapeur (5,6 → 4,4 LB/G)	12 → 42	45,23 → 45,06	169 → 179	1500 → 1540	1272 → 1557	Fente 2 7,57 → 9,17 Fente 4 6,22 → 10,35	55 ↓ 45	Meilleur
Huile _L - Vap. _M à Huile _H - Vap. _M	(4,4) Vapeur constante & Accroissement d'huile (44 → 60,5)	45 → 42	42,49 → 45,06	160 → 179	1500 → 1540	1225 → 1357	Fente 2 8,55 → 9,17 Fente 4 8,51 → 10,35	45 ↓ 45	Meilleur

Les remarques faites ci-dessus se rapportent uniquement aux combustibles liquides, mais il serait d'un grand intérêt de chercher à en savoir davantage sur le rayonnement, disons des flammes à gaz de gazogène, par exemple :

- a) Comment se comparent-elles aux flammes d'huile du point de vue de l'intensité du rayonnement ?
- b) Quel est l'effet du préchauffage du gaz ?
- c) Quel est l'effet de l'humidité ?
- d) Quel est l'effet d'autres variables comme, par exemple, l'oxygénation de l'air du gazogène.

Ce stade ultérieur, du plus grand intérêt, en vue de faire la liaison entre le tunnel et le four Siemens-Martin, consisterait dans l'exécution de nouveaux essais relatifs au four Siemens-Martin.

Ils pourraient être semblables aux essais qui ont été réalisés à Templeborough en 1946, mais seraient d'un type plus simple et seraient orientés vers des objectifs plus spécifiques.

ANNEXE I.

Résultats anormaux avec la vapeur.

Si l'on examine les données des 48 essais repris dans la publication de l'*Institute of Fuel* seulement du point de vue de l'effet de la vapeur sur le rayonnement de flammes d'huile et si l'on fait abstraction des essais pour lesquels il y avait plus d'air excédentaire qu'à l'ordinaire, il reste alors uniquement quatre essais, à savoir : 3, 12, 42 et 43. Ces derniers sont reproduits dans le tableau 1 A ; les divers postes y sont repris avec des unités plus familières à l'aciériste.

Le tableau 2 montre les données extraites des tableaux généraux pour les principales variables et laisse voir en particulier l'effet :

- 1) du passage de 4,3 à 5 lbs de vapeur par gallon pour un débit d'huile bas et constant de 44 gallons ;
- 2) d'un accroissement de vapeur de 3,6 à 4,4 lbs pour un débit d'huile haut et constant de 60,5 gallons ;

- 3) d'un rapport constant $\frac{\text{vapeur}}{\text{huile}}$ de 4,4 lbs/gallon en accroissant le débit d'huile de 44 à 60,5 gallons.

Dans le premier cas, on verra que les conditions empirent avec l'accroissement de vapeur, mais que l'air excédentaire s'est accru de 45 à 74 %, ce qui est probablement dû à l'effet d'aspiration intensifié du jet de vapeur. On peut concevoir que les modifications observées étaient dues à un accroissement de l'air excédentaire plutôt qu'à un accroissement de la vapeur. Dans les deux autres cas, l'effet d'un accroissement de vapeur et par la suite d'un accroissement d'huile, tandis que la vapeur demeure constante, se traduit par une amélioration des conditions de rayonnement ; cette conclusion s'accorde avec l'expérience pratique.

Par conséquent, on ne peut pas dire en se basant sur ces données que la vapeur est nuisible, particulièrement à la lumière de la figure 4 de la page 34 (*) de la publication de l'*Institute of Fuel*, où l'on observera que le rayonnement avec une grande quantité d'agent d'atomisation est réellement plus grand aux deux premiers mesureurs que pour une plus petite quantité. Il se peut que, lors de la fonte de ferrailles, ces 6 ou 7 premiers ft. soient plus importants que l'extrémité de la flamme.

Si, d'autre part, nous examinons les essais du brûleur (D 3/b/7/2), tous les chiffres suggèrent qu'un accroissement de vapeur produit un décroissement sensible du rayonnement et de l'émissivité. Dans la série B, où l'on a fait uniquement usage de vapeur, les courbes se révéleraient certainement significatives. Par exemple, dans la figure 1 a (reproduite ici à la figure 8) le R₁ montre qu'un flux de vapeur élevé est nuisible. Une analyse plus détaillée des données de ces essais n'est pas possible du fait du manque de chiffres.

(*) Reproduite à la figure 7 dans la présente publication.

REFERENCES

1. — J.H. CHESTERS and M.W. THRING : The Iron and Steel Institute, 1946, Special Report N° 37.
2. — I.M.D. HALLIDAY : Paper in Report on Birmingham conference on « Modern Applications of Liquid Fuels », Inst. of Fuel, 1948, p. 26.
3. — Flame Radiation Research Joint Committee-Reports of 1949 Trials at IJmuiden, Jl. Inst. of Fuel, Nov. 1951, vol. XXIV, N° 140, and Jan. 1952, vol. XXV, N° 141.
- 3a. — A.H. LECKIE, Jl. Iron and Steel Institute, 1947, p. 407, vol. 155.
4. — A.J. FISCHER : A.I.M.E., Open hearth proceedings, 1944, p. 91.
5. — B.M. LARSEN : A.I.M.E. Open hearth proceeding 1945, p. 305.
6. — Private communication.
7. — A.L. HODGE : A.I.M.E., Open hearth proceeding 1945, p. 326.
8. — G.W. van STEIN CALLENFELS : All-Basic Furnace Conference, Glasgow, 1952, (Report published by West of Scotland Iron and Steel Inst.).
9. — M.W. THRING : Jl. Iron and Steel Institute, August 1952, p. 381.