

# Utilisation des charbons de faible valeur pour la production de l'énergie aux Etats-Unis d'Amérique

par R. C. COREY <sup>(1)</sup> et J. W. MYERS <sup>(2)</sup>

## SAMENVATTING

Ingevolge de geleidelijke afname van de kwaliteit van de ruwe kolen, geven de ingenieurs der centrales en de constructeurs van vuurhaarden zich rekenschap van de noodzakelijkheid kolen van mindere hoedanigheid te gebruiken dan degene waaraan zo tot nu toe gewoon waren. De stijging van de prijs der kolen en de wenselijkheid de beste kwaliteiten voor te behouden voor chemische en metallurgische doeleinden, vereisen eveneens een grotere afname van minderwaardige kwaliteiten voor de voortbrengst van energie en warmte.

Dit verslag behandelt alleen maar het gebruik van kolen van lagere hoedanigheid in de vuurhaarden van stoomketels, namelijk in verband met de invloed van het asgehalte, van de smeltbaarheid der assen, van de agglutinerende eigenschappen, van het zwavelgehalte, de vochtigheidsgraad en vergruisbaarheid der kolen. Kolen met meer dan 20 % asgehalte worden gewoonlijk beschouwd als zijnde van mindere hoedanigheid.

In de Verenigde Staten geeft men voor de centrales de voorkeur aan grote eenheden, die tot 680 ton stoom per uur voortbrengen. Mits zekere wijzigingen kan het meest gebruikte vuurhaardtype, met poederkool en poedervormige as, haast alle soorten minderwaardige kolen op bevredigende wijze verwerken. Onder voorbehoud van zekere beperkingen onder oogpunt van het gehalte aan vluchtige bestanddelen en van de smeltbaarheidsgraad der as, kan de cycloonbrander, waarvan de verwezenlijking tamelijk recent is, eveneens kolen met groot asgehalte verbranden. Men geeft de voorkeur aan vuurhaarden met roosters of met mechanische beschikking voor capaciteiten van minder dan 113 ton stoom per uur. De eerste worden gebruikt voor anthracietachtige kool, cokes-gruis of weinig samenbakkende bitumineuze kool; de tweede wordt gebruikt voor ligniet en voor kolen met middelmatig agglutinatie-vermogen en hoog gehalte aan vluchtige bestanddelen.

Buiten de invloed op de werkingsgraad der stoomketels, verhoogt een groot asgehalte de vervoerontkosten. Bijgevolg moet de kwestie van het gebruik van minderwaardige kolen onderzocht worden in verhouding tot de ligging van de centrale. Bovendien moet de kwestie van de bezoedeling van de atmosfeer in aanmerking genomen worden indien het zwavelgehalte hoog is, hetgeen het geval is indien men de afval der kolenwassertijen gebruikt.

Het verslag haalt voorbeelden aan van energie-centrales in de Verenigde Staten en in Europa, die op bevredigende wijze kolen van geringe hoedanigheid verbruiken. Alhoewel zulke kolen op courante wijze aangewend worden in bestaande inrichtingen, bestaat er aanleiding toe opzoeken te ondernemen over de warmtegeleiding in de vlam en over de fysische eigenschappen der assen vooraleer de studie van de talrijke problemen, die door de verbranding van minderwaardige kolen gesteld worden, te kunnen aanvatten.

(1) Supervising Engineer, Combustion Research Section, Bureau of Mines, U.S. Dept. of the Interior, Pittsburgh, Pennsylvania.

(2) Fuel Engineer, Combustion Research Section, Bureau of Mines, Pittsburgh, Pennsylvania.

## RESUME

En raison du déclin graduel dans la qualité du charbon brut, les ingénieurs de centrales et les constructeurs de foyers se rendent compte de la nécessité d'utiliser des charbons de moindre qualité que ceux auxquels ils ont été accoutumés. L'augmentation du prix du charbon et le désir de conserver les meilleures qualités pour les usages chimiques et métallurgiques requièrent également une plus grande utilisation des charbons de qualité inférieure pour la production de l'énergie et de la chaleur.

Ce rapport ne vise que l'emploi des charbons de basse qualité dans les foyers de chaudières, en ce qui concerne notamment l'influence de la teneur en cendres, de la fusibilité des cendres, des propriétés agglutinantes, de la teneur en soufre, de l'humidité et de la friabilité des charbons. Les charbons dont la teneur en cendres excède environ 20 % sont généralement considérés comme de qualité inférieure.

Aux Etats-Unis, on préfère pour les centrales des unités puissantes produisant 680 tonnes de vapeur par heure. Moyennant certaines modifications, le foyer prédominant, à charbon pulvérisé et à cendres pulvérolentes, peut utiliser de façon satisfaisante presque toute espèce de charbons inférieurs. Avec certaines limitations au point de vue des matières volatiles et du degré de fusibilité des cendres, le brûleur à cyclone dont le développement est relativement récent peut également employer des charbons à haute teneur en cendres. On préfère le foyer ou grille à pelletage mécanique pour des capacités inférieures à 113 tonnes de vapeur par heure; le premier est employé pour des charbons anthraciteux, pour du grésillon de coke et pour des lignites et des charbons bitumineux peu agglutinants; le second est employé pour des lignites et des charbons moyennement agglutinants et à haute teneur en matières volatiles.

Outre son influence sur les caractéristiques de fonctionnement des chaudières, une haute teneur en cendres accroît le coût du transport du charbon; en conséquence, l'emploi de charbons de qualité inférieure doit être examiné en fonction de la situation de l'usine génératrice. En outre, il y a lieu de prendre en considération les problèmes de la pollution de l'atmosphère quand la teneur en soufre est élevée, ce qui est le cas quand on utilise les refus de lavoir.

Le rapport donne plusieurs exemples aux Etats-Unis et en Europe, d'usines génératrices, utilisant de façon satisfaisante des charbons de qualité inférieure. Bien que ceux-ci soient largement employés dans des installations courantes, il y a lieu d'effectuer des recherches relatives à la transmission de la chaleur par les flammes et aux propriétés physiques des cendres de charbon avant que ne soient résolus les nombreux problèmes posés par la combustion des charbons pauvres.

## Introduction.

Les producteurs d'énergie se préoccupaient naguère très peu de la qualité des charbons qu'ils brûlaient, parce qu'ils pouvaient toujours spécifier et obtenir facilement la qualité de combustible qui convenait le mieux à leurs installations. Cependant, le tableau a changé et les ingénieurs des stations d'énergie, aussi bien que les constructeurs de chaudières, se rendent compte de la nécessité d'utiliser des combustibles qui leur paraissaient indésirables ou tout au plus bons à mettre au teruil. Cette situation est due au déclin progressif de la qualité des charbons extraits de la mine et elle s'aggrave du fait de la demande croissante d'énergie engendrée par la houille. La qualité du charbon a baissé par suite de l'exploitation de forts tonnages de veines sales, corollaire de l'épuisement des réserves de charbon propre et de la mécanisation intense des mines profondes. D'autres considérations stimulant l'emploi de combustibles pauvres sont l'augmentation progressive du prix du charbon et l'opportunité de réserver les charbons chers pour les usages chimiques ou métallurgiques.

L'épuration des charbons ne résout pas complètement le problème, étant donné son prix de revient et la difficulté d'obtenir une séparation nette des cendres et du charbon (3) (\*). La préparation des charbons, tout en améliorant le produit de la mine, laisse subsister dans les refus une quantité notable de matières combustibles. En plus, les méthodes d'abattage et de traitement produisent une quantité considérable de charbons considérés comme inférieurs en raison de la finesse des grains et de l'humidité et non susceptibles d'être améliorés économiquement par un traitement plus poussé (30). Ces produits ont reçu divers noms locaux (schlamms, moures, etc.) qui, tous, signifient mauvaise qualité.

On est d'accord pour dire que la consommation de ces combustibles est nécessaire dans un but d'économie et de préservation des richesses nationales. Le meilleur rendement serait obtenu si l'on réservait les charbons de belle qualité pour les usages chimiques et métallurgiques et si l'on ne brûlait dans les générateurs de vapeur que les charbons pauvres provenant, soit de la mine, soit des ateliers de préparation.

Les stations centrales et celles annexées aux houillères sont tout indiquées comme consommateurs de ces charbons par suite de leur grande capacité et de la longue expérience acquise, en collaboration

(\*) Les numéros entre parenthèses se rapportent aux références de la bibliographie finale.

avec les constructeurs de foyers, dans la solution des problèmes de combustion.

Le but du présent mémoire est de discuter les divers types d'équipements appropriés à la combustion des charbons pauvres, ainsi que les problèmes et les difficultés qui se présentent le plus communément, spécialement dans la production d'énergie.

#### Définition et description des combustibles pauvres.

Avant de traiter des usages, il importe d'abord de définir ce que nous entendons par le vocable « pauvre ». Plusieurs auteurs font rentrer dans cette catégorie des produits très différents, en ayant égard aux applications particulières et à la qualité qu'elles exigent.

L'« American Society for Testing Materials » (A.S.T.M.) donne des spécifications standard pour la classification des charbons (54) d'après la teneur en cendres, la température de fusion des cendres, la teneur en soufre, le pouvoir calorifique et le calibre. Cependant, cette spécification ne contient pas la définition du combustible de faible valeur. A l'exception de la teneur en cendres, il est douteux que l'analyse usuelle puisse seule donner les bases d'une définition. Etant donné le but spécial du présent travail, nous ne considérons ici que les qualités de charbon utilisables dans les foyers des chaudières à vapeur (18).

L'humidité et la friabilité n'interviennent pas dans la classification A.S.T.M. et cependant elles ont une grande importance. C'est pourquoi nous en parlerons. La valeur d'un charbon ne doit pas être confondue avec son rang. Des propriétés très différentes servent de bases aux deux classifications adoptées par A.S.T.M. (54,55); cependant certaines des propriétés spécifiant la valeur dépendent aussi du rang.

#### Cendres.

La haute teneur en cendres est probablement le seul critère qui puisse servir à apprécier la qualité du charbon sans égard au mode de combustion.

Il est vrai qu'un charbon très propre est inutilisable dans certains foyers, par exemple dans les grilles mobiles où la cendre est nécessaire pour préserver les barreaux (1). Néanmoins, le charbon peu cendreux est très demandé pour beaucoup d'autres usages et ne sera jamais classé comme « pauvre » dans aucune échelle.

Le charbon cendreux exige le transport et la manutention d'une plus grande quantité de matières, ce qui, joint au faible pouvoir calorifique, augmente les frais de ces opérations (20). Comme la qualité du charbon décroît graduellement à notre époque, le charbon que l'on considérait autrefois comme de qualité douteuse est maintenant admis comme convenant à la génération de l'énergie. Généralement parlant, un charbon à 20 % ou plus de cendres est aujourd'hui, aux Etats-Unis, considéré comme charbon « pauvre ».

La composition des cendres n'est intéressante que sous le rapport de la fusibilité (18). Les teneurs relatives en silice, alumine, fer, chaux et magnésie ont un effet très marqué sur la température, ou sur la marge de température, où se produisent les phénomènes de frittage, fusion et autres changements dans les propriétés physiques des cendres.

Une basse température de ramollissement des cendres est indésirable quand le combustible est brûlé en lit, et aussi dans les foyers à pulvérisés. D'un autre côté, une température très élevée serait un inconvénient pour les foyers à cendres fondues ou à cyclone. Sous ce rapport, la viscosité de la scorie fluide est aussi importante que la fusibilité, les scories les plus fluides s'éliminant le plus facilement.

#### Soufre.

Le soufre est indésirable à cause de la corrosion du métal (20, 50) et de la pollution de l'air, particulièrement quand les teneurs dépassent 4 à 5 %. Comme le soufre est presque toujours combiné au fer, une haute teneur dénote d'ordinaire une basse température de fusion et affecte ainsi la qualité du combustible qu'on vient de discuter.

A part les houilles des régions du Centre, les charbons tout-venants aux Etats-Unis contiennent toujours moins de 4 % de soufre. Les charbons européens, en règle générale, en ont encore beaucoup moins, et, par conséquent, ne posent pas de problèmes spéciaux (2). Cependant, les refus de lavoir de n'importe quelle source peuvent être riches en soufre, étant donné que la pyrite se concentre dans les parties les plus denses. La présence du soufre est un inconvénient très grave dans les méthodes de combustion, qui impliquent une décomposition chimique des cendres et dont il sera question plus loin.

#### Humidité.

Puisque l'humidité diminue fortement le pouvoir calorifique, un charbon gras très humide peut devenir inutilisable dans certains cas (18, 14). Ceci est vrai particulièrement des schlamms (16, 30, 31) recueillis dans les lavoirs de charbon gras et contenant presque toujours 25 à 40 % d'eau et jusque 20 % de cendres, tandis que les meilleures sortes de tout-venants des mines profondes n'ont guère plus de 5 % d'humidité.

Il n'y a pas lieu de s'arrêter aux autres sortes de charbon. Le meilleur lignite ou charbon brun contient toujours 35 à 50 % d'eau de constitution (33, 34). Les anthracites pour générateurs de vapeur sont aussi très humides par suite du mode de préparation. Les schlamms, c'est-à-dire les parties les plus fines recueillies en queue des opérations, contiennent le maximum d'humidité, mais leur qualité dépend surtout de la teneur en cendres et de la grosseur des particules.

Une teneur modérée en humidité est désirable dans plusieurs cas. Ainsi, la combustion des fines sur les grilles est améliorée considérablement si elles sont humidifiées par des jets d'eau ou de

vapeur. Il en résulte une agglomération des particules les plus fines, qui rend le lit de combustible plus uniformément perméable à l'air et empêche la formation de trous d'air (20, 30, 53). Il est reconnu aussi que la présence de vapeur dans les gaz brûlés tend à prévenir la formation de dépôts dans les carnaux.

#### Granulométrie.

Dans les chaufferies au charbon pulvérisé, la composition granulométrique du charbon brut n'a aucune importance. Tout au plus peut-on attendre une légère réduction du coût de la pulvérisation quand il y a déjà une forte proportion de menu.

Il n'en va plus de même quand le charbon est brûlé sur des grilles (18). Le foyer à étalement par exemple exige un calibrage tel que la grosseur maximum ne dépasse pas 20 à 35 mm (1). Un charbon assez menu pour passer entre les mailles des grilles est inadmissible dans les foyers à grille mobile. Les schlamms (16, 31), qui contiennent beaucoup de particules de moins de 1 mm (et généralement aussi beaucoup de cendres et d'humidité), sont considérés comme de pauvres combustibles dans les foyers à lit épais.

#### Friabilité.

Généralement, la friabilité n'a pas d'importance dans les foyers à grille, mais les charbons très durs ne sont pas désirables dans les chaufferies au pulvérisé, parce qu'ils augmentent la dépense de force motrice (2) et d'entretien des broyeurs. Les groupements de marchands de charbon recommandent une limite inférieure de 45 à 55 degrés Hardgrove pour la friabilité des charbons bitumineux des Etats-Unis. La « American Society for Testing Materials » a donné une méthode standard provisoire pour la détermination de cette friabilité (56).

#### Intérêt des combustibles pauvres.

Les réserves en charbon de belle qualité s'épuisent dans presque toutes les parties du monde. En Pensylvanie, par exemple, la couche Pittsburgh, qui a fourni pendant cinquante ans la plus belle qualité de charbon à coke, est à peu près épuisée. Il faut donc mettre à fruit d'autres gisements (32) qui se trouvent être moins avantageux parce qu'ils renferment une plus grande quantité de lits stériles et parce que les propriétés intrinsèques du charbon, telles que le pouvoir cokéfiant ou l'inflammabilité, sont moins satisfaisantes.

Le développement du machinisme dans les mines a eu pour résultat de diminuer la valeur du charbon extrait (6,53) qui contient plus de stérile et une plus forte quantité de menu. Bien que la teneur en cendres puisse être diminuée par les divers procédés de préparation (21,29), le traitement relève le prix de revient et il peut même être impossible dans les périodes de pénurie de matériel, due à un danger national.

L'intensification de l'exploitation à ciel ouvert est un autre facteur qui a influencé la qualité

moyenne du charbon lancé sur le marché. Ce système d'exploitation a son importance dans les temps de forte consommation parce qu'il permet d'obtenir un accroissement de production dans un minimum de temps.

Dans certains pays, tous les charbons connus sont de très basse qualité et, cependant, on peut être réduit à ne pas en employer d'autres, par exemple en temps de guerre ou de restrictions légales. Le Brésil a des gisements très étendus de ces mauvais charbons et préfère normalement en importer d'autres de meilleure qualité.

La rareté des combustibles de choix, et à sa suite, l'élévation constante du prix des charbons auront pour effet de rendre économiquement intéressants les charbons de qualité inférieure, même si l'on peut se procurer des qualités meilleures.

Le problème peut se ramener au choix entre trois combustibles :

- a) charbon extrait de la mine, sans aucun traitement;
- b) charbon valorisé par lavage;
- c) déchets des systèmes d'épuration.

Quelques ingénieurs croient que l'emploi du tout-venant peut être la solution la plus économique. Ce système serait le plus efficace sous le rapport de l'utilisation de l'énergie calorifique contenue dans le charbon et dont une partie est toujours perdue dans les refus du meilleur procédé de préparation. Bien que les conditions économiques actuelles ne soient pas en faveur de ce procédé, il reste vrai qu'une formidable réserve potentielle de combustibles pour chaudières est contenue dans les terrils et dans les déchets journaliers de tous les ateliers de préparation. Souvent, ces matériaux contiennent jusqu'à 50 % d'éléments combustibles et le tonnage journalier de certains ateliers de préparation est de plus de 1000 tonnes. Il y a aussi de très forts tonnages en anthracites de basse qualité. Une entreprise d'utilité publique a acheté une quantité de stocks de schlamms contenant 50 à 90 % de combustible, et cette réserve sera gardée jusqu'à ce que les circonstances économiques en permettent l'emploi.

Quand on veut établir le bilan d'une opération, il faut considérer tous les facteurs pouvant avoir une influence sur le prix de revient pendant la durée normale de l'installation. Si le prix de revient le plus bas s'obtient en plaçant l'atelier tout près de la source de charbon, la réserve doit être suffisante pour alimenter l'atelier pendant toute sa vie, estimée généralement à une vingtaine d'années. S'il s'agit de traiter les refus du lavoir, le projet doit être conçu de manière à donner le plus bas prix de revient des deux installations combinées. Si la teneur en cendres des déchets est trop grande pour qu'on puisse les brûler, ou si elle varie considérablement, un atelier donnant trois sortes de produits peut être nécessaire (3). S'il s'agit de la reprise de vieux terrils, un nouveau traitement peut être nécessaire.

Un autre facteur à considérer, c'est la tendance de la législation sur les fumées des terrils en feu. Il est encore trop tôt pour apprécier les effets économiques de ces lois, mais il est certain que toute augmentation du prix de la mise à terril favorisera l'utilisation comme combustible, soit des déchets, soit du charbon brut.

La nécessité de conserver les combustibles de qualité pour les usages chimiques et métallurgiques devient de plus en plus évidente à mesure que les réserves diminuent et elle sera probablement dans l'avenir un stimulant de l'emploi des combustibles pauvres. Le Ministry of Fuel and Power, en Grande-Bretagne, dans un rapport technique sur le Bassin de la Ruhr (3), recommande de réserver les charbons à moins de 5 % de cendres pour l'hydrogénation et autres procédés chimiques, d'employer les charbons ayant de 5 à 15 % de cendres à la fabrication de coke métallurgique et de garder les charbons tenant plus de 15 % de cendres pour les générateurs d'énergie. La conservation des meilleurs combustibles peut être garantie, soit par la législation, soit par la bonne volonté des producteurs et des consommateurs. Un exemple de ce genre serait l'installation dans une aciérie d'un atelier pour la préparation du charbon à coke avec utilisation des refus dans des générateurs de vapeur.

#### Appareils de combustion des charbons pauvres.

On a inventé pour ces charbons un grand nombre d'appareils de chauffe avec plus ou moins de succès. La littérature nous fournit plusieurs exemples d'installations de chaudières alimentées avec des mixtes de lavoir, des fines ou des schlamms bien qu'elles n'aient pas été conçues spécialement pour cet usage (4, 5, 15, 16, 17, 36). Plusieurs étaient des chaudières à bouilleurs chargées à la main ou des petites chaudières tubulaires installées dans des houillères; tel a été le cas en Grande-Bretagne pendant la guerre. Nous ne traiterons ici que des installations plus modernes, spécialement prévues pour l'emploi des combustibles de qualité inférieure.

#### Chauffage au charbon pulvérisé.

La tendance aux Etats-Unis, comme d'ailleurs en Europe, est de créer de fortes unités génératrices au lieu d'une multiplicité de plus petites. La chaufferie au charbon pulvérisé convient très bien pour ce service (1). En fait, ce type et le cyclone sont les seuls adaptés à des unités de grande puissance. Aux Etats-Unis, la capacité maximum des foyers à grille est de 136 tonnes de vapeur par heure, tandis qu'il existe un grand nombre de chaufferies au pulvérisé produisant 454 t et de plus fortes unités sont déjà actuellement projetées.

Bien que l'on puisse employer le pulvérisé pour des productions aussi faibles que 23 t/h, il est généralement admis que les foyers à grilles sont plus économiques (frais d'installations plus frais courants) jusqu'à des puissances de 91 t/h (24). Chaque type doit être considéré individuellement dans son domaine.

Les figures 1 et 2 représentent le foyer type à cendres pulvérulentes, dont le trait principal est le mode d'élimination des cendres. Une partie des cen-

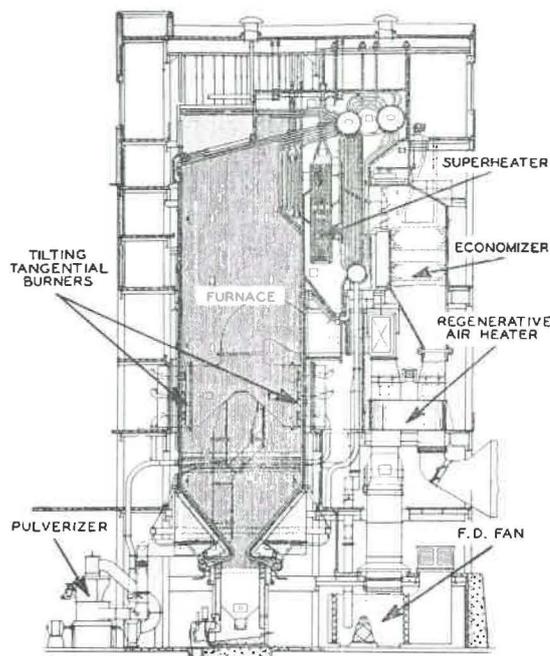


Figure 1. — Chaudière au charbon pulvérisé, à cendres pulvérulentes et brûleurs tangentiels à inclinaison variable. Vaporisation : 165.560 kg/h à 75 kg/cm<sup>2</sup> et 500° C; charbon à 36 % de cendres.

(Reproduction autorisée par Combustion-Engineering Super heater Inc.)

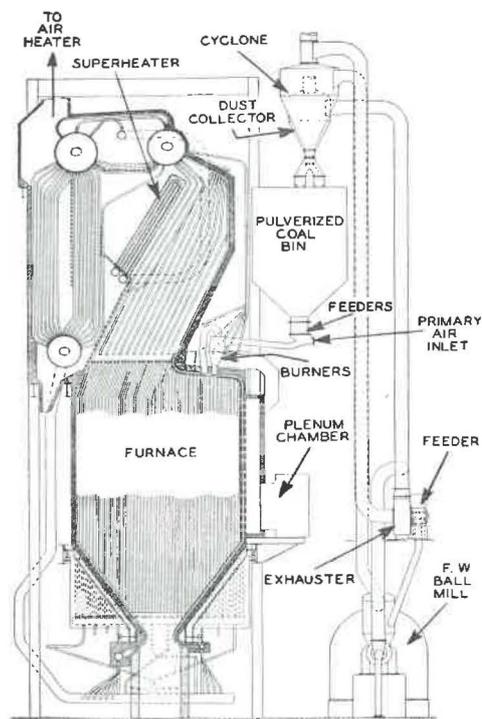


Figure 2. — Chaudière à charbon pulvérisé, à cendres pulvérulentes et flammes verticales. Construite pour 90.720 kg/h à 21 kg/cm<sup>2</sup> et 346° C. Peut brûler du charbon à 50 % de cendres.

(Reproduction autorisée par Foster-Wheeler Corp.)

dres fines en suspension se solidifie dans les parties froides du courant gazeux ou au contact des parois refroidies par l'eau et tombe dans le cendrier d'où elle est enlevée à l'état granuleux. La figure 1 représente une unité de 165 t/h construite par « Combustion-Engineering-Superheater Inc. ». Elle est chauffée tangentielle-ment par des brûleurs à inclinaison variable, placés aux quatre coins du foyer. Ces brûleurs ont un rôle très important dans le réglage de la température parce qu'ils permettent de relever ou d'abaisser le nuage de flammes dans la chambre de combustion. Le but de cette disposition est le réglage de la surchauffe indépendamment des variations de la charge et de la transmission de chaleur à travers les parois, laquelle est influencée par les dépôts de cendres. La figure 2 représente une unité Foster Wheeler de 91 t/h, qui est chauffée verticalement par des brûleurs placés au sommet de la chambre de combustion. Ce type est étudié spécialement en vue de fournir aux gaz un long trajet de refroidissement avant que les cendres ne viennent au contact des parois.

Le foyer à cendres pulvérulentes est probablement le type le plus souple sous le rapport des variétés de combustibles. Nombre d'installations brûlent avec succès des charbons passant des lignites (32) aux anthracites (8) avec des teneurs en cendres pouvant atteindre 50 % et plus. Des températures de fusion de cendre aussi basses que 1040° C sont admissibles et les constructeurs assurent que des cendres de n'importe quelle fusibilité ne gênent pas du moment que le foyer est conçu à cet effet.

Le foyer à cendres fondues fut établi pour brûler des charbons à cendres fusibles et pour évacuer une partie des cendres sous une forme plus facile à manipuler que les fines poussières des chaudières à cendres pulvérulentes (1). La température relativement élevée qui est nécessaire pour la fusion est un avantage puisqu'elle procure aussi des échanges par convections plus forts, ce qui permet de réduire les dimensions des foyers. Ceci est particulièrement avantageux pour les unités très puissantes dans lesquelles le rapport de la surface au volume n'est pas propice à la formation de gaz à basse température. Des brûleurs tangentiels ou turbulents sont exigés pour maintenir dans le fond du foyer des températures assez élevées pour assurer l'écoulement de la scorie. Le foyer à cendres fondues est comparable au foyer à cendres pulvérulentes quant aux variations de grosseur et de teneur en cendres des combustibles qu'il admet, à la seule différence que la température dépasse celle de la fusion, c'est-à-dire environ 1430° C. A la limite supérieure du point de ramollissement, ce type manque de souplesse sous le rapport des variations de la charge. La figure 3 représente une unité de 454 t/h construite par « Combustion-Engineering-Superheater Inc. »

**Foyer Cyclone.**

La chaudière présentée par la Cie Babcock-Wilcox est une innovation relativement récente (22). La première application industrielle date de 1949. Une installation typique (23), d'une capacité de

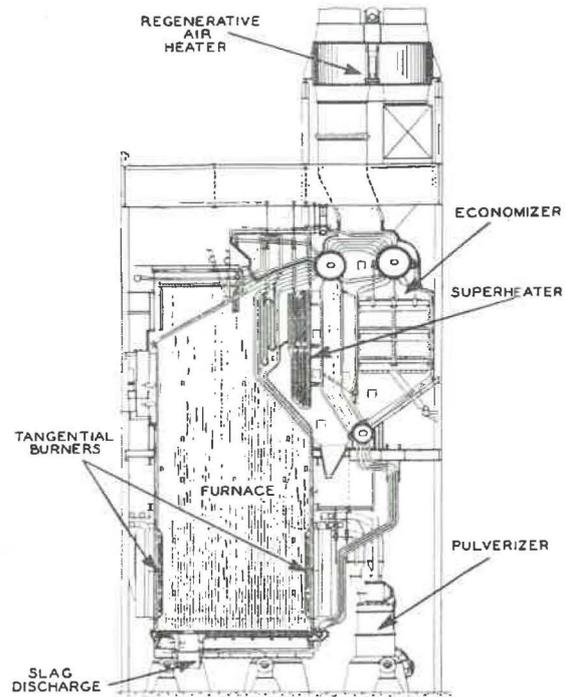


Figure 3. — Chaudière au charbon pulvérisé à cendres fondues; brûleurs tangentiels.  
Capacité 453.590 kg/h à 114 Kg/cm<sup>2</sup> et 513° C.  
(Reproduction autorisée par Comb. Eng. Sup. Inc.)

272 t/h, est représentée figure 4. Le principe est de provoquer un mouvement relatif du combustible par rapport à l'air. Le charbon broyé à 6 mm de grosseur maximum est introduit tangentielle-ment

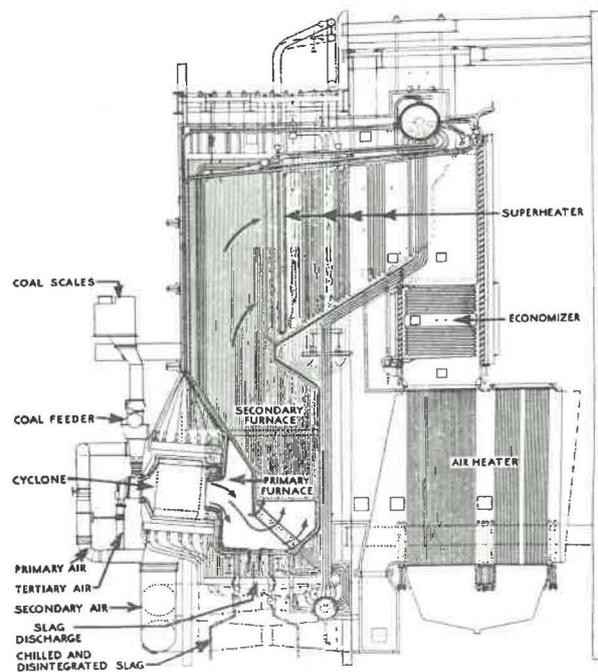


Figure 4. — Chaudière à trois brûleurs cyclones.  
Capacité 272.160 kg/h à 95 kg/cm<sup>2</sup> et 545° C.

Extrait de

« Operating Experiences with Cyclone Fired steam Generators », par W.L. Stone et I. Wade. - Rapport 51 A 119 présenté à la session annuelle de A.S. Mech. Eng. 1951.

dans la chambre de combustion, où il adhère aux parois recouvertes de scories et est balayé par l'air secondaire. Les gaz chauds quittent la chambre, passent dans le foyer primaire et se rendent au foyer secondaire à travers une grille de tubes à eau. La plus grande partie des cendres fond et retombe en gouttes dans le foyer primaire où elle est recueillie. Environ 10 % de la masse du charbon d'alimentation doivent passer à travers le tamis n° 200 pour assurer l'inflammation.

De même que le foyer à cendres fondues, le cyclone peut brûler des charbons très cendrés, la température de fusion des cendres restant en dessous de 1430° C. Cependant, on croit que les matières volatiles et l'humidité doivent rester dans certaines limites, mais le champ de possibilités n'a pas encore été exploré complètement. Aucun charbon d'une teneur inférieure à 27 % de M. V. n'a encore été essayé dans le cyclone, tandis que les foyers au charbon pulvérisé marchent même avec des anthracites à 2 % à condition que l'air soit chauffé au préalable à une température élevée (23). Du lignite à 38 % d'eau a donné beaucoup d'ennuis dans la marche du cyclone tant qu'on n'a pas pris des dispositions pour renforcer le chauffage préalable de l'air (23).

Le constructeur fait valoir qu'il n'y a que 7 à 10 % des cendres entraînées sous forme de suies, mais cet avantage est compensé par la tendance aux incrustations qui se forment dans les surchauffeurs et qui sont dues à la composition des stériles du charbon. Un avantage particulier réside dans le faible encombrement.

#### Foyer à étalement.

Ce foyer combine dans une certaine mesure deux modes de combustion (1). Une bonne partie des matières volatiles est libérée et les particules solides les plus fines brûlent complètement en suspension, tandis que les grains brûlent en un lit de matières solides. On l'a d'abord appliqué à des combustibles très cendrés et à cendres très fusibles (7, 24, 33). Il peut traiter, avec la même facilité, tout combustible, du lignite aux houilles maigres, et comme les fines particules sont chauffées pendant qu'elles sont en suspension dans l'air, ce qui détruit le pouvoir agglutinant, ce type de foyer est très efficace avec des charbons ayant un indice de gonflement très élevé.

La figure 5 est typique d'une chaudière à vapeur avec foyer à étalement et grille mobile pour l'évacuation continue des cendres. Cette unité, construite par la Cie Riley, a une capacité de 59 t/h. Actuellement, les plus fortes unités existant aux Etats-Unis ont une capacité de 136 t/h (7). La grandeur est limitée par les difficultés pratiques de la construction de grilles mobiles dépassant 56 m<sup>2</sup> de surface. Les grilles fixes peuvent suffire jusqu'à 34 t/h de capacité. Mais, la décharge continue par grille mobile s'impose pour fortes puissances et elle est préférable même pour les puissances faibles dès que la teneur en cendres du charbon dépasse 10 % (1, 2, 4)

La seule exigence pour le bon fonctionnement de ce genre de foyer concerne la granulométrie du charbon qui doit être telle que le combustible soit réparti convenablement sur la grille. (1, 24). La limite supérieure de grosseur est ordinairement 20/35 mm. Le meilleur rendement est obtenu avec n'importe quel combustible quand le taux de combustion atteint 171 kg par heure et par m<sup>2</sup>, mais on obtient encore de très bons résultats au taux de 224 kg/m<sup>2</sup>.

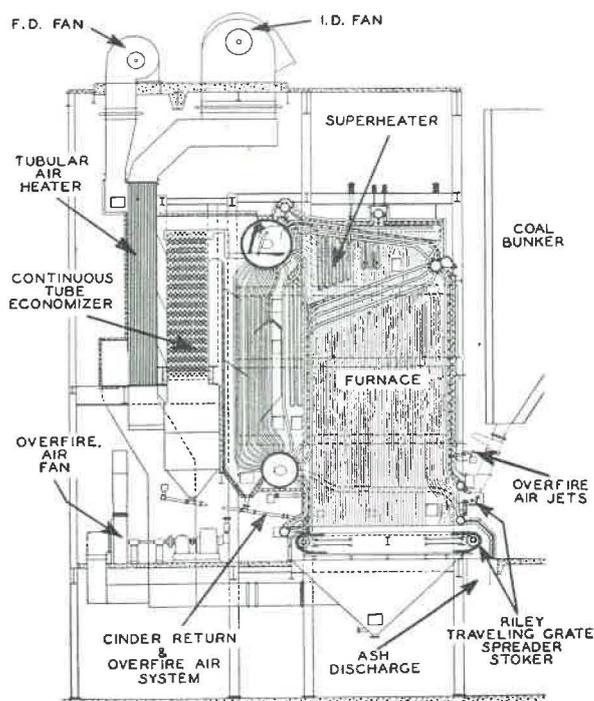


Figure 5. — Chaudière avec foyer à étalement avec évacuation continue des cendres.  
Capacité 59 t/h, 64 kg/cm<sup>2</sup> et 593° C.  
(Riley Stoker Corp.)

#### Foyers à grilles mobiles.

On comprendra dans cette catégorie les foyers à chaîne sans fin, étant donné que le mode de combustion est le même dans tous les cas. La différence principale réside dans le mode de construction de la surface de la grille (1). La surface de la chaîne est constituée par des anneaux assemblés par des broches, tandis que les grilles mouvantes se composent de sections (ou clefs) supportées par des barres attachées à une chaîne motrice. Ces clefs sont munies de passages d'air adaptés à l'espèce de combustible (16).

La capacité de ces grilles est du même ordre que celle des foyers à étalement. Des unités de 115 t/h avec des surfaces de grille de 62,5 m<sup>2</sup> ont été en service avec succès (1). On peut brûler des anthracites, des grésillons de coke, du lignite (32, 33) et des charbons gras dont l'indice de gonflement ne dépasse pas 6. L'avantage principal réside dans la possibilité de brûler des anthracites pauvres (8, 15) et des grésillons de coke (35, 36). La finesse et les caractéristiques d'inflammation de ces deux combustibles ne conviennent pas pour les foyers à étalement et la dureté du coke exclut son emploi comme pulvérisé.

Les charbons sulfureux et ceux dont les cendres fondent à basse température (980° C) brûlent bien sur des grilles mobiles. La seule limitation, c'est qu'il faut au minimum 5 % de cendres pour empêcher la grille de brûler.

Avec les charbons gras, qui contiennent des matières volatiles facilement inflammables, l'avant du foyer est pourvu d'une voûte (1). Avec l'antracite ou le coke, cette voûte est reportée à l'arrière et occupe environ la moitié de la largeur entre les murs (14). L'air soufflé par dessous est réparti en sections (8 au maximum) et les pressions d'air dans chaque compartiment sont réglées de telle sorte que la combustion se fasse en majeure partie sous la voûte. Les particules très fines brûlent en partie en suspension; le courant d'air intense sous la voûte emporte les particules incandescentes et les rejette en avant sur le charbon cru pour faciliter l'inflammation. Fréquemment, des jets d'air sont disposés dans le haut de la voûte pour accroître la turbulence dans la chambre de combustion et faire retomber les particules de charbon vers le mur de face (14). Ceci favorise le contact entre l'oxygène et le combustible et réduit la quantité de fines emportées par les gaz. Le lignite se brûle dans un foyer avec voûte arrière parce que ses caractéristiques d'ignition sont semblables à celles de l'antracite (1). La forte humidité retarde l'inflammation, et bien que le lignite contienne beaucoup de matières volatiles, son pouvoir calorifique est fort inférieur à celui du charbon gras.

Fréquemment, on emploie le foyer à grilles mobiles pour brûler un mélange de charbon pauvre et de bon charbon (15, 36). Par exemple, du grésillon de coke ou du charbon trop menu pour brûler directement peuvent être chargés sur un lit de charbons plus gros. Un distributeur ajustable dans la trémie de chargement règle l'épaisseur de chacun des lits.

La figure 6 représente un foyer de générateur sur une grille mobile et voûte arrière, alimenté en grésillons de coke (1). Cette unité est prévue pour brûler accessoirement des combustibles liquides ou des gaz de haut-fourneau par des brûleurs placés dans le mur d'arrière au-dessus de la voûte. La capacité atteint 78 t/h avec grésillons de coke et 180 t/h par la combinaison de gaz et de grésillons de coke.

Le meilleur rendement des foyers à grille mobile correspond à une consommation de 122 à 171 kg/m<sup>2</sup> dépendant du combustible (1).

*Foyers à chargement renversé et divers.*

La littérature (25) signale que les charbons dont les cendres ont une fusibilité défavorable peuvent être employés de façon satisfaisante dans des foyers à alimentation inférieure, si la combustion par unité de surface est suffisamment faible. Cependant, tous les ingénieurs admettent actuellement que le foyer à alimentation inférieure exige de meilleures qualités de charbon que n'importe quel autre type.

En outre, les fortes dépenses d'entretien et un manque de souplesse dans le fonctionnement ont

contribué au déclin de cet appareil. Un constructeur a complètement cessé la construction de types à sections multiples et d'autres ont adopté graduellement les foyers à pelletage mécanique, plus demandés.

Les données contenues dans le « Fairmont Coal Bureau Reference Bulletin » (10), de juillet 1947 (9), indiquent que, sur cent installations nouvelles de chaudières, deux seulement comportent des foyers à alimentation inférieure, tandis que 84 sont à pulvérisé et 14 à étalement. En outre, la capacité horaire maximum de l'unité à alimentation inférieure est de 68 t de vapeur, tandis que plusieurs unités à pulvérisé atteignent 454 t.

Ce procédé ne concerne qu'un faible tonnage et n'est donc pas considéré important pour la combustion de combustibles inférieurs.

De même, le « Coking stoker » et le foyer Martin (3,27) sont considérés comme peu importants. Tous deux ont été employés en Europe, mais ne sont pas très connus en Amérique. Le foyer Martin a été étudié pour utiliser des charbons bitumineux inférieurs, mais il a les mêmes désavantages que le foyer à alimentation inférieure en ce qui concerne les dépenses d'entretien (5). Le « coking stoker » n'est pas adaptable à une gamme étendue de combustibles (15); il ne peut pas brûler les anthracites, les lignites ou les charbons très inflammables ou les charbons bitumineux fortement agglutinants (26).

*Gazogènes.*

Etant donné que les cendres du charbon sont la source de multiples problèmes dans la combustion directe, on a imaginé plusieurs systèmes pour gazéifier complètement le charbon dans des appa-

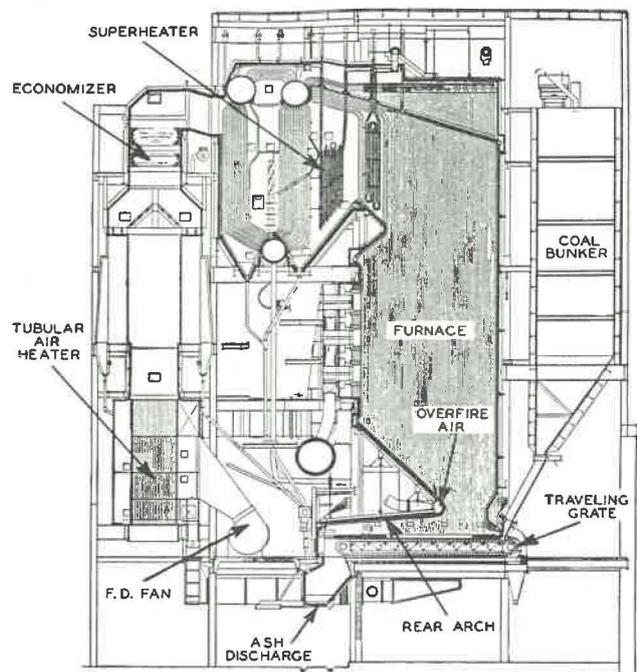


Figure 6. — Chaudière pour grésillon de coke, à grille mécanique et voûte arrière. Débit 78 t/h, à 63 kg/cm<sup>2</sup> et 482° C. (Combustion Engineering.)

reils spéciaux et pour brûler les gaz relativement propres dans les foyers des générateurs. De cette manière, on écarte les problèmes que pose la question des cendres.

Le gazogène Szikla-Rozinek (37), bâti conjointement à un générateur de vapeur, est destiné à gazéifier des fines en suspension. Plusieurs unités à l'échelle industrielle ont été en service en Hongrie. Par le moyen d'un distributeur mécanique, le charbon cru est introduit dans un courant de coke circulant entre deux chambres séparées par une cloison. Les gaz chauds passant à travers la seconde chambre (appelée chambre de carbonisation) détruisent le pouvoir agglutinant du charbon brut et le convertissent en coke. Ce coke est conduit à la chambre de gazéification, où il est partiellement gazéifié, et le résidu est ramené par le courant gazeux dans la chambre de carbonisation. La cendre est fondue et se dépose sur le fond de la chambre de gazéification, d'où elle est enlevée par une grille cylindrique tournante, laquelle sert aussi à l'admission de l'air. Les produits gazeux et chauds, comprenant les matières volatiles du charbon, passent au foyer du générateur où ils sont brûlés. L'inconvénient principal du système, c'est qu'il faut des températures assez élevées pour enlever la scorie à l'état fluide et contre le courant d'entrée d'air.

Le gazogène à courant renversé Flesch-Winkler (38) a été aussi recommandé dans le même but. Le mode opératoire est périodique. Dans le cycle de soufflage, on introduit le charbon et on élimine la scorie à l'état fluide, dans les cycles opératoires, on produit du gaz à l'eau. Les avantages invoqués en faveur de ce procédé sont :

- 1) on peut traiter une grande variété de charbon, grains ou menus, gras ou maigres;
- 2) il est indépendant de la quantité et de la fusibilité des cendres;
- 3) le taux de gazéification est très élevé;
- 4) il y a peu de pertes de combustibles dans les résidus;
- 5) la température de sortie des gaz est assez basse, ce qui facilite leur opération.

D'autres systèmes intéressants sont dus à Leuna, Thyssen-Galloy, Lurgi et Flesch-Demag. La gazéification souterraine sera peut-être possible dans l'avenir, mais il faut encore beaucoup d'essais avant qu'elle ne soit pratique.

La turbine à gaz peut être adaptée à la production de l'énergie (21,39). Elle peut être alimentée par les gaz chauds issus de n'importe lequel des appareils ci-dessus et elle pourrait même être alimentée directement par le charbon pulvérisé (40). Cependant, ce procédé est encore dans un stade peu avancé. La turbine à gaz aurait l'avantage d'un faible encombrement pour une grande capacité; elle supprime la complication des installations à vapeur, et elle est indépendante des ressources en eau.

Le Département des Recherches sur la Combustion du Bureau of Mines, aux États-Unis, a effectué des essais de gazéification du charbon

par un procédé cyclique dans un petit four de laboratoire. Pendant la période de soufflage, le lit est soulevé légèrement pour permettre aux particules de se séparer quelque peu et on alimente en charbon frais. Par suite de leur plus grande densité, les cendres traversent le lit et se déposent en masse perméable sur une grille de fond. Pendant la période active, on injecte de la vapeur à une vitesse inférieure à celle du soulèvement du lit de combustibles. A la suite de ce travail, qui n'est pas encore publié, le Bureau of Mines propose l'équipement représenté à la figure 7, pour la production de gaz à l'eau. Le charbon cru est projeté sur le lit de combustible durant la période de fluidisation par un mécanisme similaire à celui des grilles à étalement. La grille est avancée périodiquement pendant le soufflage pour évacuer les cendres accumulées. Bien que la figure montre une seule chambre de gazéification, l'unité complète consiste en deux chambres avec une chaudière de récupération. Les deux chambres opèrent alternativement de telle manière que le degré de production de vapeur est constant. Le bilan calorifique montre qu'en utilisant des charbons bitumineux à haute teneur en matières volatiles, on produit à peu près huit fois plus de vapeur qu'il n'est nécessaire pour la réaction de gazéification. L'excès de vapeur serait disponible pour d'autres usages.

La chaudière serait sujette aux mêmes ennuis concernant les dépôts de cendres que d'autres foyers à charbon, mais un gaz propre serait produit par ce procédé.

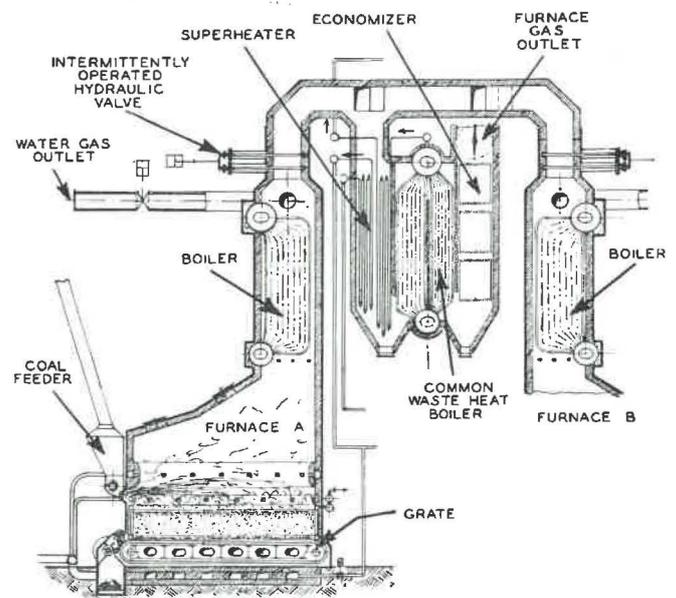


Figure 7. — Foyer à étalement proposé pour la production de gaz à l'eau en lit fluidisé.

Le deuxième foyer requis pour une élaboration continue est indiqué à la partie droite de la figure.

Une autre investigation du Bureau of Mines a porté sur la gazéification de la méta-anthracite de Rhode-Island dans un gazogène continu. Ce charbon est tellement mauvais qu'on ne parvient pas à le brûler convenablement dans aucun des foyers

d'usage courant. Non seulement la teneur en cendres est élevée (40 %), mais il y a très peu de matières volatiles et le carbone fixe est à l'état graphitique. On a trouvé qu'il est possible de le brûler dans un four à cendre fondue à condition de chauffer l'air au préalable à environ 430° C. Dans ce procédé, la cendre est un sous-produit par transformation en laine de verre qui se vend comme calorifuge pour de multiples usages. Cependant, il a été reconnu qu'une addition de fondant calcareux est nécessaire pour donner à la scorie les propriétés requises par le soufflage de la laine. Une étude économique a montré que le pouvoir calorifique des gaz suffit, non seulement à engendrer la vapeur pour souffler la laine et chauffer l'air au préalable, mais qu'une grande quantité de gaz pauvre pourrait servir à chacun de ces deux usages. La figure 8 représente l'appareil servant aux études de laboratoire.

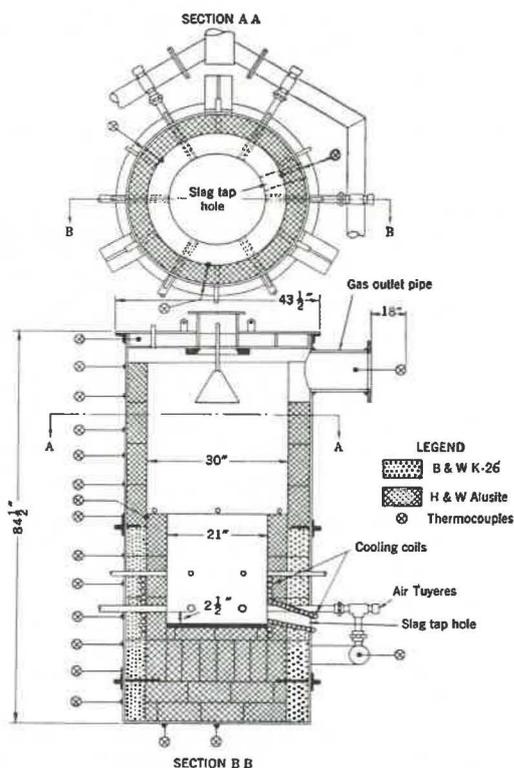


Figure 8. — Générateur à cendres fluidisées utilisé pour la gazéification de méta-anthracite de Rhode-Island, contenant 40 % de cendres.

Aucun de ces procédés n'est employé industriellement aux États-Unis à cause de certains inconvénients inévitables. Le grand encombrement et les frais élevés d'entretien d'une installation de gazéification sont considérés par beaucoup d'ingénieurs comme prohibant son utilisation à grande échelle pour la production de l'énergie. Il est probable aussi que les difficultés opératoires et de réglage, surtout dans les procédés cycliques, sont plus sérieuses que dans les appareils de combustion. A moins qu'on ne dispose d'une vaste installation d'épuration des gaz, une grande quantité de cendres est entraînée dans les chambres de combustion.

Il en résulterait peu de progrès par rapport aux foyers usuels, particulièrement par rapport au cyclone qui retient 90 % des cendres (22) et plus en dehors des fumées. L'installation d'épurateurs est coûteuse et gaspillerait la chaleur emmagasinée dans les gaz, laquelle pourrait être récupérée si l'on brûlait les gaz chauds immédiatement à leur sortie du gazogène. Cependant, ces procédés pourraient trouver un champ d'application plus vaste en Europe où la question de l'utilisation des combustibles pauvres est actuellement plus urgente qu'aux États-Unis.

**Les problèmes de la combustion des charbons pauvres.**

Un grand nombre de problèmes et de difficultés surgissent ou sont aggravés quand on veut employer les charbons pauvres dans les appareils usuels. Heureusement, plusieurs de ces difficultés d'ordre physique ou mécanique peuvent être atténuées ou supprimées par des constructions et des pratiques soigneusement étudiées. Néanmoins, on peut être limité dans cette voie par des considérations d'ordre économique.

*Capacité, coefficients d'utilisation, entretien des installations.*

Les opinions des ingénieurs diffèrent quant à l'influence des charbons pauvres sur la capacité de production et le coefficient de disponibilité des chaufferies. Dans le mémoire, nous appelons coefficient de disponibilité, le pourcentage du temps pendant lequel une unité peut travailler à sa pleine capacité. Certains estiment que le volume des chambres de combustion des foyers au pulvérisé doit être calculé très largement, par exemple pour un débit horaire de 80.000 Kcal par m<sup>3</sup>. Avec les foyers à grille, ils recommandent 122 kg/m<sup>3</sup> au maximum pour des charbons très cendreux. Par contre, d'autres sont d'avis que les surfaces de chauffe peuvent être tenues aussi propres avec les charbons sales qu'avec des charbons propres et qu'il n'existe aucune relation entre la teneur en cendres et la capacité ou le facteur de disponibilité des chaudières. Ils basent leurs calculs sur le rapport entre la surface de chauffe et la température de sortie des gaz brûlés, température qui est fonction de la fusibilité des cendres. Ce procédé est le même que pour les bons combustibles et conduit à des combustions horaires d'environ 178.000 Kcal/m<sup>3</sup> dans les foyers à grilles.

Les grilles mobiles doivent être calculées pour de plus grandes vitesses afin d'assurer la capacité voulue sans exagération de l'épaisseur du lit de combustible (1).

Tous les ingénieurs admettent l'influence défavorable des charbons très cendreux sur la capacité, le coefficient de disponibilité et sur l'entretien des pulvérisateurs et des appareils de manutention du charbon et des cendres.

Les pulvérisateurs et les moteurs sont affectés simultanément par deux conditions (19,20). Une forte teneur en cendres entraîne la manipulation d'une plus grande quantité de charbon et la dureté qui accompagne fréquemment la forte teneur en cendres exige une plus grande capacité de broyage par tonne de produit (2,32). Ainsi, l'accroissement de dimensions et d'énergie est, tout compte fait, plus que proportionnel à l'accroissement de la teneur en cendres.

La dureté a aussi pour conséquence une usure et une dépense d'entretien plus fortes des broyeurs (6). Le broyeur à boulets du type Harding est celui qui est le moins affecté sous ce rapport (8), aussi est-il préféré par beaucoup de constructeurs. Il peut même servir à broyer les cendres de coke, mais il n'est pas spécialement recommandable dans ce cas, l'usure étant 18 fois plus forte qu'avec le charbon gras. Bien que les broyeurs à boulets exigent plus de force motrice que les broyeurs pendulaires ou « bowmill » (13), leur entretien se ressent beaucoup moins de la dureté et le prix de revient du broyage (tous frais comptés) est en faveur du broyeur à boulets dès que la friabilité Hardgrove est en dessous de 50. Cependant, des constructeurs préfèrent les broyeurs pendulaires ou à disques sans égard à la friabilité et acceptent les inconvénients de l'usure et de l'entretien.

Un des effets néfastes de l'usure est le temps perdu dans les réparations. L'emmagasinage dans des trémies, joint à des broyeurs de rechange, constitue une solution de ce problème. On fait remarquer qu'avec un accumulateur le pulvérisateur seul est mis hors-service, tandis que, dans la méthode d'alimentation directe, un certain nombre de brûleurs devra aussi être mis au repos. Ces brûleurs de réserve, non seulement augmentent le coût de l'installation, mais ils sont une source d'ennuis en donnant lieu à des fuites d'air et à des détériorations s'ils ne sont pas suffisamment refroidis par l'afflux du nuage de charbon. A ce propos, il est bon de rappeler que les exhausteurs de n'importe quel type de pulvérisateurs subissent également les mauvais effets de l'usure causée par des matériaux abrasifs.

La capacité des appareils de transport et de chargement du charbon, des crassiers et des collecteurs de poussières croît en proportion de la masse de charbon à traiter et, par conséquent, de la teneur en cendres. Avec le tirage induit, la puissance des ventilateurs croît en raison des pertes de charge dans le circuit et les collecteurs de poussières.

Une forte humidité diminue la capacité des pulvérisateurs (2, 19, 20, 32) et cause des ennuis dans les autres appareils à moins qu'on ne prenne des précautions spéciales. Il arrive souvent avec des charbons mouillés que la chaleur de l'air préchauffé soit insuffisante pour la dessiccation et qu'il faille recourir à une dérivation d'une partie des gaz chauds.

#### *Pertes de carbone.*

De fortes pertes de carbone se constatent, principalement dans les fumées, quand on brûle des combustibles

très cendreuse (20). La proportion exacte n'est pas connue avec certitude, mais on croit qu'elle dépend de l'inflammabilité du charbon et de la proportion des cendres de constitution. Un broyage très fin est recommandé pour réduire les pertes; en général, plus il y a de cendres, plus fin doit être le charbon. Ici encore, le broyeur à boulet ou à tube est recommandable pour les charbons cendreuse à cause de la vaste dispersion des gros-seurs dans le produit. Cela veut dire qu'un charbon passant à travers un tamis déterminé aura une grosseur moyenne plus faible s'il provient d'un broyeur à boulets (13). Ceci est probablement une des raisons pour lesquelles la dépense de force motrice est plus grande dans le broyeur à boulets que dans les autres types.

Les fortes pertes en carbone non brûlé se présentent dans les foyers à grilles où l'on brûle toutes sortes de combustibles et la règle est de faire repasser dans le foyer les dépôts des collecteurs de suies. Par suite, il est peu probable que la proportion de carbone non brûlé augmente notablement avec la teneur en cendres. Par suite aussi, la pratique de la réinjection serait sans doute avantageuse avec les grilles mobiles dans tous les cas où l'on observe un fort entraînement de carbone non brûlé (14, 35, 45).

Même dans des chaufferies au charbon pulvérisé, les cendres pulvérulentes provenant des collecteurs de poussières sont parfois réinjectées dans le foyer pour récupérer le carbone non brûlé.

Les pertes en carbone dans les cendriers se constatent surtout quand on brûle de l'antracite sur des grilles à chaîne et que la grosseur des grains est trop forte. Le cas est sérieux surtout quand en même temps la teneur en cendres est élevée, parce qu'alors la vitesse de circulation de la chaîne est plus grande. La solution réside dans l'emploi de charbon plus fin et le réglage de la pression de l'air dans les compartiments d'arrière pour renforcer la combustion à l'avant. La grosseur la plus convenable pour l'antracite est le grain n° 3 à 5 (1 à 5 mm). Quand on brûle des combustibles aussi fins, il convient de les mouiller légèrement pour les agglutiner.

#### *La scorification dans le lit de combustible.*

La formation de mâchefer est due généralement à une mauvaise répartition du courant d'air à travers les grilles quand le foyer est mal approprié à la fusibilité des cendres du charbon. Le phénomène est le plus accentué quand les charbons n'ont pas la grosseur voulue et sont brûlés sur des grilles fixes et sans distribution de l'air par compartiments. Quand il y a trop de gros grains, la résistance du lit au passage de l'air est relativement faible aux deux extrémités de la grille. A l'avant, les fines particules restent en suspension dans l'air avant de retomber sur la grille. Il en résulte qu'il y a un déficit d'air dans la partie moyenne; le milieu est réducteur, il se forme une scorie fusible à plus basse température. En plus de la difficulté d'éliminer ce mâchefer, il y a danger de surchauffe et de détérioration à cause de la déficience d'air dans la partie centrale.

La grosseur des grains de charbon doit être limitée à 20 mm pour obtenir une bonne répartition de l'air tout au long de la grille (1). Avec les grilles mobiles et distributeur mécanique, il y a moins d'inconvénients parce que le réglage de l'admission d'air se fait par compartiments et que le mouvement de la grille tend à rendre la résistance du lit plus uniforme. Il y a souvent sur ces grilles du mâchefer tendre et poreux, mais ce n'est pas grave.

Une autre difficulté provenant d'une mauvaise distribution de l'air n'a aucun rapport avec les mâchefers. C'est la formation de nappes de gaz et une grande variation de la température à la sortie du foyer. Il en résulte qu'à température moyenne égale, il se forme plus d'incrustations sur les tubes et des inégalités dans la surchauffe.

*Dépôts de scories et de cendres.*

L'encrassement de toutes les surfaces métalliques, soit dans les foyers, les chaudières, surchauffeurs, économiseurs, est un des inconvénients les plus ennuyeux avec n'importe quel charbon, mais plus spécialement avec le pulvérisé, les charbons très cendrés et les cendres facilement fusibles.

En étudiant les foyers, soit à cendres pulvérulentes, soit à grilles, l'objectif principal doit être d'empêcher autant que possible les dépôts de matières fondues sur les murs du foyer et sur toutes les surfaces à chauffer par convection.

Bien que l'on ne connaisse pas tous les facteurs régissant le dépôt de la scorie, les constructeurs cherchent généralement à maintenir les surfaces propres par un choix convenable des dimensions de ces surfaces. Il faut une surface assez grande pour que les gaz se refroidissent, avant de quitter la chambre de combustion, jusqu'à une température spécifique qui dépend de la fusibilité des cendres. (19).

Quelques ingénieurs préfèrent le système à cendres pulvérulentes pour toutes les applications de pulvérisé, sans égard à la température de fusion et font leurs plans en conséquence.

D'autres estiment que les foyers à cendres fondues conviennent mieux avec des cendres fusibles. Cependant, ces foyers sont moins adaptables que le foyer à cendres pulvérulentes et ils devraient être réservés aux cas où l'on dispose d'une réserve en charbon à cendres fusibles pour alimenter la chaufferie pendant toute sa vie probable, c'est-à-dire au moins 20 ans. Dans l'étude d'un projet de foyers à cendres fondues, l'objectif en vue est directement l'opposé de celui du foyer à cendres pulvérulentes, c'est-à-dire que la surface de chauffe doit être mesurée de façon à obtenir une absorption de chaleur avec une température de gaz assez élevée pour maintenir la scorie en fusion sur les parois du four. A l'occasion, le système est adopté uniquement parce qu'il est plus facile de manipuler les mâchefers que les cendres fines.

La différence fondamentale entre les deux systèmes peut être illustrée par la figure 9 qui permet de comparer les chaleurs nettes disponibles par unité de surface de chauffe aux diverses températures suivant que les surfaces sont sales ou propres. C'est

un diagramme type de la forme de la fonction, mais dans les cas d'espèces, les valeurs des coordonnées varient avec le taux des échanges de chaleur entre la flamme et les parois ainsi qu'avec la quantité d'air en excès. La position des limites de température A et B dépend de la constitution des cendres. Ces lignes déterminent la position des verticales C et D qui limitent le domaine d'application de chacun des deux systèmes de four. Le foyer à cendres pulvérulentes s'emploiera avec succès à gauche de la ligne C et le procédé par fusion des scories, dans la région à droite de la ligne D. La région intermédiaire C — D n'est satisfaisante dans aucun cas et doit être évitée.

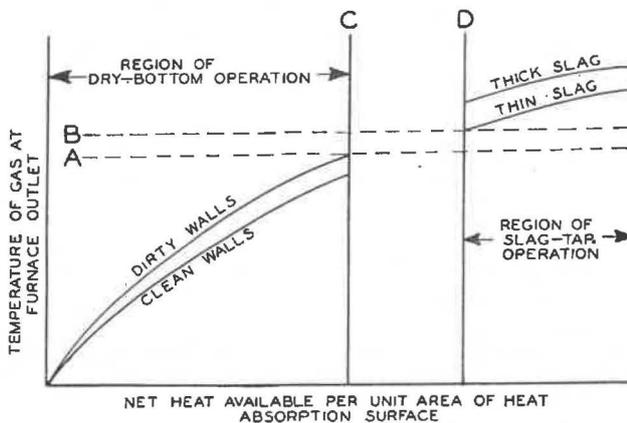


Figure 9. — Diagramme montrant les taux d'échanges calorifiques du foyer pour fonctionnement satisfaisant des foyers à cendres pulvérulentes ou à cendres fondues.

La marche dans la zone CD peut causer des ennuis insupportables avec les cendres.

On peut voir par ce qui précède que les particules de cendres entraînées par les gaz chauds, et dont le montant s'élève à 50 % et plus du poids des cendres contenues dans le charbon cru, peuvent se trouver à l'état liquide ou plastique et se coller sur les surfaces métalliques qu'elles rencontrent au passage des bouilleurs et des surchauffeurs. C'est ainsi que se forment, à la surface des tubes, des dépôts qui obstruent le passage des gaz et contrarient l'absorption de la chaleur par les surfaces métalliques.

Les dépôts dans les carneaux des chaudières à cendres pulvérulentes ou à grilles mécaniques ont aussi pour causes les particules de cendres fondues ou plastiques. Ces chaudières sont construites pour répondre à des conditions moyennes; quand il se produit des écarts par excès de température dans les chambres, il y en a aussi dans la température des gaz sortants. Quand le dépôt de cendres sur les parois devient relativement épais et se laisse pénétrer par les hautes températures, l'accumulation des matières sur les surfaces chaudes et collantes peut se faire très rapidement, surtout dans les foyers à cendres pulvérulentes dans lesquels la proportion de cendres entraînées par le courant de gaz est très forte. De leur côté, les propriétés des combustibles très cendrés sont sujettes à de fortes variations et les chaudières conçues pour une composition

moyenne prévue sont susceptibles de s'encrasser quand la proportion de cendres fusibles s'élève.

Sous certains points de vue, les dépôts dans les carneaux des foyers à cendres pulvérulentes ont moins d'inconvénients que dans les foyers à cendres fondues. Les premiers sont de nature plus friable, ils tendent à se détacher des parois plus aisément lors des changements de charge ou sous l'action de la lance. Dans les foyers où règnent de très hautes températures (foyers à cendres fondues ou à cyclone), la volatilisation des constituants alcalins de la cendre ou de scorie produit des dépôts qui adhèrent très fortement aux tubes des bouilleurs et des surchauffeurs (3,46). Ces dépôts sont très difficiles à détacher au ringard ou par soufflage des suies.

Les effets de la décomposition des cendres par la chaleur ont été mis en évidence par les recherches sur les brûleurs cyclones (25). Ce brûleur a été conçu pour réduire l'encrassement de la surface des tubes en éliminant une plus grande partie des cendres par le fond de la chambre. Bien qu'on ait obtenu un taux de dépôts sur les parois des chambres plus bas que dans le foyer à cendres pulvérulentes, ces dépôts étaient de nature plus dense et cimentés. Cette circonstance a causé beaucoup d'ennuis dans l'unité étudiée et dans laquelle le soufflage des suies était insuffisant.

Il faut attacher une grande importance au choix d'un souffleur de suie bien approprié quand on emploie des charbons très cendreux (5). Toutes les parties des carneaux en aval des chambres doivent aussi être facilement accessibles à la lance, là où le soufflage se montre insuffisant, et spécialement dans le cas des foyers cyclones et à cendres fondues.

Souvent, on prévoit dans les foyers à cendres pulvérulentes des températures compatibles avec la fusibilité des cendres, mais qui s'avèrent insuffisantes dans les surchauffeurs et réchauffeurs. La manière habituelle de remédier à cette situation est d'installer des tubes surchauffeurs radiaux directement dans la chambre. Ceci complique l'élimination des cendres et exige une grande précaution dans l'emplacement des souffleurs et beaucoup de nettoyages manuels. Ces sortes de tubes surchauffeurs, à la différence des bouilleurs qui renferment un fluide à température uniforme, sont susceptibles d'être endommagés quand d'épais dépôts rendent la transmission de la chaleur irrégulière.

Les conditions qui favorisent la décomposition chimique des cendres dans le lit de combustible ont une grande importance dans tous les foyers à grille. Cependant, ici, les incrustations sont moins fréquentes que dans les foyers au pulvérisé, parce que les cendres en grains relativement gros ont un effet de broissage qui contribue à maintenir les parois propres (8). Certains constructeurs utilisent cette propriété en triant les particules grossières des collecteurs de poussières et en les réinjectant dans le foyer.

Les résultats d'expériences récentes (48) avec des foyers alimentés par la face inférieure ont prouvé

qu'en ajoutant 16 pour 1000 d'humidité au moyen de jets de vapeur dans l'air de combustion, on réduit très notablement la formation de dépôts nuisibles sur les parois des chaudières. L'état de propreté des surfaces de chauffe compense largement la perte de chaleur causée par l'injection de vapeur dans le courant gazeux. On croit que l'addition de vapeur d'eau empêche la décomposition chimique des cendres à laquelle on attribue la formation de dépôts denses et durs. Cependant, on ne constate pas qu'une plus grande humidité dans le lit de combustible produise le même effet que l'injection de vapeur dans l'air. Il n'y a jusqu'ici aucune preuve que cet artifice puisse s'appliquer au charbon pulvérisé.

Une autre difficulté se présente parfois dans les cendriers des foyers à cendres pulvérulentes. Si la cendre est facilement fusible, elle peut se fritter, former du mâchefer et coller aux parois refroidies par l'eau. En prévision de cet accident, un constructeur emploie un cendrier incliné par rapport à l'axe du four de telle sorte que la cendre qui s'accumule est préservée de l'irradiation directe des flammes.

#### *Viscosité de la scorie.*

L'emploi de combustibles pauvres ne causerait pas de difficultés résultant de la fluidité des scories si les effets de la viscosité étaient bien compris et si, dans la construction des chaudières, des dispositions étaient prises pour parer aux grands écarts dans la composition des cendres, qui sont habituels avec ces charbons. On a déjà signalé que les fours à cendres fondues ou à cyclone conviennent pour des charbons dont les cendres fondent à moins de 1430°C. Cependant, ce chiffre n'est qu'une indication et n'est applicable à tous les cas particuliers. En fait, la viscosité de la scorie fondue est la seule propriété qui règle son écoulement et, par conséquent, elle constitue un critère plus satisfaisant qu'un degré de température.

Le Bureau of Mines (47) a effectué des recherches très étendues pendant plusieurs années pour déterminer les relations entre la viscosité des cendres et les difficultés qu'on rencontre dans le fonctionnement des chaufferies. Les découvertes les plus intéressantes de ces investigations sont que, pour assurer un écoulement satisfaisant, la scorie doit avoir une viscosité qui ne dépasse pas 150 à 200 poises ( $\text{dyne sec/m}^2$ ) et que la température soit supérieure à une certaine « température de viscosité critique » ( $T_{cv}$ ). Par définition,  $T_{cv}$  est cette température observée dans le refroidissement graduel d'une scorie, et à laquelle se produit une transition brusque de l'écoulement visqueux ou plastique, ce qui se manifeste par un accroissement brusque de la viscosité et une légère chute de la température.

Il y a certaine corrélation entre la température de fusion et  $T_{cv}$ , ainsi qu'entre la température de la scorie fondue et la viscosité. Cependant, on constate de grands écarts et les propriétés du flux ne peuvent pas être déduites infailliblement de la température

de fusion. Ceci rend compte des difficultés éprouvées au début des brûleurs cyclones (23). Un charbon de Pennsylvanie, dont les cendres ont des températures de fusion et de fluidité de 1400 et 1510° C respectivement, ne pouvait pas donner un écoulement satisfaisant, tandis que des charbons d'autre provenance ayant sensiblement les mêmes caractéristiques de fusion se comportaient convenablement. La différence entre les deux sortes de charbon réside dans la viscosité de la scorie fluide; le charbon de Pennsylvanie exigeait une température beaucoup plus haute pour atteindre la viscosité de 150 à 200 poises.

Comme autre résultat des recherches du Bureau of Mines, de nombreuses données ont été obtenues qui permettent de calculer la viscosité d'une scorie à une température quelconque en partant de la composition des cendres. Cette viscosité dépend du rapport  $\text{SiO}_2 : (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO})$  dans la scorie. Ni l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ni le rapport  $\text{Fe}_2\text{O}_3 : (\text{CaO} + \text{MgO})$  n'ont une influence mesurable sur le degré de viscosité. Par conséquent, la viscosité peut s'apprécier par la teneur en  $\text{SiO}_2$  de la cendre, abstraction faite de l'alumine.

Les recherches ont aussi fourni des données pour prédire la température de viscosité critique en se basant sur la composition des cendres, mais la relation est beaucoup plus compliquée que pour la viscosité. Les teneurs en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $(\text{CaO} + \text{MgO})$  ont toutes, ainsi que l'état d'oxydation du fer, une influence sur la température de viscosité critique.

La viscosité de la scorie influence non seulement l'évacuation des cendres, mais elle affecte aussi la transmission de la chaleur aux murs des chaudières en raison de l'épaisseur de dépôts sur ces parois. C'est encore une indication montrant l'importance qu'il faut attribuer, dans l'étude d'une chaufferie, aux propriétés du flux de scories. Le taux de la transmission de la chaleur par les murs influence la température des gaz à la sortie des chambres de combustion; or c'est là un facteur important sur lequel on base les calculs. Sous ce rapport, il faut noter que la température du chauffage préalable de l'air affecte la température dans la zone de combustion et, par conséquent, règlera les propriétés du flux de scorie dans cette même région.

#### *Inflammation du charbon pauvre.*

Les opinions diffèrent quant à la facilité d'inflammation des divers combustibles dans les différents genres de foyer. Au début, quand l'intérêt s'est porté sur l'emploi des charbons gras très cendrés sous forme de pulvérisé, deux conditions étaient considérées comme essentielles pour maintenir une combustion stable : de larges surfaces réfractaires et de longues flammes tranquilles provenant de brûleurs montés sur le toit des chambres afin de favoriser le plus possible la transmission de la chaleur au nuage de charbon entrant. Des murs réfractaires et des voûtes paraissaient aussi indispensables dans les foyers à grille et l'on trouve dans

la littérature des exemples (15) où l'on préconise un chauffage auxiliaire à l'huile minérale quand on brûle des cendres de coques ou des fines d'antracite humides sur des grilles mobiles.

Certains ingénieurs continuent à ajouter foi à ces principes, à des degrés divers (13, 14); d'autres préfèrent s'en tenir à un seul type de foyer, quelle que soit la nature du charbon, et réduisent au minimum les parois réfractaires. Un constructeur a réussi des fours chauffés tangentiellement, avec parois rafraîchies par un courant d'eau et brûlant des charbons gras pulvérisés dont la teneur en cendres s'élevait jusqu'à 50 %. On recommande aussi les écrans d'eau pour couvrir tous les murs et voûtes des foyers à grille mobile. Cette opinion se fonde sur l'observation que le charbon s'allume aussi bien par le rayonnement de la flamme ou des gaz chauds que par celui de parois réfractaires chaudes, même quand on brûle de l'antracite à 3 % de matières volatiles. Avec les charbons gras, des jets d'air au-dessus du feu sont nécessaires pour brûler les matières volatiles. Ces jets ne sont pas requis pour la combustion de l'antracite, mais ils sont utiles dans les très fortes unités parce qu'ils rejettent les cendres sur le lit et diminuent leur entraînement par le courant gazeux. (14).

On est généralement d'accord pour dire que le chauffage préalable de l'air (51) est avantageux pour faciliter l'inflammation des charbons maigres cendrés dans les foyers garnis d'écrans d'eau, mais certains ne croient pas que ce soit absolument nécessaire. Avec les grilles mécaniques, la température de l'air est limitée par le risque de détérioration des barreaux (7). Par contre, avec le charbon pulvérisé, la seule limite de température de l'air secondaire résulte de la résistance des matériaux des réchauffeurs d'air et de la quantité de chaleur apportée par le courant de gaz qui les traverse. Quand la température de l'air préchauffé est trop élevée, eu égard au bon fonctionnement des pulvérisateurs, on y remédie par des jets froids dans l'air primaire.

L'emploi d'air préalablement chauffé ne doit pas avoir d'inconvénient dans les chaufferies modernes de grande capacité puisque toutes ces unités en font usage dans un but d'économie et de rendement. De leur côté, les installations plus anciennes sans chauffage préalable, ont de très grandes surfaces réfractaires et ne doivent pas éprouver de difficultés du chef de l'ignition.

Les charbons pulvérisés maigres et cendrés s'allument plus facilement quand le mélange d'air primaire et de poussier est assez riche; mais on se heurte alors au problème du transport du charbon au brûleur par un volume d'air relativement faible. Généralement, le type de pulvérisateur pendulaire offre le maximum de variation possible du rapport air-charbon quand il travaille à sa pleine capacité. Ceci fait voir la nécessité de choisir convenablement la capacité des pulvérisateurs, tout spécialement dans les chaufferies sujettes à de grands écarts de production de la vapeur.

Quand on ne peut pas régler dans le pulvérisateur la proportion air-charbon au taux voulu, l'alimentation par trémie est indiquée, bien que ce système puisse exiger une dessiccation préalable des charbons très humides.

Un autre dispositif satisfaisant (brevet Foster-Wheeler) pour régler la proportion du charbon dans l'air primaire consiste à dévier une partie de l'air par un petit séparateur cyclone placé sur chaque tube brûleur et à la réintroduire comme air secondaire dans une autre partie de la chambre de combustion (13). Ce système appliqué à un foyer à cendres pulvérulentes est illustré par la figure 2.

Un broyage très fin favorise l'inflammation rapide du charbon par suite de la plus grande surface de contact avec l'air et de l'accroissement de la vitesse de chauffage des particules de charbon.

L'humidité cause des retards d'inflammation dans les foyers cyclones (23). En brûlant du lignite à 38 % d'eau dans une installation de l'espèce, on a trouvé qu'il est nécessaire d'élever la température de l'air au delà de son point normal (230° C) jusqu'à 340° C pour obtenir une dessiccation suffisante et pour obtenir l'inflammation dans le cyclone plutôt que dans la chambre. On a dit plus haut qu'un fort chauffage préalable aide à l'évacuation de la scorie.

Certains ingénieurs croient que l'on rencontrera habituellement des difficultés d'inflammation dans les foyers cyclones quand on brûle des charbons à faible teneur en matières volatiles, cendreaux ou non. Cependant, nous n'avons pas assez de données pour conclure d'une façon générale sur ce point. Les charbons de Pocahontas dont la teneur en matières volatiles est de 25 %, la plus basse qui ait été employée jusqu'à présent, ont brûlé de façon satisfaisante.

#### *Corrosion et érosion.*

La corrosion des surfaces métalliques relativement froides est due principalement au soufre contenu dans le combustible (20,50) et elle se produit quand la température du métal est inférieure au point de rosée du flux gazeux, point de rosée qui dépend de la proportion de SO<sub>3</sub> et de vapeur d'eau dans les gaz. Il faut bien remarquer que c'est la température du métal, pas celle des gaz, qui est le facteur déterminant. Ainsi, la corrosion d'un économiseur peut être assez rapide dans la zone où la température de l'eau d'alimentation est basse et, cependant, le réchauffeur d'air se maintiendra bien que travaillant dans des gaz plus froids, ce qui est dû au gradient relativement élevé de la transmission de chaleur entre l'air et le métal.

La corrosion des économiseurs peut être empêchée en combinant le cycle de la vapeur de telle façon que la température de l'eau d'alimentation à son entrée dans l'économiseur dépasse le point de rosée des gaz. Dans certaines chaufferies, il n'y a pas moins de sept stades dans le chauffage de l'eau d'alimentation. En plus, pour prévenir la corrosion, on prévoit un plus fort réchauffage, ce qui permet

d'ailleurs un chauffage préalable de l'air plus intense. Certains constructeurs prétendent que le rendement total peut être amélioré par l'emploi d'eaux d'alimentation plus chaudes.

La corrosion des chauffeurs d'air peut être empêchée simplement en les proportionnant pour de plus hautes températures des gaz traversant le faisceau. Ceci peut se réaliser en donnant une moindre surface aux tubes chauffeurs, en munissant l'économiseur d'un by-pass pour une partie de gaz, en faisant recirculer l'air chaud ou en établissant un by-pass pour l'air froid autour du chauffeur d'air (49,51). Ce système de recirculation et de by-pass est recommandable quand la teneur en soufre du combustible est très variable, parce que les vannes placées dans les carneaux permettent un réglage très précis de la température des gaz dans le faisceau. Néanmoins, aux Etats-Unis où le rendement thermique et l'économie d'installation ont acquis actuellement une grande importance, la tendance est aux basses températures des gaz de sortie et on se résigne à subir une certaine corrosion des chauffeurs d'air. Ceux-ci sont divisés en plusieurs sections dont les dernières, les plus froides, sont de petites dimensions et en matériaux relativement peu coûteux. Ces sections sont installées de telle sorte qu'on puisse les nettoyer fréquemment et les remplacer facilement et à peu de frais quand cela devient nécessaire.

L'érosion des murs réfractaires et des tubes des chaudières (41, 42, 43, 44) dépend de la quantité de poussières, de leurs propriétés physiques et de la vitesse des courants d'entraînement. La quantité de poussier dépend de l'intensité de la combustion, de la teneur en cendres du charbon et du type de chaudière. Ainsi, pour n'importe quel type, c'est la teneur en cendres qui est le facteur principal de l'érosion. Les propriétés physiques des cendres dépendent autant des conditions de la combustion que de la composition. Les cendres des foyers à grilles sont beaucoup plus abrasives que celles du charbon pulvérisé.

Comme la quantité et les propriétés des poussières sont plus ou moins fixes, la seule ressource qui reste aux constructeurs réside dans la vitesse de circulation. En donnant à tous les passages une section suffisante, on peut maintenir la vitesse dans de sages limites (10, 14, 35) et, en plaçant avec soin les divers compartiments et les registres, on peut empêcher les grandes vitesses et une érosion exagérée et localisée aux points où le courant change de direction.

#### *Emplacement des centrales d'énergie.*

L'emploi des charbons pauvres dans les centrales thermiques pose plus de problèmes que l'emploi de bons charbons. Avec ceux-ci, le fret par eau ou par fer est toujours moins cher. Avec les charbons de faible pouvoir calorifique ou présentant des difficultés de transport par suite de leur finesse ou de leur grande humidité, il faut choisir entre le centre d'utilisation et la mine ou le centre de préparation. (28, 31). Ce choix dépend tout d'abord des facteurs économiques.

En général, les frais de transport du charbon et de mise à terril des cendres doivent être mis en balance avec les frais de transport de l'énergie électrique aux consommateurs. Le prix des fournitures d'eau à chacun des deux emplacements aura aussi une influence. S'il faut installer des tours de refroidissement, les frais seront beaucoup plus élevés que si l'on dispose d'une abondante source d'eau courante. En général, la nécessité de réfrigérants imposera l'emplacement au centre de consommation. Quand on dispose d'eau propre à la mine, il n'y a aucune difficulté. Il y a souvent pénurie d'eau aux lieux de consommation; alors l'installation d'une centrale ne changera pas grand chose à cette situation de fait.

Quand on doit brûler des mixtes de lavoir dans une usine située assez loin, on doit choisir entre deux alternatives, transport et emploi du combustible brut, ou bien épuration avant l'expédition.

En tout cas, on peut affirmer qu'une épuration plus poussée, pratiquée au siège même de la chaufferie, sera rarement économique, que ce soit près de la mine ou au centre de consommation. En outre, il peut se faire que ce relavage augmente considérablement l'humidité du combustible. Ainsi, par exemple, il vaut peut-être mieux brûler les mixtes d'une séparation à sec que de les concentrer par flottation.

#### *Pollution de l'atmosphère.*

L'emploi de combustibles tenant beaucoup de cendres et de soufre aggrave les problèmes de la pollution de l'atmosphère. Dans les localités où des prescriptions sévères ont force de loi, il faut installer des collecteurs et des dépoussiéreurs de grande capacité, particulièrement avec les foyers au pulvérisé ou à grilles mécaniques. Le brûleur cyclone fournit une solution de la combustion de charbons très cendres sans grand entraînement de poussières dans les fumées. Comme il retient une grande proportion de la cendre, il peut suffire de le compléter par un simple collecteur de poussières. Cependant d'autres facteurs, tels que la teneur en matières volatiles et la fusibilité des cendres, doivent être aussi considérés en vue de l'emploi des foyers à cyclone.

Le foyer à grille mécanique, fonctionnant à un taux modéré, est celui qui présente le minimum d'inconvénients quant à l'émission de poussières. Cependant, l'emploi de charbons très cendres accroît la teneur en poussières (45) et peut rendre nécessaire l'adjonction de collecteurs à des installations existantes qui ont pu s'en dispenser aussi longtemps qu'elles brûlaient du bon charbon.

Une haute teneur en soufre dans le combustible est un inconvénient très grave. Dans tous les systèmes de combustion, les gaz sulfureux sont inévitables et ils sont emportés par les fumées. Si leur proportion est nuisible, il peut être nécessaire de séparer les pyrites au lavoir ou de placer la centrale thermique dans une région où les gaz exerceraient peu de dommages. Dans ce cas, la question de la pollution de l'atmosphère prime toutes les

considérations économiques quant au choix de l'emplacement.

En Europe, certaines installations sont munies de scrubbers qui absorbent presque tous le  $SO_2$ , mais dans ce procédé, les frais de premier établissement sont très élevés.

Dans certains cas, la législation sur la pollution de l'atmosphère peut être un argument en faveur de l'emploi des charbons cendres. Ainsi, lorsqu'on impose des précautions très onéreuses pour empêcher les feux de terril, il peut être avantageux de brûler les déchets de lavoir ou le charbon brut en supprimant ainsi les amas de matières combustibles.

#### **Remerciements.**

On a fait appel pour la préparation du présent mémoire à la science et à l'expérience de nombreuses personnes éminentes dans les domaines de l'exploitation des mines, de la construction ou de la conduite des centrales thermiques. Les auteurs désirent remercier tout spécialement pour leur collaboration Messieurs B. J. Cross, Directeur du Département de Recherches, John Cruise, Ingénieur du Bureau d'Etudes de « Combustion Engineering Superheater Inc. »; John Blizard, Ingénieur Conseil, et A. R. Weismantle, Directeur Adjoint du Département Vapeur de Foster Wheeler Corporation; F. G. Ely, Ingénieur Conseil de Babcock-Wilcox Co., C. H. Fliek, Directeur du Bureau du Charbon de Pennsylvania Power and Light Cy; C. J. Potter, Président de Rochester and Pittsburgh Coal Cy.

#### **Conclusions.**

La possibilité de l'emploi de combustibles de basse qualité mérite de retenir l'attention eu égard à la diminution des réserves en charbon propre et aux prix croissants des meilleures qualités. Dans certaines régions où il y a pénurie ou déclin de la production en charbon de qualité supérieure, l'emploi des mauvais combustibles devient obligatoire sans égard aux conditions économiques. Quand la question du prix de revient est prépondérante, en particulier aux Etats-Unis où la concurrence est très vive, tous les postes de dépenses doivent être étudiés avec soin pour arriver à une décision rationnelle quant à la qualité du charbon, le type de chaufferie et l'emplacement les mieux appropriés. Les facteurs moins tangibles, tels que mise à terril, pollution de l'atmosphère, ne doivent pas être négligés.

Les chaufferies de types courants peuvent généralement convenir pour brûler des combustibles pauvres, sauf peut-être certaines dispositions spéciales tendant à éviter les ennuis résultant de la haute teneur en cendres, en eau et en soufre, ainsi que de la friabilité du charbon et de la fusibilité des cendres. Certains ingénieurs estiment que les chaufferies du type usuel peuvent brûler n'importe quelle

sorte de charbon moyennant de minimes changements dans la construction. Cependant, il est prudent de compter avec les difficultés qui peuvent surgir à l'improviste par suite des grandes variations possibles dans la nature du combustible (28). En plus, l'installation doit être capable de brûler la plus mauvaise qualité qui ait une probabilité de se rencontrer pendant une période de 20 ans, durée de la vie probable d'une chaufferie. En toute hypothèse, il faut procurer au constructeur le maximum d'informations sur toutes les circonstances pour qu'il puisse résoudre le problème en pleine connaissance de cause. Dans le même ordre d'idées, il faut inclure dans les projets toutes les instructions qui peuvent aider l'ingénieur d'exploitation à obvier à un mauvais fonctionnement éventuel avant qu'il n'en soit résulté du dommage. (3,24).

Beaucoup de progrès dignes d'attention ont été réalisés dans ces dernières années. Aux Etats-Unis, le progrès a consisté à brûler dans les chaufferies de type courant des combustibles contenant de plus en plus de cendres, tandis qu'en Europe, on s'est efforcé de créer des unités de grandes puissances pour brûler des combustibles qui étaient réservés aux petites chaudières à opérations manuelles. Voici, à titre d'exemples caractéristiques, trois installations des Etats-Unis.

Une compagnie d'utilité publique de Pensylvanie brûle par an 363.000 t métriques d'antracite à forte teneur en cendres, qui étaient autrefois mises au terril comme déchets de lavoir. Le coefficient de disponibilité est élevé.

Une compagnie de chemins de fer, en Virginie, produit 91 t/h de vapeur dans une chaufferie au pulvérisé, alimentée en charbons flambants dont la teneur en cendres oscille entre 16,5 et 50 %. Ce combustible est ce qui reste du charbon brut après qu'on a trié le bon charbon pour les locomotives.

Une houillère de Pensylvanie produit 38.000 kW d'énergie électrique pour sa propre consommation, avec du charbon flambant tenant 25 à 35 % de cendres. On emploie simultanément des chaudières à grilles mécaniques et d'autres au charbon pulvérisé.

Voici quatre exemples d'installations européennes qui ont fait l'objet d'articles descriptifs :

- Une installation récente, à Palerme, Sicile, produit 60.000 kW en brûlant du pulvérisé à 30 % de cendres (12).
- La nouvelle centrale de Harnes, France, produit 100.000 kW en brûlant du pulvérisé à 35 % de cendres (10).
- La station d'énergie de Tir John (Galles) produit 107 t/h de vapeur dans chacune des quatre chaudières alimentées en fines d'antracite ayant une teneur en cendres de 10 à 24 % (13).
- Au charbonnage Emma du Limbourg hollandais, on produit 386 t/h de vapeur avec du charbon gras à 36 % de cendres (11).

Bien que l'on ait beaucoup progressé, il reste encore un champ très vaste pour le développement de l'utilisation des charbons pauvres. Le grand nom-

bre de terrils dans tous les bassins houillers des Etats-Unis en est la preuve. On y entasse des déchets ayant encore 50 % de carbone en quantités variant entre 270 et 1800 tonnes métriques par jour, soit une moyenne de 900 t par terril. L'utilisation de ce charbon, non seulement constituerait un profit énorme du point de vue de la réservation, mais encore il simplifierait notablement le problème de la pollution de l'atmosphère par les feux de terrils.

Il paraît possible de réaliser encore des progrès dans l'emploi des combustibles pauvres à condition de faire converger les efforts vers ce but. Les tentatives récentes pour transporter le charbon par pipelines (52) pourraient conduire à une réduction du coût des charbons pauvres à grande distance de la mine. Certains ingénieurs attendent aussi de bons résultats de l'amélioration des procédés de pulvérisation, notamment de la réduction des frais d'énergie et d'entretien du matériel occasionnés par les charbons durs.

Bien que les ingénieurs se vantent de réussites remarquables dans l'équipement moderne des chaufferies, ils s'appuient encore en ordre principal sur les méthodes empiriques et l'on est d'accord qu'une connaissance fondamentale à base scientifique serait nécessaire. Ce serait particulièrement utile pour les auteurs de projets appelés à traiter des combustibles qui ne leur sont pas familiers. Sous ce point de vue, les facteurs les plus importants sont le mécanisme de la combustion du charbon pulvérisé, les caractéristiques de la transmission de la chaleur des flammes par rayonnement, le mécanisme de l'accrochage des cendres et des scories aux parois des chaudières, la viscosité et les caractéristiques de la convection de la chaleur par les cendres et par les scories. Le Bureau of Mines a étudié ces problèmes depuis plusieurs années; ils font partie d'un programme de recherches de longue durée par l'utilisation de combustibles de faible valeur, mais il reste encore beaucoup à faire. Il n'est pas probable que ces recherches aboutissent à améliorer d'une façon appréciable le rendement thermique ou l'économie des chaufferies modernes. Cependant, il est très probable que des études sur la combustion convenablement dirigées conduisent à des équipements de moindres dimensions, moins coûteux et d'une plus grande souplesse quant à l'emploi de combustibles de valeur très différentes.

#### BIBLIOGRAPHIE

1. *de Lorenzi, Otto.* — « Combustion Engineering », 1st Edition - Combustion Engineering - Superheater, Inc., New York, 1949.
2. *Johnson, A.J. and Auth, G.H.* — « Fuels and Combustion Handbook », 1st Edition. - McGraw-Hill Book Co, Inc., New York, 1951.
3. *British Intelligence Objectives Sub-Committee.* — « Technical Report on Ruhr Coal Field » - Final Report N° 394, Vol. III, Appendix, N° 27 - Ministry of Fuel and Power, H. M. Stationery Office, London, 1947, 8 pp.

4. Coal Industry Joint Fuel Efficiency Committee. — « Utilization of Low-Grade Fuels » - Second progress report of Technical Panel I - The Mining Association of Great Britain, London, July 1945, 31 pp.
5. British Coal Utilization Research Association. — « Proceedings of a Conference on Problems in the Utilization of Small Coals » - London, 1944, 294 pp.
6. Arrowsmith, G.H. and Crawford, A. — « The Utilization of Low-Grade Coal for Pulverized-Fuel-Firing » - Conference on Pulverized Fuel, the Institute of Fuel, London, June 2-6, 1947, pp. 176-191.
7. Bennett, J.S. — « Firing Large Boilers with Spreader Stokers » - Proceedings of the Midwest Power Conference, Illinois Institute of Technology, Chicago, 1951, pp. 179-187.
8. Frick, C.H. — « Operating Experience with Anthracite in Central Power Stations » - Transactions of the Third Annual Anthracite Conference of Lehigh University, Bethlehem, Pa., 1940, pp. 169-180.
9. Fairmont Coal Bureau. — Reference Bulletin 10, New-York, July 1947, 8 pp.
10. Weiner, S. and Aslaksen, E. — « New 100.000-kW Steam Power Station at Harnes, Pas de Calais, France » - Combustion, Vol. 21, August 1949, pp. 36-42.
11. van Berckel, F.W. — « Emma Power Station of the Netherlands State Mines » - Combustion, Vol. 23, August 1951, pp. 34-43.
12. Kuljian, A.H. and Bonnes, F.X. — « Power for Palermo » - Power Engineering, Vol. 55, August 1951, pp. 76-8, 95-8, 120-21.
13. Mayer, J. — « The Combustion of Anthracite Duff in Pulverized Form » - Journal, Institute of Fuel, Vol. 11, 1938, pp. 305-43.
14. Hallman, R.L. — « Burning Anthracite in Power Plants » - Combustion, Vol. 20, July 1948, pp. 41-43.
15. Marks, C.H. — « Steam Plant Practice in Britain » - Power Engineering, Vol. 54, July 1950, pp. 92-96.
16. Jones, J.S. — « Some Observations on the Use of Low-Grade Fuels for Steam Raising » - The Institute of Fuel War Time Bulletin, February 1944, pp. 87-97.
17. Kirkman, P.D. — « The Use of Unfamiliar Fuels » - Institute of Fuel War Time Bulletin, June 1944, pp. 164-166.
18. MacDonald, E.J. — « The Influence of Coal Characteristics on the Performance of Stationary Boilers » - British Coal Utilization Research Association, Monthly Bulletin Vol. 15, 1951, pp. 353-362.
19. Patterson, W.S. — « Factors in Selection of Steam Generating Units » - Combustion, Vol. 19, March 1948, pp. 35-41.
20. Swain, P.W. — « Selecting Fuel for New Plants and Old » - Power, Vol. 92, December 1948, pp. 774-777.
21. Reed, J.B. — « The Fourth World Power Conference, London, July 1950 » - British Coal Utilization Research Association, Monthly Bulletin, Vol. 14, 1950, pp. 241-254.
22. Gilg, F.X. — « The Cyclone Furnace-Latest Thing in Coal Burning » - Power Generation, Vol. 54, April 1950, pp. 64-70.
23. Stone, V.L. and Wade, I.L. — « Operating Experiences with Cyclone-Fired Steam Generators » - American Society of Mechanical Engineers, Paper N° 51-A-119, Annual Meeting, November 25-30, 1951, 20 pp.
24. Drabelle, J.M. — « Burning Low-Grade Midwestern Coals on Spreader Stokers with Continuous Ash Discharge » - Transactions American Society of Mechanical Engineers, Vol. 69, 1947, pp. 203-212.
25. Hallman, C. — « Designing Stokers » - Heating and Ventilating, Vol. 41, July 1944, pp. 77-78.
26. Wignall, N. — « Mechanical Stokers » - The Heating and Ventilating Engineer, Vol. 24, February 1951, pp. 339-341.
27. Guthmann, K. — « Utilization of High-Ash Fuels » - Stahl und Eisen, Vol. 63, 1943, p. 304.
28. Muirhead, A.B. — « Development of Steam and Power in the Mining Industry » - Transactions Institution of Mining Engineers, Vol. 107, Part. 2, 1947, pp. 86-94.
29. Samuels, J.O. — « Flocculation and Flotation Principles in the Recovery of Low-Grade Fuels » - Institute of Fuel War Time Bulletin, February 1945, pp. 603-111.
30. Storrow, J.T. and Haslam, G. S., Slurry. — Colliery Engineering, Vol. 20, 1943, pp. 135-136, 169-174, 185-188.
31. Miles, W. — « Burning Slurry » - Colliery Engineering, Vol. 22, 1945, pp. 6-8.
32. Eastcott, A.R. — « Ten Years' Experience Burning Lignite and Discarded Slack Coal » - Power, Vol. 92, May 1948, pp. 276-279.
33. Combustion, « Burning Brown Coal on Stokers », Vol. 19, November 1947, pp. 47-48.
34. Colliery Engineering, « Mill Firing Brown Coal », Vol. 24, 1947, pp. 94-95.
35. Gilg, F.X. — « Burning Coke Breeze on a Chain Grate Stoker » - Blast Furnace and Steel Plant, Vol. 35, 1947, pp. 1252-1254, 1256, 1274.
36. Kiron, N.Y. — « The Utilization of Coke Breeze » - British Coal Utilization Research Association, Monthly Bulletin, Vol. 15, 1951, pp. 37-44.
37. Colliery Engineering, « Utilizing Low-Grade Fuels », Vol. 20, 1945, pp. 164-166, 168.
38. Gunz, W. — « A Suggested Solution to Burning High-Ash Coal » - Combustion, Vol. 21, February 1950, pp. 57-59.
39. Karthausser, F.B. — « Pulverized-Fuel Firing for Stationary Gas Turbines » - British Coal Utilization Research Association, Monthly Bulletin, Vol. 11, 1947, pp. 289-306.
40. Karthausser, F.B., Battcock, W.V. and Ross, F.F. — « The Coal-Fired Gas Turbine » - Journal, The Institute of Fuel, Vol. 21, 1948, pp. 58-72.
41. Weismantle, A.R. and Artsay, N. — « Fly-ash Erosion in Boilers » - Mechanical Engineering, Vol. 71, 1949, p. 946.
42. Stevens, W.D. — « Fly-Ash Erosion of Boiler Surface » - Mechanical Engineering, Vol. 71, 1949, p. 947.
43. Andrews, L.V. and Hawley, C.F. — « Fly-Ash Erosion in Boilers » - Mechanical Engineering, Vol. 71, 1949, p. 948.
44. Powell, E.M. — « Fly-Ash from Stokers » - Combustion, Vol. 21, November 1949, pp. 39-41.
45. Gladden, C.S. — « Cinder and Fly-Ash Factors when Burning Small Anthracite Coal on Traveling-Grate Stokers » - Transactions, American Society of Mechanical Engineers, Vol. 69, 1947, pp. 191-202.
46. Munzinger, O.A.F. — « Influences Affecting Slag Behavior » - Combustion, Vol. 19, March 1948, pp. 32-33.
47. Cohen, P. and Corey, R.C. — « Behavior of Ash in Pulverized-Coal-Fired Furnaces » - Combustion, Vol. 19, January 1948, pp. 33-40.
48. Murphy, P., Piper, J.D. and Schmansky, C.R. — « Fireside Deposits on Steam Generators Minimized Through Humidification of Combustion Air » - Transactions, American Society of Mechanical Engineers, Vol. 73, 1951, pp. 821-843.
49. Waitkus, J. — « Avoiding Deposits and Corrosion in Regenerative Type Air Preheaters » - Combustion, Vol. 14, April 1942, pp. 50-53.

50. Corbett, P.F. — «The Deleterious Effects of Sulfur in Fuels» - British Coal Utilization Research Association, Monthly Bulletin, Vol. 15, 1951, pp. 169-181.
  51. Thurlow, G.G. — «The Use of Preheated Air in Power Station Boilers» - British Coal Utilization Research Association Monthly Bulletin, Vol. 15, 1951, pp. 1-11.
  52. Mechanical Engineering, «Coal Pipe Line», Vol. 74, 1952, p. 250.
  53. Watson, J.M. — «Boiler Practice at Collieries» - Iron and Coal Trades Review, Vol. 1946, 1945, pp. 601-602.
  54. American Society for Testing Materials. — «Standard Specifications for Classification of Coals by Grade» - ASTM Designation D. 389-37, ASTM Standards, Part. 5, pp. 658-659.
  55. American Society for Testing Materials. — «Standard Specifications for Classification of Coals by Rank» ASTM Designation D. 388-38, ASTM Standards, 1949, Part. 5, 1949, pp. 652-657.
  56. American Society for Testing Materials. — «Tentative Method of Test for Grindability of Coal by the Hardgrove-Machine Method» - ASTM Designation D. 409-37T, ASTM Standards, 1949, Part. 5, pp. 620-623.
-