

Etude du rayonnement des flammes

Résultats obtenus par un groupe international de recherche,
au moyen d'un four expérimental situé à Ymuiden en Hollande.

par

G. M. RIBAUD, J. E. de GRAAF, O. A. SAUNDERS et M. W. THRING.

Traduit de « Iron and Coal Trades Review » du 30 novembre 1951

par J. Campus, Ingénieur Civil Métallurgiste.

SAMENVATTING

De volgende bijdrage geeft de resultaten van een omvangrijke gemeenschappelijke inspanning, geleverd door de Europese landen, met het oog op het ontdekken van het mechanisme van de lichtstraling en van de warmtegeleiding die erdoor verzekerd wordt. Slechts de gelijktijdige studie van de verbranding en van de warmtegeleiding kan toelaten de formules op te stellen voor de prae-determinatie en de verbetering van de lichtuitstraling. Dit betekent dat men door middel van apparaten, waarvan de afmetingen deze der industriële toestellen benaderen, de voorwaarden moet bestuderen waaraan een brandstof-deeltje wordt onderworpen gedurende zijn doortocht door de vlam (proefnemingen betreffende het mechanisme van de verbranding) evenals de totale uitstraling op een reeks punten van de vlam, in verschillende voedingsvoorwaarden (proefnemingen betreffende het rendement).

Huidig verslag bevat een bondig overzicht van de eerste reeks rendementsproeven, uitgevoerd in 1949. De bereikte uitslagen geven inlichtingen van onmiddellijk praktisch belang voor de berekening van vlamovens, voor zover het vlammen betreft die min of meer gelijkaardig zijn aan deze der proefnemingen.

RESUME

L'article suivant présente des résultats d'un vaste effort fait en commun par des pays européens, pour découvrir le mécanisme du rayonnement lumineux et de la transmission de la chaleur qu'il réalise. Seule, l'étude simultanée de la combustion et de la transmission de la chaleur permettra d'établir des formules pour la prédétermination et l'amélioration du rayonnement lumineux. Ceci signifie qu'il faut l'étudier à l'aide d'appareils de dimensions comparables à celles des flammes industrielles : les conditions auxquelles une particule de combustible est soumise durant son passage à travers la flamme (expériences relatives au mécanisme de la combustion), ainsi que le rayonnement total obtenu en des points situés le long de cette flamme, dans diverses conditions d'alimentation (essais de rendement). Le présent rapport contient un bref compte rendu de la première série d'essais de rendement effectués en 1949. Les résultats obtenus apportent des informations de valeur pratique immédiate pour le calcul des fours à flammes, pour autant qu'il s'agisse de flammes approximativement semblables à celles qui ont été utilisées dans les essais.

Variables étudiées.

C'est l'existence d'un four expérimental, construit aux Usines métallurgiques royales néerlandaises, qui a rendu possible une étude de ce genre à laquelle l'Angleterre, la France, la Suède et d'au-

tres pays apportent leur contribution. Un bref article illustré décrivant l'importance de ce travail pour ceux qui s'occupent des études de fours et de chaudières, et pour les utilisateurs, a paru dans le numéro du 28 avril 1950 de la revue « Iron and Coal Trades Review ».

Depuis lors, une première série d'essais de rendement a été effectuée, au cours desquels on a étudié les effets de deux variables qualitatives, c'est-à-dire la nature du combustible et celle de l'agent de pulvérisation; et de trois variables quantitatives, à savoir : les quantités de combustible, d'agent de pulvérisation et d'air de combustion. Il est apparu que les premières agissent sur le rayonnement et d'autres caractéristiques de la première partie de la flamme, qui n'a entraîné que peu d'air de combustion, tandis que les secondes affectent le rayonnement de la flamme, ainsi que la température et l'émissivité de son extrémité. Cette information était contenue dans une communication présentée au Congrès mondial de métallurgie de Detroit, aux E.-U., en octobre. Elle est présentée ici à la suite d'un accord conclu avec les auteurs et l'American Society for Metals.

Les auteurs sont des représentants de trois pays. G. M. Ribaud est Directeur des Etudes et Recherches du Gaz de France et Professeur à la Faculté des Sciences à Paris; J. E. de Graaf est Chef des Laboratoires et des Recherches aux Usines métallurgiques royales néerlandaises à Ymuiden; O. A. Saunders est Professeur de Mécanique au Collège Impérial de l'Université de Londres et M. W. Thring est Chef du Département de Physique de la British Iron and Steel Research Association à Londres.

INTRODUCTION.

On sait de longue date que les ingénieurs qui étudient les divers genres d'appareils de chauffage à flamme, sont fortement limités par le manque de connaissances au sujet du rayonnement des flammes. Il n'est possible ni de prédéterminer avec exactitude le taux de transmission de la chaleur d'une flamme produite dans des conditions connues, ni de découvrir de quelle façon on peut accroître le rayonnement en modifiant les conditions.

Il y a plus de trente ans, Schack (1) a signalé que la transmission de la chaleur par rayonnement s'effectue selon deux mécanismes principaux, appelés généralement lumineux et non-lumineux. Le rayonnement non-lumineux consiste essentiellement en bandes infra-rouges provenant des molécules tri-atomiques CO_2 et H_2O et n'est associé directement à aucune émission de lumière visible. (En fait cependant, la région des flammes de fours, où le rayonnement est presque entièrement non lumineux, peut encore être visible par suite de la présence de petites quantités d'éléments tels que le sodium). L'expression « rayonnement lumineux », par contre, se rapporte principalement au rayonnement provenant de particules minuscules de suie, qui se forment dans les flammes d'hydrocarbures quand elles sont chauffées et qu'elles subissent une combustion partielle avant de recevoir tout l'air nécessaire à la combustion. L'importance pratique

du rayonnement lumineux provient de ce que les flammes lumineuses peuvent avoir, et possèdent habituellement, des émissivités de l'ordre de 0,5 à l'unité, tandis que l'émissivité des flammes non-lumineuses dépasse rarement 0,2.

Au point de vue de l'établissement de formules à l'usage de ceux qui font les études de conception, la grande différence entre ces deux types de flamme est que le rayonnement non-lumineux est très important une fois que la combustion est complète, tandis que le rayonnement lumineux est essentiellement lié à une combustion incomplète. Ceci signifie qu'il est possible d'établir des formules pour prédéterminer et améliorer le rayonnement non-lumineux en étudiant en laboratoire les propriétés de rayonnement de mélanges divers des gaz considérés. Par contre, pour ce qui concerne le rayonnement lumineux, l'essence même du problème impose d'étudier le rayonnement dans des conditions où la combustion se produit en même temps que le rayonnement.

Etant donné que, d'après ce qui précède, l'allure de formation des particules lumineuses de suie dépend nécessairement des vitesses relatives du dégagement de chaleur et d'arrivée d'oxygène pour une masse donnée de combustible, il est essentiel que ces vitesses relatives soient les mêmes dans le dispositif expérimental que dans le four ou la chaudière dont il faut prédéterminer le rendement. Et ceci signifie : ou bien (1) qu'il faut approfondir l'étude d'une flamme de grandeur comparable à celle du four ou de la chaudière, jusqu'à pouvoir déterminer le comportement d'une certaine quantité de combustible la traversant et de le reproduire en laboratoire; ou (2) qu'il faut étudier les propriétés de rayonnement de flammes de grandeur comparable à celle du four ou de la chaudière, dans des conditions d'alimentation diverses.

Ces méthodes comportent toutes deux des déterminations à faire sur une flamme contrôlée, de grandeur comparable à celle de la flamme industrielle; mais, la première nécessite la mesure des conditions existant dans la flamme même et que rencontrera une quantité déterminée de combustible en la parcourant (on peut appeler ceci « essai de mécanisme de combustion »); tandis qu'avec la seconde, il suffit de mesurer les caractéristiques du rayonnement produit par la flamme, à l'aide de différents combustibles, pour des proportions d'air de combustion, des températures de paroi, etc..., diverses (« essai de rendement »).

En fait, il est nécessaire de suivre ces deux voies, étant donné, d'une part, qu'il est impossible d'effectuer dans un intervalle de temps fini les essais de mécanisme de combustion correspondant à toutes les permutations et combinaisons des conditions externes appliquées aux flammes dans la pratique industrielle et, d'autre part, que les essais de rendement ne permettent pas de lier ni d'appliquer aux flammes industrielles, les résultats de recherches fondamentales effectuées en laboratoire.

Un certain nombre d'auteurs, ayant entrepris antérieurement l'étude de ce sujet et parmi les-

quels il faut citer Sherman (2) et Lindmark (3), avaient conclu qu'il fallait étudier le rayonnement lumineux des flammes à une échelle semi-industrielle. Chacun de ces chercheurs a effectué des essais de rendement dans des tubes d'environ 5 pieds de diamètre, à paroi chaude, c'est-à-dire garnie de briques pour ceux de Sherman, tandis que ceux de Lindmark étaient essentiellement à paroi froide. Dans les deux cas, ils arrivèrent à donner des formules empiriques exprimant la température et l'émissivité en fonction de la distance le long de leur flamme; mais par suite de l'absence d'essais de mécanisme de combustion, il n'est pas possible d'extrapoler leurs résultats pour des conditions s'écartant sensiblement de celles qu'ils ont étudiées. Par conséquent, la construction d'un four de grandeur raisonnable destiné à l'étude du rayonnement des flammes, aux Usines métallurgiques royales néerlandaises, intéressa immédiatement d'autres chercheurs de Grande-Bretagne, de France, de Suède et d'ailleurs encore. Ils reconnurent que ce four offrait la possibilité d'aborder le problème de façon complète.

Ce qui précède montre clairement que l'étude doit comporter :

1) des essais de mécanisme de combustion dans le four, en mesurant les vitesses des gaz, les degrés de combustion, les températures et les émissivités

observe pour les particules de combustible, dans les essais de mécanisme de combustion;

4) l'analyse mathématique reliant d'abord les résultats des essais de laboratoire aux flammes utilisées dans les essais de mécanisme de combustion, et lorsque ceux-ci se montrent concordants, extension de l'analyse à l'ensemble des conditions caractérisant la flamme des essais de rendement.

Remplir un tel programme à un rythme qui permette de fournir les résultats demandés, dans un intervalle de temps raisonnable, nécessite manifestement le concours d'un nombre important d'hommes de science et l'emploi d'une grande quantité d'instruments et d'équipement en plus du four expérimental. On a, par conséquent, estimé nécessaire de rassembler ces moyens avec l'aide de différents pays et d'entreprendre en commun la réalisation d'un programme international. Un comité collectif a été institué et la recherche systématique a commencé selon ce programme. Le présent rapport contient un bref compte rendu de la première série d'essais de rendement effectués en 1949.

Le four expérimental.

Le four disponible, large et haut de 2 mètres et long de 7 mètres, a la forme d'un parallélépipède rectangle, la voûte est légèrement cintrée. Le croquis de la figure 1 en donne les principales dimen-

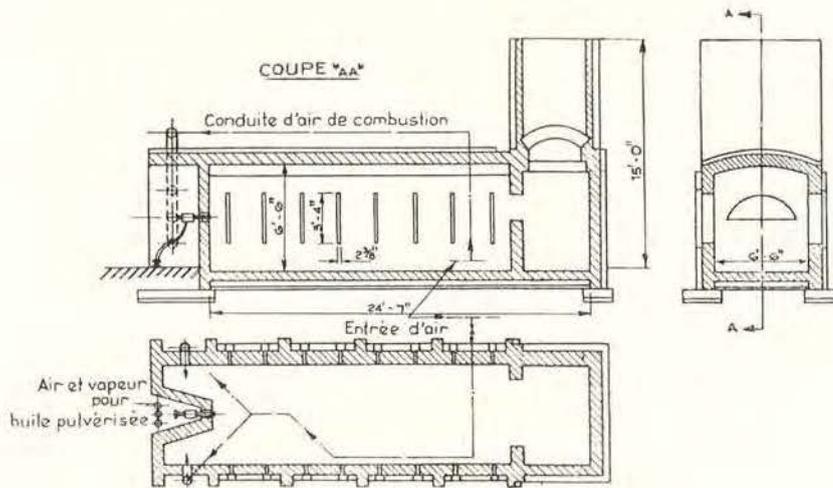


Fig. 1. — Vue générale du four expérimental.

tout le long de la flamme, pour un ensemble relativement limité de conditions ;

2) des essais de rendement consistant à mesurer le rayonnement total de la flamme et son émissivité sur toute sa longueur, en fonction du type de combustible, de la quantité d'air de combustion et de sa température, ainsi que du type d'injecteur et de la température des parois du four;

3) des expériences de laboratoire au cours desquelles on soumet les hydrocarbures, utilisés dans les deux premiers types d'essai, à une évolution dans des conditions identiques, au point de vue de l'apport de chaleur et d'oxygène, à celles que l'on

sions. Il est chauffé au moyen d'un brûleur placé au centre d'une paroi d'extrémité. L'air de combustion est introduit de part et d'autre de ce brûleur. La flamme suit approximativement l'axe longitudinal de la chambre, s'échappant par une ouverture allongée dans le sens horizontal, ménagée dans la face opposée au brûleur au niveau de l'axe. Cette fente sert tout d'abord à réduire les pertes à la sortie, occasionnées par l'émission de rayonnement en dehors de la chambre de combustion, et ensuite à faire sortir la flamme de la chambre de combustion au niveau de l'axe; enfin, à mélanger les gaz sortant, pour faciliter l'éta-

blissement d'un bilan calorifique en assurant la précision de l'échantillonnage et de la mesure des températures.

La grandeur du four, comparée aux plus grandes flammes des fours à sole d'aciérie et des chaudières à tubes d'eau, est réduite dans le rapport de 2 ou 3 à 1 et est effectivement supérieure à celle de beaucoup de flammes industrielles. Ceci assure l'analogie du comportement de particules traversant cette flamme expérimentale et la majorité des flammes industrielles.

On sait que, dans un certain groupe de flammes industrielles du type considéré, l'entraînement de l'air de combustion avec le jet de combustion est surtout dû à la quantité de mouvement de ce jet, dont la vitesse est élevée. Il fut décidé d'effectuer les premiers essais à l'aide de ce type de flamme, de préférence à celui dans lequel l'air de combustion est introduit à grande vitesse, de façon à se mélanger au courant de combustible sous l'effet de sa propre quantité de mouvement.

Un tel système est plus compliqué qu'un jet libre dans un milieu effectivement illimité et immobile, comme celui qui a été étudié par Hawthorne, Weddell et Hottel (4), et ceci pour deux raisons. Tout d'abord, la quantité d'air de combustion qui peut être entraînée par le jet, est limitée à la quantité fournie et, si l'entraînement d'une plus grande quantité d'air est nécessaire pour la conservation de la quantité de mouvement du jet, il faut ramener une partie des gaz brûlés de l'extrémité de la flamme, opération appelée recirculation.

En second lieu, les parois font obstacle au libre étalement du jet, à partir d'une certaine distance. Dans le cas présent, cette distance est approximativement les $\frac{2}{3}$ de la longueur du four, de sorte que la perturbation provoquée par les parois n'affecte pas la combustion de façon sensible dans la partie initiale de la flamme, bien que la recirculation y soit également appréciable.

Le schéma d'écoulement dans le four diffère encore autrement des écoulements simples susceptibles d'une expression mathématique, en ce sens que l'on introduisait l'air par deux orifices verticaux s'étendant sur toute la hauteur du four de part et d'autre du jet, au lieu de l'introduire tout autour de celui-ci. Ceci tendait à créer une différence entre les compositions de mélanges prélevés dans un plan vertical et dans un plan horizontal passant par l'axe. L'influence de tous ces facteurs compliquant l'analyse des mélanges et de l'écoulement a cependant été étudiée à l'aide d'une maquette par Newby et Tyler, en vue de les relier aux cas théoriques les plus simples.

Le four est pourvu, sur les deux côtés, de fentes verticales, à deux pieds de distance l'une de l'autre, à travers lesquelles on peut faire des mesures du rayonnement de la flamme en utilisant des instruments à faible ouverture, qui permettent de viser à travers la flamme la fente située sur la paroi opposée ou bien la paroi à température élevée.

Les pertes de chaleur à travers les parois et les fentes refroidies à l'eau constituent la charge ther-

mique du four, qui dissipe environ 20 % de l'énergie du combustible, selon les indications d'un bilan calorifique approximatif.

Première série d'essais de rendement.

Plan des essais.

La méthode classique pour étudier les effets d'un certain nombre de variables de contrôle sur le rendement d'une flamme consisterait à choisir, pour débiter, une combinaison particulière de valeurs de ces variables et ensuite, d'en modifier une, puis de lui rendre sa valeur initiale avant de faire varier la suivante. On obtiendrait des informations sur l'interaction de deux variables en en modifiant deux simultanément, les essais se faisant dans un ordre quelconque selon l'intérêt présenté par les différentes variables.

Cependant, cette méthode est absolument inapplicable pour deux raisons. Tout d'abord, il n'est pas possible de reproduire une flamme avec une grande similitude en réutilisant un même ensemble de variables de contrôle, pour de multiples raisons, dépendant en particulier du fait que le four est une chambre en briques lesquelles sont mises en service à haute température. Il en résulte que les écarts présentés par de simples répétitions de la même expérience ne sont que relativement peu inférieurs aux effets de variables. Ceci signifie qu'il n'est possible de déterminer exactement les effets de ces variables que si l'on effectue un certain nombre d'essais pour chaque valeur de chaque variable. Les essais doivent être répétés effectivement 10 à 20 fois. Ensuite, et toujours parce que les essais sont effectués dans des chambres en briques, il se produit habituellement une modification systématique de l'appareil, dans le temps, au cours d'une série d'expériences, de sorte qu'il n'est jamais possible de répéter une expérience quelconque dans des conditions identiques, après un certain temps.

Dans ces conditions, la méthode classique cesse d'être économique et on a par conséquent décidé d'utiliser l'essai factoriel dans lequel on maintient un certain nombre de variables intervenant dans l'essai, cinq dans le cas présent, à certaines valeurs (ici 2 valeurs pour chaque variable) et on effectue des essais avec toutes les combinaisons des grandes et des petites valeurs des différentes variables. Toutes ces combinaisons sont faites de façon qu'il n'apparaisse pas d'influence systématique du temps dans les calculs pour la détermination de l'effet des variables. On peut y arriver en faisant en sorte que les 16 essais correspondant à une valeur élevée d'une variable déterminée soient répartis uniformément, ou selon le hasard, parmi les 32 essais. Dans le cas présent, on a décidé d'effectuer un groupe de 48 essais de rendement, de sorte que 16 soient répétés, fournissant ainsi une chance plus grande de faire apparaître les effets. Un essai factoriel de ce type permet automatiquement de déterminer les interactions en même temps que l'effet majeur des variables. On peut

découvrir, par exemple, que l'effet du changement d'une variable est plus important quand une autre variable a une valeur élevée plutôt que faible.

Variables de contrôle.

Les 5 variables auxquelles on donnera 2 valeurs dans le premier essai factoriel de rendement sont :

1) la nature du combustible liquide, du mazout lourd et un mélange de brai et de créosote;

2) le taux d'apport d'énergie par le combustible dont les deux valeurs sont 1,92 et 2,66.10⁶ k. cal/h. La plus petite des deux valeurs est celle qui donne la plus faible dimension pratique de la flamme, l'autre étant la valeur maximum compatible avec la température de service des briques;

3) la nature de l'agent de pulvérisation du combustible liquide : air et vapeur;

4) la proportion en poids de l'agent de pulvérisation : on a adopté 2 proportions présentant entre elles une différence de 20 %. On a donné à la plus faible la valeur minimum déterminée par l'observation visuelle, qui ne donnait pas la flamme dite paresseuse. A l'autre valeur correspond une flamme visible qui remplit les deux tiers de la longueur du four.

5) deux quantités d'air de combustion, 100 et 125 % introduits par les orifices d'entrée (par suite de l'infiltration d'air, les moyennes des quantités d'air effectivement intervenues, calculées à partir des teneurs en CO₂, sont de 158 à 170 % respectivement). Il s'est révélé nécessaire d'établir un contrôle automatique des trois variables quantitatives, à savoir : les taux d'alimentation en combustible, en air de combustion, et en agent de pulvérisation. En outre, l'obtention d'un fonctionnement régulier nécessite un contrôle automatique de la constance de la température du combustible et de la pression dans le four durant tous les essais. On a réglé la pression dans le four à une valeur aussi élevée que possible assurant un bon fonctionnement.

Mesures effectuées.

Les déterminations du rayonnement de la flamme faites dans ces essais ont consisté principalement en mesures du rayonnement au moyen d'un pyromètre à radiation totale, à faible ouverture, pointé à travers la flamme, sur un arrière-corps froid. On a utilisé six instruments de ce type, installés de façon à pouvoir être déplacés verticalement en face de six fentes pour fournir des courbes du rayonnement total en fonction de la hauteur. Les mesures fournies par ces instruments sont reçues par deux appareils enregistreurs.

On a complété les déterminations ainsi faites au moyen de deux autres types de mesures, permettant toutes deux de calculer l'émissivité globale de la flamme et le rayonnement que fournirait un corps noir à la température effective de radiation. Il s'agissait de la température de brillance, mesurée avec un pyromètre optique, et du rayonnement total dans un angle étroit, mesuré à travers la flamme sur le fond constitué par la paroi en briques du four.

Connaissant le rayonnement de la paroi en briques et la différence existant entre la flamme et un corps gris, on peut déterminer dans ce dernier cas l'émissivité et la température de la flamme, en employant la méthode de Schmidt. On a mesuré à cette fin les températures des parois qui fournissent à la fois une mesure du rayonnement renvoyé à la flamme, ainsi que sa puissance de chauffe pour un degré donné d'isolement thermique des parois. On a effectué ces mesures au moyen de plusieurs thermocouples logés dans les parois de façon que les extrémités des cannes soient dans le plan de la face interne des parois.

On a utilisé une autre mesure du rayonnement fournie par un appareil mesurant l'écoulement de chaleur. Deux appareils de ce type, placés dans les parois, furent utilisés à des distances différentes sur la longueur du four et mesurent le rayonnement total suivant tous les rayons d'une hémisphère, reçu par la surface d'un calorimètre refroidi par l'eau. Ils fournissent une mesure directe de l'efficacité de la flamme pour chauffer une petite charge dans l'enceinte en briques considérée, à condition de connaître l'émissivité et la température de rémission du rayonnement de cette dernière.

Afin de chiffrer le degré de combustion, l'excès d'air et la chaleur sensible entraînée hors du four par la flamme, on prélève continuellement un échantillon du gaz pour l'analyse à la chicane où se trouve un pyromètre à aspiration, fonctionnant de façon continue.

Résultats obtenus.

On constate, en analysant les résultats obtenus, que les nombreux effets dus aux variations des variables sont tellement plus importants que les effets de la dispersion due au hasard, qu'ils ne sauraient être dus à cette même dispersion qu'une fois sur mille. Ceci indique que l'utilisation de la méthode factorielle pour l'établissement du plan se justifie bien dans ce cas.

On peut exprimer les effets les plus importants des variations des cinq variables sur le rayonnement de la flamme, mesuré au moyen du pyromètre à radiation totale de faible ouverture pointé sur un fond froid, sous forme de courbes indiquant les lectures maximums pour chaque fente, du rayonnement de la flamme pour toutes les longueurs d'onde. On peut utiliser ces informations pour mesurer la largeur de la flamme ou l'acuité du sommet lorsqu'on déplace l'instrument verticalement. Les courbes correspondantes se superposent davantage vers l'extrémité de la flamme, car son rayonnement y est plus uniforme sur la hauteur.

On peut observer directement les effets des cinq variables sur la position du rayonnement maximum et du rayonnement de l'extrémité de la flamme. D'autre part, il est impossible de savoir si les effets des variables résultent de changements de l'émissivité de la flamme, de sa température ou des deux à la fois. On ne peut pas non plus déduire leur influence sur la largeur de la flamme (sinon de

façon indirecte en comparant les moyennes des valeurs maxima obtenues à chaque fente) ni l'influence combinée de deux variables.

Cependant les essais permettent d'obtenir différentes informations.

Tout d'abord, les émissivités relatives de la flamme ont été calculées de deux manières à partir des lectures, comme on l'a mentionné plus haut. Dans une première méthode, on a comparé les lectures du pyromètre à radiation totale, faites en visant un milieu froid et un milieu chaud, en supposant que la flamme se comporte comme un corps gris; dans la seconde, on a comparé les lectures, faites à l'aide du pyromètre optique et du pyromètre à radiation totale visant tous deux un milieu froid, en admettant que la variation de l'émissivité de la flamme en fonction de la longueur d'onde soit représentée par

$$-kL/\lambda^n$$

la relation $\varepsilon = 1 - e$ où n est l'exposant 1.39 pour $\lambda < 0.8 \mu$ et 0.95 pour $\lambda > 0.8 \mu$.

Aucune de ces deux méthodes n'est parfaitement sûre, à la fois par suite des hypothèses qu'elles impliquent et parce qu'elles se basent sur la comparaison de deux instruments différents. Néanmoins, elles s'accordent remarquablement bien en ce qui concerne les effets des variables, indiquant que le mélange brai-créosote donne une émissivité notablement plus élevée que le mazout, sur toute la longueur de la flamme, tandis que la température des deux flammes ne présente pas de différence appréciable, excepté à leur extrémité où la flamme de brai-créosoté a 60° de moins. Des quantités croissantes de combustible augmentent l'émissivité de l'extrémité de la flamme et n'accroissent pas la température de plus de 60 à 80° sur toute sa longueur. Le remplacement de l'air par la vapeur pour la pulvérisation ne change pas l'émissivité de la flamme, mais abaisse la température de sa partie initiale de 20 à 40°. En augmentant la quantité d'agent de pulvérisation, on diminue l'émissivité de l'extrémité de la flamme et on augmente la température de sa partie initiale. L'accroissement de la quantité d'air de combustion modifie très peu l'émissivité de la flamme, mais provoque un abaissement marqué de la température à l'extrémité.

En ce qui concerne les effets essentiels des variables sur la largeur de la flamme, le brai-créosoté donne une flamme plus large et un accroissement de la quantité de combustible a le même effet. L'accroissement de la quantité de combustible a une influence plus grande sur le rayonnement de la flamme dans sa partie initiale lorsqu'on utilise le mazout au lieu du brai-créosoté. Ceci constitue le cas le plus intéressant d'effets combinés.

Résumé des résultats.

On peut résumer les résultats globaux de la façon suivante:

1) le mazout donne une flamme plus étroite que celle du brai-créosoté dans la proportion de 7% et dont le maximum du rayonnement, qui se trouve à

plus grande distance du brûleur, est de 17% inférieur à celui de l'autre flamme. La température de sortie des gaz et celle de l'extrémité de la flamme dans le cas de l'emploi du mazout, sont supérieures de 50° ou plus aux températures correspondantes résultant de l'emploi du brai-créosoté; par contre, ce dernier donne une flamme dont l'émissivité est considérablement plus élevée que celle de la flamme de mazout. Les effets de l'émissivité et de la température à l'extrémité de la flamme se compensent de sorte que le rayonnement total est le même.

2) A un accroissement de 59 % de la quantité de combustible, correspond un accroissement de 6 % de la largeur de la flamme qui devient plus longue et plus intense, son rayonnement maximum ayant augmenté de 8 % et se situant à une distance supérieure de 16 %.

3) L'emploi de la vapeur au lieu d'air comme agent de pulvérisation a abaissé de 11 % le maximum du rayonnement, tout en augmentant de 10 % sa distance au brûleur, par suite d'une réduction de 11 % du maximum de la température de la flamme et d'un certain retard dans son développement. Cette variable n'a pas modifié l'émissivité de la flamme ni influencé de façon significative la température de rayonnement ou l'émissivité à l'extrémité de la flamme.

4) Une augmentation de 20 % de la quantité d'agent de pulvérisation a affaibli le rayonnement à l'extrémité de la flamme (11 % de réduction à trois mètres du brûleur), mais n'a influencé que relativement peu le rayonnement de sa partie initiale. Cet affaiblissement du rayonnement de l'extrémité de la flamme, résultant de l'accroissement de la quantité d'agent de pulvérisation, est la conséquence d'une diminution de l'émissivité de la flamme plutôt que de sa température. Ces effets ne dépendent pas du type d'agent de pulvérisation.

5) Une augmentation de 25 % de la quantité d'air de combustion a affaibli le rayonnement de l'extrémité (12 % de réduction à 5 mètres du brûleur). La température des gaz sortant est également plus faible et la différence de rayonnement à l'extrémité de la flamme résulte plutôt d'une diminution de température que d'une modification de l'émissivité.

Examen des résultats :

Un examen de ces résultats indique que ce sont les variations des variables qualitatives, c'est-à-dire le changement de combustible ou le remplacement de l'air par la vapeur comme agent de pulvérisation, qui influencent le rayonnement de la partie initiale de la flamme, tandis que les variations de trois variables quantitatives, c'est-à-dire les quantités de combustible, d'agent de pulvérisation et d'air de combustion, agissent sur son extrémité.

Ceci indique que le rayonnement de la partie initiale de la flamme dépend principalement de la rapidité d'inflammation du combustible considéré et de sa dilution qui affecte la température théorique

de combustion. Le brai créosoté doit probablement sa rapidité plus grande d'inflammation au créosote et sa plus grande émissivité au brai.

A son extrémité, la flamme a eu le temps de perdre une quantité de chaleur considérable, absorbée par l'enceinte, de sorte que sa température dépend fortement du taux d'alimentation en combustible et de l'excès d'air qui peut se mélanger à la flamme dans cette zone et la diluer. L'effet principal d'un accroissement de la quantité d'agent de pulvérisation est d'augmenter la quantité de mouvement du jet et d'augmenter par conséquent sa capacité d'entraîner de l'air qui accélère la combustion dans la partie terminale de la flamme, ce qui réduit l'émissivité par suite de la combustion plus rapide des particules de suie.

Une autre façon de présenter les résultats, sous une forme utile à ceux qui s'occupent de l'étude des fours, consiste à donner la moyenne générale du rayonnement fourni par la flamme, ainsi que la moyenne générale de la température et de l'émissivité calculée, en fonction de la distance à partir du brûleur, en même temps que les variations qu'il faut en attendre du fait du changement d'une variable à l'exclusion des autres, dans l'intervalle utilisé au cours de ces essais. Sous cette forme, on peut utiliser les résultats d'une façon très approximative pour prédéterminer le rayonnement émis par les flammes dans les conditions appliquées à ces essais.

Conclusions.

Cette première série d'essais de rendement fournit des renseignements de valeur pratique immé-

diante à ceux qui s'occupent des études de conception, pour autant qu'elles concernent des flammes de type approximativement semblable à celles qui ont été utilisées dans les présents essais. Pour accroître encore cette possibilité d'application pratique immédiate, il est particulièrement nécessaire d'inclure des essais comportant l'étude d'autres combustibles et d'autres méthodes d'injection du combustible, ainsi que du préchauffage de l'air et des parois froides. Cependant, les résultats indiquent également combien il est nécessaire d'ajouter à ces essais de rendement, des essais de mécanisme de combustion pour étudier les changements de condition qui se produisent dans le jet gazeux et l'évolution d'une particule de combustible qui parcourt la flamme. Cette étude indique également clairement que l'on ne pourra progresser vers la solution de ce problème compliqué sans le traiter d'une façon complète.

Références.

- (1) A. SCHACK, — *Z. Techn. Phys.*, 5, p. 267, 1924; *ibid.*, 6, p. 297, 1925.
- (2) R. A. SHERMAN, — *Trans. A.S.M.E.*, 56, pp. 177, 401 (1934).
- (3) T. LINDMARK et H. EDENHOLM, — « The flame radiation in water-cooled Boiler Furnaces », Pt. 1; T. LINDMARK et E. KIGNELL, *ibid.*, Pt. 2; T. LINDMARK : « Study on Heat Transmission in Boiler Furnaces » - *Ingeniors Vetenskaps Akademien*, n^{os} 66, 109 et 91, respectivement.
- (4) W. R. HAWTHORNE, D. S. WEDDELL et H. C. HOTTEL, — 5^e Symp. sur les phénomènes de la combustion, de la flamme et de l'explosion (Wisconsin, 1950).
- (5) M. P. NEWBY et J. D. TYLER, — Communication privée.