

MÉMOIRES

Etude sur le Chauffage direct

Rapport sur la recherche de l'économie
de charbon dans le chauffage des chaudières
et des fours à chauffage direct

INTRODUCTION

Par décision du Bureau, en date du 9 novembre 1919, il a été constitué au sein de l'Association belge de standardisation, une Commission spéciale des économies de combustible.

Ce sujet s'écarte, à vrai dire, de ceux qu'on a coutume de comprendre dans le domaine de la standardisation. Mais, outre que la recherche d'une méthode-type d'obtention du minimum de consommation de charbon est tout à fait conforme aux principes directeurs de la standardisation, le contact établi en vertu de l'organisation de l'A. B. S. entre les services techniques des administrations publiques, les groupements industriels et les associations d'ingénieurs, créait un milieu éminemment favorable à une étude compétente et autorisée de cette question et c'est ce qui a déterminé l'A. B. S. à lui faire place parmi ses travaux.

La Commission spéciale présidée par M. le Baron Forgeur, directeur de l'Office des questions industrielles au Ministère des Affaires économiques, s'est attaché comme secrétaire-rapporteur, M. Frédéric Smal, ancien ingénieur au Syndicat des Charbonnages liégeois, actuellement directeur-commercial de la Société anonyme des Charbonnages de Bonne-Espérance, Batterie et Violette à Liège.

Il a été immédiatement reconnu que la tâche la plus urgente consistait non pas à étudier et, le cas échéant, à préconiser l'adoption de procédés nouveaux de chauffage, mais bien à *aider les industriels à tirer un parti meilleur des installations existantes*. A son tour, ce problème s'est trouvé présenter deux aspects distincts, selon qu'il s'agissait, soit de l'exécution même du travail de la chauffe, soit de son contrôle.

Il fallait donc créer deux manuels : un pour le chauffeur, l'autre pour l'ingénieur.

En ce qui concerne le premier, la Commission a constaté immédiatement qu'il y avait été pourvu depuis longtemps par la publication du catéchisme des chauffeurs, dû à l'Association des Ingénieurs sortis de l'Ecole de Liège et dont la première édition remonte à 1867. Comme une nouvelle édition était précisément en préparation au moment où la Commission inaugurerait ses travaux, un contact, facilité par certaines relations personnelles, fut établi entre les deux organismes et la 9^e édition du Catéchisme put ainsi paraître en 1921, avec la mention du concours que l'A. B. S. y avait apporté (1).

Dans l'intervalle, la Commission avait jugé utile de présenter les traits essentiels des instructions contenues dans le Manuel sous une forme plus compacte, encore, et elle avait édité à cette fin une « Affiche portant conseils aux chauffeurs » et qui semble avoir reçu un accueil favorable.

Restait la question beaucoup plus difficile du guide à établir à l'usage des ingénieurs. Malgré l'existence de beaucoup d'ouvrages de valeur, aucun d'eux ne présentait, semble-t-il, les qualités voulues pour satisfaire au programme très net que s'était proposé la Commission et en vue duquel il importait d'ailleurs essentiellement qu'il fût tenu compte expressément de la nature toute spéciale des charbons belges. La nécessité fut donc reconnue d'établir une œuvre absolument nouvelle, s'appuyant sur l'expérience personnelle des membres de la Commission, complétée elle-même par les recherches expérimentales qu'il paraîtrait possible et utile d'instituer pour parfaire les données existantes.

Le rapport qui suit forme la première partie du travail ainsi conçu et au sujet duquel il reste à faire remarquer que, dans l'esprit de la Commission, il ne constitue pas une œuvre de standardisation au sens propre du mot, mais seulement une ébauche, destinée à recevoir plus tard les améliorations et additions que l'expérience aura suggérées. A cette fin, toutes observations auxquelles auront donné lieu la lecture ou la mise en pratique des recommandations qu'il contient seront reçues avec empressement au siège de l'A. B. S., 33, rue Ducale, à Bruxelles, et il en sera soigneusement tenu compte pour l'avenir.

C'est dans le même but et sous les mêmes réserves que le Bureau de l'A. B. S., réuni le 15 février 1922, a autorisé la publication du présent rapport.

(1) Voir *Ann. des Mines de Belgique*. T. XXII (année 1921), 3^e liv., p. 957.

PREMIÈRE PARTIE

Du Personnel et de la chaufferie

1. CHOIX ET EMPLOI DU PERSONNEL.

Les chauffeurs seront choisis de constitution robuste, sobres et, sur ce dernier point, ils devront faire l'objet d'une surveillance soutenue. Les tempéraments par trop lymphatiques, résistant d'ailleurs mal au feu, devront être éloignés, tandis qu'on retiendra, parmi les autres, les sujets ayant une bonne intelligence et surtout un caractère bien trempé. Ils devront, en effet, comprendre le fonctionnement des appareils de sûreté et agir avec calme et décision prompte en cas d'accident ou de menace de grave danger.

En ce qui regarde l'emploi du personnel, il conviendra de distinguer les *ouvriers accomplis*, des *manceuvres* ou *apprentis*.

Les ouvriers accomplis seront indispensables partout où un seul homme devra suffire à la tâche. Les apprentis et les manoeuvres ne se rencontreront que dans les chaufferies de moyenne et grande importance où ils seront *encadrés* par ouvriers accomplis qui en seront les guides.

D'une manière générale, il est désirable qu'aucun travail, étranger à la chauffe, ne soit confié au chauffeur pendant le chauffage. Cependant, dans le cas des petites consommations (moins de 200 kilogrammes de charbon par heure), le chauffeur pourra remplir également l'office de mécanicien, pour autant que le moteur soit immédiatement voisin de la chaufferie. Dès que la consommation totale atteindra 200 kilogrammes de charbon par heure, on ne devra plus confier au chauffeur d'autre tâche que celle de la conduite des feux et, dans le cas particulier de la production de la vapeur, de l'alimentation de la chaudière.

Lorsque la consommation totale atteindra 500 kilogrammes de charbon par heure, le chauffeur ne devra plus avoir d'autre travail que celui de la conduite des feux, étant même entendu qu'il disposera d'un aide pendant l'opération du nettoyage des feux, pour l'enlèvement des cendres. Il pourra continuer à assurer l'alimentation des chaudières, encore que dans certains cas, déterminés par la disposition des lieux et l'allure de marche, la création d'un poste spécial d'alimenteur soit indiqué.

2. AMÉNAGEMENT DE LA CHAUFFERIE.

En dehors des dispositions à envisager pour réduire au strict minimum les pertes de chaleur sensible par rayonnement, il faudra veiller à la protection des chauffeurs contre les intempéries, en même temps qu'aux mesures à prendre pour la plus grande facilité du travail et pour la retraite du personnel en cas d'accident.

Les parois extérieures en maçonnerie enveloppant les carnaux seront sinon doubles, tout au moins protégées par un toit complété d'avents mobiles, surtout si le voisinage immédiat de la chaufferie est découvert et propice à l'action des vents pluvieux. Le mieux sera de loger l'installation dans un bâtiment couvert, spécial, comprenant une aire de travail dégagée à l'avant de chaque foyer. Cette aire de travail aura au moins 3^m,50 de largeur, non compris le chemin de circulation des wagonnets, fussent-ils monorails, ou des brouettes, pour le transport du combustible. Cela revient à dire que l'amenée du charbon ne devra pas gêner les chauffeurs.

Dans les chaufferies où la vitesse de combustion est élevée et où la continuité du travail intensif doit être assurée, il conviendra de disposer, à l'avant des fourneaux, une galerie souterraine ventilée dans laquelle les cendres et les escarbilles seront précipitées lors du nettoyage des feux,

par des ouvertures pratiquées dans le sol à l'aplomb des plaques mortes. De cette façon, la manœuvre pour l'enlèvement des résidus, après le nettoyage, s'effectuera dans la galerie sans encombrer les chauffeurs (fig. 1).

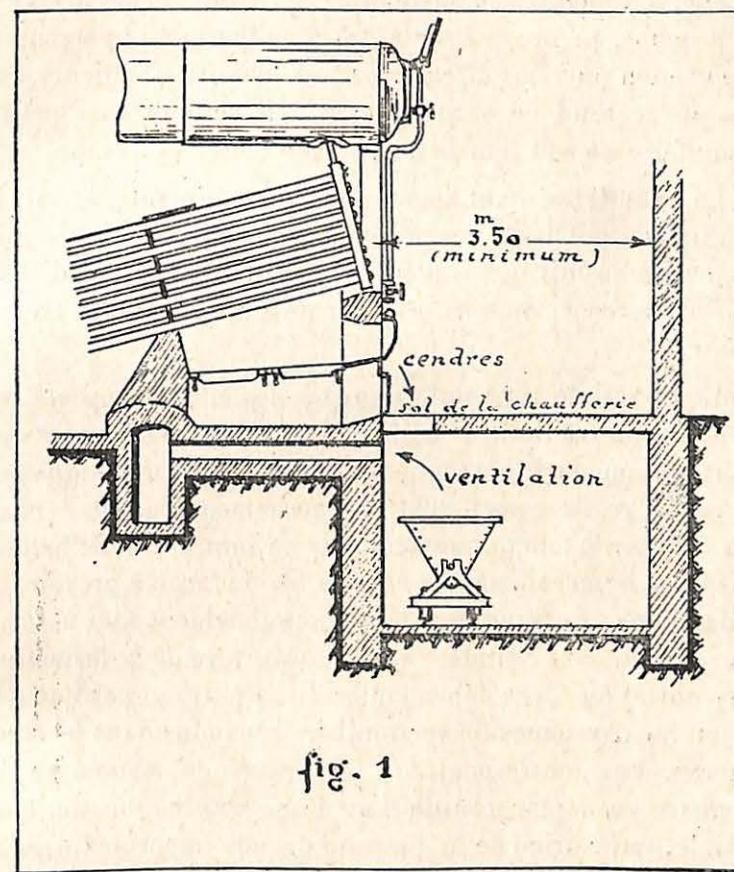


fig. 1

La chaufferie sera parfaitement éclairée, tant de nuit que de jour, et particulièrement aux endroits où sont fixés les appareils de contrôle. Il sera nécessaire de prévoir un éclairage de secours pour la nuit, indépendant de l'éclairage électrique de l'usine, celui-ci étant vulnérable. Des lampes-

tempête ordinaires toujours en bon état de fonctionnement suffiront largement comme éclairage de secours.

Ni le contour, ni la partie supérieure des massifs ne seront encombrés ; la circulation et l'accès aux appareils de sûreté, d'alimentation ou de prise de vapeur seront aisés en tout temps, encore que seuls, les chauffeurs et le personnel d'entretien puissent circuler sur les massifs. D'ailleurs, en ce qui regarde ce dernier point, on veillera à ce que la chaufferie ne soit jamais un passage obligé de l'usine.

La chaufferie étant logée dans un bâtiment spécial, il faudra, en prévision des accidents, ménager deux ou plusieurs sorties distinctes pour la retraite du personnel. Les portes devront toujours s'ouvrir de l'intérieur vers l'extérieur.

Le travail de la chauffe exigeant des efforts musculaires répétés, on veillera à faciliter toutes les manœuvres qui doivent concourir notamment à la conduite économique des feux. Le registre sera donc soigneusement équilibré pour en faciliter le fonctionnement et il ne sera pas difficile d'en disposer le mécanisme de commande de façon à prévoir les dilatations. Lorsque son bon fonctionnement sera assuré, on pourra, sans crainte, rendre l'ouverture ou la fermeture des portes du foyer dépendantes de sa position par l'un des nombreux systèmes de verrouillage répandus dans le commerce. Les contre-poids ou les leviers de manœuvre du registre se déplaceront le long d'une graduation toujours lisible, indicatrice de la position de cet important organe dans la gargouille d'évacuation des fumées.

Une conduite d'eau pour le mouillage du charbon règnera dans la chaufferie et il y aura, greffé sur cette conduite, au moins un robinet distinct pour deux chauffeurs voisins.

Enfin, il conviendra de réserver un petit local à l'usage exclusif du personnel de la chaufferie. Ce local servira de

réfectoire, éventuellement de salle de repos et sera munie, dans la mesure du nécessaire, de tables, sièges et armoires. En même temps, ce local pourra comprendre un dispositif simple pour permettre les soins de toilette, à moins que l'usine ne dispose de bains-douches à l'usage des chauffeurs.

Moyennant ces précautions, on pourra exiger la plus grande propreté dans la chaufferie et le meilleur entretien des appareils de sécurité et de contrôle.

Convient-il de dire, en terminant cette introduction, qu'il y a toujours intérêt à parfaire l'éducation des chauffeurs en les encourageant à l'étude, ou tout au moins à la lecture d'opuscules, tel que le *Catéchisme des chauffeurs*, publié par l'Association des Ingénieurs de Liège et adopté par l'A. B. S. pour sa propagande (1).

(1) Voir *Annales des Mines de Belgique*. Tome XXII. (Année 1921), 3^e liv., page 957.

DEUXIÈME PARTIE

De la combustion au point de vue chimique

CHAPITRE PREMIER

Rappel des considérations théoriques.

3. GÉNÉRALITÉS. — DÉFINITION DU CHAUFFAGE DIRECT SUR GRILLE.

Cette étude traite du *Chauffage direct sur grille*.

Le chauffage direct sur grille s'obtient par l'emploi de combustibles solides, brûlés en un temps, aussi complètement que possible dans le voisinage immédiat de la grille.

Le processus complet des réactions avec l'oxygène est donc réalisé dans un laboratoire unique appelé *chambre de combustion*, ce qui justifie la dénomination technologique de *combustion en un temps*. Cette dénomination s'applique également au traitement des combustibles gazeux et des combustibles liquides ou solides pulvérisés, avec cette différence que pour ces derniers il y a absence de grille.

Au contraire, lorsque les combustibles solides sont distillés ou gazéifiés dans des gazogènes, ils subissent dans ces appareils une première combustion imparfaite en donnant des gaz combustibles dont la combustion s'achève dans un laboratoire distinct de la chambre de gazéification : on dit, dans ces conditions, que la combustion s'opère *en deux temps*.

Dans le chauffage direct sur grille, on assure un appel d'air permanent, à travers la grille et la charge, afin de permettre la continuité des réactions qui s'opèrent dans la masse du combustible en ignition. Il est bien entendu que ces réactions sont précédées de distillations et de gazéifications dont il ne peut être fait une analyse précise. Pour cette raison, et contrairement à certaines théories, on ne cherchera pas ici à assimiler les phénomènes du chauffage direct sur grille au chauffage en deux temps. Le résultat

final des réactions au foyer sera donc envisagé comme découlant d'une seule opération chimique, cette manière de voir restant conforme à la conception industrielle de la combustion en un temps.

La combustion économique exige deux conditions :

- 1° Une oxydation complète des éléments du combustible ;
- 2° L'obtention de ce résultat avec la production de la plus petite masse possible de fumées.

La combustion sera complète s'il n'y a pas manque d'air ; elle permettra la plus grande récupération possible de la chaleur sensible, s'il n'y a pas excès nuisible d'air.

Le contrôle chimique des fumées permet seul de mesurer l'importance du manque ou de l'excès nuisible d'air. Or, il faut bien le reconnaître, ce contrôle tel qu'il est effectué est, le plus souvent encore, purement passif, et ne fait que constater des états d'équilibre chimique au foyer, répondant ou non aux conditions de l'économie.

La présente étude tente de préciser l'objet des recherches dans le contrôle, et pour en faciliter la lecture, il est nécessaire de regrouper quelques éléments théoriques essentiels.

4. COMPOSITION DES COMBUSTIBLES ET DE L'AIR COMBURANT.

a) COMBUSTIBLES. — Les combustibles *belges* pour grilles sont des charbons de qualité dite « *demi-grasse* » dont les propriétés d'agglutination conviennent parfaitement à l'emploi des charbons menus ou poussières lavés.

La composition chimique *élémentaire* de ces charbons, cendres et eau hygroscopique déduites, se tient approximativement dans les limites suivantes :

Carbone (y compris le soufre)	85 à 93 %
Hydrogène	3,5 à 5 %
Oxygène et azote.	4 à 9 %

La teneur en matières volatiles obtenues par distillation en vase clos, suivant la méthode de Muck ou encore du double creuset, oscille entre 11 et 18 %. Le symbole chimique de ces matières volatiles peut être représenté par $C^m H^n$; celles de ces matières volatiles dégagées au foyer se composent le plus souvent de méthane ($C H^4$).

Le charbon est toujours accompagné de cendres et d'eau. Le charbon pratiquement sec retient de l'eau hygroscopique; en plus de cette eau, les catégories lavées sont imprégnées d'eau provenant des appareils de lavage. Pour le bon travail des charges, une certaine humidification est nécessaire et l'on sera même amené, pour cette raison, à incorporer, à pied d'œuvre, de l'eau de mouillage au charbon traité, si celui-ci ne tient pas bien sur la pelle.

b) AIR COMBURANT. — L'air atmosphérique est un mélange complexe de gaz et de vapeurs; il suffira, pour le présent objet, de le supposer composé d'oxygène, d'azote et de vapeur d'eau.

Pour l'établissement des bilans thermiques, il est nécessaire de connaître le degré hygrométrique de l'air.

Les déterminations hygrométriques de l'air se font au moyen du psychromètre d'August.

L'emploi du psychromètre conduit aux déterminations suivantes :

Soient, H m/m de mercure, la pression atmosphérique;
 t degrés centigrades, la température moyenne de l'air pendant l'essai;
 t' degrés centigrades, le point de rosée;
 $0^{kg},805$, le poids du mètre cube de vapeur à 760 m/m de mercure et à 0 degré centigrade;
 h m/m de mercure, la tension maximum de la vapeur d'eau contenue dans l'air atmosphérique à t' degré et renseignée dans les tables.

On aura successivement,

Poids du mètre cube de vapeur d'eau à H m/m de mercure et à t° :

$$0,805 \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{H}{760} \text{ kilogramme.}$$

Volume de la vapeur d'eau contenue dans 1 mètre cube d'air d'expérience :

$$\frac{h'}{760} \text{ mètre cube.}$$

Poids de la vapeur d'eau contenue dans 1 mètre cube d'air :

$$0,805 \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{H}{760} \cdot \frac{h'}{760} \text{ kilogramme.}$$

Appelons ce poids g_2 kg., $g_2 = 0,00038 \frac{H \cdot h'}{273 + t}$ kilogramme.

Le volume de la vapeur d'eau contenue dans l'air humide sera en pour cent :

$$g_1 = \frac{100 h'}{760} = 0,13 h'$$

En ce qui regarde plus spécialement la composition volumétrique de l'air sec, il sera admis, conformément aux plus récentes mesures, que l'air sec contient 20,944 p. c. d'oxygène et 79,056 p. c. d'azote.

Si on représente ces nombres respectivement par d_1 et e_1 , on aura la relation $\frac{e_1}{d_1} = 3,775$ ou $4,775 d_1 = 100$, et, en tenant compte de la vapeur d'eau : $4,773 d_1 + g_1 = 100$ ou $d_1 < 100$, mais généralement > 95 .

5. PROCESSUS DES RÉACTIONS SELON LES PROPORTIONS RELATIVES DU COMBUSTIBLE ET DE L'AIR COMBURANT EN PRÉSENCE.

Ce chapitre a pour but de donner un aperçu rapide de la composition qualitative des fumées dans les divers modes d'emploi des combustibles et de montrer que les proportions relatives du comburant et du combustible sont déterminantes de cette composition.

Les réactions vives qui caractérisent la combustion industrielle, s'opèrent à haute température. Le combustible doit donc être porté à sa température d'inflammation pour réagir rapidement avec l'oxygène de l'air.

Les charbons « crus » peuvent être portés à haute température, en *vase clos*, c'est-à-dire à l'abri de l'air, ou bien en contact avec l'oxygène de l'air.

Portés à haute température en vase clos, les charbons *distillent* tandis que maintenus au contact de l'air, ils subissent la *gazéification* et la *combustion*.

a) **DISTILLATION.** — Le phénomène spécial de la distillation en vase clos donne lieu au départ des matières volatiles du charbon et à la formation du coke. Ce phénomène réalise la *carbonisation* et donne des fumées contenant des hydrocarbures, de l'hydrogène et de la vapeur d'eau, accompagnés de petites quantités d'ammoniaque.

b) **GAZÉIFICATION.** — L'introduction d'une certaine quantité d'air, généralement humide, dans la chambre de distillation provoque, en plus de la distillation, la combustion imparfaite du coke et la production d'oxyde de carbone et d'hydrogène sous l'action de la vapeur d'eau. Pendant ce temps, une partie des matières volatiles peut subir la combustion complète avec production de CO_2 et de vapeur d'eau. Il faut admettre, d'autre part, que la présence simultanée de CO_2 et de carbone en ignition est peu stable aux températures déjà élevées de la gazéification.

Théoriquement donc, les fumées contiendront des hydrocarbures, de l'hydrogène, de l'oxyde de carbone, de la vapeur d'eau et de l'azote provenant principalement de l'air comburant.

La gazéification pourra être poursuivie complètement sans modification de la composition qualitative des fumées, qui sont celles que, théoriquement, on cherche à obtenir dans les gazogènes industriels.

c) **COMBUSTION.** — En augmentant la masse d'air par kilogramme de combustible, on entrera progressivement dans la phase des combustions complètes : l'hydrogène brûlera en vapeur d'eau, les hydrocarbures brûleront en vapeur d'eau et en CO_2 , tandis que l'oxyde de carbone brûlera en CO_2 .

A un moment donné, la composition qualitative des fumées pourra donc être la suivante : vapeur d'eau, hydrocarbures, hydrogène, oxyde de carbone, CO_2 et azote.

L'accroissement continu de la masse d'air conduira à la *combustion théorique complète*, appelée aussi *combustion normale*, dont les fumées ne comprendront que la vapeur d'eau, du CO_2 et de l'azote. Dans cet état, les fumées ne possèdent plus de pouvoir calorifique et sont celles que l'on doit tenter d'obtenir dans le chauffage direct ou dans les fours à gaz.

Les conditions habituelles de la pratique obligent à envisager la combustion complète avec excès d'air, excès nécessaire jusqu'à un certain point et dont la présence est expliquée par les lois de l'équilibre chimique. On sera donc en présence de la combustion complète avec excès d'air qui donnera des fumées comprenant de la vapeur d'eau, de l'oxygène, du CO_2 et de l'azote.

Très généralement d'ailleurs, on pourra rencontrer dans les fumées tous les constituants gazeux, combustibles ou

neutres, dont il vient d'être parlé, et c'est pour cette raison qu'il convient d'envisager ce dernier cas, tout à fait général, dans l'établissement de la composition volumétrique des fumées.

La recherche de l'expression de la composition volumétrique des fumées est en effet nécessaire, car la connaissance de la composition qualitative des fumées ne peut suffire, à l'examen complet de la question de l'utilisation économique du charbon. On est contraint de rechercher cette expression pour permettre le contrôle des analyses des fumées, et aussi pour établir le bilan calorifique d'une opération de chauffage.

6. NOTATIONS. CONSTANTES. RÉACTIONS CHIMIQUES.

Avant de procéder à l'établissement de la composition volumétrique des fumées, il est utile de signaler la notation admise dans les calculs, la grandeur des constantes et les principales réactions qui peuvent avoir lieu dans le foyer.

a) NOTATIONS. — L'analyse chimique élémentaire donne la composition gravimétrique suivante du combustible sec :

- α % de carbone (y compris le soufre)
- β » hydrogène
- γ » oxygène
- δ » azote
- ε » cendres

avec la condition, $\alpha + \beta + \gamma + \delta + \varepsilon = 100$.

On représentera par g_1 grammes la quantité d'eau hygroskopique et de mouillage accompagnant un kilogramme de combustible sec.

b) CONSTANTES. — La composition gravimétrique de l'air sec sera, en tenant compte des constantes physiques publiées par le Bureau des Longitudes (annuaire 1912) :

- 23,15 % d'oxygène
- 76,85 % d'azote.

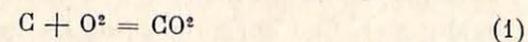
Outre l'oxygène et l'azote dans la proportion indiquée ci-dessus, chaque mètre cube d'air contiendra une certaine quantité de vapeur d'eau hygrométrique que l'on désignera par g_2 grammes.

Poids moléculaires des gaz contenus dans les fumées. — Les poids moléculaires ci-dessous sont rapportés au poids moléculaire, 32 grammes, de l'oxygène. Le volume moléculaire des gaz est 22,40 litres (détermination de D. Berthelot. — Annuaire du Bureau de Longitudes 1912).

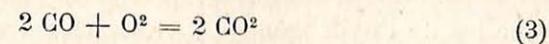
Gaz et vapeurs	Densités absolues à 760 m/m de mercure et 0° centigrade.	Poids moléculaires
CO ²	1,977	44
CO	1,250	28
H ² O	0,805	18,02
CH ⁴	0,717	16,03
O ²	1,429	32
N ²	1,257	28,02
H ²	0,090	2,02

c) RÉACTIONS CHIMIQUES. — I. Carbone. — Les principales réactions du carbone à envisager sont celles provoquées par l'oxygène de l'air, par la vapeur d'eau et par l'acide carbonique. Il faut encore envisager l'action de ces corps sur l'oxyde de carbone et l'acide carbonique.

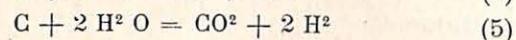
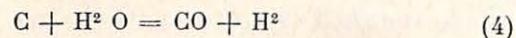
L'oxygène réagit de deux façons distinctes sur le carbone en ignition :



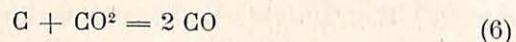
S'unissant à l'oxyde de carbone, il donne :



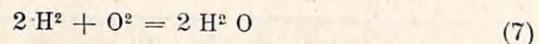
La vapeur d'eau agit sur le carbone en ignition de deux manières :



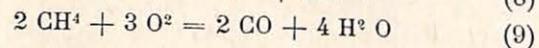
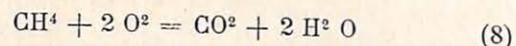
L'acide carbonique s'unit au carbone en ignition en donnant :



II. **Hydrogène.** — La réaction principale de l'hydrogène est :



III. **Méthane.** (CH^4). — Les réactions de l'oxygène et du méthane sont les suivantes :



Ce sont là quelques réactions essentielles, parmi d'autres plus complexes et par cela même moins bien connues, qui ont lieu dans un foyer et qui sont régies par les lois de l'équilibre chimique. L'état physique des réactifs, le rapport de leurs masses, la température des laboratoires, celles de la combustion, etc., sont les facteurs qui déterminent l'importance de chacune de ces réactions. Cette question, particulièrement familière à M. H. Le Chatelier a été développée dans ses divers ouvrages sur la combustion.

7. ÉTABLISSEMENT DE LA COMPOSITION VOLUMÉTRIQUE DES FUMÉES. GAS GÉNÉRAL.

a) **DISPERSION DES ÉLÉMENTS COMBUSTIBLES.** — Pour établir par une formule générale la composition quantitative des fumées, il convient de tenir compte de toutes les réactions possibles du carbone, réactions qui peuvent se produire simultanément dans le foyer, de même que de celles de l'hydrogène et de tous les autres éléments.

Après l'introduction dans le foyer d'un kilogramme de charbon sec, les 10α grammes de carbone se répartissent en :

$10 \alpha_1$ grammes brûlant en anhydride carbonique,

$10 \alpha_2$ » » en oxyde de carbone,

$10 \alpha_3$ » distillant en méthane,

$10 \alpha_4$ » s'échappant à l'état libre, soit que cette quantité accompagne les escarbilles et les cendres, ou qu'elle est entraînée dans les carnaux sous forme de suies.

On posera, $10 \alpha = 10 (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)$ grammes.

L'hydrogène total du combustible — 10β grammes — se divisera en $10 \beta_1$ grammes brûlant en vapeur d'eau.

$10 \beta_2$ grammes distillant en méthane, ce qui donne subsidiairement la relation $3 \beta_2 = \alpha_3$.

$10 \beta_3$ grammes s'échappant sous forme d'hydrogène, on posera

$$10 \beta = 10 (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3) = 10 (\beta_1 + \frac{\alpha_3}{3} + \beta_3)$$

L'oxygène γ % du combustible pèsera 10γ grammes par kilogramme de combustible sec et interviendra dans les réactions au même titre que l'oxygène de l'air.

Le poids d'azote correspondant à δ %, 10δ grammes, s'ajoutera à l'azote de l'air dont le rôle est passif au point de vue des réactions, tout autant, pourra-t-on admettre, que les 10ε grammes de cendres.

On n'envisagera pas ici l'éventualité des dissociations de l'anhydride carbonique ni de l'oxyde de carbone, les températures régnant dans la chambre de combustion n'étant pas assez élevées pour que les premières dissociations soient sensibles, ni assez basses pour que celles de l'oxyde de carbone apparaissent, en dehors du cas, exclus ici, des gazogènes.

Pour être suffisamment complet, il est indispensable de signaler que les fumées contiendront la vapeur d'eau issue

de l'eau hygroscopique ou de mouillage du charbon, de même que tout ou partie de celle de soufflage ou accompagnant l'air atmosphérique, lequel n'est jamais théoriquement sec.

Partie de cette vapeur agira sur le carbone en ignition en donnant du gaz à l'eau.

En appelant, x , la fraction du volume d'air en excès accompagnant le volume d'air sec N_0 mètres cubes qui est entré en réaction par kilogramme de combustible, il sera entraîné dans le foyer un poids de vapeur d'eau, représenté par l'expression

$$[g_1 + N_0(1+x)g_2] \text{ ou } g_1 + Ng_2 \text{ grammes.}$$

Ce poids se divisera en deux parties dont l'une passera dans les gaz à l'état de vapeur d'eau et dont l'autre se décomposera en hydrogène (1), que l'on retrouvera dans les fumées, et en oxygène qui se sera uni plus ou moins complètement au carbone.

Il en résulte évidemment que les $10(\alpha_1 + \alpha_2)$ grammes de carbone se décomposeront eux-mêmes en deux parties.

$10(\alpha'_1 + \alpha'_2)$ grammes qui réagiront directement avec l'oxygène de l'air et $10(\alpha''_1 + \alpha''_2)$ grammes qui réagiront avec la vapeur d'eau.

Le poids d'hydrogène, $10\beta_4$ grammes libéré par ces dernières réactions sera représenté par

$$10\beta_4 = \left(\frac{10}{3} \alpha''_1 + \frac{5}{3} \alpha''_2 \right) \text{ grammes}$$

tandis que le poids d'hydrogène, $10\beta_5$ grammes, se trouvant dans la vapeur d'eau qui échappe à toute réaction, sera représenté par

$$10\beta_5 = \left[\frac{g_1 + N(1+x)g_2}{9} - \left(\frac{10}{3} \alpha''_1 + \frac{5}{3} \alpha''_2 \right) \right] \text{ grammes.}$$

(1) Par la réaction du gaz à l'eau.

b) *Calculs.* — Tenant compte de ce qui précède, il est aisé d'exprimer le poids d'oxygène consommé, A kilogrammes, par kilogramme de charbon sec. Ce poids s'écrira :

$A = (1+x) \times (0,0267 \alpha'_1 + 0,0133 \alpha'_2 + 0,0793 \beta_1 - 0,01 \gamma)$ kilogrammes d'où l'on tire le volume d'air sec normal, N mètres cubes, en divisant ce poids par 0,2993 représentant, en kilogramme, le poids d'oxygène contenu dans un mètre cube d'air sec normal :

$$N = \frac{(1+x) \times (0,0267 \alpha'_1 + 0,0133 \alpha'_2 + 0,0793 \beta_1 - 0,01 \gamma)}{0,2993}$$

mètres cubes d'air sec normal, c'est-à-dire, à 760 millimètres de mercure et à zéro degré Celsius.

De même, la *composition volumétrique des fumées (cas général)* découlera de l'établissement du volume normal, c'est-à-dire supposé à 760 millimètres de mercure et à zéro degré Celsius, de chaque constituant de la fumée.

On aura, par kilogramme de combustible sec :

Volume normal de CO^2 :

$$\frac{0,0367}{1,977} \alpha_1 \text{ ou } 0,01855 \alpha_1 \text{ mètres cubes} \quad (1)$$

Volume normal de CO :

$$\frac{0,0233}{1,250} \alpha_2 \text{ ou } 0,01867 \alpha_2 \text{ mètres cubes} \quad (2)$$

Volume normal de H^2O :

$$\frac{0,0893}{0,805} (\beta_1 + \beta_5) \text{ ou } 0,11107 (\beta_1 + \beta_5) \text{ mètres cubes} \quad (3)$$

Volume normal de CH^4 :

$$\frac{0,01336}{0,717} \alpha_3 \text{ ou } 0,01863 \alpha_3 \text{ mètres cubes} \quad (4)$$

Volume normal de H^2 :

$$\frac{0,01}{0,09} (\beta_3 + \beta_4) \text{ ou } 0,11111 (\beta_3 + \beta_4) \text{ mètres cubes} \quad (5)$$

Volume de O² :

$$\frac{0,20944 x \times (0,0267 a'_1 + 0,0133 a'_2 + 0,0793 \beta_1 - 0,01 \gamma)}{0,2993}$$

ou $x \times \{0,00931 (2 a'_1 + a'_2) + 0,05551 \beta_1 - 0,007 \gamma\} \text{ m}^3$ (6)

Volume normal de N² :

$$\frac{0,79056 (1+x) \times (0,0267 a'_1 + 0,0133 a'_2 + 0,0793 \beta_1 - 0,01 \gamma)}{0,2993} + \frac{0,01}{1,257}$$

ou $[(1+x) + \{0,03516 (2 a'_1 + a'_2) + 0,20963 \beta_1 - 0,02641 \gamma\} + 0,008 \delta] \text{ mètres cubes}$ (7)

En représentant par Σ la somme des grandeurs (1) à (7), la composition volumétrique centésimale des fumées sera :

$$\text{CO}^2 \dots \dots a \% = 1,855 \frac{\alpha_1}{\Sigma}$$

$$\text{CO} \dots \dots b \% = 1,867 \frac{\alpha_2}{\Sigma}$$

$$\text{H}^2 \dots \dots c \% = 11,111 \frac{\beta_3 + \beta_4}{\Sigma}$$

$$\text{O}^2 \dots \dots d \% = \frac{x}{\Sigma} \times \{0,931 (2 a'_1 + a'_2) + 5,551 \beta_1 - 0,7 \gamma\}$$

$$\text{N}^2 \dots \dots e \% = \frac{1+x}{\Sigma} \times \{3,516 (2 a'_1 + a'_2) + 20,963 \beta_1 - 2,641 \gamma\} + \frac{0,8 \delta}{\Sigma}$$

$$\text{CH}^4 \dots \dots f \% = 1,863 \frac{\alpha_3}{\Sigma}$$

$$\text{H}^2\text{O} \dots \dots g \% = 11,107 \frac{\beta_1 + \beta_5}{\Sigma}$$

8. RELATION OBLIGÉE ENTRE LES VOLUMES DES CONSTITUANTS DE LA FUMÉE. CONTRÔLE DES ANALYSES.

a) GÉNÉRALITÉS. — En partant de l'analyse volumétrique des fumées, ce qui revient à prendre le problème à rebours (1), on peut déterminer les diverses portions du carbone total du combustible qui ont réagi successivement en CO², CO et CH⁴, le carbone résiduel, c'est-à-dire, qui a échappé à toutes réactions, ayant fait l'objet d'une détermination spéciale. Même remarque pour l'hydrogène.

Il est donc essentiel d'être assuré de l'exactitude des résultats de l'analyse des fumées, cette analyse étant par elle-même délicate en raison de l'extrême instabilité des volumes gazeux sous l'influence des variations, même minimes, des températures.

Le présent chapitre a pour but d'indiquer un moyen de contrôle des analyses. Ce moyen consiste dans la vérification d'une certaine relation qui doit exister entre les volumes des constituants de la fumée.

Cette relation est signalée par M. J. Seigle dans le « Bulletin et Comptes-rendus mensuels de la Société de l'industrie minérale (5^e série, t. XIV, 1^{re} livr., 1918) ».

Le chauffage direct, en un temps, a été défini plus haut comme étant celui qui résultait d'une série de réactions chimiques s'effectuant dans un seul laboratoire. On admettra que ces réactions se produisent dans un certain ordre et à la suite ou en concordance avec les phénomènes de distillation qui se passent sur la grille.

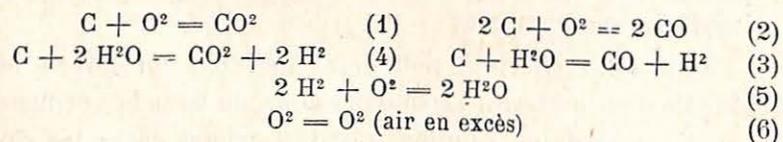
Le charbon frais introduit dans le foyer distille abondamment en laissant sur la grille du coke en ignition qui est enveloppé tout d'abord par l'air frais. On rencontrera donc en premier lieu les réactions du carbone du coke avec l'air

(1) Ce sera d'ailleurs l'unique façon de l'aborder dans les applications industrielles.

et la vapeur d'eau que cet air contient. On pourra admettre que les matières volatiles, constituées par les hydrocarbures, n'entrent en contact avec l'air (qui n'a pas réagi mais qui a traversé la couche de coke sur la grille par des cheminées), que dans la chambre de combustion.

Il est donc logique, en dehors des raisons de simplicité, de rechercher la relation qui existe entre les constituants de la fumée résultant de la combustion du coke d'abord, et ensuite, de voir les modifications apportées dans ces relations par la combustion des hydrocarbures.

b) COMBUSTION DU COKE. — On envisagera donc en premier lieu le cas du carbone, lequel donnera lieu aux réactions suivantes :



En rapportant ces relations à l'unité molécule-gramme, on pourra admettre qu'elles interviennent simultanément chacune un nombre de fois représenté par x, y, z, t, u et v .

La proportion de chacun des constituants de la fumée est d'autre part représentée par une fraction du volume total Σ' des fumées :

a_1 pour l'anhydride carbonique	(CO^2)
b_1 pour l'oxyde de carbone	(CO)
c_1 pour l'hydrogène	(H^2)
d_1 pour l'oxygène	(O^2)
e_1 pour l'azote	(N^2)
g_1 pour la vapeur d'eau	(H^2O)

On a la relation de condition :

$$a_1 + b_1 + c_1 + d_1 + e_1 + g_1 = \frac{\Sigma'}{22,4} = V$$

Σ' étant exprimé en litres et 22,4 litres représentant le volume de la molécule-gramme, V exprimera le nombre

total de volumes moléculaires entrant dans l'opération envisagée.

On pourra donc écrire :

$$\begin{array}{l} a_1 = x + t \\ b_1 = 2y + z \\ c_1 = z + 2t - 2u \\ d_1 = v \\ g_1 = 2u \\ e_1 = 3,775(x + y + u + v) \end{array}$$

En remplaçant dans la valeur e_1 , x, y, u et v par leur expression

$$\begin{array}{l} x = a_1 - t \\ y = \frac{b_1 - z}{2} \\ u = \frac{g_1}{2} \\ v = d_1 \end{array}$$

il viendra,

$$a_1 + b_1 + c_1 + d_1 + 3,775(a_1 - t + \frac{b_1 - z}{2} + \frac{g_1}{2} + d_1) + g_1 = V$$

ou

$$4,775(a_1 + d_1) + 2,8875 b_1 + c_1 + 2,8875 g_1 - 1,8875(2t + z) = V$$

or

$$2t + z = c_1 + g_1$$

donc,

$$4,775(a_1 + d_1) + 2,8875 b_1 - 0,8875 c_1 + g_1 = V \quad (A)$$

Cette relation fondamentale (A) exprime que si les analyses de gaz sont bien faites, les teneurs dans les fumées de la combustion du coke, de CO^2 , CO , H^2 , O^2 et H^2O en volumes pour cent vérifieront la relation :

$$4,775(a_1 + d_1) + 2,8875 b_1 - 0,8875 c_1 + g_1 = 100$$

c) INTERVENTION DES HYDROCARBURES. — La relation fondamentale (A) sera modifiée par la combustion complète ou incomplète des hydrocarbures dans la chambre de combustion.

Au nombre de volumes V provenant de la combustion du coke d'un kilogramme de charbon sec, correspondra un nombre de volumes v de méthane qui se répanâra dans la chambre de combustion.

Dans le cas particulier des charbons demi-gras belges, on peut décomposer un kilogramme de charbon pur, en envisageant la plus grande présence possible de méthane, comme il suit :

800 grammes de carbone libre,
160 grammes de méthane,
40 grammes d'oxygène.

On établit aisément que dans le cas de la combustion tout à fait incomplète du carbone libre, cas de la production du gaz à l'eau, le volume du méthane représenterait au maximum 7% des fumées produites, tandis que dans le cas de la combustion complète de ce carbone libre, ce même volume ne dépasserait pas 3,5% du volume total des fumées.

En effet, le premier cas donne $800/12 = 66,7$ volumes moléculaires d'oxyde de carbone et 66,7 volumes d'hydrogène, soit 133,3 volumes moléculaires pour 10 volumes de CH^4 .

Le cas de la combustion complète du carbone libre, donne $800/12 = 66,7$ volumes d'acide carbonique et près de 250 volumes d'azote, soit 300 volumes de fumées initiales pour 10 volumes de CH^4 .

Il en résulte une modification de la relation (A) qui devra s'écrire dans le cas du dosage du méthane ; f représentant la proportion de ce gaz :

$$4,775 (a + d) + 2,8875 b - 0,8875 c + f + g = 100$$

ou, si ce dosage ne s'effectue pas :

$$100 > 4,775 (a + d) + 2,8875 b - 0,8875 c + g > 93$$

Ce qui précède se rapporte au cas de la distillation du méthane sans qu'il y ait combustion de ce gaz, mais lorsque le méthane brûle dans la chambre de combustion, la modification de la relation est plus profonde, à cause, soit de la disparition de l'oxygène qui était en excès dans les fumées initiales, soit de l'augmentation d'azote provenant de l'air comburant ayant pénétré dans la chambre de combustion par des cheminées.

Pour apprécier l'importance des modifications apportées ainsi dans la relation (A), il convient de distinguer la combustion incomplète de la combustion complète du méthane, sans s'arrêter toutefois à l'action de la vapeur d'eau sur ce gaz.

α) Dans le cas de la combustion incomplète du coke.

La combustion incomplète ou complète du méthane se fera au moyen d'air ayant pénétré par des cheminées dans la chambre de combustion.

1° Combustion incomplète du méthane suivant la formule.



L'accroissement du volume d'oxyde de carbone sera au plus égal au volume maximum de CH^4 soit 0,075 V ; le volume d'oxygène correspondant sera 0,1125 V entraînant 0,429 V d'azote ; la vapeur d'eau se sera accrue de 0,15 V .

Il viendra donc dans les fumées initiales :

$$a_1 + b_1 + c_1 + d_1 + e_1 + g_1 = V$$

et dans les fumées après la combustion incomplète du méthane,

$$a_1 + (b_1 + 0,075) + c_1 + d_1 + (e_1 + 0,429 V) + (g_1 + 0,15 V) = 1,654 V$$

L'équation fondamentale :

$$4,775 (a_1 + d_1) + 2,8875 b_1 - 0,8875 c_1 + g_1 = V,$$

deviendra,

$$4,775 (a_1 + d_1) + 2,8875 (b_1 + 0,075 V) - 0,8875 c_1 + g_1 + 0,15 V = \sigma \times 1,654 V$$

$$\text{ou } \sigma = \frac{1,3666}{1,654} = 0,826$$

En désignant donc :

$$a_1 \text{ par } a$$

$$b_1 + 0,075 V \text{ par } b$$

$$c_1 \text{ par } c$$

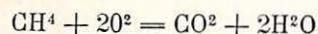
$$d_1 \text{ par } d$$

$$g_1 + 0,15 V \text{ par } g$$

On aura, si $1,654 V = 100$

$$100 > 4,775 (a + d) + 2,8875 b - 0,8875 c + g > 82,6$$

2° Dans le cas de la combustion complète du méthane suivant la formule.



On obtient de la même manière :

$$100 > 4,775 (a + d) + 2,8875 b - 0,8875 c + g > 83$$

β) Dans le cas de la combustion complète du coke.

1° Combustion incomplète du méthane.

L'air comburant nécessaire pénétrant par des cheminées, on obtient la relation :

$$100 > 4,775 (a + d) + 2,8875 b - 0,8875 c + g > 89$$

Au contraire, si l'oxygène se trouve en excès dans les fumées elles-mêmes, on doit poser dans ce cas :

$$a_1 + (b_1 + 0,035 V) + c_1 + (d_1 - 0,0525 V) + e_1 + g_1 + 0,07 V = 1,0525 V$$

$$\text{et } 4,775 (a_1 + d_1 - 0,0525 V) + 2,8875 (b_1 + 0,035 V) - 0,8875 c_1 + g_1 + 0,07 V = \sigma \times 1,0525 V$$

d'où $\sigma = 0,875$ et la relation fondamentale devient :

$$100 > 4,775 (a + d) + 2,8875 b - 0,8875 c + g > 87,5,$$

si $1,0525 V = 100$

2° Combustion complète du méthane.

Les calculs conduits de la même façon donnent les relations suivantes :

$$100 > 4,775 (a + d) + 2,8875 b - 0,8875 c + g > 89,5$$

dans le cas où l'air nécessaire à la combustion vient s'ajouter aux fumées, et

$$100 > 4,775 (a + d) + 2,8875 b - 0,8875 c + g > 86,4$$

dans le cas où l'oxygène en excès dans les fumées initiales suffit à la combustion du méthane.

Généralement, on se borne à la détermination expérimentale de l'acide carbonique, de l'oxyde de carbone et de l'oxygène. On retient la vapeur d'eau lors de la prise des échantillons de gaz et, notamment dans le cas du chauffage direct, on ne détermine pas l'hydrogène. D'ailleurs la solution de chlorure cuivreux acide, employée pour l'absorption de CO, dissout également certains gaz hydrogénés des fumées. Dans le cas des combustions complètes, le terme g est plus élevé que c et l'on peut poser sans crainte

$$100 > 4,775 (a + d) + 2,8875 b > 84$$

que l'on écrira

$$100 > 5 (a + d) + 3 b > 84 \quad (\text{B})$$

pour tenir compte de la solubilité des gaz dans l'eau des appareils de mesure et aussi de l'éventualité de combustions incomplètes importantes.

Cette relation simple doit servir au contrôle des analyses. Les charbons demi-gras belges vérifient très approximativement la relation

$$5 (a + d) + 3 b = 92$$

9. EXEMPLE D'APPLICATION DES PRINCIPES THÉORIQUES QUI PRÉCÈDENT
AU CAS D'UN COMBUSTIBLE DE COMPOSITION DONNÉE

Pour fixer les idées sur l'exposé qui précède, on a réuni dans un tableau les résultats calculés détaillant la composition des fumées obtenues par le traitement d'un même charbon de qualité demi-grasse tenant 18 p. c. de matières volatiles et 9 p. c. cendres, dans les cas :

- 1° de la distillation en vase clos ;
- 2° De la gazéification partielle ;
- 3° De la gazéification totale ;
- 4° De la combustion incomplète ;
- 5° De la combustion théorique complète ou normale ;
- 6° De la combustion complète avec 50 % d'air en excès ;
- 7° De la combustion complète avec 100 % d'air en excès.

DONNÉES : a) L'analyse élémentaire du charbon sec est la suivante :

Carbone fixe	82 % ou α
Hydrogène.	4 » β
Oxygène	4 » γ
Azote	1 » δ
Cendres.	9 » ε
Vérification.	100 %

b) On sait qu'en ce qui regarde le méthane, on a la relation :

$$\alpha_3 = 3 \beta_2$$

c) La teneur supposée de 18 % de matières volatiles permet d'écrire :

$$\alpha_3 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \gamma + \delta = 18$$

d) Le carbone résiduel α_1 a été fixé à 2 % lorsqu'il n'a pas été déterminable par le caractère de l'opération elle-même, comme dans le cas de la carbonisation et de la gazéification partielle ;

e) On a également par définition :

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha'_1 + \alpha'_2 + \alpha''_2 + \alpha_3 + \alpha_4$$

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3$$

HYPOTHÈSE : a) On a supposé le charbon à l'état sec ;

b) On a supposé l'air comburant saturé d'humidité à une température initiale de 17° C. environ, de façon que cet air contenait 15 grammes de vapeur d'eau par mètre cube. Le poids total d'eau entraînée dans le foyer a donc été obtenu par l'expression $N_0 (1 + x) g_2$, où $g_2 = 15$ grammes.

c) La vapeur d'eau hygrométrique a été supposée réagir avec le carbone fixe en ignition, dans les cas particuliers de la gazéification et de la combustion incomplète, et donner du gaz à l'eau dans la mesure de toute la masse de cette vapeur d'eau hygrométrique. Dans ces cas particuliers, on a établi aisément que le nombre représentant α''_2 en % était celui exprimant N_0 en mètres cubes, c'est-à-dire qu'on a pu écrire :

$$\alpha''_2 = N_0, \text{ pour } g_2 = 15 \text{ grammes.}$$

En raison de cette même hypothèse l'hydrogène résultant de la décomposition de la vapeur d'eau hygrométrique était obtenu par la relation

$$\beta_4 = \frac{N}{6}$$

d) On a déterminé N_0 par la formule établie plus haut, dans laquelle on a posé, pour plus de simplicité, dans les opérations où l'air était absent ou en quantité insuffisante :

$$0,0793 \beta_1 = 0,01 \gamma$$

e) Dans la phase de la gazéification partielle, on a étudié le cas particulier de $\alpha'_2 = \alpha_4$, tandis que dans la combustion incomplète, on a étudié le cas de

$$\alpha'_2 = \alpha_1, \beta_2 = \frac{\beta}{2} \text{ et } \beta_3 = \frac{\beta}{16}$$

Formule de contrôle. — La formule de contrôle rigoureuse a été appliquée, de même que la formule approchée 1° dans le cas où CO^2 n'est pas dissout dans l'eau des appareils de mesure et 2° dans le cas où cette dissolution a atteint 5 %.

TABLEAU DES RÉSULTATS CALCULÉS DE LA COMPOSITION VOLUMÉTRIQUE DES FUMÉES OBTENUES DANS LE TRAITEMENT D'UN CHARBON CHAUFFÉ A L'ABRI DE L'AIR OU EN CONTACT AVEC CELUI-CI.

Notations	Observations	Distil. I	Gazéification		Combustions			
			Partielle II	Totale III	incomplète IV	normale V	+50% air VI	+100% air VII
α	α ₁ (CO ₂)	0	0	0	34,5	80	80	80
	α ₁ '	0	0	0	0	0	0	0
	α ₂ (CO)	0	35,6	68	34,5	0	0	0
	α ₂ '	0	1,58	3,02	4,94	0	0	0
β	α ₃ (CH ₄)	9	9	9	6	0	0	0
	α ₄	73	35,6	2	2	2	2	2
	β ₁ (H ₂ O)	0,5	0,5	0,5	1,75	4	4	4
	β ₂ (CH ₄)	3	3	3	2	0	0	0
β	β ₃ (H ₂)	0,5	0,5	0,5	0,25	0	0	0
	β ₄ (H ₂)	0	0,3	0,51	0,83	0	0	0
γ	oxygène du charbon.	4	4	4	4	4	4	4
δ	azote du charbon	1	1	1	1	1	1	1
ε	cendres du charbon	9	9	9	9	9	9	9
x	fraction de l'air en excès	0	0	0	0	0,5	1,0	
N m ³	volume d'air frais	0	1,582	3,023	4,941	8,063	12,095	16,126
<i>Composition volumétrique des fumées (volumes absolus à 0° C. et à 760 m/m de mercure)</i>								
CO ₂	Vol. normal absolu en m ³	0	0	0	0,640	1,485	1,485	1,485
CO	»	0	0,693	1,323	0,735	0	0	0
H ₂	»	0,056	0,090	0,112	0,120	0	0	0
O ₂	»	0	0	0	0	0,844	1,688	
N ₂	»	0,008	1,259	2,398	3,908	6,366	9,545	12,724
CH ₄	»	0,168	0,168	0,168	0,112	0	0	0
H ₂ O	»	0,056	0,056	0,056	0,196	0,596	0,668	0,743
Σ	Volume en m ³ par kg. de charbon sec	0,288	2,266	4,057	5,711	8,447	12,542	16,640
<i>Composition volumétrique centésimale</i>								
a	CO ₂ en %	0	0	0	11,2	17,5	11,8	8,9
b	CO en %	0	30,6	32,6	12,9	0	0	0
c	H ₂ en %	19,5	3,9	2,7	2,0	0	0	0
d	O ₂ en %	0	0	0	0	0	6,7	10,1
e	N ₂ en %	2,8	55,7	59,2	68,5	75,5	76,2	76,6
f	CH ₄ en %	58,2	7,4	4,1	2,0	0	0	0
g	H ₂ O en %	19,5	2,4	1,4	3,4	7,0	5,3	4,4
σ rigoureux			pas d'applicat.	96,9	95,1	91,5	94,1	95,6
σ approché	sans dissolution de CO ₂			97,8	94,7	87,5	92,5	95,0
σ approché	avec dissolut. de 5% CO ₂			97,8	92,0	83,2	89,3	92,3

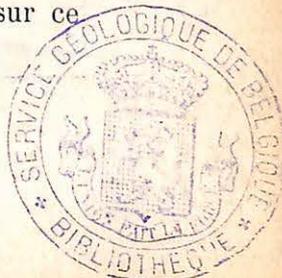
GRAPHIQUE DES RÉSULTATS. — Les résultats théoriques obtenus ont été traduits en graphique (fig. 2) pour les rendre plus saisissables et mieux permettre leur rapprochement avec ceux directement observés expérimentalement.

Valeurs des résultats calculés. — Les résultats pratiques, qu'il s'agisse de distillation, de gazéification ou de combustion, s'éloignent plus ou moins sensiblement de ceux qui ont été établis ci-dessus. Les lois de l'équilibre chimique, dont il n'a pu être tenu compte dans les exemples calculés, régissent en effet les phénomènes de distillation et de combustion ; elles introduisent dans la fumée, une variété de gaz et de vapeurs bien différente de celle qu'on a fixé *a priori* en tenant compte de la nature de l'opération (distillation, gazéification, combustion incomplète ou parfaite).

D'ailleurs, les phénomènes de la dissociation, non de l'acide carbonique ni de la vapeur d'eau, mais de l'oxyde de carbone interviennent à des températures relativement basses ; d'autre part quoi qu'on fasse, dans le chauffage direct, il y a toujours, même dans la phase des combustions complètes, des hydrocarbures imbrûlés qui échappent aux réactions, sans compter que la formation de de la suie, dans les chambres de combustion, apporte une autre cause de perturbations dans les résultats.

On n'approche de la combustion normale que dans le chauffage en deux temps (gazéification dans les gazogènes, puis combustion par l'air secondaire) tandis qu'on s'en éloigne sensiblement dans le chauffage direct. Dans ce dernier cas, il faut toujours un important excès d'air pour atteindre la combustion pratiquement complète et il y a lieu de s'inquiéter de cette exigence.

Sans que des études, en ce qui concerne particulièrement le charbon, aient été méthodiquement entreprises sur ce



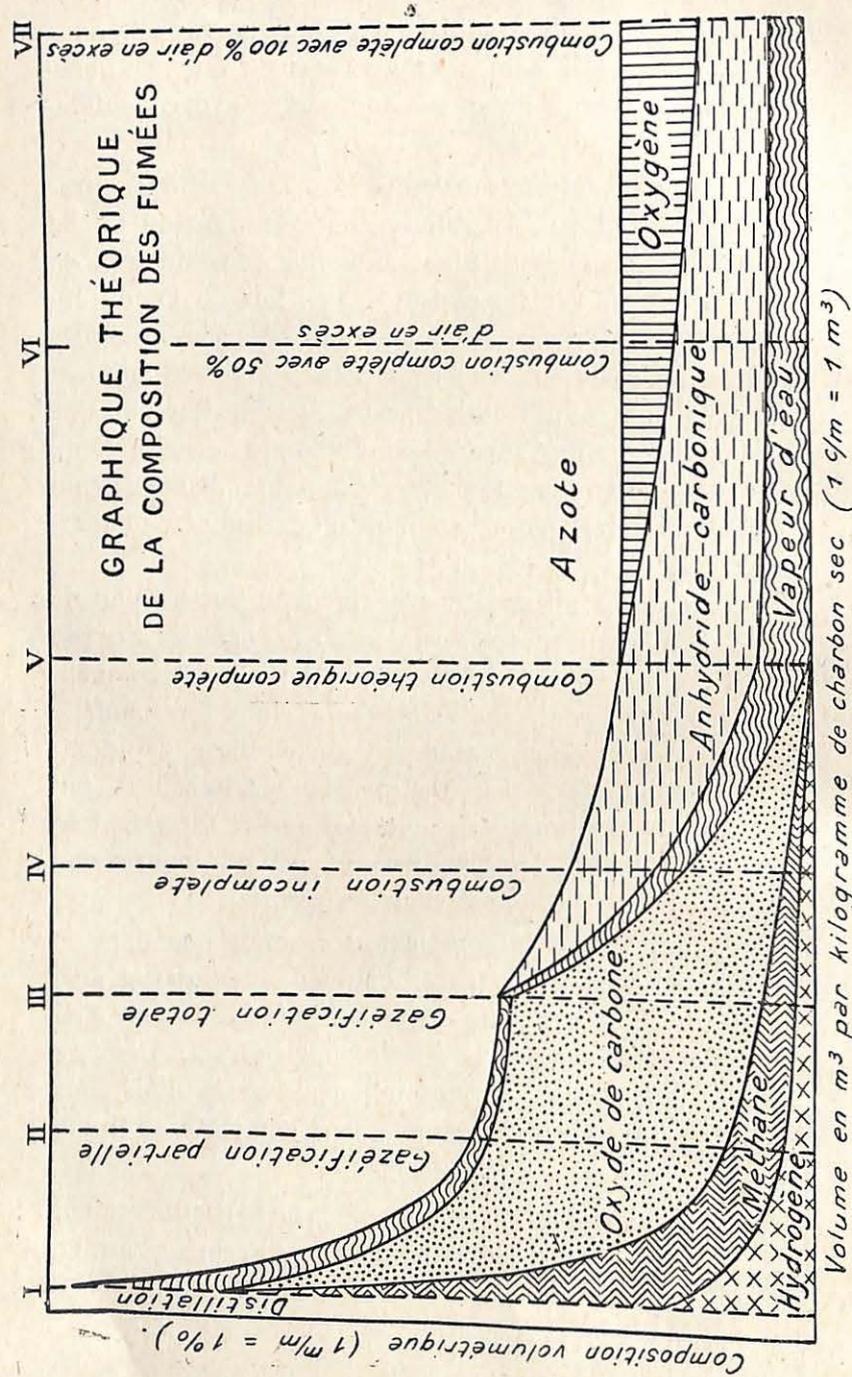


FIG. 2.

point, aux appareils industriels mêmes, on peut expliquer les combustions avec excès d'air en s'appuyant sur le résultat des recherches expérimentales de MM. Pelet et Jomini de l'Université de Lausanne sur les *limites de combustibilité*.

CHAPITRE II.

De la limite de combustibilité des combustibles.

10. RECHERCHE DES CONDITIONS DANS LESQUELLES LA COMBUSTION NE PEUT PLUS SE PRODUIRE. — Expériences de MM. Pelet et Jomini.

Les travaux de MM. Pelet et Jomini sur cette question ont été publiés dans la 734^e livraison (février 1903) du *Moniteur Scientifique* du docteur Quesneville.

Voici, suivi pas à pas, le résumé succinct de ce travail, tout à fait intéressant par le caractère objectif de ses résultats. Ces derniers ont été obtenus et présentés un peu en dehors des considérations de la mécanique chimique qui devient aujourd'hui un peu plus familière qu'alors.

Les auteurs se sont proposés de rechercher les conditions dans lesquelles la combustion ne peut plus se produire.

Ils rappellent les expériences de H. Davy qui, le premier, montra les différences de combustibilité.

Davy introduisit une bougie allumée dans une bouteille et constata qu'elle s'éteignait avant d'avoir épuisé tout l'oxygène contenu. Dans l'atmosphère ainsi appauvrie d'oxygène, il fit brûler du soufre pendant un certain temps ; le soufre s'éteignit avant d'avoir épuisé tout l'oxygène de la bouteille. Après le soufre, un jet d'hydrogène put être maintenu en combustion et, enfin, après l'hydrogène, le phosphore.

Chaque fois, l'extinction se produisait faute d'oxygène en quantité suffisante et non faute de combustible.

Les auteurs remarquent que dans n'importe quel foyer, il existe toujours dans les fumées une certaine proportion d'oxygène de l'air qui ne prend pas part à la réaction et qu'il est rare que la quantité d'anhydride carbonique formé dépasse 14 %.

MM. Pelet et Jomini se sont demandés à *quel moment se produira l'extinction d'une flamme brûlant dans un volume d'air limité*, et de quelles causes dépend cette extinction. Ils ont donc appelé *limite de combustibilité* le moment où un combustible quelconque cesse de brûler, l'extinction étant produite, par défaut d'oxygène, sans qu'il y ait absence complète d'oxygène, et non par manque de combustible.

Des expériences ont été faites en effectuant diverses combustions sous cloches de capacités différentes; les gaz ont été dosés à l'état sec, mais comme certains combustibles produisent de la vapeur d'eau, qui ne figure pas dans les analyses, de même que de l'anhydride sulfureux très soluble dans des appareils de dosage, tous les résultats ont été donnés par le calcul de l'*oxygène disparu* (O. D.) et de l'*oxygène restant* (O. R.) en % du volume de l'air qui est intervenu.

EXEMPLE : Combustion de l'alcool; les gaz dosés ont révélé 6,9 % CO²; 10,2 % O²; 82,9 % azote.

On pose

$$\frac{79,2}{\text{azote dosé}} = \frac{x}{\text{oxygène dosé}}$$

d'où

$$x = \frac{79,2 \times 10,2}{82,9} = 9,75 \%$$

représentant la proportion d'oxygène restant, réduite à 79,2 % d'azote, c'est-à-dire l'oxygène non brûlé pour

100 volumes d'air avant la combustion. La différence : $20,8 - x = 11,05 \%$ représentera l'oxygène disparu (O.D.) réduit à 79,2 % d'azote ou à 100 volumes d'air primitivement contenus dans la cloche.

(MM. Pelet et Jomini ont admis que l'air contenait 79,2 % vol. Azote et 20,8 % vol. Oxygène.)

La valeur de l'oxygène disparu correspond ainsi, non seulement à la quantité de gaz carbonique dosé, mais aussi à l'oxygène qui a contribué à former l'eau produite par les combustibles hydrogénés ou respectivement l'anhydride sulfureux formé par les combustibles soufrés.

Quoique les auteurs n'aient pas exprimé par une grandeur mesurable la limite de combustibilité, la distinction qu'il ont faite de l'oxygène disparu et de l'oxygène restant permet d'établir cette grandeur.

Au moment où le combustible cesse de brûler, le système chimique (combustible; comburant et azote; produits des combustions antérieures) est en équilibre.

Cet état d'équilibre peut être défini arithmétiquement par le rapport des volumes d'oxygène disparu d'une part, et de l'oxygène total de l'air sec d'autre part.

En conséquence, on pourra mesurer la limite de combustibilité par le rapport :

$$L_c = \frac{20,80 - d'}{20,80} = \frac{\text{O. D.}}{20,80}$$

d' représentant en % la teneur directement observée des gaz brûlés en oxygène.

On observera ici que les plus récentes mesures de la composition de l'air, effectuées par lord Raleigh, ont donné 79,056 % d'azote et 20,944 % d'oxygène. On conservera dans ce paragraphe la composition de l'air adoptée par MM. Pelet et Jomini, pour maintenir les chiffres cités dans leur rapport. Cette légère discordance n'infirmera en rien les conclusions de ce chapitre.

RÉSULTATS. — *Un même combustible possède des limites de combustibilité différentes suivant les conditions dans lesquelles il est brûlé.*

Nature du combustible et conditions de l'expérience : combustion dans une cloche de 7 litres	CO ² %	O ² %	Azote %	O. D. %	O. R. %	L _c
1. Bougies de 27 m/m de diam.	5,7	13,3	81,0	7,70	13,10	0,37
2. Bougies de 12 m/m de diam.	3,4	15,3	81,3	5,78	15,02	0,28
Gaz d'éclairage						
3. Bec papillon (flamme large de 9 cm.)	5,5	6,4	88,1	15,00	5,80	0,72
4. Brûleur Bunsen (flamme de 12 cm.)	6,1	6,6	87,3	14,77	6,03	0,71
Alcool à 95°, mouillé ensuite de proportions croissantes d'eau, brûlant sous une cloche de 7 litres dans un godet de 5 cm. de diamètre						
5. Alcool pur 95°	6,9	10,2	82,9	10,98	9,82	0,53
6. Alcool pur plus 20 % d'eau	5,6	12,2	82,2	8,96	11,84	0,43
7. Alcool pur plus 40 % d'eau	4,9	13,1	82,0	8,03	12,77	0,39
8. Alcool pur plus 60 % d'eau	3,3	15,2	81,5	5,92	14,88	0,28

De ces essais, il ressort que, pour un même corps, la limite de combustibilité s'élève légèrement à mesure que la flamme grandit. Or, la grandeur de la flamme est proportionnelle à la quantité de combustible brûlé dans l'unité de temps. Les expériences sur l'alcool mouillé sont caractéristiques à cet égard. Cela provient de ce que l'eau diminue la volatilisation de l'alcool, et ainsi la proportion de combustible pénétrant pendant chaque seconde dans la flamme.

On peut donc dire, en première conclusion, que *la limite de combustibilité est plus élevée lorsque la quantité*

de vapeurs combustibles introduite dans la flamme, pendant l'unité de temps, est plus grande.

Causes de l'extinction des flammes.

En brûlant de l'hydrogène en flamme de 5 c/m sous une cloche de 12 litres, les expérimentateurs ont constaté que, grâce à la surpression produite dans la cloche par la dilatation initiale des gaz, la flamme, *au commencement*, diminuait tout de suite du tiers de sa longueur primitive, puis s'élargissait et s'évasait tout en continuant à diminuer lentement de longueur pendant la combustion.

Cette expérience marquait donc d'une façon frappante la diminution de combustibilité de l'hydrogène au fur et à mesure de la disparition de l'oxygène. Lorsque l'oxygène restant n'était plus que de 1,8 %, la flamme d'hydrogène s'éteignait, ce corps ayant atteint, dans les conditions de l'expérience, sa limite de combustibilité.

Influence de la température des flammes.

Des recherches sur la température des flammes ont montré que les combustibles dont les flammes atteignent *la température la plus élevée sont ceux-là dont la limite de combustibilité est aussi la plus élevée.*

Ces expériences ont aussi révélé que *la limite de combustibilité s'élève si la température de l'air ambiant augmente.*

Cette conclusion est consécutive aux résultats d'expériences faites dans des espaces clos de différents volumes, la limite de combustibilité s'abaissant quand le volume de l'espace clos augmente. Les résultats du tableau ci-dessous l'indiquent en même temps qu'ils montrent que les valeurs d'oxygène disparu diminuent lentement dans les grands volumes.

Combustibles	Volumes						
	0,7 l.	7 l.	60 l.	1250 l.	18 m ³	air libre	
Bougies O. D. % . . .	8,77	6,68	4,5	4,19	—	—	
Soufre O. D. % . . .	11,10	8,42	7,88	4,26	3,90	—	
Benzène	O. D. % . . .	13,29	12,28	7,06	5,50	—	5,20
	Lc	0,64	0,59	0,34	0,265	—	0,25
Alcool O. D. % . . .	13,33	10,98	7,71	7,13	—	—	

Le graphique de l'O. D. par rapport au volume de la chambre de combustion serait donc, dans chaque cas, asymptotique à une horizontale (fig. 3).

Cette horizontale aurait pour ordonnée la limite de combustibilité du combustible brûlé dans un volume infini, c'est-à-dire à l'air libre. La limite de combustibilité serait constante, à égalité de température du lieu où s'effectue la combustion, quelle que soit la grandeur de la flamme.

Des investigations poussées sur la marche des chauffebains ont montré que, lorsque le débit du gaz de chauffage (en l'occurrence du gaz d'éclairage) était manifestement trop fort eu égard à la masse d'air disponible, l'analyse des gaz révélait l'existence d'anhydride carbonique, d'oxyde de carbone et d'acétylène, dans les fumées, à l'exclusion absolue d'oxygène. Ceci est la preuve tirée de la pratique, que la limite de combustibilité dépend principalement de la quantité de combustible gazeux introduite dans la flamme pendant l'unité de temps.

Conclusions.

On est donc amené à admettre que pour un combustible quelconque, solide ou liquide, brûlant dans des conditions déterminées, la limite de combustibilité est fonction,

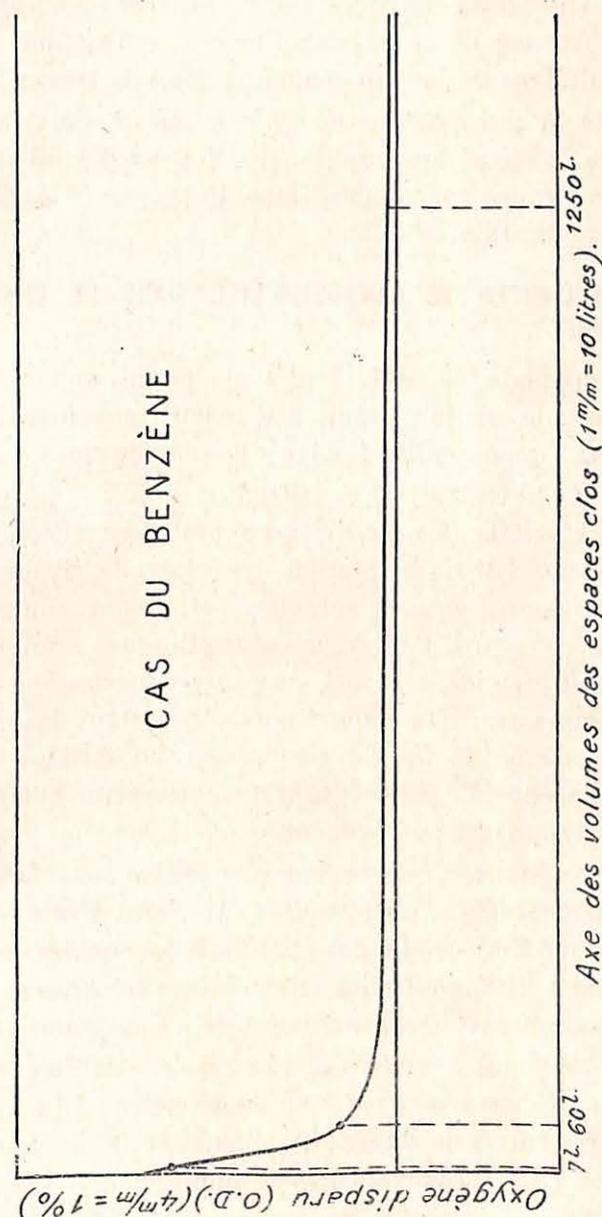


FIG. 3.

1° de la nature du corps, et par suite de la température de la flamme et de la quantité de combustible gazeux introduit dans la flamme pendant l'unité de temps ;

2° de la température de l'air ambiant. En définitive, c'est de la température seule que dépend l'équilibre chimique entre les gaz combustibles, l'oxygène et les produits de la combustion.

11. LES LIMITES DE COMBUSTIBILITÉ DANS LE CHAUFFAGE DIRECT.

La méthode de MM. Pellet et Jomini, appliquée aux charbons de grille conduit aux mêmes conclusions ; elle explique l'impossibilité d'obtenir des combustions normales dans le chauffage direct sur grille.

Les résultats des expériences pratiques effectuées en 1909 et en 1910 à la Station des essais du Syndicat des Charbonnages Liégeois, actuellement dissous, sont significatifs à cet égard. Les expériences pratiques dont il vient d'être fait mention sont des essais de vaporisation dont le programme avait été élaboré par le Secrétaire-Rapporteur de la Commission des Economies de Combustibles, en vue de rechercher la possibilité d'un classement commercial des charbonnages pour vapeur.

Ces expériences concordent pleinement avec celles des expérimentateurs suisses et elles autorisent à voir, dans la combustion industrielle des charbons, les mêmes relations de cause à effet, que celles observées au sujet des multiples matières combustibles expérimentées à Lausanne.

La chaudière ayant servi aux essais était du type Lancashire à tubes foyers de 0^m,80 de diamètre ; elle possédait 75 mètres carrés de surface de chauffe et 2^m²,40 de surface de grille. Ces tubes foyers étaient munis chacun de six tubes Galloway. Le rapport de la surface de chauffe à la surface de grille était de 31,25.

La chaudière était timbrée à 6 atmosphères absolues. La grille composée de lames en acier battu de 10^m/^m d'épaisseur et écartées d'axe en axe de 17^m/^m, avait 35,7 % de section utile.

Le tirage était naturel ou forcé (par ventilateur aspirant) selon l'allure de la combustion.

Dans ces essais, les combustions avaient évidemment lieu à l'air libre en raison de la permanence de l'afflux de l'air frais dans les chambres de la combustion. Sans commettre d'erreurs sensibles au point de vue des conclusions — celles-ci ne découlant pas de la valeur absolue des résultats — on a pu admettre que les fumées, à l'analyse, étaient sèches. Dans cette hypothèse, la méthode de MM. Pelet et Jomini a été appliquée pour la détermination de l'oxygène restant (O. R.) et de l'oxygène disparu (O. D.).

Deux séries d'essais sont présentées, relatives, la première, à des modes différents d'expérimentation d'un même charbon, la seconde, à l'expérimentation d'un charbon de qualité invariable, mais ayant des teneurs en cendres différentes dans chaque essai.

Première série. — Comprend deux essais effectués sur un même charbon à des vitesses ou allures de combustion différentes (opérateur M. Perot, Ingénieur).

Ce charbon d'essai est une fine lavée demi-grasse tenant 13,2 % matières volatiles et 8,1 % de cendres.

Les allures de combustion choisies ont été de 95,8 et 53 kilogrammes par heure et m² de grille. Les résultats sont réunis dans le tableau ci-dessous :

Première série. — Influence de l'allure de la combustion sur la limite de combustibilité										
	Allure par heure et m ² de grille	Analyse des gaz secs en %			O. D. en %	O. R. en %	L _c	Oxygène ayant réagi avec H ₂	Excès d'air sec	Température au foyer (calculée)
		CO ²	O ²	N ²						
Essai I . .	95,8	11,40	7,50	81,10	13,42	7,33	0,65	2,02	0,55	1495°
Essai II . .	53	10,05	9,30	80,65	11,62	9,13	0,56	1,57	0,78	1340°

On constate que la limite de combustibilité est plus élevée dans la combustion rapide que dans la combustion lente ; la température aux foyers a été beaucoup plus élevée également. D'autre part, il n'est pas besoin de démontrer que la quantité de combustible gazeux introduite dans la flamme pendant l'unité de temps a été plus importante dans le premier cas que dans le second, puisque l'excès d'air sec a été moindre. Les conclusions de MM. Pelet et Jomini se vérifient donc entièrement ici.

Deuxième série. — Comprend trois essais relatifs à la différence de volatilité propre du combustible due à la présence d'une proportion croissante de cendres. Le charbon d'essai est une fine lavée demi-grasse dont le charbon pur tenait 14,8 % matières volatiles. Les trois échantillons essayés tiennent 10, 20 et 30 % de cendres ; ces teneurs ont été obtenues artificiellement en mélangeant, à la fine lavée, une proportion convenable des schistes de lavage provenant du charbon même. La présence des cendres avait pour effet de réduire la teneur en matières volatiles qui atteignait théoriquement 14 % dans l'échantillon à 10 % de cendres, 13,2 % dans l'échantillon à 20 % et 12,4 % dans celui à 30 % de cendres.

En réalité, les teneurs en matières volatiles ne dimi-

naient pas aussi rapidement à cause des gaz provenant de la calcination des cendres.

Les allures ont été choisies de telle manière que la production totale de chaleur utile par heure fût la même dans les trois cas.

La vitesse de combustion croissait donc avec la teneur en cendres. (Opérateur : M. Bouffart, ingénieur.)

Deuxième série. — Influence de la volatilité du combustible rendue variable par la différenciation des teneurs en cendres											
	Teneur en cendres %	Allure par heure et m ² de grille	Analyse des gaz secs en %			O. D. en %	O. R. en %	L _c	Oxygène ayant réagi avec H ₂	Excès d'air sec	Température au foyer (calculée)
			CO ²	O ²	N ²						
Essai I . .	10	46,5	10,5	8,6	80,9	12,38	8,42	0,60	1,88	0,68	1420°
Essai II . .	20	63,3	9,1	10,1	80,8	10,90	9,90	0,52	1,80	0,91	1300°
Essai III . .	30	95,4	7,8	12,0	80,2	8,95	11,85	0,43	1,15	1,32	1100°

Les conclusions de MM. Pelet et Jomini se confirment donc avec une grande exactitude, et l'on est autorisé à voir, pour chaque combustible, une limite de combustibilité dépendante des conditions d'emploi de ce combustible, ainsi que de sa pureté.

Les foyers chauds, tapissés de produits réfractaires, seront favorables aux hautes températures, elles-mêmes propices au relèvement de la limite de combustibilité ; tandis que, de leur côté, les combustibles les plus purs auront une grande combustibilité en raison de leur volatilité élevée. Cette dernière remarque est d'autant mieux assise que dans les essais de la deuxième série, malgré un accroissement de l'allure de la combustion, les combustibles les plus cendreuse ont révélé une combustibilité moindre. Si l'on avait maintenu l'allure constante dans les trois essais,

le désavantage de l'impureté du combustible eut donc été plus grand encore.

12. CONCLUSION.

Sans s'appesantir ici davantage sur la question de l'économie, on doit conclure qu'au point de vue de la conduite des feux, lorsque l'on traite un combustible invariable, dans des conditions de marche déterminées, à une installation elle-même invariable, on se heurte nécessairement à la limite de combustibilité du combustible employé. Cette propriété se traduira par une teneur en anhydride carbonique (CO^2) que l'on ne pourra dépasser quoi qu'on fasse.

La combustion complète ne sera obtenue qu'à cette limite de combustibilité avec telle teneur en CO^2 que comportent les facteurs en cause. En deçà du volume d'air pratiquement nécessaire, on n'aura que la combustion incomplète, même avec un excès sur la quantité d'air théorique, et au delà de ce volume, on entraînera dans le foyer un super-excès d'air réellement nuisible. C'est ce super-excès qu'il faut à tout prix éviter, tout en évitant également la combustion incomplète.

Le graphique de la composition des fumées, étudié au chapitre I^{er}, § 9, construit en tenant compte de la limite de combustibilité (fig. 4), supposée atteinte lorsqu'il y a 50 % d'air en excès, montre une continuité plus grande dans la variation de la composition des fumées que celles du graphique théorique (voir fig. 2). Quel que soit le phénomène : distillation, gazéification ou combustion, on trouvera en présence, en dehors de l'oxygène qui disparaît au voisinage de la gazéification complète, tous les éléments gazeux de la fumée. Mais aussitôt que la limite de combustibilité a été atteinte, tous les gaz combustibles disparaissent : hydrocarbures, hydrogène et oxyde de carbone.

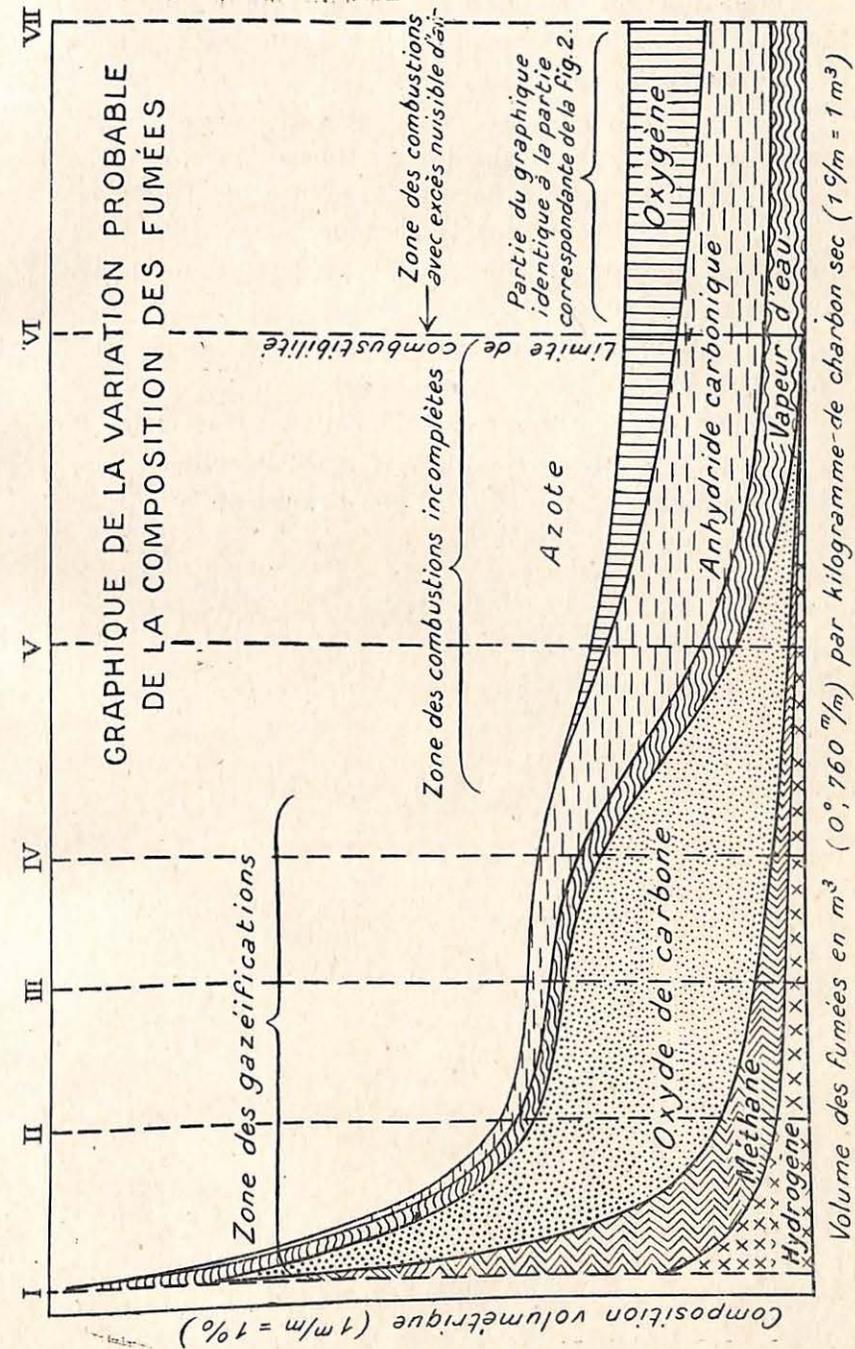


FIG. 4.

On ne doit donc pas s'écarter de cette limite qui, pratiquement, marque la combustion complète avec minimum de pertes par la cheminée.

Les résultats d'analyse des gaz de gazogènes et d'éclairage, quoique obtenus sur des charbons de composition chimique différente des charbons demi-gras indigènes (voir Le Chatelier : Leçons sur le carbone, Paris 1908 et Le chauffage industriel, Paris 1920), n'établissent aucune discordance avec les déductions qui précèdent.

Pour l'objet de cette étude, il convient de retenir qu'il faut déterminer la limite de combustibilité d'un charbon de grille dans les conditions mêmes de l'emploi de ce charbon.

Le chapitre suivant pose les principes de cette détermination et donne quelques résultats d'expériences faites en application de ces principes.

(A suivre).

Aveuglement d'une voie d'eau

DANS UN Puits, A 554 MÈTRES DE PROFONDEUR,
au moyen de la cimentation
pratiquée à niveau plein par l'intérieur du puits

PAR

M. LOUIS SAUVESTRE

Ingénieur civil des Mines (E. S. M. P.)

Administrateur-Directeur de la Société des Charbonnages de Beeringen.

Le puits n° 1 du premier siège de la société de Beeringen avait atteint la profondeur de 646 mètres et avait ainsi pénétré de 22 mètres dans le terrain houiller.

Ce puits avait été creusé par le procédé de la congélation sur les 485 premiers mètres; il avait été cuvelé jusqu'à 508 mètres, puis creusé à niveau vide de 508 à 585 mètres sans rencontrer d'eau, sauf toutefois de 554 à 570 mètres, dans la craie blanche, laquelle donna une venue insignifiante de 600 litres-heure. Mais cette craie blanche était tendre, sans grande consistance. Cette partie du puits, comprise entre 508 et 585 mètres avait été murillée. Enfin, de 585 à 640 mètres on avait passé par une reprise de congélation (1).

La trousse de base ayant été placée à 646 mètres, alors qu'on reprenait le creusement dans le houiller, une voie d'eau se déclarait à 554 mètres, crevant un pan de maçonnerie et donnant un débit de 150 mètres cubes-heure. (Voir le diagramme des débits mesurés au fur et à mesure de l'ascension de l'eau dans le puits. Planche I.)

Origine de l'eau. — Nous fûmes fixés immédiatement sur l'origine de l'eau. En effet, les eaux du crétacé qui sont surtout abondantes dans l'assise du tufeau (376-450) sont jaillissantes et nous avons utilisé leur niveau piézométrique élevé pour alimenter en eau potable les maisons de notre personnel. Dès que la rupture se fut produite dans le puits, toutes les habitations furent privées d'eau et nous pûmes suivre l'abaissement du niveau piézométrique dans un son-

(1) Voir *Annales des Mines de Belgique*. Tome XXI (année 1920), 1^{re} liv.