BnF Gallica

La combustion et les combustibles / par Paul Vérola,...

Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Vérola, Paul (1884-1945). Auteur du texte. La combustion et les combustibles / par Paul Vérola,.... 1941.

1/ Les contenus accessibles sur le site Gallica sont pour la plupart des reproductions numériques d'oeuvres tombées dans le domaine public provenant des collections de la BnF. Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n°78-753 du 17 juillet 1978 :
- La réutilisation non commerciale de ces contenus ou dans le cadre d'une publication académique ou scientifique est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur et notamment du maintien de la mention de source des contenus telle que précisée ci-après : « Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France » ou « Source gallica.bnf.fr / BnF ».
- La réutilisation commerciale de ces contenus est payante et fait l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service ou toute autre réutilisation des contenus générant directement des revenus : publication vendue (à l'exception des ouvrages académiques ou scientifiques), une exposition, une production audiovisuelle, un service ou un produit payant, un support à vocation promotionnelle etc.

CLIQUER ICI POUR ACCÉDER AUX TARIFS ET À LA LICENCE

2/ Les contenus de Gallica sont la propriété de la BnF au sens de l'article L.2112-1 du code général de la propriété des personnes publiques.

3/ Quelques contenus sont soumis à un régime de réutilisation particulier. Il s'agit :

- des reproductions de documents protégés par un droit d'auteur appartenant à un tiers. Ces documents ne peuvent être réutilisés, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.
- des reproductions de documents conservés dans les bibliothèques ou autres institutions partenaires. Ceux-ci sont signalés par la mention Source gallica.BnF.fr / Bibliothèque municipale de ... (ou autre partenaire). L'utilisateur est invité à s'informer auprès de ces bibliothèques de leurs conditions de réutilisation.

4/ Gallica constitue une base de données, dont la BnF est le producteur, protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle.

5/ Les présentes conditions d'utilisation des contenus de Gallica sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

6/ L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur, notamment en matière de propriété intellectuelle. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

7/ Pour obtenir un document de Gallica en haute définition, contacter
utilisation.commerciale@bnf.fr.

Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France



E. MARTIN REL.-

PAUL 'VÉROLA'

LA COMBUSTION ET LES COMBUSTIBLES



1225

COLLECTION ARMAND COLIN

La Combustion et les Combustibles

8° Z
21106
(231)

DL 2974 18-6-41 A

DU MÊME AUTEUR

Chimie et Fabrication des Explosifs. Un vol. in-16 (11 × 17), broché ou relié (Collection Armand Colin).

Nº 231.

COLLECTION ARMAND COLIN
(Section du Génie civil)

La Combustion et les Combustibles

par

Paul VÉROLA
Ingénieur en Chef des Poudres

—

22 Figures



BIBLIOTHÈQUE NATIONALE IMPRIMÉS

LIBRAIRIE ARMAND COLIN
103, Boulevard Saint-Michel, PARIS

—

1941

Tous droits réservés

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays.
Copyright 1941, by Max Leclerc et Cie.

PRÉFACE

Quand l'homme a su faire un feu, il s'en est servi d'abord pour se chauffer et cuire ses aliments ; ce premier emploi de la combustion, de beaucoup le plus ancien, n'est pourtant pas d'une origine si lointaine que notre organisme ait eu le temps de se déshabituer des aliments crus, et c'est en méditant sur la jeunesse relative du mythe de Prométhée que Charles Richet a soupçonné l'importance des vitamines.

L'emploi du feu pour produire de l'énergie mécanique est bien plus récent encore : la première application date de l'époque où les compositions fusantes avec lesquelles les Chinois préparaient leurs feux d'artifice furent adaptées à la propulsion des projectiles dans les canons ; il a fallu encore quelques siècles de plus pour que la combustion, mise au service de travaux pacifiques, commençât à supplanter l'énergie vitale des animaux et des esclaves, ainsi que la force des vents et des cours d'eau.

Mais alors son domaine s'est développé avec une accélération prodigieuse ; elle s'est diversifiée elle-même, tant dans sa matière première : le combustible, que dans son appareillage : chaudière, four ou moteur ; elle a satisfait progressivement à tous nos besoins matériels ; elle en a créé de nouveaux et elle a imprégné ainsi l'ensemble de l'activité humaine.

Ce vaste domaine déborderait du cadre restreint dont nous disposons si on ne retrouvait heureusement, dans

toutes ses parties, des caractères communs, des règles fondamentales qui subsistent tout en s'adaptant aux conditions particulières de chaque industrie : ce sont ces principes généraux que nous nous sommes efforcé de mettre en lumière, de suivre dans leurs applications les plus importantes, et nous souhaitons l'avoir fait avec assez de précision pour qu'on trouve dans ce livre les données, les formules et les schémas principaux suivant lesquels se crée « la force motrice du feu ».

LA COMBUSTION ET LES COMBUSTIBLES

Chapitre premier

LA COMBUSTION COMME SOURCE D'ÉNERGIE MATIÈRES PREMIÈRES DE LA COMBUSTION COMBUSTIBLES NATURELS, ARTIFICIELS ET DE SYNTHÈSE

La combustion comme source d'énergie. — Lorsque l'homme a cherché des sources artificielles d'énergie, il s'est d'abord orienté vers la solution la plus simple : la recherche du mouvement perpétuel proprement dit, et c'est la faillite de toutes ces tentatives que consacre le principe de Carnot, base de la Thermodynamique.

D'après ce principe, on ne peut produire de travail sans qu'il y ait chute de chaleur d'une source chaude à une source froide. Or nous disposons sur notre globe de deux sources fondamentales de chaleur : la radiation solaire et le noyau central de notre planète ; il semble donc naturel de les employer directement à la production d'énergie et de réaliser ainsi le mouvement perpétuel de seconde espèce, entretenu par des causes naturelles permanentes.

En fait, aucun des essais entrepris dans ce sens n'a pu aboutir à des résultats réellement pratiques et le dernier en date, effectué en 1935 par Georges Claude dans la baie de Rio de Janeiro, pour mettre en œuvre la différence de température existant entre la surface chaude de mers exposées au soleil tropical et les couches profondes, plus froides, a finalement échoué comme les précédents.

C'est que, dans la nature, en régime stable, les différents potentiels (voltage ou température des couches successives d'air, d'eau ou de terre) varient lentement ; par exemple, le degré géothermique, c'est-à-dire la profondeur suivant laquelle, dans une mine, la température augmente de 1 degré, varie de 26 à 120 mètres ; on est donc contraint à employer un appareillage extrêmement volumineux et à mettre en jeu des quantités considérables de matière pour une faible production de travail ; or l'industrie humaine est actuellement suffisamment pourvue de calories plus maniables pour ne pas recourir à des moyens incommodes.

Pratiquement, il a donc fallu chercher d'autres solutions, et on les a trouvées en employant de véritables accumulations d'énergie rassemblées sur des espaces considérables ou concentrées en des milliers d'années. Telles sont, dans le premier cas, la force du vent et les chutes d'eau, qui résultent de perturbations atmosphériques s'étendant sur des centaines de kilomètres ; tels sont, dans le second cas, les gisements de houille ou de pétrole formés au cours des âges géologiques.

En ce qui concerne les premières, et jusqu'à ce que l'électricité ait donné le moyen de transporter commodément l'énergie à distance, ces sources naturelles manquaient d'un avantage indispensable : la possibilité d'utiliser le travail, non où il était produit, mais là

où on en avait besoin ; pour y parvenir, il fallait pouvoir créer des sources de chaleur en un endroit quelconque, et ce résultat a été atteint en employant une réaction chimique, toujours la même dans ses grandes lignes : la combustion.

Matières premières de la combustion. — Cette réaction fondamentale est constituée par l'union à l'oxygène, soit du carbone, soit de l'hydrogène, soit de ces deux corps à la fois. Son avantage essentiel, c'est que l'un des éléments en cause, l'oxygène, se trouve partout à la surface du globe, puisque l'air en contient 21 % en volume. Reste à trouver le carbone, ou le carbone et l'hydrogène.

C'est par le bois et la houille ou par le pétrole qu'on les obtient, c'est-à-dire par des matières actuellement vivantes ou qui l'ont été.

En effet, et c'est le deuxième principe de la thermodynamique, les phénomènes naturels tendent dans leur ensemble vers une dégradation et une uniformisation de l'énergie ; seule la vie est capable de remonter ce courant et, tout en obéissant aux lois de l'Énergétique dans l'ensemble de son domaine, elle choisit parmi les réactions possibles, comme le démon de Maxwell choisit parmi toutes les molécules gazeuses, et elle remonte le niveau de l'énergie dans un domaine restreint ; en outre, en se multipliant, elle accumule ces remontées d'énergie : ainsi l'activité humaine se concentre dans les villes, la puissance mécanique se concentre dans les grandes usines.

L'énergie élaborée par la vie, remontée à un niveau qui la rende utilisable par notre industrie, c'est, en définitive, l'énergie solaire, et il se trouve que les éléments fondamentaux réellement employés par l'entremise de cette énergie proviennent du gaz carbonique

contenu dans l'air et de l'eau répandue à la surface du globe ou vaporisée dans l'atmosphère.

Le cycle terrestre du carbone. — Le gaz carbonique existe dans l'air à une teneur très faible : il y a environ trois mètres cubes de CO^2, soit 6 kg., pour 10 000 mc. d'air au niveau du sol ; cette teneur diminue de moitié à une altitude de 10 km. et est nulle à une altitude de 50 km. ; on peut donc compter sur environ 6 kg. de CO^2, soit 1 kg. 6 de carbone, dans l'atmosphère par mètre carré de surface terrestre. La surface de l'ellipsoïde terrestre étant de 5×10^{14} mq, la quantité totale de carbone contenue dans l'atmosphère sera approximativement de 8×10^{14} kg. ou de 800 milliards de tonnes ; telle est la réserve, constamment reconstituée comme nous allons le voir, dans laquelle la vie a puisé pour constituer les combustibles géologiques, houille ou pétrole, et dans laquelle, actuellement, elle puise pour la formation du bois.

C'est en effet par les végétaux, au moyen de la fonction chlorophyllienne des plantes, qu'est captée l'énergie solaire.

La propriété essentielle de la cellule chlorophyllienne est de fixer le carbone de l'atmosphère en présence de la lumière et d'une certaine quantité de chaleur, en produisant un glucide.

Ainsi se trouve réalisée la réaction globale suivante :

$$6\ CO^2 + 6\ H^2O = 6\ O^2 + C^6H^{12}O^6$$

mais une telle réaction absorbe 675 calories ; il faut donc que la plante se procure cette énergie, et elle l'obtient en absorbant une partie des radiations solaires qu'elle reçoit.

Il est vraisemblable que la formation des glucides est opérée en plusieurs étapes, mais on n'a pu, jusqu'ici, identifier les produits intermédiaires. L'hypothèse la

plus ancienne, formulée par Berthelot, admet la production initiale d'aldéhyde formique suivant la réaction

$$CO^2 + H^2O = H - COH + O^2 ;$$

la polymérisation de l'aldéhyde formique donnerait ensuite un sucre

$$6\ H - COH = C^6H^{12}O^6.$$

D'après cette réaction, un volume de CO^2 doit être remplacé dans l'atmosphère de la plante par un volume d'oxygène, et l'expérience montre qu'il en est bien ainsi ; d'autre part, on a pu réaliser *in vitro* la synthèse de l'aldéhyde formique suivant la réaction ci-dessus par la lumière en présence de certains catalyseurs.

Quel que soit le mécanisme intime de la réaction, son rendement énergétique est excellent ; il résulte en effet des travaux de Würmser que 70 à 80 % de l'énergie lumineuse absorbée par la chlorophylle se retrouvent dans le travail chimique effectué par la plante ; une autre caractéristique de cette action végétale, c'est sa sélectivité, puisqu'elle va extraire le carbone d'un mélange gazeux qui ne contient que trois dix-millièmes du composé carboné ; enfin, elle y remplace le gaz carbonique par un volume égal d'oxygène.

Une fois le carbone fixé dans la plante, il s'incorporera dans des composés divers et, notamment, dans la cellulose, constituant essentiel de l'arbre, qui résulte d'une déshydratation des glucides et dont la formule est $(C^6H^{10}O^5)^n$.

La puissance d'absorption du gaz carbonique par les plantes varie suivant les espèces et suivant les climats. Dans nos régions, elle correspond à la production de 2 500 à 5 000 kg. de bois par hectare ; la combustion de ce bois, c'est-à-dire la transformation inverse de son carbone en CO^2, dégagerait 1 400 grandes calories. Le nombre de calories utilisables ainsi fixées est très

faible par rapport au total des calories irradiées par le soleil sur le même hectare pendant une année ; en effet, suivant Violle, chaque mètre carré du grand cercle terrestre, projection de l'hémisphère éclairé, reçoit 25 calories par minute ; on en déduit que le rapport en question est de l'ordre de 5 dix-millièmes. Les plantes de pays plus chauds, telles que l'eucalyptus, par exemple, ont une croissance plus rapide, ce qui s'accompagne de la présence dans le bois d'une plus grande quantité de sels servant de catalyseurs aux réactions de croissance de la plante et, comme conséquence fâcheuse, d'un plus grand taux de cendres dans le charbon obtenu à partir de ces bois.

La teneur de l'atmosphère en acide carbonique joue un rôle considérable sur la croissance des plantes ; en 1885, Kreusler, opérant sur des feuilles de charme maintenues sous un éclairage constant à une température de 25°, constata que la rapidité de croissance doublait quand la teneur en CO^2 de l'atmosphère passait de 3 dix-millièmes à 50 dix-millièmes et que le maximum, légèrement supérieur à 2,5, était atteint dès que la teneur était de l'ordre de 1 %. Le blocus économique de l'Allemagne, pendant la guerre de 1914-1918, l'a conduite à reprendre la question en 1917. Des essais ont été effectués par la *Deutsche Luxemburgische Bergwerk und Hütten* de Dortmund avec les gaz résiduaires de la combustion de gaz de haut-fourneau dans les moteurs, en envoyant ces gaz dans des serres ; l'effet est immédiat ; les plantes ainsi traitées fleurissent plus vite ; les feuilles de plants de ricin doublent de largeur ; la récolte en tomates passe de 29 kg. 15 à 81 kg. 3 et celle de concombres de 138 kg. à 235 kg. Ces essais, poursuivis ensuite en pleins champs, sont restés aussi concluants.

Il est donc indubitable qu'une haute teneur de

l'atmosphère en CO^2 active considérablement la croissance des plantes et il est vraisemblable que les amas formidables de végétaux fossiles qui constituent le charbon de terre se sont développés dans des périodes où l'atmosphère terrestre était plus riche que maintenant en CO^2.

Actuellement, d'après Ch. Roszak, la fonction chlorophyllienne n'utilise pas, sur toute la surface de la terre, plus de 3 millionièmes des 220 trillions de kilowatts que la terre reçoit du soleil, ce qui correspond à une puissance de 660 millions de kw. ; d'ailleurs, cette puissance est amassée, non sous forme mécanique, mais sous forme de combustible, et, si on pouvait la transformer totalement en énergie mécanique, on disposerait finalement, avec le rendement moyen des machines ou des foyers actuels, de 60 à 100 millions de kw.

La cellulose, les amidons, les sucres ainsi élaborés par les plantes sont les aliments grâce auxquels les animaux herbivores développent leurs propres organismes ; or les herbivores sont précisément les aliments des carnivores, si bien que, sur terre, toute la vie, sauf pour certains organismes inférieurs comme les bactéries nitreuses, ne subsiste que grâce à la fonction chlorophyllienne des plantes.

Cette fonction absorbe le gaz carbonique et restitue un volume égal d'oxygène ; c'est l'hémoglobine du sang des animaux qui, dans la fonction respiratoire, effectue l'opération inverse, absorbe l'oxygène et restitue le gaz carbonique ; toutes nos sources thermiques de combustion se sont superposées à cette fonction de l'hémoglobine pour absorber également l'oxygène et restituer l'acide carbonique ; ainsi le carbone effectue un cycle fermé qui le ramène à l'atmosphère d'où les plantes l'ont extrait.

C'est Lavoisier, une fois de plus précurseur génial,

qui, dans un papier écrit de sa main vers 1793 et retrouvé en 1847 par J.-B. Dumas, a décrit ce processus dans les termes suivants :

« Les végétaux puisent dans l'air qui les environne, dans l'eau et, en général, dans le règne minéral, les matériaux nécessaires à leur organisation. Les animaux se nourrissent ou de végétaux, ou d'animaux qui ont été eux-mêmes nourris de végétaux, en sorte que les matières qui les forment sont toujours, en dernier résultat, tirées de l'air et du règne minéral ; enfin la fermentation, la putréfaction et la combustion rendent perpétuellement à l'air de l'atmosphère et du règne minéral les principes que les végétaux et les animaux leur ont empruntés. »

Combustibles solides, liquides et gazeux naturels. — La puissance dont l'homme a besoin à l'heure actuelle peut se chiffrer de la façon suivante :

On extrait annuellement environ 1 400 millions de tonnes de combustibles solides sur toute la terre ; en attribuant à ces combustibles un pouvoir calorifique moyen de 6 500 calories au kg., cette masse représente environ 9×10^{15} calories.

On extrait environ 230 millions de tonnes de pétrole brut qui, en le comptant à 10 000 calories par kg., représentent $2{,}3 \times 10^{15}$ calories.

Enfin, la puissance hydroélectrique installée est de l'ordre de 15 millions de kw. ; en lui attribuant une utilisation annuelle moyenne de 100 jours, elle correspond à 3×10^{13} calories ; la puissance disponible est de l'ordre de 100 millions de kw. correspondant à environ 2×10^{14} calories ; mais il y a lieu de remarquer que ces calories, étant déjà sous forme mécanique, valent six à dix fois plus que les autres, si bien qu'une utilisation totale des ressources hydroélectriques du

globe procurerait l'équivalent de 5×10^{15} calories thermiques.

Au total, l'ordre de grandeur des besoins actuels de l'humanité est de $1{,}5 \times 10^{16}$ calories thermiques.

On y satisfait surtout par des combustibles solides, liquides ou gazeux naturels et par des combustibles artificiels fabriqués à partir des premiers pour leur donner des qualités spéciales.

Les combustibles gazeux naturels qui accompagnent d'ordinaire les gisements de pétrole jouent un rôle très modeste en France ; notre seul gisement industriel se trouve à Vaux, dans l'Ain. Au contraire, aux États-Unis, l'exploitation du gaz naturel a donné lieu à une distribution s'étendant sur des centaines de kilomètres.

Les combustibles solides naturels comprennent les charbons et les schistes ; les charbons sont constitués par des végétaux fossiles ; ils sont exploités quelquefois en carrières (lignites de la Ruhr), et le plus souvent dans des mines dont la profondeur peut dépasser 1 000 mètres.

Dans l'analyse de ces combustibles on distingue :

le pourcentage d'eau qu'ils contiennent : soit humidité qui s'en va par simple séchage, soit eau de constitution qui ne s'extrait que par une véritable décomposition du combustible ;

les matières volatiles, qui comprennent les produits qui distillent par un chauffage du combustible poussé jusqu'à ce que tout dégagement cesse ;

le carbone fixe, qui est le carbone restant dans le résidu ;

les cendres, qui complètent le poids du résidu.

Plus un charbon est de formation récente, plus sa composition se rapproche de la cellulose initiale, plus il contient de matières volatiles et, notamment, d'eau de constitution.

Par ordre croissant d'ancienneté on trouve :

la tourbe, qui se forme encore à l'heure actuelle dans les tourbières par décomposition de végétaux dans l'eau ; la tourbe peut avoir jusqu'à 40 % d'eau de constitution ; c'est un combustible de qualité inférieure ; on ne peut l'utiliser qu'après un séchage qui, pour être économique, doit être fait par l'air et le soleil. Certaines tourbes, très peu cendreuses, notamment des tourbes hollandaises, sont employées à des fabrications spéciales comme celles du charbon actif destiné à l'absorption des gaz et des vapeurs industrielles et, notamment, au débenzolage du gaz. De nombreuses tourbières existent en France, en particulier dans le plateau de Millevache et en Bretagne ; celle dont l'exploitation est la plus importante est constituée par la Grande-Brière, près de Nantes ; sa production sert dans le pays environnant au chauffage domestique ;

les lignites : on range sous ce nom une gamme très étendue de combustibles ; elle commence aux xylites, dans lesquels on retrouve intacts des morceaux de bois fossiles ; ces corps donnent à la distillation, non des produits de la série aromatique : benzols, phénols, comme la houille, mais des produits de la série grasse, alcool méthylique, acide acétique, comme le bois. On y trouve ensuite le lignite brun, le *braunkohle* allemand qui constitue les grands gisements de la Ruhr en Allemagne et qu'on rencontre en France dans les Landes ; c'est un combustible jeune à forte teneur en eau de constitution et qu'il faut sécher avant tout emploi ou tout traitement. Enfin, elle se termine aux lignites noirs, très voisins de la houille ; ce sont de véritables charbons à haute teneur en matières volatiles, mais à faible taux d'eau de constitution et, en général, à teneurs en cendres et en soufre assez élevées ; le gisement français le plus important se trouve dans les Bouches-

du-Rhône entre Aix et Marseille ; ces lignites sont employés aux mêmes usages domestiques et industriels que la houille ;

les houilles : cette catégorie comprend la grande majorité des charbons industriels ; elles se classent, d'après Gruner, suivant le tableau ci-après, par ordre d'ancienneté croissante et suivant leur taux de matières volatiles :

Houille sèche à longue flamme	40 à 48 %
Charbon gras à longue flamme	32 à 40 %
Charbon gras	24 à 32 %
Charbon 3/4 gras	18 à 24 %
Charbon 1/2 gras	14 à 18 %
Charbon 1/4 gras	10 à 14 %
Charbon anthraciteux maigre	7 à 10 %
Anthracite	4 à 7 %

La première catégorie donne à la distillation le plus de sous-produits, mais laisse un résidu de carbone, le coke, représentant seulement 50 à 60 % de la houille primitive, et pulvérulent ; la deuxième catégorie donne un coke fondu, mais fendillé ; les quatre suivantes donnent un coke fondu et compact. Les deux dernières donnent très peu de sous-produits et un coke fritté ou pulvérulent ; aussi ne sont-elles jamais distillées, mais brûlées directement.

Notre principal bassin houiller se trouve dans les départements du Nord et du Pas-de-Calais ; les deux suivants sont dans la Moselle et la Loire ; les plus importants à la suite sont à Blanzy (Saône-et-Loire), La Grand'Combe, Bessège et Rochebelle (Gard), Decazeville et Cransac (Aveyron), Carmaux et Albi (Tarn), La Courbelle, la Bouble et la Roche (Puy-de-Dôme). L'anthracite se rencontre dans les Alpes, le gisement le plus important étant celui de La Mure.

Les schistes bitumineux sont formés par un squelette argileux intimement uni à une matière organique com-

plexe dans laquelle on trouve le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote et le soufre ; leur teneur en matières volatiles est très variable et peut atteindre 35 % ; par distillation on en extrait une huile analogue au pétrole et qui se forme dans la distillation elle-même ; on ne doit pas confondre les schistes proprement dits avec les roches simplement imprégnées de bitume ; ainsi les prétendus schistes de Madagascar ou du Canada sont des roches imprégnées qui, par simple broyage et traitement à l'eau chaude, abandonnent tout leur bitume.

Les gisements de schistes sont très abondants en France et en Afrique du Nord, mais un seul est en exploitation en France, à Autun.

Le combustible liquide naturel est le pétrole brut, auquel sont liées également les sources de gaz combustible naturel, composé à peu près exclusivement de méthane, et qui jaillissent des sondages pétrolifères, parfois même, comme à Bugey, dans l'Ain, lorsque le pétrole a déjà disparu du gîte.

Le pétrole abonde dans les deux Amériques, au voisinage de la Caspienne, en Roumanie, en Pologne, en Asie Mineure, à Bornéo, en Chine. Les Allemands ont fini par en extraire des quantités appréciables dans le Hanovre ; mais ni en France, à part les suintements des sables de Pechelbronn et le puits de Gabian, ni dans les colonies françaises, à part de faibles quantités en Algérie ou au Maroc, on n'a pu en trouver [1].

C'est que le pétrole a pris une importance considérable dans le monde ; par le seul fait qu'il est liquide, on le transporte, sur des centaines de kilomètres, dans de simples canalisations, les pipe-lines ; on l'entre-

1. Immédiatement avant la guerre, un forage a rencontré une nappe pétrolifère aux environs de Saint-Gaudens dans la Haute-Garonne.

pose et on le distribue avec une facilité que n'offrent pas les combustibles solides ; quand on fractionne le pétrole par distillation, ses produits employés pour la combustion n'ont pas de cendres et peuvent être introduits commodément dans les cylindres des moteurs eux-mêmes ; ils dégagent par kilogramme 30 % d'énergie de plus que les meilleures houilles. Ce dernier avantage a été la cause essentielle de leur adoption, d'abord par les marines de guerre, puis par une grande partie des flottes marchandes, car, tout en réduisant au minimum le travail dans les chaufferies et en le facilitant, tout en réduisant le temps perdu pour le ravitaillement en combustible, ils augmentent, à poids égal, le rayon d'action des navires.

C'est aussi la raison pour laquelle l'Amirauté anglaise s'est intéressée au pétrole avec la plus grande énergie.

Enfin, le pétrole brut n'est pas seulement la source de combustibles précieux, mais on en tire encore les graisses et les huiles indispensables au graissage dans l'industrie moderne ; et c'est là une deuxième justification de sa primauté dans le monde.

Le pétrole est contenu dans des poches et il est mis sous pression par des gaz ; on l'extrait en enfonçant des tubes jusqu'au gisement.

Formation de la houille et du pétrole. — On admet que la houille résulte d'une fermentation des végétaux de l'époque carbonifère, conduisant à une perte de plus en plus grande d'oxygène ; en effet si, d'après Chabanier, on rapporte à 100 de carbone les teneurs en oxygène et hydrogène des différents corps figurant dans ce processus, on trouve les chiffres suivants :

	Cellulose	Bois	Tourbe	Lignite	Houille	Anthracite
Hydrogène	13,9	12,5-11,5	13-10	8-6,6	7,2-4,3	4,5
Oxygène..	111	90-85	83-56	38-33	20,8-3	9,4-2

En présence d'eau légèrement acide, ou rendue acide par des ferments tels que le *bacillus amylobacter*, par exemple le *micrococcus carbonicus* retrouvé à l'état fossile, la réaction fondamentale qui donnerait naissance à la houille serait, suivant Renaud :

$$4\ C^6H^{10}O^5 = C^9H^6O + 7\ CH^4 + 8\ CO^2 + 3\ H^2O$$

H pour 100 de C	13,9	5,56	33,3
O pour 100 de C	111	14,82	0

On pourrait d'ailleurs avoir une proportion moins grande d'hydrogène dans le produit par déshydratation partielle de l'hydrate de carbone qui constitue la cellulose, par suite d'échauffement durant la période de transformation.

D'après Fischer, universellement connu par ses travaux sur la distillation des charbons, ceux-ci proviendraient, non de la cellulose du bois que la fermentation transformerait complètement en gaz, mais de la lignine dont le bois de chêne renferme 30 % et les coquilles de noix jusqu'à 50 % ; la lignine aurait une structure moléculaire benzénique qui se retrouve dans les produits de la distillation du charbon ; la lignine se transformerait en acides humiques, puis en charbon humique, les cires et résines en bitume, et l'ensemble constituerait le charbon bitumineux.

Les pétroles contiennent de 13 à 18 % d'hydrogène, donc plus que les charbons.

Par leur faible teneur en oxygène, ils se séparent

nettement de la série des charbons ; la plupart ont, en outre, une teneur en hydrogène supérieure à celle de la cellulose, mais inférieure à celle de graisses animales, comme la palmitine, par exemple, qui a 20,5 d'hydrogène et 39,1 d'oxygène pour 100 de carbone. C'est pourquoi on attribue généralement la formation du pétrole à la décomposition de masses d'origine animale entassées dans les mers par les courants, ou déposées dans des lacs par des inondations périodiques. Pourtant, le fait qu'on a trouvé du pétrole (Mahoning County, foncé et visqueux) au contact d'une houille bitumineuse semble montrer qu'il peut avoir aussi les mêmes origines végétales que la houille ; il serait alors donné par une fermentation différente s'effectuant en milieu légèrement alcalin ; ce processus aurait eu lieu aux températures relativement basses où les fermentations sont possibles.

Une autre théorie, développée par Gignoux et Horace Havre, met en jeu des températures déjà plus élevées. Elle admet que la croûte terrestre passe par des alternatives de fusions partielles, pouvant atteindre le fond de certaines mers intérieures ou de certains bras de mer, et de resolidifications ultérieures. Le magma central faisant irruption par la fracture amènerait l'évaporation de l'eau et la précipitation des sels, la conservation dans la saumure formée progressivement, puis la distillation des corps des animaux marins, et donnerait naissance à des gaz et à des hydrocarbures plus lourds qui se condenseraient dans les parties supérieures plus froides. L'anhydrite et le gypse ont pu être réduits par ces hydrocarbures avec formation de soufre se liant aux hydrocarbures ou se déposant en masses considérables (gisement de soufre de la Louisiane, très légèrement imprégné d'hydrocarbures).

Enfin, une troisième théorie fait également appel

à des températures de formation voisines de 300°, mais à des matières premières exclusivement minérales : c'est la théorie catalytique de Sabatier et Mailhe. Elle est basée sur les expériences de Sabatier et Senderens : en hydrogénant de l'acétylène sur du nickel maintenu à 200°, ils ont obtenu un liquide analogue aux pétroles de Pennsylvanie ; si, également sur le nickel, on envoie de l'acétylène sans hydrogène à une température comprise entre 200° et 300°, on obtient une vive incandescence avec formation de carbone ; une partie de l'acétylène se polymérise en carbures aromatiques d'après le mécanisme qu'a décrit Berthelot ; ces carbures, qui rappellent le pétrole brut, hydrogénés sur le nickel à 200°, donnent un liquide analogue au pétrole du Caucase ; quand cette hydrogénation a lieu vers 300°, on obtient un liquide analogue au pétrole de Galicie. Si on admet qu'il existe dans les profondeurs de la croûte terrestre de grandes masses de métaux alcalins ou alcalino-terreux, ainsi que des carbures de ces métaux, l'eau arrivant au contact de ces corps dégagera de l'hydrogène et de l'acétylène ; si on admet en outre la présence dans les roches voisines de nickel, cobalt ou fer, tous catalyseurs de l'hydrogénation, l'hydrogène et l'acétylène, à leur contact, pourront donner du pétrole. Cette théorie pourrait se conjuguer avec la précédente, en admettant que c'est dans le magma central, venant au contact de l'eau des mers, que se trouvent les métaux et les carbures donnant naissance au pétrole.

Combustibles artificiels et de synthèse. — Les combustibles artificiels s'obtiennent par distillation ou fermentation ; les carburants de synthèse s'obtiennent par hydrogénation de combustibles de moindre valeur à des températures et des pressions appropriées.

Le plus ancien combustible artificiel est le charbon

de bois ; il est obtenu par distillation du bois ; employé dans les chauffages domestiques, il a été aussi le premier combustible industriel, et les hauts fourneaux, producteurs de la fonte, par exemple, ont d'abord fonctionné au charbon de bois ; il a trouvé, depuis la guerre de 1914-1918, un regain de faveur grâce au développement des gazogènes à charbon de bois alimentant certains camions automobiles.

La distillation de la houille fournit le coke : coke de gaz de ville obtenu dans les usines à gaz, servant aux chauffages industriels et domestiques ; coke de fours à coke, plus résistant, employé en métallurgie. Une caractéristique de l'économie française, c'est, d'une part, sa richesse relative en minerai de fer, d'autre part, sa pénurie en houilles à coke ; ce déséquilibre nous entraîne à des importations coûteuses de houilles et de coke.

La distillation du bois ou de la houille donne naissance à des gaz et à des vapeurs condensables qui, pour le bois, contiennent de l'alcool méthylique CH^2OH, et, pour la houille, du benzol C^6H^6 et ses homologues supérieurs, des phénols, etc.

Le prototype du combustible obtenu par fermentation est l'alcool éthylique dont la matière première est le sucre des plantes : canne à sucre, betterave, raisin ; son emploi comme carburant a été développé en France depuis la guerre par les pouvoirs publics.

On s'efforce, à l'heure actuelle, d'étendre l'industrie de fermentation à la production, à partir des jus sucrés, de cétones constituant un carburant de choix pour les moteurs d'aviation.

Les carburants de synthèse s'obtiennent par cracking ou par hydrogénation proprement dite.

Le cracking est une opération dans laquelle les molécules d'hydrocarbures sont cassées, craquées, et se

réunissent pour donner, d'une part, des produits plus légers contenant une proportion plus forte d'hydrogène, d'autre part, des produits plus lourds contenant moins d'hydrogène ; en fait, on réalise l'hydrogénation d'une partie de la masse aux dépens du reste.

Quant à l'hydrogénation proprement dite, elle consiste dans l'addition d'hydrogène aux molécules d'hydrocarbures lourds, aux charbons ou à l'oxyde de carbone, sous l'action de la chaleur, de la pression et de catalyseurs appropriés. Si Bergius l'a fait entrer en Allemagne dans le domaine industriel, ce sont les travaux de Sabatier sur la catalyse qui en ont fixé les données essentielles ; on obtient par ce procédé toute la gamme des produits du pétrole.

Production des combustibles solides et liquides en France. — La production de houille et de lignite s'est élevée en France, en 1936, à 46 146 000 tonnes ; elle s'est répartie, de la façon suivante, entre les différents bassins minéralogiques :

Arras et Douai	61,6 %
Strasbourg (Moselle)	11,8 %
Saint-Étienne	7,0 %
Lyon (Blanzy, anthracite de La Mure)	5,0 %
Alès (Gard, Hérault)	5,9 %
Toulouse (Tarn, Aveyron)	3,2 %
Clermont	3,1 %
Marseille (lignites)	1,6 %
Nancy (Ronchamp), Bordeaux, Nantes	0,8 %

La production de coke de fours à coke s'est élevée à 7 millions de tonnes, celle de coke de gaz à 1 900 000 t.

En regard de cette production nationale, nos importations de houille se sont élevées à 18 656 000 tonnes, et nos importations de coke à 2 562 000 tonnes. Nous avons importé en outre 1 million de tonnes d'agglo-

mérés de charbon. Si on les évalue toutes en houille crue, nos importations se sont élevées en 1936 à 23 millions de tonnes, soit à la moitié de notre production.

Si, maintenant, nous passons au benzol et au pétrole, nous trouvons des chiffres de production très inférieurs ; ils se réduisent à 80 000 tonnes pour le benzol et à 80 000 tonnes pour le pétrole ; le benzol provient, pour 65 000 tonnes, des cokeries et, pour 15 000 tonnes, des usines à gaz. La production de pétrole provenait, en 1930, pour 74 000 tonnes, de Pechelbronn, pour 2 000 tonnes, de Gabian et, pour 4 000 tonnes, de la distillation des schistes d'Autun.

En ce qui concerne le pétrole de synthèse, deux usines pilotes ont été installées à Béthune et à Liévin, pour la mise au point respectivement des procédés Perilhou et Audibert. Les Mines de Courrières et les Établissements Kuhlmann ont monté une usine capable de produire 20 000 tonnes d'essence par an par le procédé Fischer Tropsch.

En regard de ces chiffres dérisoires, nos besoins en combustibles liquides correspondent à un tonnage qui, en 1930, a été de l'ordre de 3 500 000 tonnes de pétrole brut et ont été à peu près exclusivement satisfaits par des importations provenant des principaux pays suivants :

États-Unis	41,0 %	Roumanie	6,5 %
Perse	17,5 %	Russie	11,0 %
Possessions hollandaises en Malaisie.	6,5 %	Venezuela.....	11,5 %
		Divers	6,0 %

La valeur de ces importations, non dédouanées, s'est élevée, en francs Poincaré, à 2 800 millions.

Pour les 10 premiers mois de 1938, nos importations de pétrole brut se sont élevées à 5 850 000 tonnes, et nos importations d'essence à 6 295 375 hectolitres. L'Irak (Mossoul) a fourni 2 639 431 tonnes de pétrole

brut ; les États-Unis ont fourni 1 916 076 tonnes de pétrole brut et 3 779 347 hectolitres d'essence.

Production des combustibles solides et liquides dans le monde. — Nous donnons ci-dessous, d'après les statistiques de la Société des Nations, la production, en millions de tonnes, des houille et lignite en Europe, en 1936 :

France	46,1	houille et lignite
Allemagne	158,4	houille
—	161,4	lignite
Grande-Bretagne	232,2	houille
Belgique	27,8	—
Pologne	29,7	—
U. R. S. S.	127,5	—

La production totale de l'Europe, U.R.S.S. exceptée, s'élève à 529,5 pour la houille et 197,5 pour le lignite.

La production totale de houille des États-Unis s'élève à 438,4, y compris une faible partie de lignite.

La production mondiale de houille s'élève à 1 233 et celle de lignite à 205,5.

Voici maintenant la production mondiale de pétrole en 1934 ; elle est évaluée en barils américains, à raison de 7 barils de pétrole brut pour une tonne :

États-Unis	909 107 000
Russie	168 648 700
Venezuela	142 072 329
Irak	71 921 468
Roumanie	62 006 000
Iran	52 663 782
Mexique	38 167 022
Indes Néerlandaises	42 289 408
Colombie	17 340 724
Argentine	14 045 652
Pérou	15 936 937
Trinité	10 894 363
Indes anglaises	8 997 399

Pologne.	3 697 617
Bornéo	2 673 041
Sarawak	1 948 044
Japon.	1 484 962
Égypte	1 479 037
Équateur	1 655 062
Canada	1 418 810
Allemagne.	2 266 964

La production totale s'est élevée à 1 500 millions de barils, soit à plus de 200 millions de tonnes.

Le pétrole dégage dans la combustion de 40 à 50 % de calories de plus que la houille ; il fournit donc environ 25 % des calories consommées annuellement dans le monde sous forme de combustibles solides ou liquides. Les États-Unis, à eux seuls, ont fourni 60 % de la production mondiale de pétrole.

En France, de 1925 à 1935, les besoins en énergie ont été satisfaits de la manière suivante :

	Charbon	*Pétrole*	*Énergie hydraulique*	*Bois et divers*
	—	—	—	—
1925	87 %	3,5 %	4,5 %	5 %
1930	82 %	6,9 %	7,0 %	4,1 %
1935	76 %	10,7 %	9,2 %	4,1 %

Les industries des combustibles. Les trusts. — Ces industries fondamentales alimentent toutes les formes de l'activité humaine et elles ont concentré autour d'elles une masse formidable de capitaux ; mais, d'emblée, une distinction essentielle s'impose entre le charbon et le pétrole ; si on examine les tableaux de production que nous venons de donner, on constate que le charbon s'extrait surtout dans des pays fortement industrialisés. C'est que le charbon, employé depuis longtemps, a provoqué l'installation des usines sur les emplacements mêmes où on le trouvait, car il est rela-

tivement onéreux à manutentionner et à transporter ; bref, l'industrie s'installe sur le charbon.

Au contraire, le pétrole qui, jusqu'à l'apparition des moteurs à explosion ou à combustion interne, ne servait qu'à l'éclairage, a été découvert, même aux États-Unis, dans des régions peu industrielles ; mais, grâce à la facilité avec laquelle on le transporte et on le distribue, c'est lui qui est allé à l'industrie et, précisément, la fortune de John Rockfeller, petit épicier de l'Ohio, date du jour où il eut l'idée de construire des lignes de tuyauteries, des *pipe-lines*, pour amener le pétrole des puits aux raffineries et aux centres de distribution.

Une autre conséquence de ces caractères distinctifs, c'est que, dans tous les pays industrialisés, il y a du charbon national ; au contraire, à part l'Amérique depuis l'origine, et à part la Russie depuis qu'elle s'est industrialisée, il n'existait pas de pétrole national jusqu'à ces dernières années.

John Rockfeller était donc bien placé pour créer et tenir en mains l'industrie mondiale du pétrole, et c'est en monopolisant les moyens de transport et de distribution qu'il assura l'hégémonie du groupe de la *Standard Oil* ; l'ensemble du réseau américain de pipe-lines atteint un développement de 200 000 kilomètres ; comme le prix moyen du kilomètre est de 300 000 francs, l'immobilisation est de l'ordre de 60 milliards de francs ; en ce qui concerne les pompes de distribution, leur nombre, pour la France seule, dépasse 50 000 ; en général, elles sont fournies par les sociétés de pétrole, qui tiennent ainsi leurs distributeurs.

D'après les déclarations de M. G. H. Michler, administrateur de la *Standard Oil* de New Jersey (*Europe Nouvelle* du 14 décembre 1929), le montant des capitaux investis dans cette industrie s'élevait, à cette époque, à 11 milliards de dollars non dévalués, soit

le double du montant des capitaux investis dans l'industrie métallurgique et la moitié des capitaux investis dans les chemins de fer.

On conçoit donc que les conducteurs de groupes aussi importants soient investis d'une puissance égale à celle des chefs des États politiques les mieux organisés et, d'après ce que nous avons dit de la répartition du pétrole dans le monde, ils sont amenés à faire de la colonisation ; encore s'agit-il là d'une colonisation spéciale : l'Angleterre a colonisé les Boshimans, la France les nègres du Congo ; pour le pétrole, ce sont les puits des côtes désertes du Texas ou des îles de la Sonde qui viennent coloniser les plus vieux pays d'Europe.

CHAPITRE II

LES ÉLÉMENTS ACTIFS DE LA COMBUSTION
RÉACTIONS DE COMBUSTION
IMPURETÉS DES COMBUSTIBLES
POUVOIRS CALORIFIQUES DES COMBUSTIBLES
TEMPÉRATURES DE COMBUSTION ; CONTROLE

Éléments actifs de la combustion : l'oxygène. — L'élément primordial de la combustion est l'oxygène qui, dans presque toutes les installations industrielles, est exclusivement fourni par l'air atmosphérique. Nous rappellerons que la teneur de l'air en oxygène est de 23 % en poids et de 21 % en volume ; le reste est constitué en presque totalité par de l'azote qui ne participe pas à la combustion ; l'air contient encore de faibles quantités de vapeur d'eau qui varient d'après son degré d'humidité et qui, lorsque l'air est saturé, atteignent les valeurs suivantes par kg. d'air sec :

à 0°...	3 gr. 8	à 15°...	10 gr. 5	à 30°...	26 gr. 9
à 5°...	5 gr. 4	à 20°...	14 gr. 5	à 35°...	36 gr. 3
à 10°...	7 gr. 65	à 25°...	19 gr. 8	à 40°...	48 gr. 4

Cette humidité joue un rôle appréciable dans les réactions qui se passent à l'intérieur des hauts fourneaux, comme nous le verrons plus loin.

Ainsi, pour un volume d'oxygène exigé par la combustion, on lui apporte en outre, la plupart du temps,

quatre volumes d'azote qui diluent l'élément actif et abaissent considérablement la température de la réaction ; théoriquement, on disposerait de températures initiales beaucoup plus élevées et, par suite, d'un meilleur rendement, si la combustion se faisait dans l'oxygène pur. En fait, il est impossible, la plupart du temps, d'opérer ainsi, parce que les matériaux employés dans la construction des chambres de combustion ou les cylindres des moteurs ne résisteraient pas à ces températures élevées ; nous examinerons cependant, plus loin, un appareil, le gazogène à fusion de cendres, dans lequel, pour certaines réactions, on surdose l'air en oxygène.

Un autre facteur intervient pour abaisser encore la température. En effet, la dilution de l'oxygène oblige, la plupart du temps, à employer un excès d'air, l'élément le moins coûteux, afin d'assurer une complète utilisation des autres éléments. On peut réduire l'excédent nécessaire en comprimant l'air, ce qui est moins coûteux que d'en séparer l'azote, car le travail de compression peut être récupéré en détendant les gaz après la combustion ; cette réduction est l'un des avantages qu'on retire de la compression de l'air dans les moteurs à essence ou à huile lourde, et on commence à le rechercher dans certaines chaudières modernes dont le foyer fonctionne sous 2 à 3 kg. de pression effective. L'excès d'air dont on a besoin pour assurer une combustion complète avec un combustible déterminé dépend du volume de la chambre de combustion par kg. de combustible brûlé, c'est-à-dire du temps dont on dispose pour effectuer la combustion ; c'est ainsi que dans les chaudières chauffées au charbon, où la durée disponible est plus grande, l'excès d'air ne dépasse pas le double de la quantité théoriquement nécessaire et se réduit souvent à 50 et même 25 %, tandis que dans

les moteurs Diesel, bien que l'huile lourde employée brûle plus rapidement que le charbon, l'excès d'air dépasse souvent le double de la quantité théorique pour une durée de combustion de l'ordre du cinquantième de seconde.

Le carbone et l'hydrogène. — Ce sont les deux combustibles essentiels ; pratiquement, ils ne sont jamais employés isolément, et, si le carbone constitue en poids la plus grande partie des combustibles, il se trouve toujours uni à de l'hydrogène même dans les combustibles solides ; ces derniers contiennent également de l'oxygène en quantité d'autant plus grande qu'ils sont de formation plus récente ; ils renferment aussi de faibles quantités d'azote. Voici la composition moyenne des principaux combustibles solides :

	Combustible brut				Combustible sec			
	teneur en :				proportions respectives de :			
	matières volatiles	*eau*	*cendres*	*carbone fixe*	*carbone*	*hydrogène*	*oxygène*	*azote*
Bois	52	25	0,5	22,5	50	6	43,5	0,5
Tourbe.....	35	28	2	35	57	6,5	35	1,5
Lignite brun .	22	51	5	22	67	5,0	27,5	0,5
Lignite des Alpes	35	11	12	42	72	6,0	21	1,0
Houille flambante	40	2	8	50	85	5,5	9	0,5
Houille à coke	25	3	7	65	86	5,0	7,8	1,2
Anthracite ..	5	1	7	87	95	2,0	2,5	0,5

Dans tous ces combustibles solides, le pourcentage d'hydrogène ne dépasse pas 6 à 7 % ; pour les pétroles, au contraire, nous avons vu au chapitre précédent que

cette teneur varie de 13 à 18 % ; c'est de cette constatation qu'est venue l'idée de liquéfier le charbon en lui incorporant de l'hydrogène ; ce procédé, l'hydrogénation, est le seul par lequel on puisse mettre totalement le charbon sous forme liquide.

La combustion peut s'opérer non seulement sur des solides et des liquides, mais aussi sur des gaz. Le carbone gazéifié se présente sous deux groupes distincts de combinaisons. La première comprend les hydrocarbures gazeux dont le prototype est le méthane, CH^4, renfermant 25 % d'hydrogène, qui constitue la majeure partie des gaz naturels du pétrole ou des gaz de cracking, et le grisou, qui se dégage dans de nombreuses mines de charbon.

Le deuxième groupe est constitué par l'oxyde de carbone, CO, qui résulte d'une combustion incomplète du carbone ; on en trouve dans les produits de la distillation du charbon, notamment dans le gaz de ville, où il est formé par l'oxygène contenu dans le charbon ; on le fabrique aussi systématiquement par l'action de l'air ou de la vapeur d'eau sur le charbon.

La combustion s'effectue donc entre un élément toujours gazeux, le comburant, constitué par de l'air parfois surdosé en oxygène, et des éléments combustibles, charbons, hydrocarbures, alcools, oxyde de carbone, qui sont solides, liquides ou gazeux, dans lesquels les éléments combustibles essentiels sont le carbone et l'hydrogène.

Les réactions dans la combustion. — Les réactions fondamentales sont les suivantes, dans la combustion complète :

$C + O^2 = CO^2 + 94{,}5$ ca.; $2\,H^2 + O^2 = 2\,H^2O + 115{,}4$ ca.

Elles remplacent un volume d'oxygène par un volume de gaz carbonique, et deux volumes d'hydrogène et un

volume d'oxygène par deux volumes de vapeur d'eau ; elles dégagent en même temps une quantité de chaleur considérable. Dans le cas général d'un combustible de formule $C^aH^bO^c$, la réaction s'écrira :

$$4\,C^aH^bO^c + (4a + b\text{-}2c)O^2 = 4aCO^2 + 2bH^2O + 4a \times 97{,}5\ \text{ca.} + 2b \times 57{,}7\ \text{ca.} - 4q$$

q étant la chaleur de formation du combustible ; cette chaleur de formation se détermine d'ailleurs au moyen de la réaction ci-dessus, en brûlant le combustible avec de l'oxygène, dans une bombe placée à l'intérieur d'un calorimètre.

La quantité de chaleur dégagée est une première caractéristique de la combustion ; elle représente l'énergie libérée et qui sera utilisée au chauffage ou transformée mécaniquement. La deuxième caractéristique est la température des produits de la réaction ; plus elle est élevée, plus la quantité d'énergie utilisable et plus le rendement seront grands. Cette température s'obtient en divisant le nombre de calories obtenues par la chaleur spécifique moyenne des corps formés entre la température initiale et la température atteinte qu'il s'agit précisément de déterminer ; elle se calcule par approximations successives. Nous rappellerons que si, pour un solide ou un liquide, il y a une seule chaleur spécifique, variable avec la température, et, par suite, une seule chaleur spécifique moyenne entre deux températures, pour les gaz il existe deux chaleurs spécifiques : la chaleur spécifique à volume constant, qui intervient pour la combustion dans une bombe manométrique, et la chaleur spécifique à pression constante, plus grande que la précédente en raison du travail effectué par le gaz qui se dilate en s'échauffant ; c'est celle qui intervient pour la combustion dans les foyers. Dans les moteurs à explosion ou à combustion interne, le régime est mixte, car le volume et la pression

varient simultanément. Les deux chaleurs spécifiques sont dans un rapport voisin de 1,4 pour H^2, N^2, O^2 et CO, de 1,32 pour H^2O et de 1,3 pour CO^2 ; elles croissent avec la température.

Voici, d'après Nernst et Wohl, pour ces cinq gaz, les valeurs de la chaleur spécifique moyenne à volume constant d'une molécule entre 0° centigrade et les températures croissantes (petites calories par molécule-gramme) :

t	0	100	200	300	527	927	1327	1727	2127	2527
H^2	4,82	4,91	4,93	4,94	4,97	5,06	5,21	5,36	5,52	5,66
N^2	4,97	4,97	4,99	5,03	5,16	5,43	5,67	5,80	6,00	6,10
CO	4,97	4,98	5,00	5,06	5,22	5,52	5,76	5,90	6,10	6,20
O^2	5,00	5,07	5,17	5,27	5,50	5,85	6,07	6,20	6,30	6,40
CO^2	6,63	7,18	7,67	8,08	8,84	9,77	10,37	10,80	11,10	11,40
H^2O	5,99	6,05	6,14	6,24	6,53	7,09	7,61	8,10	8,50	8,80

Voici, d'autre part, les chaleurs spécifiques moyennes à pression constante par kg. de ces mêmes gaz et de l'air en grandes calories, entre 0° centigrade et les températures croissantes :

t	0	100	200	300	500	900	1300	1700	2100	2500	3000
H^2	3,403	3,429	3,455	3,482	3,534	3,640	3,745	3,849	3,955	4,060	4,192
N^2	0,245	0,247	0,249	0,251	0,254	0,262	0,269	0,277	0,285	0,292	0,302
CO	0,245	0,247	0,250	0,252	0,256	0,265	0,273	0,281	0,290	0,297	0,302
O^2	0,215	0,216	0,218	0,219	0,223	0,229	0,236	0,242	0,249	0,255	0,264
CO^2	0,202	0,209	0,217	0,225	0,238	0,257	0,268	0,277	0,284	0,290	0,296
H^2O	0,462	0,464	0,466	0,468	0,473	0,490	0,513	0,531	0,590	0,642	0,713
Air	0,237	0,239	0,240	0,242	0,246	0,253	0,261	0,268	0,275	0,282	0,292

Aucun des combustibles usuels ne s'enflamme spontanément à la température ordinaire et la combustion doit toujours être amorcée par un échauffement préalable du combustible en un ou plusieurs points de sa masse.

Avec les combustibles solides et liquides, la réaction est progressive, sa phase initiale se passant à la surface du morceau ou de la goutte de combustible ; sous l'influence de la chaleur, cette surface vaporise des matières volatiles, et le carbone se gazéifie suivant la réaction :

$$2\,C + O^2 = 2\,CO$$

Les gaz formés brûlent ensuite intégralement dans l'excès d'air ; on conçoit donc la nécessité d'une bonne pénétration par l'air de toute la masse en combustion ; plus les éléments sont petits, plus la surface d'émission est grande et plus la combustion s'accélère, exigeant un moindre excès d'air pour être complète ; c'est pourquoi le combustible est pulvérisé finement dans les brûleurs à huiles lourdes et dans les injecteurs de moteurs Diesel ; on voit donc que, même avec des combustibles solides ou liquides, la combustion se termine toujours entre des gaz, mais à proximité des solides ou des liquides qui les ont émis, et il est alors difficile de répartir la production de chaleur en des points multiples, car il faudrait y amener le charbon ou y pulvériser le liquide ; dans ces conditions, c'est sur l'appareil d'utilisation de la chaleur qu'on agira et on lui donnera des formes et des dimensions convenables afin d'utiliser au mieux les calories dégagées par le foyer.

Au contraire, quand il s'agit de combustibles gazeux, une surpression générale donnée à ces combustibles permet de les distribuer commodément en débits appropriés dans des zones choisies à l'avance ; le mélange

de l'air et du gaz est réalisé un peu avant la zone de combustion. La combustion se propage dans ces mélanges à une vitesse inférieure à 12 mètres à la seconde et on doit donner au courant des fluides une vitesse supérieure à la propagation de la flamme, de façon que celle-ci ne vienne pas s'éteindre à la région origine du mélange.

Les mélanges de gaz et d'air ne s'enflamment plus lorsque la proportion de gaz est trop faible ou lorsqu'elle est trop forte ; ainsi un mélange d'air et d'hydrogène ne s'enflamme que lorsque sa teneur volumétrique en hydrogène est comprise entre 9 et 68,5 %, sous une atmosphère de pression, ou entre 9,5 et 67,5, sous 10 atmosphères de pression. Pour l'oxyde de carbone, ces chiffres sont respectivement 15,9 et 72,9 % ou 18,4 et 62,4 %. Les deux limites se resserrent également quand il y a dépression ; ainsi pour CO la limite inférieure remonte à 50 % quand la pression tombe à 13 cm. de mercure.

L'inflammation se produit à partir d'une température minima, dite température d'inflammation, mais déjà au-dessous de cette température se produit une combustion lente, sans flamme et incomplète, qui donne naissance à de la vapeur d'eau, de l'aldéhyde, de l'oxyde de carbone, etc.... Ainsi avec le pentane, dont la température d'inflammation est de 476°, la combustion lente commence dès 255° ; des catalyseurs la favorisent ; la mousse de platine assure le fonctionnement de lampes à alcool sans flamme, productrices d'aldéhyde assainissant l'atmosphère de salles confinées ; en faisant passer le mélange de gaz et d'air à travers une masse poreuse de silice, en l'enflammant à la sortie, puis en ralentissant le débit, on réalise la combustion sans flamme à l'intérieur de la masse réfractaire ; ce dernier dispositif a reçu quelques applications industrielles,

Impuretés des combustibles. — Deux impuretés jouent un rôle essentiel dans la combustion : le soufre et les cendres.

Le soufre se rencontre dans la plupart des combustibles ; les charbons en renferment souvent des pourcentages tels qu'ils ne pourraient s'expliquer exclusivement par le soufre contenu dans les plantes originelles ; on admet qu'il provient d'infiltration, dans les couches de charbon, d'eaux chargées de sulfates ; ces sulfates, réduits à la longue par le carbone, se transformeraient notamment en pyrites sulfureuses et en composés sulfurés organiques ; on y rencontre également des sulfates en faible quantité. Dans la combustion, la distillation ou la gazéification du charbon, le soufre organique et une partie du soufre des pyrites se dégagent sous forme d'hydrogène sulfuré mélangé à une proportion de gaz sulfureux d'autant plus grande que l'excès d'air est plus considérable ; dans le cas de la distillation, une partie du soufre reste dans le coke et s'en dégage lorsqu'on éteint le coke sortant du four de distillation en l'arrosant d'eau. Le soufre des sulfates reste dans les cendres, résidu final du charbon. Les pétroles ne renferment que du soufre organique. Quelle que soit la forme sous laquelle il se présente, le soufre passé dans les gaz de la combustion s'y trouve à l'état de gaz sulfureux SO^2, mélangé de quantités plus ou moins grandes d'anhydride sulfurique SO^3 ; il en résulte, en présence d'eau, la formation d'acides sulfureux et sulfurique qui corrodent les pièces métalliques placées dans les gaz du foyer. C'est pourquoi le soufre, dès que sa teneur dépasse 1 à 2 %, constitue une impureté redoutable des combustibles. On élimine une grande partie du soufre pyritique dans le traitement du charbon (lavage) préalable à sa vente ; nous verrons également que, dans l'hydrogénation du charbon ou des

résidus de pétrole, on arrive à l'extraire sous forme de soufre et, ainsi, à le valoriser.

Les cendres jouent un rôle important pour les charbons. Elles sont dues, pour une petite part, aux substances minérales contenues à l'origine dans les plantes d'où provient le charbon, et, pour la plus grande part, à des dépôts minéraux intercalés entre les couches de charbon ou infiltrés dans ces couches. Les cendres des végétaux, en faible quantité, et réparties dans la masse, ne nuisent pas à la tenue au feu du charbon ; il en va tout différemment des autres qui, par leur épaisseur, peuvent maintenir leur structure dans le feu et s'opposer à l'attaque des parties charbonneuses ; on conçoit que, dans ce cas, la pulvérisation préalable du charbon facilite, lorsqu'il est très cendreux, sa combustion complète. C'est ainsi qu'aux Houillères de Ronchamp on a pu brûler des poussiers, résidus de lavage, renfermant plus de 50 % de cendres.

La composition des cendres est très variable. Elles peuvent renfermer, d'une part, des éléments acides : silice, oxyde ferrique, d'autre part, des éléments basiques : chaux, magnésie, enfin de l'alumine. Leur caractéristique essentielle est leur point de fusion : les cendres qui contiennent soit des éléments acides, soit des éléments basiques, soit de l'alumine, fondent à haute température et restent généralement inaltérées dans la combustion ; comme les cendres de charbon de bois, elles ne s'agglomèrent pas, ne gênent pas l'afflux d'air et s'éliminent facilement ; au contraire, les cendres qui, contenant des éléments des diverses catégories, fondent au-dessous de 1 400°, provoquent la formation de scories qui se solidifient quand elles sortent de la zone de combustion ; elles enrobent souvent des parcelles de charbon non brûlé, entravent l'arrivée d'air et obligent à un « piquage » du foyer qui les rompt et permet leur élimination.

L'humidité est une impureté habituelle des combustibles solides ou gazeux ; on ne la trouve pas dans les pétroles, qui ne sont pas miscibles à l'eau ; elle constitue un inconvénient pour la combustion et la distillation, car elle consomme une quantité notable de calories pour sa vaporisation (629 ca. par kg. d'eau pris à 15°) et abaisse la température du foyer ; au contraire, dans le cas de la gazéification et lorsqu'elle n'est pas en quantité trop considérable, elle provoque la formation d'une certaine quantité de gaz à l'eau qui, mélangé au gaz pauvre, en augmente la valeur calorifique, et elle absorbe une partie des calories dégagées par la transformation du carbone en CO. On distingue dans les combustibles l'humidité proprement dite, qui est enlevée par simple dessiccation, et l'eau de constitution qui fait partie intégrante du combustible et n'est extraite que par un chauffage à 110° ; ainsi une tourbe contient jusqu'à 90 % d'eau lorsqu'elle est sortie de la tourbière ; par un séchage prolongé à l'air et au soleil on peut abaisser cette teneur à 25, 30 % qui représente alors l'eau de constitution.

Pouvoir calorifique des combustibles. — C'est la quantité de chaleur que dégage un kg. de combustible lorsqu'il est brûlé ; à l'issue d'une combustion industrielle, l'eau préexistant dans le combustible et l'eau formée se trouvent à l'état de vapeur, et une partie des calories dégagées a servi à leur vaporisation à raison de 11,6 calories par molécule-gramme d'eau, c'est-à-dire pour 18 gr., ce qui représente 644 calories par kg. d'eau vaporisée à partir de 0° ; le reste, c'est-à-dire les calories qui sont passées dans les gaz et la vapeur d'eau, une fois formée, pour les échauffer et les amener à leur température à la fin de la combustion, constitue ce qu'on appelle le pouvoir calorifique

inférieur ; si on lui ajoute les calories employées à la vaporisation de l'eau, on obtient le pouvoir calorifique supérieur.

C'est ce dernier qu'on détermine expérimentalement dans la bombe de Mahler, en y brûlant 1 gramme de combustible dans de l'oxygène à une pression de 25 kg. Le combustible comprimé sous forme d'une pastille est traversé par un fil de fer relié au pôle en platine d'un dispositif d'allumage ; la pastille est placée dans une coupelle en platine portée par le couvercle de la bombe qui se fixe sur le corps de l'appareil avec un joint étanche à la pression de 25 kg. Le couvercle étant fixé, on introduit l'oxygène sous pression par un orifice à pointeau, on place l'obus dans un calorimètre et on fait fonctionner le dispositif d'allumage qui porte à l'incandescence le fil de fer et le combustible et provoque leur combustion ; on note les températures successives de l'eau du calorimètre d'où on déduit l'échauffement maximum D de cette eau, et la correction *d* représentant la baisse spontanée de la température ; on ouvre la bombe et on la lave à l'eau distillée ; une partie de l'azote contenu dans le combustible s'est transformée en acide nitrique, qui ne se forme pas dans la combustion ordinaire ; on dose donc dans l'eau le poids formé, soit *p*, et le pouvoir calorifique supérieur Q est donné par la formule

$$Q = 1\,800\,[(D + d)(P + P') - (0.23\,p + 1.6\,p')]$$

dans laquelle P est le poids de l'eau du calorimètre, P' l'équivalent en eau de la bombe et de ses accessoires, 0,23 ca. la chaleur de formation de 1 gr. d'acide nitrique dilué, *p'* le poids du fil de fer, 1,6 ca. la chaleur de combustion de 1 gr. de fer.

D'autre part, connaissant la quantité totale d'hydrogène contenue dans le combustible sous forme d'eau et d'hydrocarbures, on en déduit la quantité totale

d'eau formée dans la combustion, et, si q est la chaleur de vaporisation de cette eau, le pouvoir calorifique inférieur sera $Q - q$; on peut d'ailleurs déterminer directement la quantité d'eau formée si le couvercle de la bombe porte un tube plongeant au fond du récipient ; à la fin de l'essai, on la balaie par un courant d'air sec et on dose l'humidité entraînée.

Certaines formules donnent approximativement le pouvoir calorifique inférieur d'après l'analyse centésimale du combustible. Soit C le pourcentage du combustible en carbone, H en hydrogène, O en oxygène.

La formule employée en Allemagne, dans laquelle S représente la teneur en soufre, H^2O celle en eau, est :

$$Q - q = 81\,C + 290\,(H - \frac{O}{8}) + 25\,S - 6\,H^2O.$$

Goutal, en France, a proposé la formule

$$Q = 82\,C + a\,V$$

dans laquelle C est la teneur en carbone fixe, V la teneur en matières volatiles et a un coefficient qui dépend de V et qui, pour des houilles dont le taux V croît de 5 à 20 et 35 %, décroît de 145 à 109 et 94.

Le pouvoir calorifique (inférieur) des lignites varie de 4 000 à 6 000 calories ; celui des charbons, de 5 000 à 8 000 ca. ; celui de l'alcool est de 6 350 ca., celui de l'essence de pétrole de 9 800 ca. environ, celui du mazout de 10 000 à 11 000 ca. ; le pouvoir calorifique le plus élevé au kg. est celui de l'hydrogène qui atteint 28 800 ca., mais, pour les gaz, ce pouvoir calorifique au kg. n'a plus de sens ; celui qui compte, pratiquement, est le pouvoir calorifique au mètre cube, proportionnel au pouvoir calorifique moléculaire ; celui de l'hydrogène n'est plus que de 2 587 ca. au mc., celui du CO est de 3 050, celui du méthane de 7 960 ca. ; le pouvoir calorifique du gaz pauvre est de 1 050 à 1 100 ca. ; par injection de vapeur on peut, en formant partielle-

ment du gaz à l'eau, l'élever à 1 400 ; celui du gaz à l'eau est de 2 600 ca. ; celui du gaz de ville, obtenu par distillation de la houille et non débenzolé, varie de 5 000 à 5 500 calories.

La détermination du pouvoir calorifique d'un gaz peut se faire à l'obus Mahler, comme pour les liquides ou les solides, en remplissant d'abord l'obus de gaz, puis d'oxygène sous une pression de 5 kg., mais on emploie le plus souvent le calorimètre de Hartley, modifié par Junckers, qui permet de déterminer le pouvoir calorifique non à volume constant pendant la combustion, mais à pression constante. Dans cet appareil, un débit déterminé de gaz arrive à un brûleur et les produits de sa combustion échauffent un débit déterminé d'eau ; la vapeur d'eau formée dans la combustion se condense contre les parois de métal refroidies par le courant d'eau, et est recueillie et pesée. Le gaz brûlé sort de l'appareil à une température voisine de celle du gaz non brûlé. La connaissance de l'échauffement subi par le courant d'eau donne le nombre de calories dégagées par la combustion d'un volume déterminé de gaz à la température et à la pression de l'expérience, avec condensation de l'eau formée ; on en déduit le pouvoir calorifique supérieur du mètre cube de gaz à 0° et 760 mm. de pression, et, en retranchant les calories de condensation du poids d'eau formée, le pouvoir calorifique inférieur.

Températures de gazéification ou de combustion. — Ces températures peuvent se mesurer ou se calculer.

Pour les mesurer, lorsqu'elles ne dépassent pas 1 600°, on peut employer le pyromètre thermo-électrique Le Chatelier, constitué par un couple platine-platine rhodié placé à l'intérieur d'un tube de silice et qu'on introduit dans la zone dont on veut déter-

miner la température. Le couple est relié à un galvanomètre dont la déviation, tarée au préalable, mesure la température. Pour la mesure des températures de 400° à 2 000°, on emploie le télescope pyrométrique de Fery ; avec cet appareil, on détermine la température d'un foyer en mesurant la quantité d'énergie qu'il rayonne et qui, d'après la loi de Stefan, est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue du foyer ; le pyromètre comprend un petit télescope à miroir au foyer duquel est placé un couple thermo-électrique, relié à un galvanomètre ; ce couple est constitué par deux lames, croisées à angle droit, de fer et de constantan, soudées à leur point de croisement ; elles forment ainsi un réticule sur lequel vient se former l'image de l'objet ; ce dernier est constitué par une ouverture pratiquée dans le four dont on mesure la température ; on vérifie la position de l'image avec un oculaire ; par un diaphragme placé en avant du réticule, on ne conserve qu'un faisceau lumineux émis de l'objet sous un angle constant, quelle que soit la distance de l'appareil à l'ouverture du four, et les indications du pyromètre sont indépendantes de cette distance pourvu que l'image de l'ouverture soit plus grande que la soudure et la couvre bien. Le galvanomètre est gradué directement en degrés de température par un étalonnage préalable ; la précision de cet appareil est grande, car on commet sur la température une erreur quatre fois plus faible que sur la quantité d'énergie rayonnée.

On emploie fréquemment aussi pour ces déterminations, notamment dans les émailleries, les verreries, les industries du fer, etc..., les montres fusibles dont l'emploi a été proposé pour la première fois en 1882 par C. Lauth et G. Vogt, chimistes de la manufacture de Sèvres ; ce sont de petites pyramides triangulaires

tronquées, constituées par une pâte céramique d'une composition telle, pour un numéro déterminé, qu'elle se ramollisse à une température déterminée ; ces températures sont échelonnées, par exemple, de 20° en 20° depuis 600° jusqu'à 2 000°. Pour assurer leur stabilité, on les enfonce de 3 à 5 mm. dans une plaque réfractaire humide, d'une surface suffisante pour que, lors du ramollissement de la montre, son extrémité se recourbe sur cette plaque. On introduit en général dans l'enceinte dont on veut mesurer la température trois montres de numéros consécutifs, en les préservant par des briques placées autour contre les courants d'air ou de gaz. La température sera fixée de façon suffisamment précise si, l'extrémité de la montre intermédiaire s'étant recourbée, la montre de numéro supérieur reste intacte et celle de numéro inférieur se couche sur la plaque.

On peut également déterminer par le calcul la température maxima dégagée dans un foyer de gazéification ou de combustion. On prend pour origine des calories dans les corps, par exemple, le zéro centigrade ; on fait le total des calories apportées à partir de zéro degré par les corps en réaction et on y ajoute les calories dégagées par la réaction ; supposant que la réaction se passe à t^o, on divise ce total par la capacité calorifique moyenne des produits entre 0 et t^o, et le quotient doit précisément être égal à t^o ; si au lieu de t^o on trouve $t_1{}^o$, on essaiera, par exemple, la température $\frac{t + t_1}{2}$ jusqu'à ce que le quotient soit peu différent de la valeur admise, et alors ce quotient sera la température cherchée.

Plusieurs difficultés se présentent, qui empêchent un calcul très précis de cette température maxima : il faut d'abord apprécier quelle va être la température

des corps au moment où ils vont réagir et, par conséquent, les calories qu'ils vont fournir après les avoir reprises en partie aux produits de la réaction déjà effectuée. La réaction elle-même n'est pas instantanée et l'énergie qu'elle rayonne pendant sa réalisation diminue sa température maxima.

On calcule ainsi que la combustion du carbone sans excès d'air donne une température de 2 375° ; aucune brique réfractaire usuelle ne pourrait y résister ; on ne peut envisager la combustion du carbone ou des hydrocarbures sans excès d'air appréciable qu'à l'intérieur d'une enceinte tapissée de tubes d'acier parcourus par un courant d'eau ou de vapeur absorbant une grande partie des calories dégagées par le foyer. Le taux de gaz carbonique dans les fumées atteint alors 20 % en volume. S'il y a un excès d'air de 25 %, le taux de CO^2 dans les fumées se réduit à 16 % et la température s'abaisse aux environs de 1 900° ; avec un excès d'air de 50 %, le taux de CO^2 se réduit à 14 % et la température aux environs de 1 600° ; ces derniers chiffres sont les plus habituels.

Contrôle de la gazéification et de la combustion. — Pour ces deux opérations, une condition essentielle de bonne marche, c'est que le combustible ait été intégralement transformé ; on ne doit pas en trouver dans les cendres ou les scories ; on le vérifie en les réduisant en poudre fine, les chauffant dans l'oxygène et dosant le gaz carbonique produit.

Le contrôle de la gazéification se complète par la vérification du pouvoir calorifique du gaz produit, par exemple avec un calorimètre Junkers enregistreur.

Tant pour la gazéification que pour la combustion, on analyse également les gaz formés ; l'un des appareils les plus employés pour cette analyse est l'appareil

d'Orsat ; le gaz y est aspiré dans une éprouvette graduée et un volume déterminé de ce gaz mis en contact dans des flacons successivement avec une solution de potasse qui absorbe le gaz carbonique, une solution alcaline d'acide pyrogallique qui absorbe l'oxygène, et une solution de cuivre ammoniacal qui absorbe l'oxyde de carbone ; les réductions successives de volume donnent les teneurs du gaz en ces divers constituants. Le plus souvent on se contente du dosage du gaz carbonique ; sa teneur doit être aussi faible que possible dans la gazéification et aussi forte que possible dans la combustion ; l'appareil enregistreur Brenot enregistre automatiquement toutes les cinq minutes la teneur d'un gaz en anhydride carbonique.

Chapitre III

LES COMBUSTIBLES SOLIDES
LEUR PRÉPARATION INDUSTRIELLE

Les combustibles, tels qu'on les retire de leurs gisements naturels, doivent en général subir une préparation avant leur emploi ; nous allons examiner dans ce chapitre les divers modes de préparation des combustibles solides.

Bois et charbon de bois. — L'industrie les avait progressivement délaissés, mais, en raison de leur très faible teneur en cendres, ils ont retrouvé, depuis la guerre de 1914-1918, un nouvel emploi dans les gazogènes alimentant les camions automobiles.

Le bois qu'on y utilise doit être sec ; il est formé, en général, de déchets de fabrications provenant de bois durs ou de bois séché à l'air, mais à l'abri de la pluie ; on n'est pas encore parvenu à utiliser couramment du bois mouillé ou du bois vert ; sa teneur en humidité varie de 10 à 18 %, sa teneur en cendres de 0,5 à 0,8 % et il a 63 à 72 % de matières volatiles qui comprennent son eau de constitution ; son pouvoir calorifique supérieur est de 2 800 ca. environ ; il passe à 3 600 ca. pour le bois sec et à 4 700 ca. pour le bois desséché par chauffage.

Le charbon de bois s'obtient par la distillation du bois ; il est fabriqué encore en France par le procédé des meules. La distillation en cornues permettait de récupérer, d'une part de l'acétate de chaux, de l'alcool méthylique et de l'acétone ; d'autre part, le goudron, qui donne l'huile de créosote et le brai. Mais cette carbonisation plus industrielle avait cédé le pas, elle-même, à la fabrication de l'alcool méthylique de synthèse, par le procédé Patart, à partir de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène. Elle a repris une nouvelle activité, dans laquelle ce ne sont plus les produits de la distillation qui comptent, mais la valorisation du charbon de bois comme carburant de remplacement.

C'est pourquoi les processus de fabrication sont modifiés dans les installations les plus récentes. Voici celui employé à la station d'essai de la Poudrerie de Sevran pour la production de l'aggloméré de charbon de bois appelé carbonite. Il est basé sur le fait que la carbonisation du bois s'opère en quatre phases : jusqu'à 155°, le bois perd son eau d'imbibition, il se désève ; de 155° à 275°, la cellulose subit une décomposition pyrogénée d'où ne résultent que de l'eau et des gaz ; de 275° à 420° se fait la décomposition pyrogénée de la lignine avec production d'alcools, cétones, acides organiques et hydrocarbures constituant le goudron ; au-dessus de 420° on n'obtient plus que des gaz permanents d'un bon pouvoir calorifique.

Pour permettre la séparation de ces phases, le bois, au lieu d'être découpé en rondins, est déchiqueté en petits morceaux qu'on introduit dans des autoclaves où est injectée de la vapeur à 5 kg. de pression qu'on détend, à la fin du chauffage, dans les autoclaves suivants ; le bois, ainsi déshydraté, subit les deux phases suivantes dans une cornue chauffée sur la périphérie ; un tuyau central perforé prélève les gaz et vapeurs

tout le long de la cornue en évitant toute surchauffe destructrice de ces produits ; le chauffage est arrêté avant que commence la quatrième phase ; on a ainsi un charbon qui contient encore 7 à 8 % de matières volatiles riches en calories. En opérant ainsi, une tonne de bois de pin donne 270 kg. de charbon de bois, 120 kg. de goudron anhydre et 50 mc. de gaz, tandis qu'avec les procédés habituels, ces chiffres sont respectivement 250, 80 et 110. Le goudron primaire obtenu est partiellement oxydé par injection d'air et chauffage ; on augmente ainsi son pouvoir agglutinant ; on le mélange au charbon broyé et on en fabrique des boulets calibrés du poids de 15 gr. environ, en faisant le mélange dans une presse rotative ; les boulets sont recuits dans une atmosphère neutre vers 425°-440° et constituent alors la carbonite.

Sur le charbon de bois, ces agglomérés ont les avantages suivants : ils sont compacts, d'une densité supérieure à 1, et, tandis que le charbon de chêne ne pèse que 250 kg. au stère, le poids de carbonite qu'on peut loger dans le même volume est 3,5 fois plus élevé ; alors que le charbon est friable et salissant, l'aggloméré roule et coule ; il se manipule sans formation de poussière et se brise très difficilement ; enfin il n'est pas pénétré par l'eau, tandis que le charbon en absorbe 15 à 20 % de son volume ; ces diverses propriétés augmentent, à encombrement égal du combustible, le rayon d'action du camion automobile ; ils permettent le stockage du combustible en plein air et rendent sa manipulation facile et propre.

Tourbe. — La production de la tourbe en France n'a cessé de décroître depuis le début du siècle ; c'est ainsi qu'elle est passée de 45 000 t. en 1913 à 30 000 t. en 1923 ; au contraire, en Allemagne, en Italie, au

Danemark, la production se maintient ou se développe. Or il existe en France 400 000 ha. de tourbières bien prospectées ; la moitié a des superficies d'un seul tenant supérieures à 100 ha. pour lesquels une exploitation industrielle est possible ; en comptant sur un minimum de 300 kg. de tourbe sèche par mq., équivalant à 160 kg. de houille, les 200 000 ha. exploitables équivalent à 320 millions de tonnes de houille, d'autant moins négligeables qu'ils sont répartis sur tout le territoire. La caractéristique essentielle de la tourbe, c'est d'être un colloïde à très haute teneur en eau ; quand elle est extraite de la tourbière, elle contient de 85 à 90 % d'eau ; or l'élimination de cette eau est très difficile, qu'il s'agisse de tourbe de plaine, constituée surtout par des spores de rhizomes et des radicelles, ou de la tourbe de plateau, constituée par des sphaignes. Le seul procédé suffisamment économique est le séchage à l'air et il ne peut assurer une production annuelle suffisante que si le climat n'est pas trop humide.

La tourbe est extraite soit à la main, avec un outil appelé grand louchet, qui la débite en mottes, soit avec des extracteurs mécaniques reproduisant le travail à la main. Dans de nombreuses installations, notamment au Canada, elle est extraite par des dragues, triturée dans l'eau sous forme de boues recueillies sur des aires filtrantes ; on obtient ainsi des couches homogènes dont la teneur en cendres est réduite et qui, grâce à la trituration subie, se sèchent assez facilement ; ces couches sont découpées, moulées en forme de briquettes et entassées sous des abris où, au bout de quelques semaines de beau temps, elles sont ramenées à une teneur de 30 à 35 % d'humidité ; elles ont alors un pouvoir calorifique d'environ 3 000 ca. Tous les procédés imaginables ont été essayés pour détruire

le colloïde de la tourbe et en faciliter le séchage ; procédés chimiques : addition d'acide ou de chaux ou de sel gemme, etc... ; physiques : compression, congélation, substitution d'huile à l'eau, électrolyse, surchauffe.... Le seul qui ait donné des résultats industriels est le procédé Madruck, dans lequel on ajoute à la tourbe humide une poudre sèche, en fait de la tourbe sèche pulvérisée, le mélange se séchant alors plus rapidement.

La tourbe, combustible pauvre en calories, est très réactive ; on obtient facilement avec elle une combustion complète ; elle est employée sur grilles, ou dans des gazogènes avec lesquels elle peut fournir un gaz donnant jusqu'à 1 400 ca. au mètre cube.

Préparation mécanique des charbons. — Le tout-venant extrait d'une mine de charbon renferme des éléments de dimensions très variables, depuis le poussier jusqu'à des morceaux de plusieurs centimètres de côté ; l'usage commercial donne aux diverses dimensions les dénominations suivantes :

0 à 1/2 ou 1 mm. . . .	poussier
1/2 ou 1 à 5 mm. . . .	fines
5 à 10 mm.	perles
10 à 20 mm.	grains
20 à 30 mm.	braisettes
30 à 50 mm.	têtes de moineaux ou noisettes
50 à 80 mm.	gailletins

Les appareils qui consomment le charbon, soit pour le brûler, soit pour le gazéifier, ont un rendement d'autant plus élevé qu'ils ont été plus soigneusement appropriés à une catégorie de combustible ; les foyers pour poussier, brûlant un charbon qui offre une très grande surface de combustion, ne pourront employer des morceaux ; pour tirer un bon parti du charbon, il est donc indispensable de le classer en catégories

analogues aux catégories commerciales que nous venons d'énumérer.

D'autre part, l'impureté fondamentale du charbon est constituée par les cendres qui, elles, sont incombustibles ; elles se divisent en deux catégories : les cendres adventices, qui proviennent des matières minérales interposées par les eaux dans les lits de végétaux qui ont formé la houille, et les cendres essentielles, qui proviennent des matières minérales contenues dans les végétaux eux-mêmes. A ce point de vue, depuis une vingtaine d'années et sur l'initiative de Mrs Mary Stopes, on distingue, à l'examen microscopique de la houille, quatre composants : le fusain, le durain, le clarain et le vitrain.

Le fusain a une texture friable ; on y reconnaît des fibres noircies, rarement des feuilles et du liège ; dans le durain, on distingue une masse de granules très petits avec des taches dorées ou orangées représentant des cuticules ou des spores ; dans le clarain, sur un fond translucide et doré apparaissent des débris de tiges ou de feuilles, tandis que dans le vitrain il ne reste plus qu'une masse colloïdale, homogène et translucide.

Le clarain et le vitrain forment le charbon pratiquement pur, dont il est impossible de séparer les cendres constitutives ; dans chaque échantillon de houille, le charbon pratiquement pur aura donc un certain taux de cendres ; de même les pierres qu'on rencontre dans le charbon contiendront 15 à 35 % de charbon et elles auront un taux de cendres variant de 65 à 85 % qui sera le taux de cendres des pierres pratiquement pures.

Les cendres ont des inconvénients multiples : elles représentent un poids et un volume morts dans le transport des combustibles, dont elles augmentent le coût ; à la combustion ou à la gazéification, elles consti-

tuent un déchet d'autant plus gênant qu'il est souvent fusible ; enfin, en formant une scorie, elles enrobent du charbon non brûlé, à une teneur qui atteint couramment 30 à 40 %, et diminuent le rendement calorifique. Il est donc nécessaire de débarrasser les meilleures qualités de charbon des cendres éliminables en les lavant.

Courbes de classement et de lavabilité des charbons. — Elles permettent de définir en quantités et en qualités toutes les catégories de charbons qu'on obtiendra par le traitement d'une houille déterminée.

Pour en tracer les courbes de classement, on crible le tout-venant dans des appareils munis de tamis à trous ronds et on détermine les quantités correspondant à chacune des sept catégories commerciales ; on trace une courbe en prenant pour abscisses les dimensions en millimètres, et en ordonnées le pourcentage de charbon obtenu dans le total des catégories de 0 à la dimension considérée (Fig. 1). Soit un charbon contenant 55 % de 0/10, 14 % de 10/20, 9 % de 20/30, 8 % de 30/50 et 7 % de 50/80, on tracera une courbe passant par les six points 0/0, 10/55, 20/69, 30/78, 50/86 et 80/93 ; ce sera la courbe de classement ; on y adjoindra le taux de matières volatiles qui, étant en général le même pour toutes les catégories, sera représenté par une parallèle aux abscisses, par exemple d'ordonnée 15 si le charbon a 15 % de matières volatiles ; on tracera également la courbe des taux de cendres en gardant les mêmes abscisses et en portant en ordonnées les taux de cendres ; ces taux augmentent d'ordinaire avec la grosseur de la catégorie ; la courbe tracée suppose des taux de 16 pour le 0/10, 19 pour le 10/20, 21 pour le 20/30, 24 pour le 30/50 et 27 pour le 50/80.

L'établissement de ces courbes permet d'effectuer

en toute connaissance de cause le criblage du charbon ; ce criblage, nécessaire au point de vue commercial,

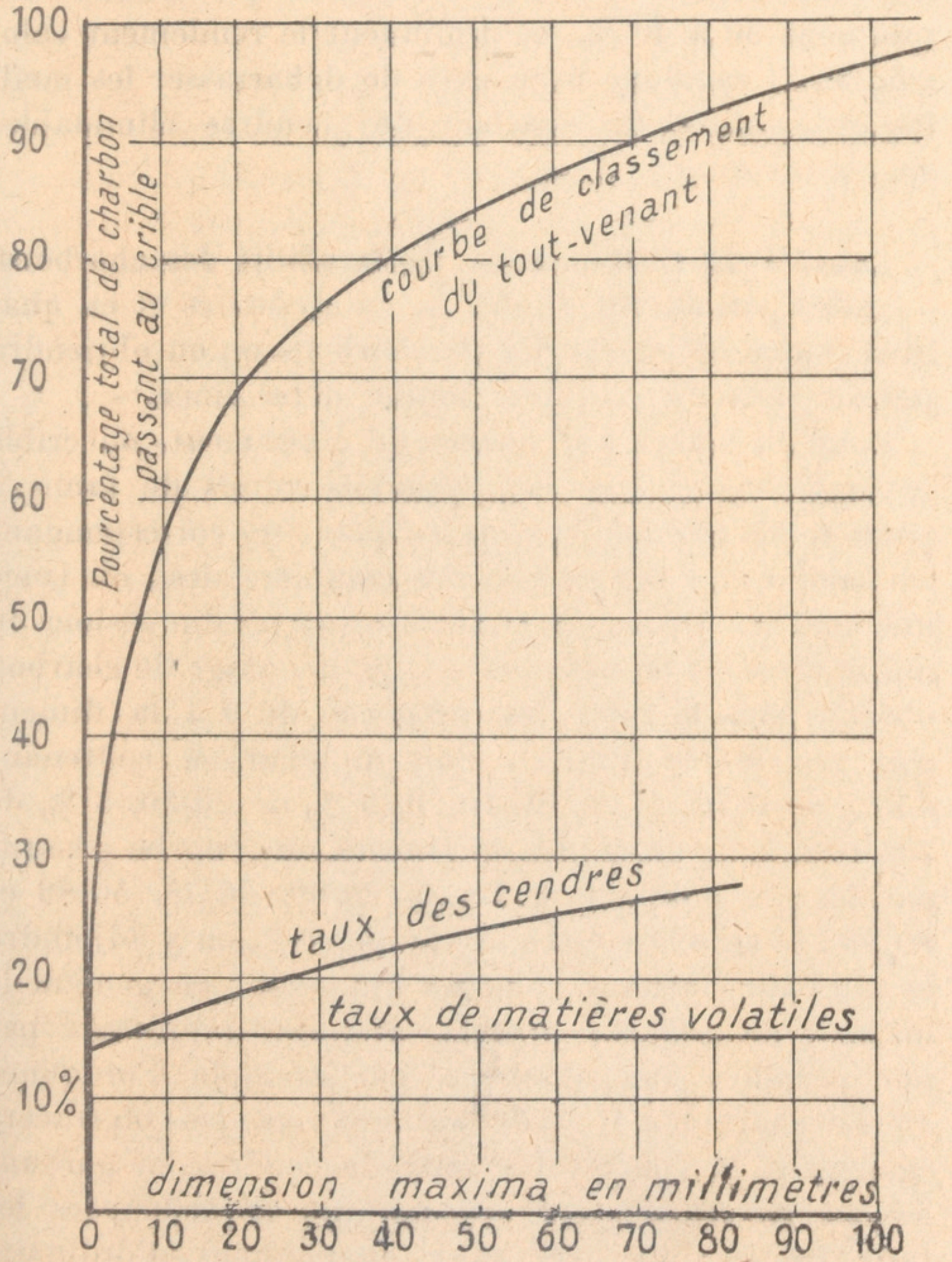


FIG. 1. — COURBES DE CRIBLAGE.

est indispensable à un lavage correct du charbon ; en effet, il élimine le poussier qui ne doit pas passer

dans les lavoirs parce qu'il y forme des mousses d'où les schistes cendreux ne se précipitent pas ; en outre, il s'agglomère aux argiles dégagées dans l'eau par le lavage et forme des schlamms difficiles à sécher et à utiliser, qui viennent salir en partie le 0/5 lavé. D'autre part, le criblage permet de ne laver simultanément que des morceaux de dimensions voisines ; ceci est important, car la séparation du schiste et du charbon dans le lavoir est basée sur la différence de vitesse de chute dans l'eau du schiste et du charbon ; or du schiste fin tomberait aussi lentement que du charbon plus gros, malgré leur différence de densité, et la séparation ne se ferait plus ; ainsi, lorsque deux morceaux de schiste et de charbon de 8 mm. ont des vitesses de chutes respectivement de 17 et de 12 cm., un grain de schiste de 1 mm. n'aura plus qu'une vitesse de chute de 10 cm., inférieure à celle du morceau de charbon.

Les courbes de lavabilité ont été proposées par Hanappe, il y a environ 25 ans ; nous allons en exposer la théorie et le mode d'emploi d'après la communication que l'éminent spécialiste du traitement industriel des combustibles, M. Ch. Berthelot, a faite le 8 juin 1923 à la Société des Ingénieurs civils. On les trace en se basant sur la différence de densité entre le schiste et le charbon proprement dit ; en divisant un échantillon de charbon en portions de densité croissante, on le séparera en même temps en portions de teneurs en cendres croissantes.

Pour effectuer cette division, on emploie soit de l'acide sulfurique, soit une solution de chlorure de zinc, plus ou moins dilués par l'eau, soit du tétrachlorure de carbone plus ou moins dilué par de la benzine, et on constitue des solutions de densités 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 ; on verse l'échantillon dans la solution 1.2 ;

on note le pourcentage qui flotte et on détermine son taux de cendres. On lave, on sèche la partie la plus lourde, on la verse dans la solution 1.3 ; on note le pourcentage qui flotte et on détermine son taux de cendres ; on continue l'opération avec les solutions suivantes. On obtient ainsi cinq fractions avec le pourcentage du poids total représenté par chacune et le taux de cendres correspondant. Sur une ordonnée dont la hauteur totale représente l'unité (Fig. 2), on porte de haut en bas le premier pourcentage AC et au milieu de la longueur AC, en D, on porte une abscisse D*d* représentant à l'échelle choisie la teneur en cendres de la première fraction ; on obtient ainsi le point *d* de la courbe de lavabilité. On porte ensuite en CE le pourcentage de la deuxième fraction et au milieu F de CE l'abscisse F*f* représentant la teneur en cendres de la deuxième fraction ; en continuant, on obtient de même les points *h*, *l* de la courbe. On la fait partir parallèlement à l'axe vertical du point *a* et elle aboutit en *b* sur l'axe horizontal.

Le premier avantage de cette courbe est de renseigner, par son simple examen, sur la facilité avec laquelle on pourra laver le charbon ; si, comme sur la figure, elle se compose de deux tronçons à courbures très différentes, le charbon sera facile à laver ; si, au contraire, la courbure varie peu d'une extrémité à l'autre, le lavage sera difficile ; la courbe permet en outre de prévoir quelles seront les teneurs en cendres du charbon lavé et des schistes, si on tire un pourcentage déterminé de charbon lavé à partir du charbon non lavé ; elle montrera également si on a intérêt à laver les schistes d'une première opération ou à incorporer au charbon lavé une partie du poussier.

Pour la fraction CE, par exemple, la teneur totale en cendres de cette fraction est représentée par le

produit CE × F*f*, c'est-à-dire sensiblement par la surface CE*ec* et la quantité totale des cendres conte-

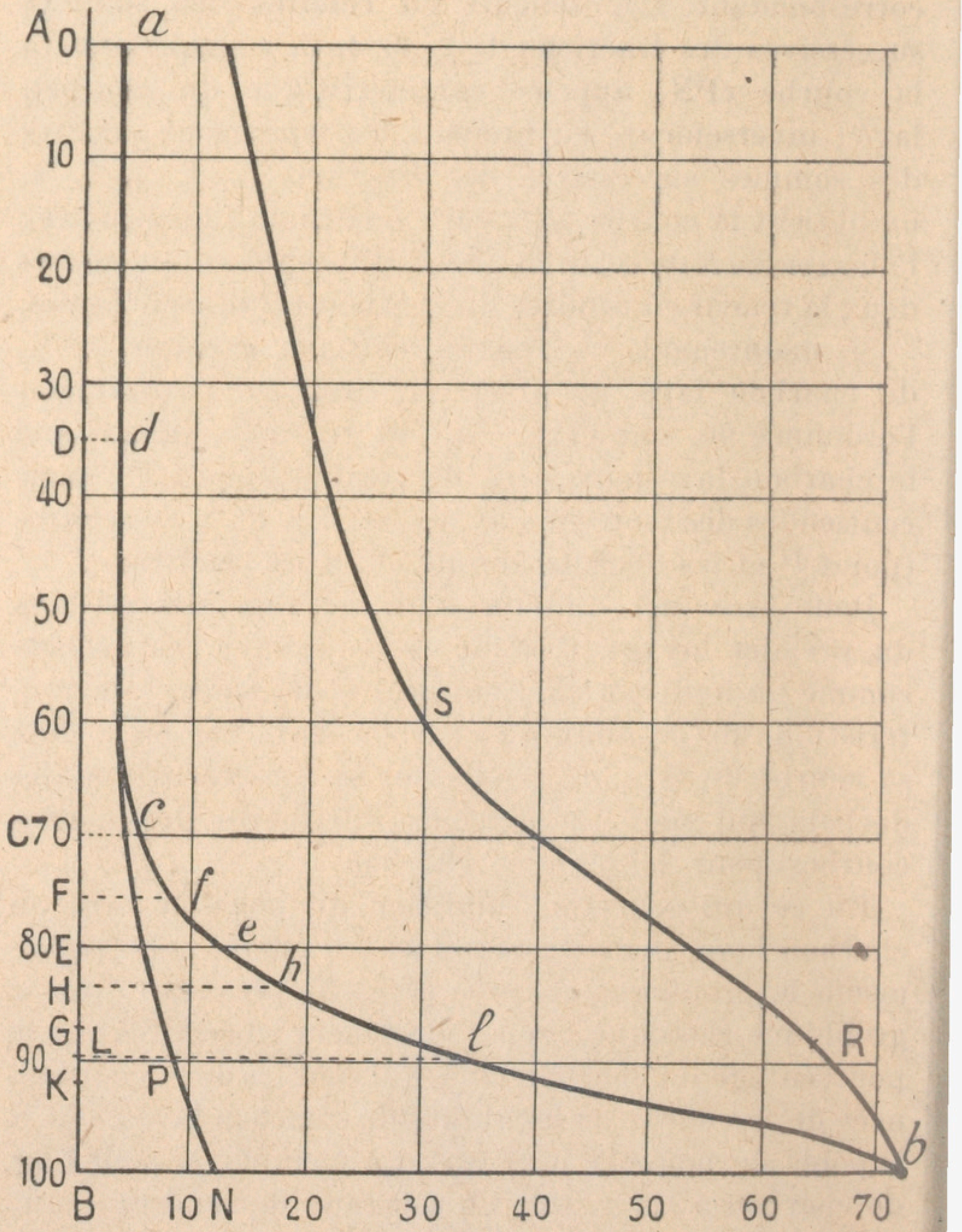


FIG. 2. — COURBES DE LAVABILITÉ.

nues dans le charbon est représentée par la surface AB*blecda*, 12 par exemple, et en divisant par le poids

total, soit 100, on obtient sur B*b* le point N à une distance 12 % de B. On obtiendra de même les points correspondant aux teneurs en cendres des sommes successives des fractions 1, 2, 3, 4, 5, ce qui donnera la courbe *c*PN, appelée caractéristique du charbon lavé ; inversement, en prenant les teneurs en cendres des sommes successives des fractions 5, 4, 3, 2, 1, on obtient la courbe *b*RS, caractéristique des schistes ; l'abscisse en A de cette courbe et BN, représentant toutes deux la teneur en cendres du charbon total, sont égales.

Si, maintenant, on veut obtenir par exemple 90 % de charbon lavé, on trace l'horizontale passant par l'ordonnée 90, soit P*l*R. On voit immédiatement que le charbon lavé aura 5 % de cendres (point P), mais contiendra des morceaux ayant jusqu'à 40 % de cendres (point *l*) et les déchets auront 62 % de cendres.

Pour examiner l'intérêt d'un relavage des déchets du premier lavage, il suffit de considérer ces déchets comme un nouveau charbon brut et de tracer la caractéristique de ce nouveau charbon lavé, car on a déjà sa courbe de taux de cendres et sa caractéristique des déchets qui sont les portions inférieures des mêmes courbes pour le premier charbon.

En ce qui concerne l'addition du poussier brut au charbon lavé, pour en examiner les effets, nous préconisons le graphique ci-après (Fig. 3), plus clair que le graphique classique : soit C la teneur en cendres et *p* le pourcentage du charbon lavé, qui sont les deux coordonnées de la courbe de lavabilité du charbon lavé ; soit K le poids de poussier brut qu'on a à employer pour 1 kg. de charbon à laver, soit Cb son taux de cendres ; enfin soit Cm le taux de cendres qu'on veut avoir finalement dans le mélange ; on aura la relation

$$\frac{pC + KCb}{p + K} = Cm \qquad \text{ou} \qquad Cmp - pC = K\,(Cb - Cm)$$

Ayant la courbe de lavabilité ABC du charbon à laver qui donne c en fonction de p, traçons la courbe $X = p_c$ en prenant une échelle d'abscisses quelconque pour X ; on obtient la courbe DEF ; nous avons à

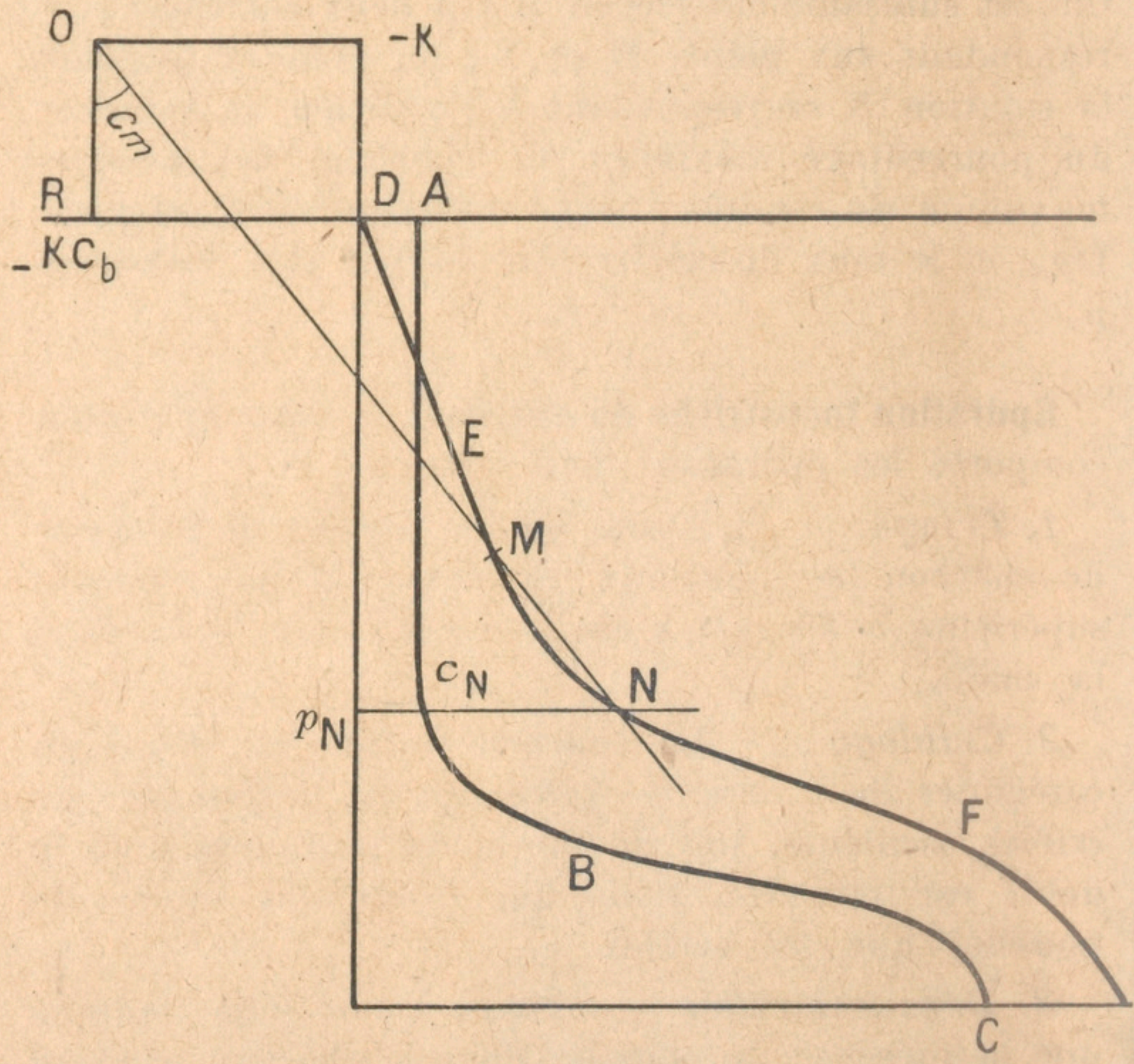


FIG. 3. — GRAPHIQUE PERMETTANT D'APPRÉCIER L'ADDITION DU POUSSIER BRUT AU CHARBON LAVÉ.

chercher ses points d'intersection avec la droite de coordonnées P et X :

$$C_m P - X = K (C_b - Cm)$$

Toutes ces droites passent, quand Cm varie, par le même point O de coordonnées $X = -KC_b$, $P = -K$. Le taux de cendres Cm est représenté par la tangente

de l'angle ROMN ; il y a une valeur limite de Cm à partir de laquelle la droite OMN ne coupe plus la courbe DEF ; le problème est donc impossible si on veut une teneur en cendres trop faible pour le mélange ; si la teneur Cm est suffisamment élevée, il y a deux solutions correspondant aux points M et N ; on prendra toujours la solution N correspondant à l'addition au poussier du pourcentage maximum de charbon lavé avec le maximum de cendres ; ce pourcentage est l'ordonnée Dp_N, et le taux de cendres du charbon lavé, l'abscisse $p_N c_N$.

Épuration industrielle du charbon. — Cette épuration comporte les opérations suivantes :

1. Triage. — Il a pour but de séparer de la masse de charbon les morceaux les plus gros, par exemple supérieurs à 50 mm. ; ces morceaux sont épierrés à la main.

2. Criblage. — Le charbon restant est classé en catégories de différentes grosseurs, au moyen soit de cribles oscillants, soit de tambours tournants dont le débit est moindre, mais qui produisent moins de poussier que les cribles.

3. Dépoussiérage. — Nous avons déjà indiqué que la présence de poussier dans le charbon gêne au lavage par la formation de mousses et de schlamms ; le dépoussiérage s'effectue, soit au moyen de tamis vibrants, soit pneumatiquement, dans un courant d'air ; le dépoussiérage pneumatique n'enlève guère que 60 à 70 % du poussier, mais il est sensiblement plus économique. Le dépoussiérage est réalisé d'autant plus facilement que le charbon est plus sec.

4. Lavage. — Cette opération, qui a pour objet de séparer le charbon proprement dit des schistes,

peut se faire dans deux types d'appareils différents, les lavoirs et les rhéolaveurs.

L'organe essentiel d'un lavoir (Fig. 4 et 5) est une

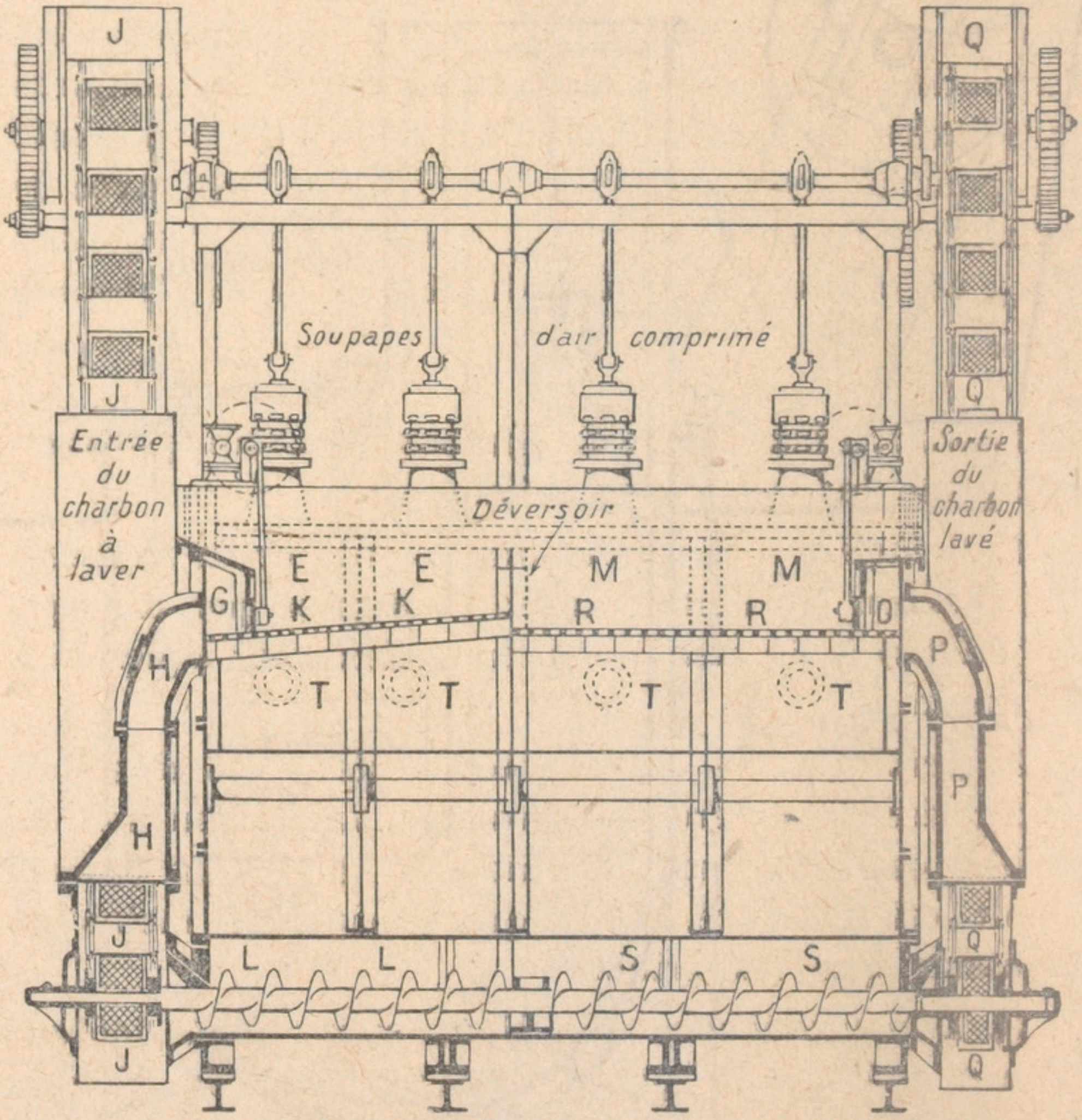


FIG. 4. — BAC DE LAVAGE BAUM, A AIR COMPRIMÉ.

E, premier compartiment de lavage ; M, deuxième compartiment de lavage ; T, arrivées d'eau ; K, R, plaques perforées ; G, sortie des gros schistes ; H, coulotte des gros schistes ; L, vis sans fin conduisant les autres schistes à la noria J ; J, noria de reprise des stériles ; Q, noria de reprise des mixtes ; S, vis sans fin conduisant les mêmes mixtes à la noria Q ; O, sortie des mixtes ; P, coulotte des mixtes.

caisse métallique dont la paroi supérieure, inclinée, est perforée et qui est pleine d'eau ; des pistons ou des arrivées intermittentes d'air comprimé, suivies d'évacua-

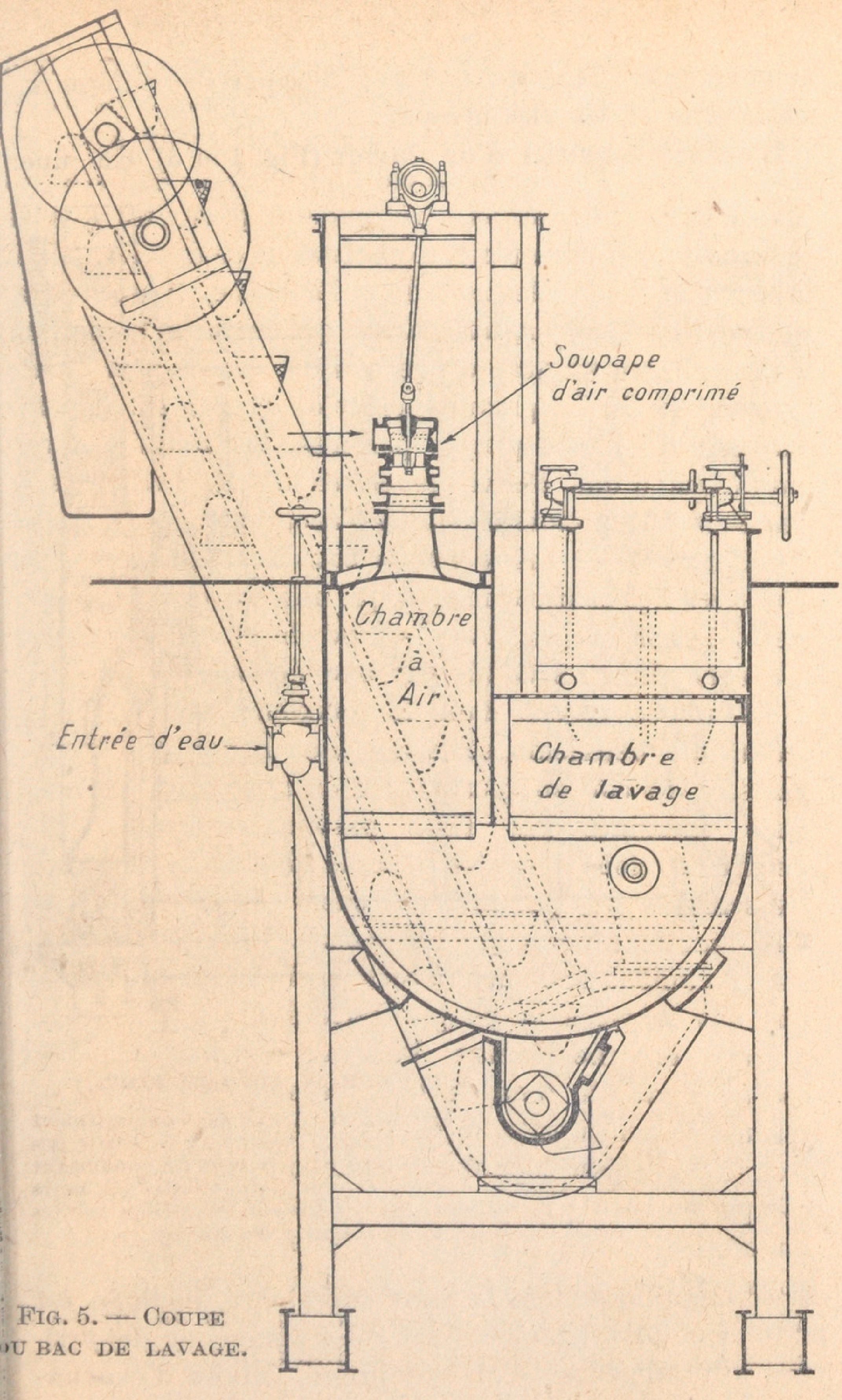


FIG. 5. — COUPE
DU BAC DE LAVAGE.

tion, communiquent à cette masse d'eau une oscillation permanente qui lui fait traverser la plaque perforée, sur laquelle une coulotte déverse le charbon à laver ; l'eau, dans son mouvement ascendant, soulève les morceaux, et le schiste, retombant plus vite que le charbon proprement dit, se place sous ce dernier. L'eau affluant continuellement dans la caisse, il existe, en plus des oscillations, un courant qui entraîne le charbon et les mixtes au delà d'une cloison, située à la partie supérieure de la plaque perforée, et qui les déverse sur une deuxième plaque perforée, horizontale, située au-dessus d'une deuxième caisse d'eau. Les schistes restés sur la première plaque s'accumulent à la partie inférieure de la caisse où ils sont repris, égouttés et évacués. Les schistes menus qui ont traversé la plaque perforée sont repris dans le fond de la caisse par une vis sans fin et évacués par une noria.

La masse passée dans le deuxième compartiment subit une deuxième sélection sous l'effet des oscillations et du courant permanent de l'eau. Les charbons purs entraînés par l'eau passent au-dessus d'une deuxième cloison contre laquelle viennent s'accumuler les schistes qui, par intermittence, sont envoyés dans une deuxième noria qui les évacue. Une deuxième vis sans fin amène également à cette noria les menus schistes qui ont traversé la plaque perforée.

Dans les rhéolaveurs, l'organe essentiel est une coulotte dans le fond de laquelle sont pratiquées des rainures transversales *r* (Fig. 6) ; sous ces rainures se trouve une caisse séparée à sa partie supérieure en deux compartiments par une cloison verticale *c* ; de l'eau introduite par le tuyau *e* se divise dans la caisse en deux courants, l'un ascendant, affluant par la rainure dans la coulotte, l'autre descendant vers un orifice *d* situé au bas de la caisse. Le produit à laver est entraîné

dans la coulotte par un courant d'eau ; les schistes, plus lourds et de forme plus aplatie que le charbon, tombent plus rapidement au fond de la coulotte ; le courant d'eau affluant par la rainure *r* interdit l'entrée de celle-ci au charbon, tandis que le schiste y pénètre et est évacué par l'orifice *d*.

La récupération de l'eau employée dans ces divers appareils est d'une importance capitale ; l'égouttage des schistes et du charbon de dimensions supérieures à 3 mm. s'effectue assez facilement ; le problème est plus délicat pour le menu inférieur à 3 mm., imprégné d'argile fine et qui, entraîné par l'eau de lavage, constitue le schlamm. On y parvient en faisant décanter l'eau de lavage dans des trémies en forme de cône renversé ; les boues qui s'y déposent sont ensuite passées dans un courant d'eau, soit sur des tamis oscillants, soit sur des rhéolaveurs dans lesquels l'eau débarrasse les grains de charbon de l'argile qui les enrobe ; les grains les plus fins sont égouttés sur un lit de coke ; quant à l'eau qui a entraîné l'argile, elle est décantée dans des citernes.

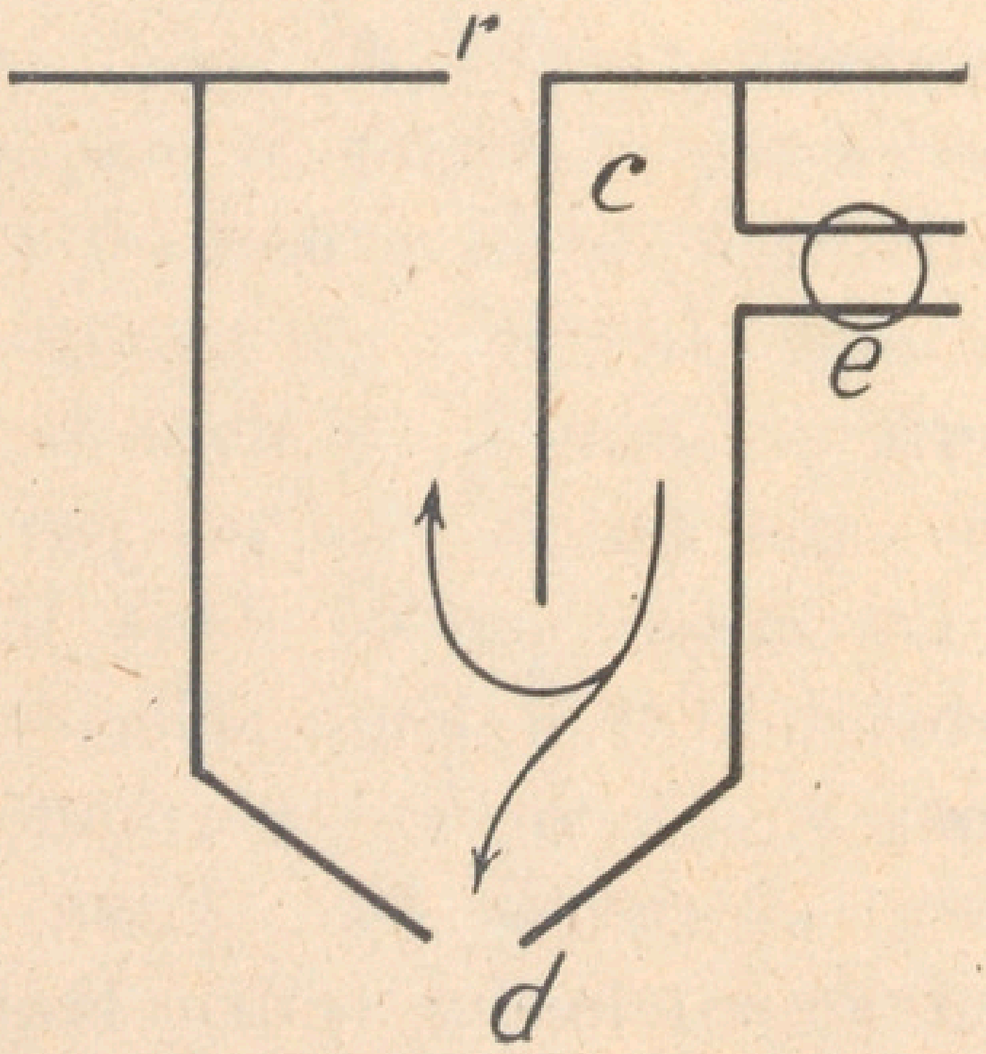


FIG. 6. — PRINCIPE DES RHÉOLAVEURS.

Signalons enfin que les sujétions résultant de l'emploi de l'eau pour le lavage des charbons devaient engager les spécialistes dans l'étude de procédés pneumatiques de triage. C'est ainsi qu'aux États-Unis se développe, depuis une dizaine d'années, le séparateur pneumatique Wye. Il est constitué par une table à secousses

traversée par un courant d'air et qui a la forme d'un Y, d'où le nom donné à l'appareil ; la table est recouverte de nervures entre lesquelles chemine le schiste, tandis que le charbon, plus léger, offrant une surface d'attaque à l'air plus grande dans tous les sens, franchit ces rainures et tombe sur les côtés de la table.

Dans tous ces appareils, la séparation des schistes et du charbon s'effectue sous deux actions combinées : la différence de densité et la différence de résistance à un courant d'eau ou d'air, cette dernière dépendant de la dimension des grains en traitement ; malgré le criblage préalable du produit à traiter, qui réduit dans une certaine mesure l'importance du deuxième facteur, on ne peut arriver par ces procédés à une séparation complète ; dans cet ordre d'idées, un perfectionnement considérable a été apporté par le procédé de flottage.

Ce procédé est basé sur le fait suivant : lorsqu'on brasse par de l'air un mélange d'eau et d'un autre liquide, huile, alcool, acide, etc., et qu'on incorpore à ce mélange un poussier, suivant la nature des réactifs et de la matière constituant le poussier, ce dernier ou bien se rassemble dans l'écume ou à la surface du liquide, ou bien tombe au fond. Ce procédé, appliqué d'abord au traitement des minerais, notamment en Australie, est employé maintenant aussi pour le traitement des schlamms de lavage du charbon et des poussiers de charbon gras.

Dans les procédés de flottage proprement dits, on malaxe le charbon avec de l'eau contenant au maximum 1 % du poids du combustible en huile, et dans laquelle on injecte de l'air ; le malaxage est opéré, soit mécaniquement (procédés de la *Minerals Separation*, Kleinbentink), soit par l'air introduit (procédés *Ekof*, Coppée). On emploie 4 à 5 litres d'eau par kg. de matière à traiter. Le charbon qui se rassemble dans

l'écume est égoutté et, en général, on le mélange à des fines lavées pour réduire la teneur totale en eau. On emploie ce mélange à la fabrication de coke ou d'agglomérés.

Dans le procédé *Trent* on mélange du charbon, pulvérisé au tamis n° 200, avec de l'eau contenant 30 % d'huile en poids du combustible ; si le charbon a peu d'eau de constitution, il s'unit très vite à l'huile pour former un amalgame ayant la consistance du beurre et qu'on débarrasse par barattage de l'eau incluse. Si on emploie de l'huile distillant à basse température, on la récupère par chauffage, et le poussier de charbon se retrouve intact, débarrassé des cendres non constitutives ; si on emploie de l'huile lourde, le chauffage permet de récupérer des huiles légères et lourdes et laisse un coke aggloméré.

Agglomération du charbon. — Ce traitement sert à produire deux catégories de combustibles : les briquettes employées dans le chauffage industriel, et les boulets employés dans le chauffage domestique ; il permet de donner une valeur marchande aux fines et au poussier ; le grand avantage des agglomérés réside dans la facilité de leur manutention et de leur stockage ; les briquettes occupent un volume réduit dans les soutes des navires et les tenders des locomotives ; leur manipulation est plus propre et donne lieu à un minimum de déchet.

Le liant employé d'ordinaire est le brai, résidu de la distillation des huiles de houille ; on lui substitue parfois le brai de pétrole, obtenu dans la distillation des huiles de pétrole. On a proposé quantité de succédanés, organiques comme le sulfite de cellulose, ou inorganiques comme l'argile ; mais aucun n'a pu supplanter le brai. Sa qualité influe grandement sur le pourcentage qu'on

doit en employer, ce pourcentage variant également avec les combustibles traités ; le brai est caractérisé d'ordinaire par : son point de ramollissement ou de fusion dans des conditions déterminées d'expérience ; sa teneur en carbone insoluble dans divers solvants, tels que la pyridine ou le toluène ; sa teneur en matières volatiles ; sa teneur en cendres.

Le charbon employé ne doit pas avoir plus de 3 % d'humidité ; si éventuellement on le sèche, on emploie d'ordinaire pour cette opération des séchoirs comportant des soles superposées que le charbon parcourt successivement sous l'action de raclettes. Le brai est broyé finement en évitant toute élévation de température qui provoquerait des collages dans le broyeur ; il est ensuite mélangé, au taux de 7 à 8 %, au charbon dans des malaxeurs chauffés à la vapeur ; le brai se ramollit et on obtient une pâte qui est distribuée aux alvéoles d'un plateau, si on fabrique des briquettes, ou au dispositif d'alimentation des presses à boulets. La compression des briquettes se fait sur les deux faces de la briquette successivement au moyen de deux pistons agissant sur les alvéoles du plateau ; la pression est de 200 kg. par cmq. environ. La presse à boulets est constituée par deux roues munies d'alvéoles ovoïdes entre lesquelles est distribuée la pâte ; la pression dépend du serrage donné aux deux roues qui tournent à même vitesse.

Les briquettes sont pleines ou perforées ; les briquettes pleines pèsent de 1 kg. 250 à 10 kg. ; les perforées pèsent en général 500 gr. ; les boulets pèsent d'ordinaire 50 gr. ; on consomme environ 30 kg. de charbon pour l'agglomération d'une tonne de houille, moitié pour le séchage du charbon, moitié pour la production de vapeur.

Le lignite (*braunkohle* des Allemands) est suscep-

tible de s'agglomérer sans liant ; comme le lignite cru est assez friable, cette agglomération est indispensable s'il doit subir un transport et plusieurs manutentions ; on attribue son aptitude à l'auto-agglomération, soit à la présence dans la masse de cellules végétales qui ont tendance à s'enchevêtrer, soit à l'action d'un liant (paraffine, cire minérale) qu'il contient. Pour que l'agglomération se fasse convenablement, le lignite doit contenir de 12 à 18 % d'eau. Les opérations successives comportent : un concassage et un criblage ne retenant que les grains inférieurs à 5 mm., — un séchage à la vapeur ou à l'air chaud, — la fixation de la teneur en eau à la valeur optima par mélange de divers lignites, — la compression dans des presses analogues à celles employées pour la houille, mais fonctionnant à 1 300-1 500 kg. par cmq. Pour produire une tonne de briquettes à 5 000 calories, on utilise 3 tonnes de lignite à 2 100 ca. ; on consomme donc 20 % des calories pour le séchage et la compression.

On a également essayé de réaliser l'auto-agglomération de la houille en la chauffant à une température déterminée, voisine de 500°, où se produit un ramollissement qui permet l'agglomération sous pression ; le procédé *Kainscop*, mis au point industriellement par Evence-Coppée, aurait résolu ce problème et entrerait dans la pratique.

Charbon pulvérisé. — La combustion des charbons réalise l'union du carbone qu'ils contiennent avec l'oxygène de l'air ; c'est une réaction entre un solide et un gaz, qui ne peut s'opérer que par la surface du solide ; cette réaction sera d'autant plus rapide et d'autant plus complète que pour une même masse de combustible sa surface sera plus grande ; c'est pourquoi dans les hauts fourneaux, par exemple, où

le combustible doit non seulement brûler, mais ensuite réduire le gaz carbonique formé par la combustion, on emploie un combustible poreux : le coke. Il est bien évident aussi que plus on diminue la dimension des grains de charbon, plus, pour une même masse, leur surface augmente.

Une combustion plus rapide diminue la longueur de la flamme ; on peut donc réduire le volume réservé à la combustion, le poids, l'encombrement et le prix de l'appareillage correspondant ; la pulvérisation permet à l'air d'atteindre plus facilement toutes les particules de carbone, même lorsqu'elles sont mêlées à des schistes ; elle réduit la quantité d'imbrûlés et améliore le rendement ; ainsi elle a permis de brûler l'anthracite des Alpes qui, fortement chargé de cendres et avec un taux très faible de matières volatiles, ne peut être employé dans les foyers ordinaires ; enfin elle permet de réduire la quantité d'air nécessaire à une combustion complète et augmente la température du foyer.

Il était donc naturel qu'on vît dans la pulvérisation un moyen d'utiliser dans de bonnes conditions les fines cendreuses, les poussiers non lavés et les schlamms. Le procédé, appliqué d'abord aux fours à ciment, puis étendu en Amérique, pendant la guerre de 1914-1918, au chauffage des chaudières, a été introduit, sur l'initiative de Citroën, en France, où il s'est rapidement développé.

La finesse atteinte dans la pulvérisation joue un grand rôle, que les essais de M. Étienne Audibert ont mis en lumière dès 1923 ; ainsi une houille à 38,5 % de matières volatiles brûle complètement en 0 sec. 83 lorsqu'elle est broyée de façon que ses grains soient compris entre les tamis 120 et 140 ; elle brûle en moins de 0 sec. 4 quand ses grains sont compris entre les tamis 220 et 240. Les durées de combustion diminuent

lorsque l'excès d'air augmente, tout au moins jusqu'à représenter 50 % de l'air nécessaire strictement.

La pulvérisation, lorsque le charbon est sec, lui donne des propriétés voisines de celles des liquides ; il coule, il peut s'expédier dans des tuyauteries par pression d'air comprimé, comme les liquides ; cette propriété, qui facilite considérablement les manutentions, permet d'employer non seulement des appareils individuels de pulvérisation placés à proximité des chaudières ou des fours d'utilisation, mais aussi d'établir des centrales de pulvérisation d'où le pulvérisé est distribué aux divers postes d'emploi ; l'analogie entre le pulvérisé et les liquides se poursuit jusque dans les organes de combustion qui sont des brûleurs à injection d'air, analogues aux brûleurs à mazout.

L'organe essentiel dans un atelier de pulvérisation est le broyeur ; c'est l'énergie consommée par lui qui constitue la contre-partie des avantages procurés par le pulvérisé ; elle varie de 10 à 18 kwh. par tonne de charbon traité. Au début on estimait que, pour être envoyé au broyeur, le charbon ne devait pas contenir plus de 1 % d'humidité, compte non tenu de l'eau de constitution du combustible, d'où, la plupart du temps, la nécessité d'un séchage préalable qu'on effectue soit dans des sécheurs rotatifs à axe incliné, soit dans des sécheurs verticaux qui ne consomment guère plus de 3 kwh. par tonne traitée. Or il s'est trouvé qu'en voulant améliorer le fonctionnement des broyeurs, on est parvenu à y passer des charbons beaucoup plus humides, tenant jusqu'à 10 % d'humidité. On a cherché, en effet, pour réduire la puissance consommée, à extraire du broyeur les particules dès qu'elles atteignaient la finesse nécessaire ; le procédé efficace a été de ventiler le broyeur de façon à entraîner les parties les plus fines, l'air étant ensuite dépoussiéré dans un cyclone où le

pulvérisé se dépose ; en substituant à l'air froid de l'air chaud ou des gaz chauds on est parvenu à sécher, au moins partiellement, le charbon dans le broyeur.

Il n'est pas nécessaire de pousser la pulvérisation très loin, ce qui augmenterait exagérément la puissance consommée ; pour la plupart des charbons, il suffit d'obtenir une finesse telle que 95 % du combustible passe au tamis de 100.

Les broyeurs importants sont soit constitués par des galets portés par des pendules fixés à un axe vertical et que la rotation de l'axe vient faire rouler sur un cercle en acier où se produit le broyage, soit des broyeurs à boulets tournant moins vite et constitués par deux troncs de cône à axe horizontal, assemblés par leur large base. Les broyeurs de moindres puissances sont constitués par des masselottes, marteaux, palettes, doigts, tournant à grande vitesse et projetant le charbon contre le stator pour le pulvériser.

Chapitre IV

COMBUSTION INDUSTRIELLE

Dans la grande majorité des cas, la combustion sert à augmenter la température de certains corps, à les fondre, à les vaporiser, à les faire entrer en réaction, sans que ses propres produits interviennent chimiquement dans l'opération ; c'est ce qui se passe avec les chaudières à vapeur et la majeure partie des fours innombrables de l'industrie ; parfois, au contraire, les gaz de la combustion sont des agents essentiels du processus chimique réalisé, notamment par les réductions d'oxydes qu'ils provoquent, et l'un des exemples les plus typiques est le haut fourneau, dont nous parlerons au chapitre suivant.

Quand il s'agit de chauffage simple, nous avons déjà signalé l'infériorité des combustibles solides : ils sont relativement difficiles à distribuer et on ne peut guère, avec eux, produire la chaleur où on doit l'utiliser, ni donner à l'appareillage des formes telles que les calories contenues dans les fumées en soient extraites assez complètement ; c'est pourquoi on renonce de plus en plus au charbon dans le chauffage des fours et qu'on le remplace par des combustibles liquides ou gazeux. Seule, la pulvérisation lui permet de lutter encore dans ce domaine avec une certaine efficacité. Au contraire,

quand il s'agit de chaudières, ces inconvénients ont moins d'importance, car c'est alors l'eau, le corps à chauffer, qui, étant liquide ou vaporisé, peut prendre des formes appropriées à une bonne transmission des calories produites ; par ailleurs, en raison de sa forte capacité calorifique à l'état liquide ou à l'état de vapeur, par sa grande chaleur de vaporisation, l'eau constitue le meilleur réservoir de calories pour le chauffage ou la production d'énergie, et c'est grâce à elle que le charbon est encore si abondamment consommé sans gazéification préalable.

La grille. — C'est l'organe essentiel de la combustion du charbon, car elle assure le contact entre le combustible et l'air, fournisseur d'oxygène ; jusque vers la fin du siècle dernier, elle était fixe et la chauffe se faisait exclusivement à la main.

Quand le combustible est très fin, il passerait entre les barreaux d'une grille ordinaire ; on emploie alors la grille à gradins, constituée par des plaques superposées et successivement en retrait ; la couche de combustible arrêtée à l'extrémité de chaque plaque est brûlée par l'air passant horizontalement entre les plaques.

Dans les installations ordinaires, l'air est mis en mouvement par le tirage d'une cheminée placée en queue de l'appareillage.

On sait depuis longtemps qu'une augmentation de la vitesse de l'air accroît à la fois la vitesse de combustion et la température du foyer : le soufflet de forge en est la réalisation industrielle la plus ancienne ; aussi, pour augmenter la puissance de vaporisation des chaudières par mètre carré de surface de grille, pour augmenter la température du foyer et, par suite, le rendement thermique de la combustion, pour brûler

complètement des combustibles plus cendreux, a-t-on été conduit à augmenter la vitesse de l'air sur la grille ; on y est parvenu au moyen de ventilateurs insérés dans le circuit de l'air et des gaz, soufflant l'air sur la grille ou tirant les fumées vers la cheminée, ou encore au moyen de ventilateurs, partiellement ou totalement hors du circuit, et soufflant dans la cheminée de façon à en augmenter le tirage par entraînement des fumées au moyen du fluide soufflé (tirage indirect Louis Prat).

On a pu faire ainsi passer la quantité de charbon brûlée sur grille fixe de 35 kg. à 100 kg. à l'heure par mètre carré.

Pour donner le meilleur rendement, la combustion doit se faire avec le minimum d'air assurant l'oxydation complète du charbon : d'où la nécessité d'avoir sur la grille une couche de charbon d'épaisseur régulière entraînant une distribution uniforme de l'air sur toute la surface. Dans la chauffe à la main, le charbon est jeté avec une pelle sur la grille à travers des ouvertures situées sur la devanture de la chaudière et fermées normalement par des portes en fonte. A chaque ouverture de ces portes, de l'air entre dans la chaudière et trouble le régime de marche.

Le résidu laissé par le charbon est constitué, suivant son degré de fusibilité, soit par des cendres pulvérulentes qui tombent à travers les barreaux dans le cendrier placé sous la grille, soit par des mâchefers agglomérés en morceaux plus ou moins gros et que le chauffeur doit détacher avec un ringard et faire passer à travers les barreaux dans le cendrier ; cette opération constitue le décrassage, qui entraîne de nouvelles rentrées d'air perturbatrices.

Si on pousse la combustion, le travail du chauffeur devient très pénible, car il doit garnir de charbon toute la grille environ trente fois par heure. Il était donc

naturel de chercher à le remplacer par des dispositifs mécaniques. Ces derniers doivent assurer l'alimentation régulière du foyer et la combustion complète du char-

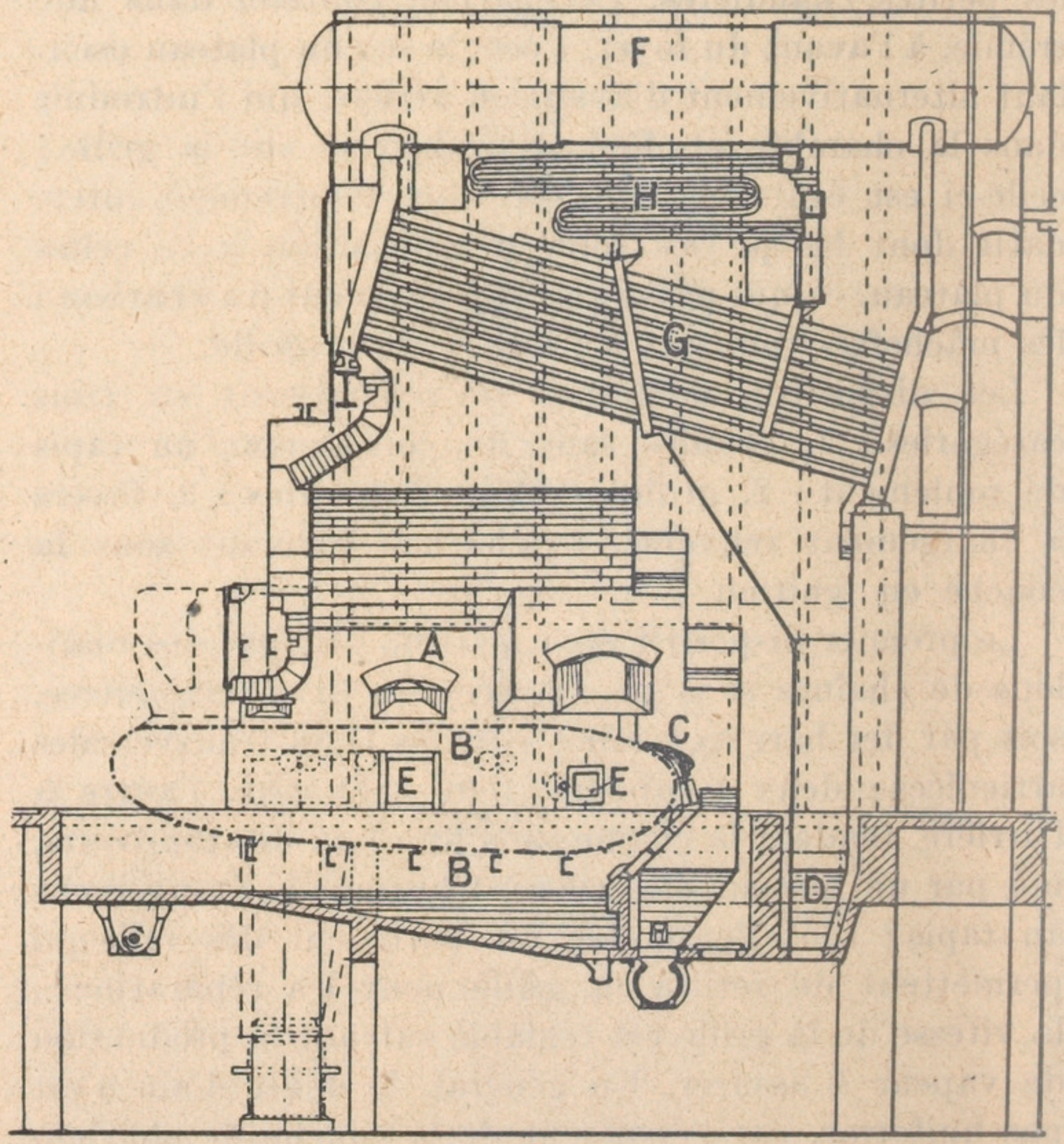


FIG. 7. — CARACTÉRISTIQUES DE LA GRILLE « ROUBAIX », TYPE H.

A, foyer ; B, grille sans fin ; C, racloirs à mâchefers ; D, trémie à mâchefers ; E, carneaux amenant l'air de combustion ; F, corps de la chaudière ; G, tubes de vaporisation ; H, surchauffeur.

bon à toutes les allures que peut soutenir la chaudière ; ils doivent également assurer le décrassage de la grille et l'enlèvement des mâchefers.

Un des premiers dispositifs de chargement automatique a été constitué par le pelletage automatique du combustible, qu'on emploie encore fréquemment avec les petites chaudières. Le charbon contenu dans une trémie, à l'avant du foyer, s'écoule sur un plateau oscillant alternativement d'avant en arrière, qui l'introduit dans la chambre et d'où il se déverse sur la grille ; celle-ci est également animée d'un mouvement alternatif dont les phases sont en opposition avec celles du plateau, ce qui provoque l'avancement du charbon ; les mâchefers tombent à l'arrière de la grille.

Les dispositifs modernes se répartissent en trois catégories : 1, chaînes sans fin constituant un tapis de roulement ; 2, grilles mobiles à gradins ; 3, foyers à chargement renversé, le charbon arrivant sous la couche en ignition.

Le premier dispositif est constitué soit par des maillons de chaînes sans fin accolées les unes aux autres, soit par des barreaux reliés par des tiges transversales articulées ; deux tambours, l'un à l'avant, l'autre à l'arrière, tendent la chaîne sans fin ; l'un des tambours, mû par un moteur électrique, transmet le mouvement au tapis ; tout l'ensemble est porté sur des rails qui permettent de retirer la grille pour les réparations ; la vitesse de la grille est réglable suivant la production de vapeur à assurer. En général, le débit d'air n'est pas uniforme, car l'épaisseur de la couche de charbon diminue d'avant en arrière ; on est donc conduit à envoyer moins d'air à l'arrière qu'à l'avant ; il est nécessaire également d'assurer un joint bien étanche à l'air, à l'arrière de la grille, à l'endroit où les mâchefers sont décollés par un racloir ainsi que par l'écartement des éléments les uns des autres, quand ils commencent à tourner sur le tambour arrière ; en général, le joint est assuré par une couche de mâchefer.

On règle l'allure de l'air et la vitesse de la grille de façon à avoir le moins d'imbrûlés possible dans les mâchefers, avec un taux de CO^2 aussi grand que possible dans les gaz. Sur ces grilles, l'épaisseur de combustible varie de 10 à 30 cm. et la vitesse de translation de 5 à 25 cm. par minute ; la longueur du tapis varie de 3 à 6 m. ; on brûle, en tirage naturel, de 100 à 150 kg., par heure et mètre carré de grille, de charbon calibré à 35 mm., contenant de 5 à 20 % de cendres, avec un minimum de 15 % de matières volatiles ; on aura alors un taux de CO^2 variant de 8 à 10 % ; sur des grilles soufflées ordinaires, on brûlera de 150 à 250 kg. par mq. de grille et par heure ; le taux de cendres pourra atteindre 35 % et le taux de matières volatiles descendre à 8. % ; le taux de CO^2 variera de 8 à 12 % ; si le soufflage de l'air est compartimenté d'avant en arrière, le taux de CO^2 pourra atteindre 15 %. Les fines qui passent, au début, entre les barreaux sont recueillies dans une trémie spéciale et renvoyées au foyer.

Les foyers à gradins ont leurs barreaux disposés suivant les marches d'un escalier ; le charbon est envoyé de la trémie par des poussoirs sur les marches successives, et les barreaux sont animés de mouvements relatifs qui décollent les mâchefers et font avancer le charbon ; ces foyers atteignent une longueur de 3 m. 50.

Dans le troisième type, à alimentation par le bas de la couche, le charbon arrive sous la masse en ignition ; ces dispositifs exigent un fort tirage et, par conséquent, l'emploi de ventilateurs ; dans un mode de réalisation, le charbon est poussé par un piston dans un conduit central d'où il déborde à droite et à gauche sur des barreaux en gradins, percés de trous d'arrivée d'air ; l'ensemble constitue un toit, le charbon arrivant par le faîte du toit, les mâchefers tombant au bas avec les

cendres ; ce dernier type a permis de réaliser des chaudières dont la vaporisation dépasse 80 tonnes d'eau à l'heure.

La chambre de combustion. — La grille est placée à l'intérieur d'une chambre appelée chambre de combustion ; son rôle est multiple : elle assure la distillation préalable du charbon et son allumage ; elle doit empêcher la perte de calories dégagées par la combustion de façon que ces calories soient conservées jusqu'au moment de leur transmission au métal qui contient l'eau à vaporiser ou la vapeur à surchauffer ; elle oriente les transmissions calorifiques par rayonnement et convection vers les régions utiles ; enfin elle permet l'enlèvement des cendres et des mâchefers.

La transmission de la chaleur se fait par deux processus bien distincts :

1° Par *rayonnement*, sous forme de radiations calorifiques émises par le corps incandescent et absorbées par les corps exposés au rayonnement ; à ce point de vue, à peu près seuls, dans un foyer, les corps solides sont susceptibles d'émettre ou d'absorber des radiations calorifiques, et les gaz, à l'exception de la vapeur d'eau et du gaz carbonique, ne participent pas à ces échanges ; il en résulte que, dans un foyer, le rayonnement a son origine à peu près unique dans le charbon incandescent et dans les particules solides entraînées par les gaz, et les calories ainsi émises sont uniquement absorbées par les parois ou les tubes d'eau de la chaudière. La quantité de chaleur transmise par rayonnement est donnée par la formule :

$$Q = 4{,}60 \times S_P \left[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 \right]$$

dans laquelle Q est la quantité de chaleur, en grandes calories, reçue par une surface S évaluée en mètres carrés,

à la température absolue T_1 ; φ étant l'angle moyen sous lequel est vue la surface émettrice, à la tempé-

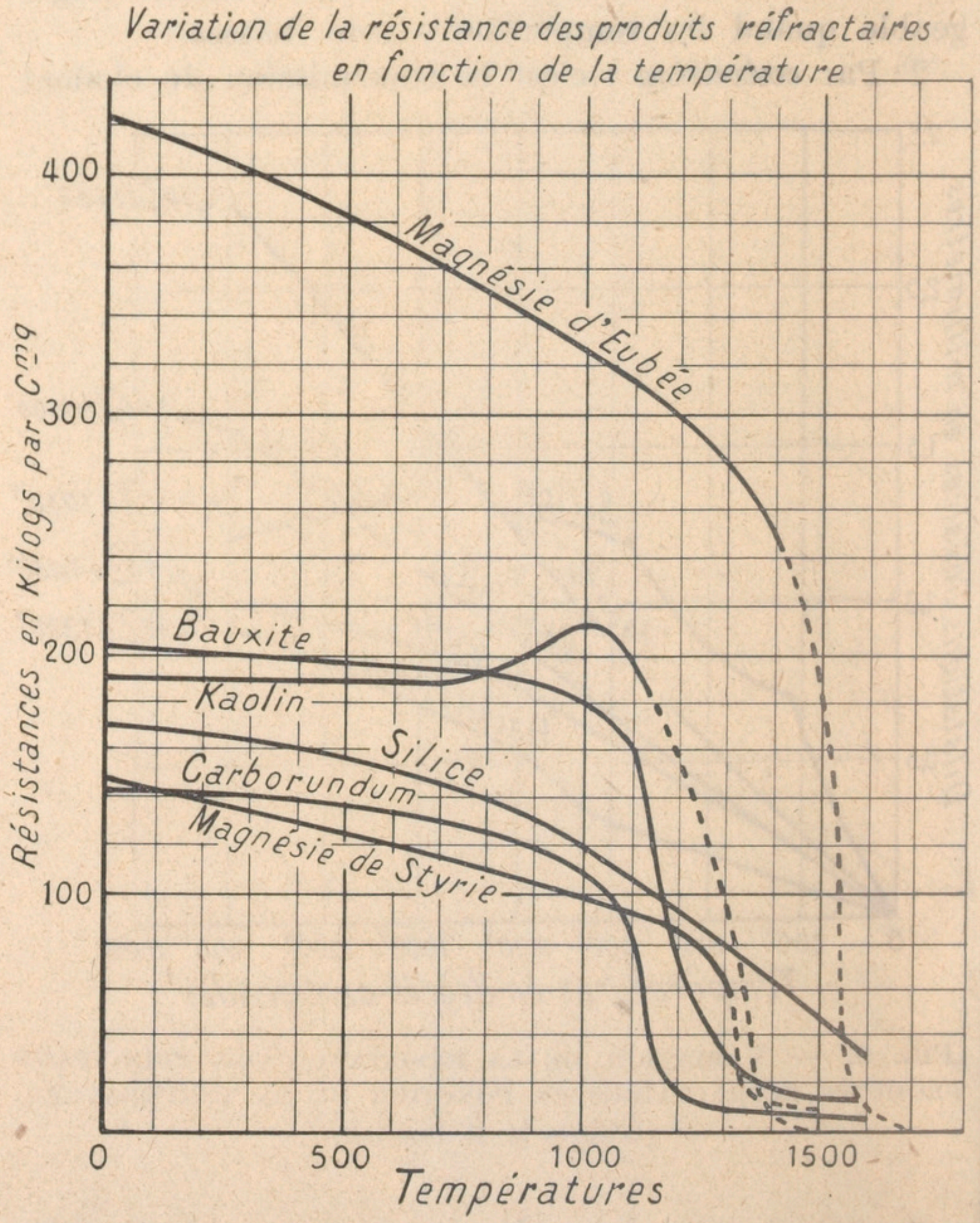


FIG. 8. — VARIATION DE LA RÉSISTANCE DES PRINCIPAUX PRODUITS RÉFRACTAIRES EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE.
(D'après M. B. Bogitch.)

rature absolue T, des points de la surface réceptrice.

Elle dépend de la quatrième puissance des tempé-

ratures absolues ; le phénomène est donc prépondérant quand les températures sont élevées, ce qui est le cas de la chambre de combustion ; il est au contraire négligeable quand les températures sont basses.

2° Par *convection* : c'est la transmission de chaleur

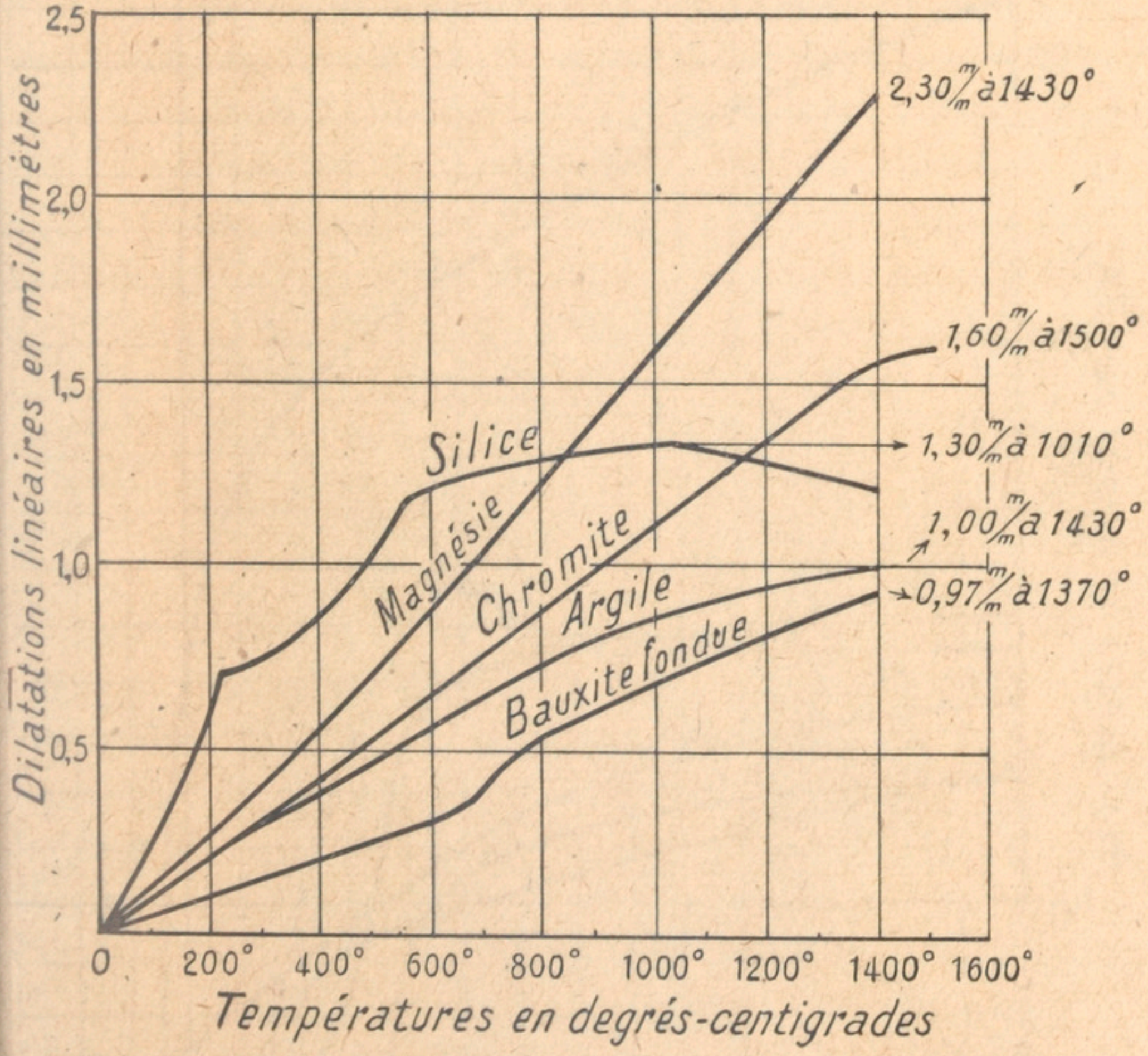


FIG. 9. — VARIATION DE LA RÉSISTANCE DES PRINCIPAUX PRODUITS RÉFRACTAIRES EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE.

(D'après M. B. Bogitch.)

par contact entre des molécules de gaz ou de liquides et des molécules liquides ou des atomes solides, à des températures différentes ; elle aura lieu entre les gaz du foyer et les parois de la chaudière ou les tubes d'eau. La quantité de chaleur transmise par convection

entre les gaz et les tubes d'eau est donnée par la formule :

$$Q = S \times (d.\ v)^{0,786}\ S\,(T - T_1)$$

dans laquelle Q est la quantité de chaleur transmise, en grandes calories, d la densité des gaz, v leur vitesse en mètres par seconde, S la surface de contact, T et T_1 les températures des gaz et du métal.

Les parois de la chambre, qui doivent empêcher la perte des calories vers l'extérieur, sont constituées en matériaux mauvais conducteurs de la chaleur ; elles atteindront des températures d'autant plus élevées que la combustion sera plus active et qu'elles pourront moins rayonner à leur tour vers des corps à basse température : charbon froid arrivant sur la grille ou tubes d'eau. Dans les chaudières de moyenne importance, une voûte, placée au début de la grille, réverbère la chaleur sur le combustible qui arrive et en favorise la distillation et l'inflammation ; dans les grandes chaudières, au contraire, on s'efforce d'envoyer tout le rayonnement du foyer sur l'appareillage de vaporisation, la température générale étant suffisante pour assurer la mise en route de la combustion. Dans tous les cas, les températures de la paroi sont élevées, et c'est pourquoi on la constitue en matériaux réfractaires, difficilement fusibles.

Ces matériaux sont livrés sous forme de briques ou de pièces de forme et sont constitués par des argiles spéciales, la magnésie, la silice, etc.... Les caractéristiques d'une matière réfractaire sont sa température de fusion, sa résistance mécanique, sa dureté, son coefficient de dilatation, sa conductibilité. Il arrive souvent aussi que, dans les chambres de combustion ou dans les fours, les pièces soient en contact avec des cendres, des scories, des métaux, d'où possibilité de réactions susceptibles de détériorer les pièces ou de polluer les produits fabriqués.

Les bonnes briques d'argile doivent contenir au moins 30 % d'alumine ; on les rend plus réfractaires en mélangeant de la bauxite blanche (alumine presque pure) à l'argile ; elles fondent vers 1 600° ; les briques de silice ont de 96 à 97 % de silice pure et elles fondent entre 1 700° et 1 750° ; une bonne brique de magnésie ne doit pas contenir plus de 6 % de silice et 5 % d'oxyde de fer. Elle fond entre 1 600° et 1 700°. La bauxite, qui a la dilatation la plus faible parmi tous les matériaux réfractaires industriels, convient particulièrement pour les fours à marche discontinue dans lesquels la montée en température est rapide. Nous reproduisons ici, d'après M. B. Bogitch, les graphiques donnant, pour les principaux produits réfractaires, la variation de leur résistance et leur dilatation en fonction de la température (Fig. 8 et 9).

En fait, les briques d'argile conviennent pour la plupart des chambres de combustion et on les prend d'autant plus alumineuses qu'elles ont à résister à des températures plus hautes ; nous verrons plus loin, à propos de la combustion du charbon pulvérisé, les précautions qu'on a été amené à prendre dans l'organisation des chambres de combustion lorsque la température du foyer est très élevée.

Enlèvement des mâchefers. — Les résidus de la combustion passés de la grille dans le cendrier doivent être évacués de la chaufferie ; ce qui fait la difficulté du problème, c'est la température élevée de ces résidus et leur dureté, qui amènent une usure rapide du matériel ; très souvent encore, cet enlèvement se fait à la main ; le travail est pénible, car il s'exécute en général dans un sous-sol étroit ; la masse incandescente, quand elle est extraite, est arrosée et dégage des vapeurs parfois sulfureuses ; chaque ouverture du cendrier amène

des rentrées d'air qui troublent l'allure de la combustion ; l'opération, ainsi réalisée, est donc nuisible et coûteuse.

Quantité de systèmes ont été essayés pour assurer mécaniquement cet enlèvement ; le plus simple consiste dans une surélévation telle de la chaufferie et des massifs des chaudières que les mâchefers puissent être vidés par intermittence dans des trémies où ils s'éteignent ; des trémies ils tombent dans des wagons qui les emportent à des terrils ; les avantages de ce dispositif ont pour contre-partie le supplément notable de frais de premier établissement qui résulte de l'exhaussement de toute l'installation. Les transporteurs à sec, comportant des vis sans fin, des convoyeurs à augets, des norias, etc., s'usent trop rapidement pour être d'un emploi pratique ; le transport et l'élévation pneumatiques conduisent à une dépense de force motrice excessive. On a donc été amené à effectuer l'opération dans l'eau ; encore le transport des cendres par un appareillage immergé présente-t-il les mêmes défauts que le transport à sec, et c'est, finalement, l'enlèvement par un courant d'eau qui s'est montré le plus efficace ; c'est, d'ailleurs, une solution analogue qui a été adoptée dans les usines à gaz pour l'extinction et l'enlèvement du coke, résidu de la distillation dans les cornues.

Dans le système hydraulique de transport, un canal placé sous l'exutoire des cendriers reçoit les mâchefers d'une façon continue ou par intermittence ; il est en même temps parcouru par un courant d'eau ; l'extinction brutale des cendres les désagrège et elles sont entraînées par le courant, soit à une chaîne munie de godets perforés qui les remonte, soit à une citerne où elles se déposent et où elles sont reprises par une benne-piocheuse. La quantité d'eau à mettre en mouvement peut être calculée en tablant sur une teneur moyenne de 100 gr. de cendres par litre d'eau.

Combustion du charbon pulvérisé. — Par les problèmes qu'elle a soulevés, la chauffe des chaudières au charbon pulvérisé a amené des perfectionnements considérables dans la construction des chambres de combustion. Lorsque le nouveau mode de chauffage avait pris naissance aux États-Unis, il employait les combustibles dont on disposait couramment dans ce pays, c'est-à-dire d'excellents charbons à un faible taux de cendres ; au contraire, quand on l'introduisit en France, les houillères, qui furent parmi ses premiers adeptes, s'efforcèrent d'y consommer leurs produits invendables, fines de dépoussiérage, résidus de lavage à forte teneur en cendres ; il fallait donc pouvoir assurer une combustion complète du carbone cendreux et recueillir et éliminer les cendres par des moyens pratiques n'entraînant pas une usure trop rapide des installations.

La solution de la première difficulté a été trouvée en perfectionnant le contact entre les grains de charbon et l'air, et en préchauffant cet air. La combustion du poussier se fait en deux phases : dans la première, il s'échauffe et émet des gaz en empruntant des calories au milieu ; dans la deuxième, qui commence dès que sa température atteint le point d'inflammation, il brûle et assure la production de chaleur. Il y a intérêt à réduire la durée du phénomène, car on réduit ainsi la longueur de la flamme et on peut diminuer le volume de l'appareillage.

Le pulvérisé, stocké dans une trémie, est introduit par un distributeur tournant, à plateau, dans un courant d'air, appelé air primaire, qui représente 10 à 15 % de l'air total nécessaire à la combustion, et qui l'entraîne dans le brûleur. A l'origine, le brûleur était un simple tuyau en acier débouchant dans la chambre ; on a trouvé ensuite qu'il était bon d'assurer la prétur-

bulence du mélange, c'est-à-dire d'augmenter le déplacement relatif de l'air par rapport aux grains. On y parvient simplement dans le brûleur *Calumet* en plaçant sur le trajet du mélange une plaque avec trou central, sur les bords duquel sont placées des ailettes, inclinées à 35° sur l'axe et qui provoquent la rotation du fluide. L'emploi de ce dispositif fait tomber de 7,5 % à 3,5 % la teneur en carbone des imbrûlés.

Dès sa sortie du brûleur, le mélange est échauffé par le rayonnement des paroïs de la chambre et il atteint le point d'inflammation ; suivant l'allure et, par suite, la température de la chambre, le trajet nécessaire pour y arriver varie d'une vingtaine de centimètres à plus d'un mètre ; c'est à ce moment que doivent affluer les jets d'air secondaire assurant la combustion complète, et on les distribue de façon à provoquer un nouveau brassage de l'air et du charbon. L'excès d'air nécessaire pour supprimer toute présence d'oxyde de carbone dans les fumées est faible et on peut atteindre des teneurs de 16 à 17 % en gaz carbonique.

Jusqu'à ces dernières années, les calories contenues dans les fumées à la sortie de la chaudière étaient employées à réchauffer l'eau d'alimentation ; de plus en plus, maintenant, dans les grandes centrales, ce préchauffage se fait par injection de vapeur dans l'eau ; les calories des fumées deviennent disponibles et on les emploie à réchauffer l'air de combustion dans des échangeurs de calories. On peut ainsi disposer d'air dont la température atteint de 200° à 250°, soit pour séparer le poussier et le sécher dans les appareils de pulvérisation, soit pour activer la combustion. A la centrale de Mazingarbe, avec du pulvérisé à 20 % de matières volatiles, 35 % de cendres, donnant un refus de 5 % au tamis de 100 (1 550 mailles au cmq.), et de 20 % au tamis de 200 (6 200 mailles au cmq.), et en

employant un air secondaire préchauffé à 200°, la longueur de la flamme était d'une dizaine de mètres ; la pression de l'air primaire, dont la température pouvait atteindre 150°, était de 35 cm. d'eau, la pression de l'air secondaire était de 18 cm. d'eau. On admet, en général, que 70 % des calories de la flamme sont transmises dans la première moitié de sa longueur.

L'emploi d'air chaud, la réduction de l'excès d'air consécutive à la pulvérisation du charbon ainsi qu'au brassage du mélange, provoquent une augmentation de la température propre de combustion qui dépasse 2 000°. La constitution de la chambre de combustion de façon à résister aux températures élevées qu'on y développe, la collecte et l'élimination des cendres ont soulevé alors les difficultés les plus graves que le pulvérisé ait eu à vaincre.

Au début, on a adopté les dimensions de chambre en usage pour les grilles, soit un volume de 3 à 5 mc. par mq. de surface de grille, ou de 15 à 25 mc. par tonne de charbon brûlé à l'heure ; les résultats ayant été désastreux, deux voies différentes furent suivies pour réaliser des foyers d'une durée suffisante. Dans la première, on aboutit à des chambres de grand volume, atteignant 60 et 70 mc. par tonne de charbon ; leur inconvénient essentiel réside dans leur encombrement et leur prix de revient élevé ; leur hauteur, qui atteint parfois celle d'un immeuble à 4 étages, ne leur confère qu'une stabilité très relative. Dans la deuxième, on s'est efforcé de maintenir le volume unitaire aux environs de 30 mc., d'abord en réduisant la longueur de flamme par préchauffage de l'air et bon brassage du mélange (car augmenter la finesse du charbon eût été trop onéreux), ensuite en refroidissant artificiellement les parois de la chambre.

Ce refroidissement a été obtenu, soit par un courant

d'air circulant à l'intérieur des maçonneries réfractaires, soit par des tubes d'eau placés devant les parois, soit enfin en constituant la chambre par des parois froides au moyen des tubes *Bailey*. La capacité calorifique de l'air est faible, il enlève peu de calories ; aussi le premier moyen s'est-il rapidement révélé insuffisant ; on a alors été amené à placer devant les parois, ou dans leur épaisseur, des surfaces absorbantes constituées par des faisceaux de tubes vaporisateurs participant à la circulation générale de l'eau dans la chaudière ; tels sont les dispositifs *Murray*, *Wood*, etc. Enfin, on est arrivé à la paroi dite « froide » avec les blocs *Bailey*, constitués par des plaques de fonte, présentant une surface lisse du côté du foyer et, sur l'autre côté, des échancrures dans lesquelles sont logés des tubes d'eau ; un mastic conducteur de la chaleur assure la liaison entre le tube et la plaque ; pour les endroits les plus exposés au rayonnement, le côté du foyer est garni d'un mince revêtement réfractaire qui protège la fonte ; les faces extérieures de ces ensembles sont recouvertes d'un enduit calorifuge magnésien d'une dizaine de centimètres d'épaisseur ; en donnant plus ou moins d'extension à la zone des parois ainsi traitées, on refroidira plus ou moins la chambre et on pourra ainsi l'adapter au combustible à traiter, suivant sa rapidité de combustion et la nature de ses cendres.

Après la conservation des parois de la chambre, la deuxième question essentielle qui se posait était celle de la collecte et de la sortie des cendres. Deux solutions ont été en présence au début du pulvérisé : dans la prémière, on profitait de la haute température du foyer pour recueillir les cendres à l'état fondu, au bas de la chambre, à l'entrée d'un trou de coulée d'où elles tombaient dans le cendrier proprement dit, soustrait au rayonnement, et où elles se solidifiaient ; le dispo-

sitif présente plusieurs inconvénients : à la température de fusion, les cendres attaquent fortement les matériaux réfractaires et en provoquent l'usure rapide ; à des allures réduites, ou sous l'influence d'un refroidissement accidentel, les cendres se prennent en masse, d'où arrêt de l'installation et décrassage pénible au pic ou à la pince ; — dans la deuxième solution, on refroidissait suffisamment les cendres pour les recueillir solidifiées à l'état pulvérulent ; elle allait donc de pair avec le refroidissement des parois de la chambre et elle a exigé, pour un dégagement donné de calories par mc. de chambre, un refroidissement d'autant plus énergique que les cendres étaient plus fusibles ; les graphiques ci-après (Fig. 10 et 11) donnent, d'après Mr. Barjou, le rapport φ des surfaces refroidies à la surface totale de la chambre qu'il faut avoir au minimum, à un taux de vaporisation déterminé, pour éviter la fusion des cendres.

Ces dispositions ont assuré le triomphe des foyers à cendres solides et, il y a dix ans déjà, 5 % seulement des installations au charbon pulvérisé fonctionnaient encore en cendres fondues.

Une grande partie des cendres est entraînée par le courant d'air, et on a reproché au pulvérisé d'en rejeter des quantités notables dans l'atmosphère ; mais, comme ces cendres sont impalpables, si les cheminées sont assez hautes, elles se répartissent sur une vaste surface et, en général, ne sont pas nuisibles ; on peut d'ailleurs en arrêter la plus grande partie avec un dépoussiéreur électrostatique des fumées. A la centrale de Mazingarbe, leur total se précipitait ainsi : 35 % dans le cendrier sous la chambre, 15 % à travers la chaudière, l'économiseur, les réchauffeurs d'air, 42 % dans le dépoussiéreur électrostatique et la cheminée, 8 % étaient rejetés dans l'atmosphère.

Le développement du charbon pulvérisé pour le

chauffage des grandes unités de vaporisation a été

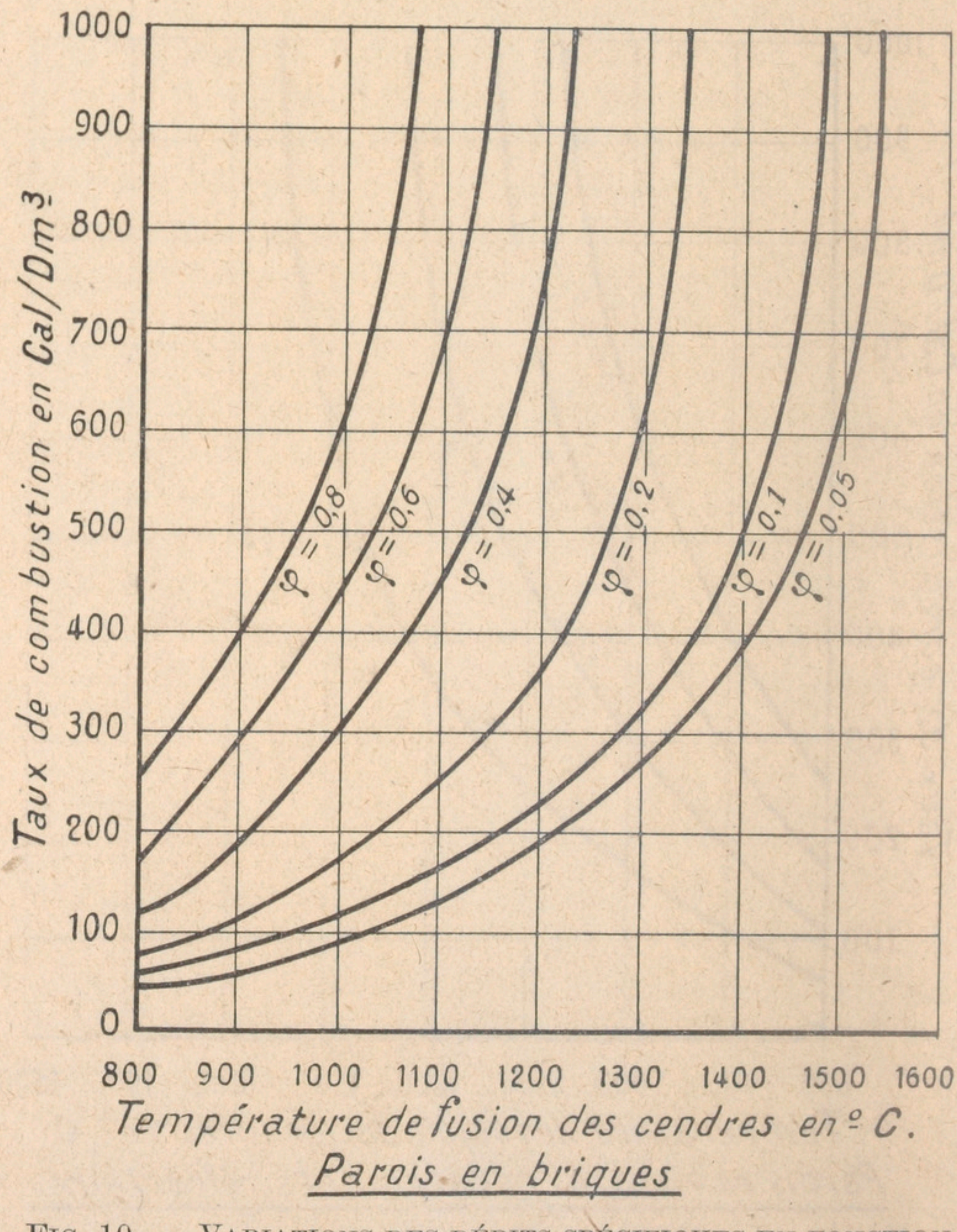


FIG. 10. — VARIATIONS DES DÉBITS SPÉCIFIQUES EN FONCTION DES TEMPÉRATURES DE FUSION DES CENDRES pour différentes valeurs des zones refroidies de foyers. Constructions ordinaires en briques réfractaires. (D'après M. Barjou.)

foudroyant dans ces dernières années ; il se ralentit actuellement à la suite d'une offensive des grilles

qui se sont adaptées aux grandes puissances unitaires.

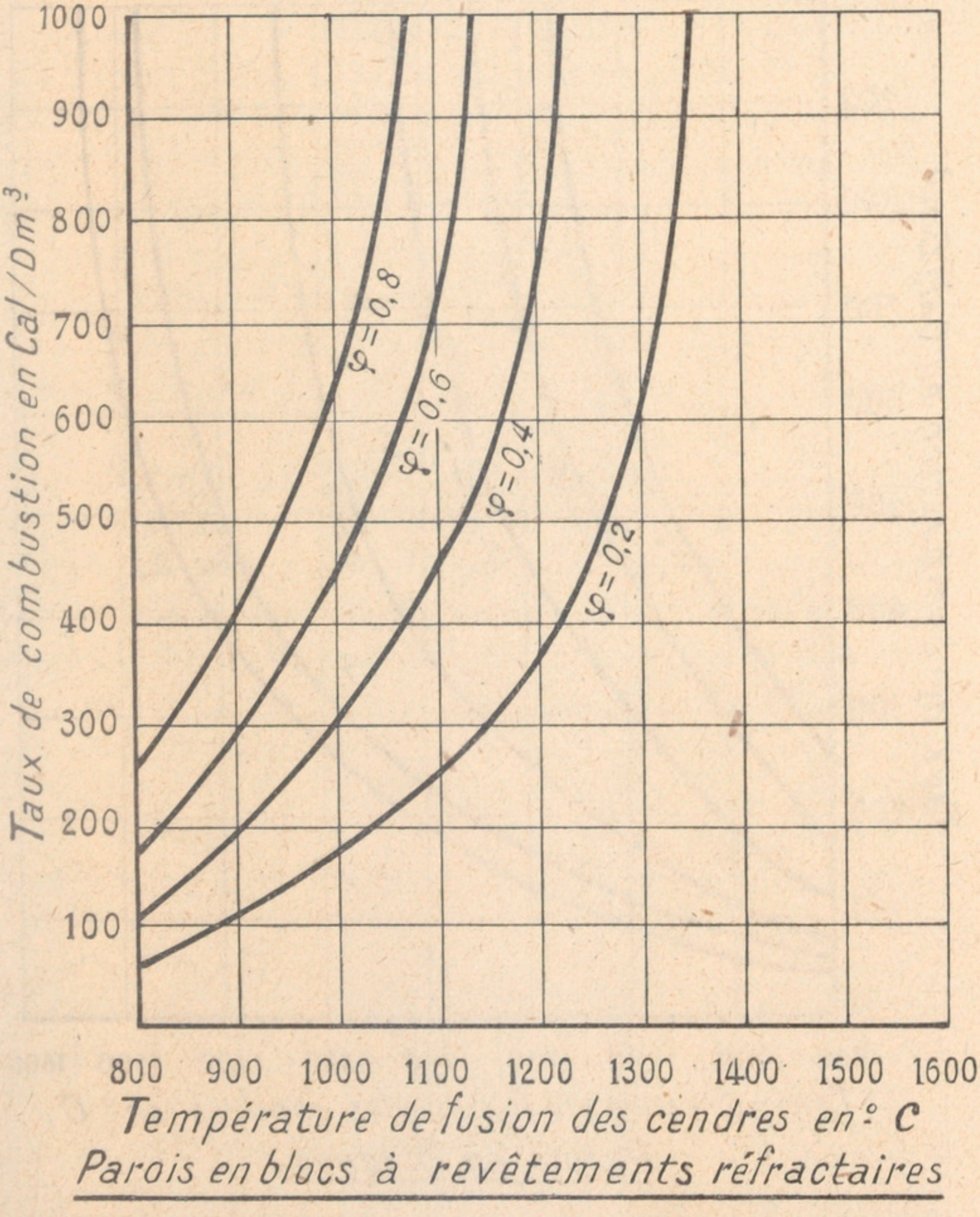


FIG. 11. — VARIATIONS DES DÉBITS SPÉCIFIQUES EN FONCTION DES TEMPÉRATURES DE FUSION DES CENDRES pour différentes valeurs des zones refroidies de foyers. (D'après M. Barjou.)

Combustion des gaz et des liquides. — La combustion se simplifie quand on passe des solides aux liquides

et des liquides aux gaz. Avec les gaz, le mélange du comburant et du combustible se fait sans difficulté. Le prototype du brûleur est le bec Bunsen, tant employé dans les laboratoires et qui a servi de modèle à tous les fourneaux à gaz ; il comporte une rentrée d'air primaire réglable, peu avant l'extrémité du bec, et un afflux d'air secondaire autour du bec. La quantité d'air primaire admise doit être assez faible pour que la combustion ne se propage pas à l'intérieur du bec, et la vitesse du mélange assez faible pour que la flamme ne soit pas « soufflée », c'est-à-dire pour que la combustion commence dès que le gaz est en contact avec l'air secondaire ; si l'excès d'air est suffisant, on a une flamme oxydante ; si la quantité d'air est insuffisante pour assurer la combustion complète, on a une flamme réductrice contenant de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène ; on parachève la combustion par une nouvelle addition d'air.

Dans le mélange d'un gaz combustible et de l'air, la vitesse de propagation de la flamme varie suivant la nature du gaz, sa teneur dans l'air et la température du mélange ; elle passe par un maximum pour une certaine teneur.

HYDROGÈNE (teneur dans l'air)	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %
Vitesse en mètre/seconde	0,6	1,95	3,30	4,87	3,45	2,3	1,10
MÉTHANE	6	8	10	12	14	16	
Vitesse.....	0,03	0,35	0,42	0,61	0,36	0,10	
GAZ DE HOUILLE	8	10	12	14	15	17	20
Vitesse.....	0,3	0,5	0,72	0,93	1,05	1,27	0,80

ACÉTYLÈNE	2,9	5	7	9	15	22	40	60
Vitesse.....	0,1	2	4	6	3	0,4	0,22	0,07

Variation de vitesse pour de l'air contenant 10 % de méthane, d'après M. Taffanel :

Température.....	15°	200	300	400
Vitesse	0,6	1,0	1,3	1,7

Quand un mélange d'air et de gaz combustible débouche dans un four, il s'épanouit, et la vitesse du jet se ralentit, si bien qu'à une distance à peu près constante de l'orifice pour toutes les directions, c'est-à-dire suivant une surface sensiblement sphérique, la vitesse devient celle de la flamme qui semble alors s'étaler sur toute cette surface idéale : d'où l'expression de combustion en surface, tandis qu'avec des brûleurs, ou lorsque l'air et le gaz se mélangent progressivement, pendant la combustion, dans le four même, on a un jet de flamme ou une combustion en profondeur. L'inventeur anglais Bone-Court a eu l'idée de faire traverser à un mélange très intime d'air et de gaz une masse réfractaire perméable aux gaz. Si cette masse réfractaire est étalée suivant la surface que formerait naturellement la combustion, les matériaux réfractaires, portés au rouge vif contribueront à stabiliser la combustion sur cette surface, à l'intérieur du réfractaire, et on obtient la combustion dite sans flamme, appliquée à certaines chaudières et fours à réchauffer.

Enfin, pour obtenir de hautes températures, on a, avec le gaz, l'avantage de pouvoir préchauffer commodément, et le comburant et le combustible. Plus le préchauffage est intense, plus la combustion est rapide et la flamme courte.

Lorsqu'on brûle des liquides, mazout, fuel-oil,

goudrons, etc..., l'opération est plus simple qu'avec le charbon, car la combustion est plus rapide, la flamme plus courte et, d'autre part, on n'a pas de cendres à recueillir et à éliminer, mais on a toujours à résoudre, comme dans le cas du charbon, le problème d'un contact intime à assurer entre le combustible et l'air.

On ne peut espérer y parvenir par une gazéification du liquide — ainsi qu'on y parvient dans la carburation des moteurs à explosion — car il s'agit de combustibles lourds dont la vaporisation, à température élevée, serait trop lente pour assurer le mélange avec l'air. Il faut donc pulvériser le liquide, soit par injection d'air ou de vapeur d'eau, soit par des dispositifs mécaniques. C'est le brûleur lui-même qui assure cette pulvérisation, par l'air ou la vapeur dans les petites unités jusque vers 100 mq. de surface de chauffe, mécaniquement pour les unités plus grandes ; dans l'un et l'autre cas, la pulvérisation est réalisée en imprimant à la masse d'huile des mouvements désordonnés, des impulsions incohérentes qui la divisent, d'où l'emploi dans le brûleur de trajets non rectilignes, de peignes, de brise-jets, etc.

Une fluidité minima du combustible est nécessaire pour que la pulvérisation soit possible, et, éventuellement, on l'obtient par réchauffage ; il est inutile d'aller sensiblement au delà, car la dépense de calories augmente et le débit des brûleurs diminue ; ce résultat, paradoxal à première vue, provient de ce que, dans le brûleur, du fait d'une plus grande fluidité, les lames de liquide comprimées contre les parois s'amincissent plus que leur vitesse n'augmente.

Les dimensions de la chambre de combustion correspondent à la combustion horaire de 240 kg. de mazout par mètre cube de chambre, soit environ 4 mc. de chambre pour 10 millions de calories, ce qui représente

un volume cinq fois plus petit que celui des plus petites chambres à charbon ; il en résulte une diminution notable de l'encombrement des chaudières, qui, jointe à l'augmentation de la puissance calorifique du combustible à volume égal, à la facilité et à la rapidité de ses manutentions, justifie la grande faveur dont jouissent les combustibles liquides dans la Marine.

Transmission des calories de la combustion. — Les calories efficaces de la combustion sont toutes incluses dans les gaz formés ; les mâchefers correspondent à une double perte : par les calories qu'ils emportent et par le charbon non brûlé qu'ils contiennent. Avec un charbon à 8 000 calories, ayant 7 % de cendres, une teneur de 25 % de carbone dans les mâchefers et de 60 % dans les escarbilles et les cendres donnera une perte de 4 à 5 % du total des calories dégagées ; on a donc grand intérêt à réduire le taux de carbone dans les cendres jusqu'au point où cette réduction entraînerait un trop grand excès d'air.

Les calories contenues dans les gaz et transférées partiellement par différence de température aux appareils d'utilisation sont les seules calories efficaces ; leur transfert peut s'effectuer suivant trois procédés généraux : soit par contact direct, — soit par conductibilité à travers une paroi métallique, la température du produit à traiter augmentant pendant que celle des gaz diminue, — soit enfin par régénération, les gaz réchauffant pendant une période une masse de métal ou de réfractaires qui, dans une deuxième période, cède sa chaleur aux corps à réchauffer, qui sont alors toujours gazeux.

Le chauffage par contact direct est employé pour réaliser de hautes températures toutes les fois que les flammes ne peuvent contaminer les produits à obtenir,

ou lorsque, par leur nature oxydante ou réductrice, elles participent à la réaction à réaliser ; il en est ainsi, par exemple, dans les fours à réverbère où les flammes chauffent non seulement une sole au-dessus de laquelle elles passent et qui contient les produits en réaction, mais aussi une paroi réfractaire surplombant la sole et lui réverbérant la chaleur absorbée ; dans ce procédé, les surfaces d'échange sont réduites, mais elles suffisent parce que, les températures à réaliser étant élevées, on ne peut enlever aux gaz qu'une quantité relativement faible de calories.

Le chauffage à travers une paroi conductrice, donc métallique, est le plus employé ; c'est ainsi que fonctionnent les chaudières ; on aurait intérêt à se servir d'un métal bon conducteur de la chaleur, tel que le cuivre ou l'aluminium ; il en est ainsi, par exemple, dans les alambics, lorsque les pressions mises en jeu sont faibles ; mais lorsqu'elles sont élevées, comme, par exemple, dans les chaudières modernes, le seul métal utilisé est l'acier ; on peut porter la température d'aciers spéciaux, pratiquement, jusqu'à 550°-600° d'une façon continue ; on peut donc, à l'heure actuelle, chauffer par conductibilité jusqu'à 500°-550° ; mais le procédé par transmission directe devient peu efficace et exige des surfaces d'échange considérables dès que la température à maintenir dépasse ces chiffres et qu'il faut constituer les cloisons avec des matériaux réfractaires.

La quantité de chaleur Q transmise par conductibilité d'un fluide à température T_1 à un fluide à température T_2 à travers une surface S d'un métal d'épaisseur e, est donnée par la formule

$$(1) \qquad Q = KS\,(T_1 - T_2) \text{ avec } \frac{1}{K} = \frac{1}{K_1} + \frac{e}{c} + \frac{1}{K_2}$$

K_1 et K_2 sont les quantités de chaleur transmises dans

l'unité de temps pour une différence de température de 1° de l'un des fluides au métal, *c* la quantité de chaleur qui passe dans l'unité de temps à travers l'unité d'épaisseur et l'unité de surface du métal pour une différence de température de 1°. En fait, dans un échangeur de calories, les températures T_1 et T_2 ne sont pas constantes, T_1 diminue et T_2 augmente ; on doit donc considérer un élément infiniment petit de l'échangeur et ensuite intégrer l'équation obtenue sur toute la longueur. On simplifie le calcul en utilisant la table de Hausbrand, qui permet d'appliquer directement la formule (I) en y substituant à T_1-T_2 une

Table de Hausbrand.

$\frac{D_0}{D}$	E	$\frac{D_0}{D}$	E
0,0025	0,166	0,20	0,500
0,005	0,188	0,21	0,509
0,01	0,215	0,22	0,518
0,02	0,251	0,23	0,526
0,03	0,277	0,24	0,535
0,04	0,298	0,25	0,544
0,05	0,317	0,30	0,583
0,06	0,335	0,35	0,624
0,07	0,352	0,40	0,658
0,08	0,368	0,45	0,693
0,09	0,378	0,50	0,724
0,10	0,391	0,55	0,756
0,11	0,405	0,60	0,786
0,12	0,418	0,65	0,815
0,13	0,430	0,70	0,843
0,14	0,440	0,75	0,872
0,15	0,451	0,80	0,897
0,16	0,461	0,85	0,921
0,17	0,466	0,90	0,953
0,18	0,478	0,95	0,982
0,19	0,489	1,00	1,000

certaine valeur moyenne ; soit T'_1 et T''_1 les températures initiales et finales du premier fluide, T'_2 et T''_2 celles du second fluide ; en général, ils traversent l'échangeur à contre-courant ; on a donc deux différences de températures aux deux extrémités, $T'_1 - T''_2$ et $T''_1 - T'_2$; soit D_0 la plus petite et D la plus grande ; on forme le rapport $\frac{D_0}{D}$ inférieur à l'unité ; on trouve dans la table ci-jointe la valeur d'un coefficient E en regard de la valeur de $\frac{D_0}{D}$, et la différence de température à introduire dans la formule (1) sera égale à DE.

Dans le chauffage par régénération, réalisé industriellement tout d'abord par Siemens, on fait passer les gaz chauds à travers un empilage de briques réfractaires ; quand la température de l'empilage a monté suffisamment, les gaz sont envoyés à travers un deuxième empilage, pendant que le gaz à réchauffer est envoyé sur le premier empilage qu'il refroidit. Il est donc nécessaire d'avoir au moins deux chambres de récupération, l'une en chauffage, l'autre en refroidissement.

La vitesse des fluides à travers les empilages est, d'ordinaire, voisine de 1 m. à la seconde. Pratiquement, avec des gaz à 1 600°, on peut réchauffer jusqu'à 1 000° ; avec des gaz à 1 000°, on peut réchauffer jusqu'à 800°.

Utilisation et dépoussiérage des fumées. — Lorsque les gaz de la combustion ont traversé les appareils, fours ou chaudières, à chauffer, ils sortent à une température d'autant plus élevée que la température à réaliser est, elle-même, plus haute. Les fluides d'une chaudière ont 250° à 350°, les fumées d'un four peuvent dépasser 1 000° ; il était naturel de chercher à récupérer une partie des calories qu'elles contiennent encore. Pour les fumées des fours, le plus souvent à haute

température, le seul organe utilisable est le régénérateur dont nous venons d'exposer les principes ; il sert, lorsque le four est chauffé au gaz, à réchauffer l'air de combustion et le gaz ; on augmente ainsi la température des fumées, dont il faut une moindre quantité pour transmettre le même nombre de calories, et on diminue la quantité de gaz consommée.

Pour les chaudières, deux catégories de dispositifs, presque tous par conductibilité, sont employés : les réchauffeurs d'eau ou économiseurs, et les réchauffeurs d'air. Il y a une vingtaine d'années, le premier dispositif seul était en usage ; il servait à réchauffer l'eau d'alimentation à sa sortie du condenseur, avant son entrée dans la chaudière ; les premiers types d'appareils ont été constitués par des tubes verticaux en fonte lisse où circulait l'eau et entre lesquels passaient les gaz. Il est à peu près complètement supplanté actuellement par l'économiseur à petits tubes d'acier ou par l'économiseur à tubes à ailettes horizontaux et en fonte ou en acier. Ces appareils effectuent un simple réchauffage de l'eau, sans vaporisation.

Ils ont perdu de leur intérêt le jour où on a constaté qu'il était avantageux pour le rendement total de réchauffer l'eau d'alimentation en lui incorporant de la vapeur ayant déjà travaillé ; cette opération, qui s'appelle le soutirage et qui permet de réchauffer l'eau par paliers successifs, s'est généralisée, si bien qu'il est devenu nécessaire de trouver un autre emploi de la chaleur des fumées, et c'est pourquoi on s'en sert maintenant pour réchauffer l'air du foyer. Les réchauffairs sont presque tous des échangeurs de calories par conductibilité et constitués soit par des paquets de tôles entre lesquelles sont alternées des lames d'air et de gaz, soit par des tubes dans lesquels passe l'air et autour desquels circulent les fumées ; ces derniers sont

plus étanches et moins encombrants. Le réchauffair Ljunstrom est un régénérateur d'un type très particulier. Il est constitué par un tambour mobile divisé en secteurs remplis de tôles d'acier minces et ondulées. Ce tambour, qui a un diamètre de près de 6 mètres, tourne lentement à l'intérieur d'une enveloppe à laquelle aboutissent les canalisations d'air et de fumées séparées par une cloison médiane. Les paquets de tôle des secteurs s'échauffent dans les fumées et repassent à l'air les calories absorbées. Cet appareil est très efficace et peu encombrant.

Dans tous ces appareils, des dispositifs sont prévus pour l'extraction des suies et des cendres que les fumées y déposent.

D'après Roszak, un réchauffage de t^o de l'air d'alimentation provoque dans les appareils évaporatoires ordinaires une augmentation de $0{,}15\,t^o$ de la température de combustion.

Les fumées, quand elles arrivent à la cheminée, contiennent encore des cendres d'autant plus abondantes que le combustible initial était plus cendreux ; leur dégagement dans l'atmosphère constitue pour l'hygiène publique un danger que tend à combattre la loi Morizet, promulguée le 20 avril 1932, sur la suppression des fumées industrielles. On est donc amené à dépoussiérer les fumées avant leur envoi à la cheminée. Trois groupes de procédés peuvent être employés :

Le dépoussiérage à sec : il s'opère, soit par des variations brusques de vitesse des gaz projetant les poussières en dehors du flux gazeux dans les chambres de dépôt, soit par la force centrifuge communiquée aux gaz par un ventilateur ou par des ailettes fixes les obligeant à un mouvement giratoire ; on extrait alors la veine périphérique qui est la plus chargée en poussières ;

Le dépoussiérage humide : il s'opère, soit par barbo-

tage des fumées dans l'eau, soit par pulvérisation d'eau dans les fumées, soit en faisant circuler celles-ci entre des tubes le long desquels ruisselle une mince lame d'eau ;

Le dépoussiérage électrique : les fumées passent entre deux électrodes, dont la négative est un fil et la positive une plaque contre laquelle se précipitent les poussières ; la tension employée est de l'ordre de 80 000 volts.

Les meilleurs de ces appareils peuvent enlever 80 à 90 % des poussières contenues dans les fumées.

Contrôle de la combustion. — Ce contrôle, indispensable si on veut atteindre le maximum de rendement calorifique, comprend :

1. La mesure des quantités de matières entrant en réaction, comportant : détermination du poids de combustible brûlé, par pesée quand il s'agit de charbon, par comptage volumétrique quand il s'agit de liquides ou de gaz ; — détermination du pouvoir calorifique du combustible ; — détermination du volume d'air admis et de fumées produites, par déprimomètres mesurant, par la différence des niveaux d'un liquide dans un tube à deux branches, la charge ou la dépression qui entraînent le débit dans les canalisations ;

2. La détermination de la composition des fumées, notamment de leur teneur en gaz carbonique, en oxyde de carbone et en oxygène, permettant de vérifier que la combustion est complète et que l'excès d'air est réduit au minimum nécessaire à cette combustion complète ;

Analyse des mâchefers ;

3. La mesure des températures par thermomètres ou pyromètres.

Il existe des modèles enregistreurs de ces divers appareils, au moyen desquels il est possible de contrôler d'une façon permanente la conduite de la combustion.

Chapitre V

LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE LIQUÉFACTION ET DE GAZÉIFICATION DU CARBONE

Nous avons déjà signalé combien les combustibles liquides ou gazeux sont d'un emploi plus commode que les combustibles solides ; il était donc naturel qu'on cherchât à tirer du charbon des liquides ou des gaz combustibles. La chimie du carbone apprend qu'il forme deux catégories de composés combustibles, industriellement utilisables : dans la première, on trouve les innombrables hydrocarbures où il est uni à l'hydrogène ; la seconde est constituée exclusivement par l'oxyde de carbone, gaz dans lequel il est uni à l'oxygène.

La production systématique de CO est réalisée par la gazéification, que nous étudierons plus loin ; elle s'effectue, au moins pour la majeure partie, grâce à une combustion limitée du charbon dans l'air ; il en résulte un ballast important d'azote qui diminue le pouvoir calorifique au mètre cube du gaz produit et lui vaut son nom de gaz pauvre.

Les hydrocarbures s'obtiendront par l'action à chaud de l'hydrogène sur le carbone ; si on emploie dans ce but de l'hydrogène externe, on liquéfiera le charbon en fabriquant des pétroles synthétiques.

On peut enfin tirer parti de l'hydrogène qui préexiste dans le charbon et, par un simple chauffage, à l'abri

de l'air, extraire du charbon des liquides et des gaz ; ces gaz, qui ne sont pas mélangés à des quantités importantes d'azote, ont un pouvoir calorifique élevé et sont appelés gaz riches.

Cette dernière opération est appelée improprement distillation, car elle ne se borne pas à extraire du charbon par le chauffage des corps qui y préexistent. En effet, quand on traite le charbon par des solvants appropriés (SO^2 liquide, solution de soude, etc.), dont l'action est d'ailleurs faible, on n'en sort aucun des liquides qu'on obtient dans la distillation ; ces corps, ainsi que les gaz formés, résultent de transformations chimiques produites par le chauffage et qui consistent dans une véritable migration de l'hydrogène.

Comportement du charbon pendant la distillation. — Le charbon est constitué de deux groupes d'éléments distincts : la matière humique et les résines. Sous l'action de la chaleur, la première fournit d'abord de l'eau ; à aucun moment elle ne se ramollit ; vers 300°, la décomposition commence avec formation de gaz, H^2, CH^4, CO^2 et du CO en petites quantités ; elle peut se terminer vers 600°. Si elle dépasse notablement cette température, CO^2 dégagé sera réduit par le carbone en excès et la proportion de CO augmentera. Si le chauffage est lent, l'oxygène se combine surtout à l'hydrogène et la quantité d'eau dégagée augmente ; si le chauffage est rapide, l'oxygène se porte sur le carbone, beaucoup plus abondant. Comme il n'y a aucun ramollissement de la matière, le résidu n'est pas aggloméré.

Les corps résineux fondent vers 300°-320° et se décomposent en dégageant des hydrocarbures, notamment du naphtène, et des composés oxygénés qui se décomposent quand la température s'élève. Le distillat laisse un résidu poisseux, déjà bien aggloméré à 500° si,

par ailleurs, le résidu humique n'est pas trop abondant. A cette température, le coke est encore tendre, mais, si on monte jusqu'à 1 000°, le résidu poisseux est craqué et le carbone libéré durcit le coke. Il existe donc pour la plupart des houilles un point de ramollissement, grâce auquel la distillation de fines et de poussier de charbon peut laisser un coke aggloméré et compact. Ce point de ramollissement a été déterminé par MM. Charpy et Jean Durand, en opérant sur de petits cylindres, agglomérés par la compression, de charbon finement broyé, additionné d'eau ; les cylindres sont séchés avant le chauffage qui a lieu en atmosphère d'hydrogène, dans un tube scellé. La présence d'hydrogène empêche le dégagement des hydrocarbures ; on constate alors que pour des houilles françaises, notamment de Montrambert, Marles, Bruay, le point de ramollissement se situe entre 400° et 450°.

Ce phénomène a été mis à profit dans le procédé Kainscop, réalisé industriellement à Ougrée en Belgique, pour l'obtention directe d'agglomérés ; on distille jusqu'au point de ramollissement des houilles riches en matières volatiles, en recueillant le goudron et les gaz formés jusqu'à cette température ; le résidu est comprimé à chaud et refroidi.

Le chauffage dégage également une partie de l'azote contenu dans le charbon ; on en retrouve de 30 à 80 % dans le coke, soit sous forme de gaz occlus, soit sous forme d'azotures de carbone, plus ou moins définis ; 6 à 25 % se dégagent sous forme d'ammoniaque ; le reste part sous forme d'azote, d'acide cyanhydrique, de composés pyridiques, etc. La formation d'ammoniaque commence vers 350° et se développe vers 500° ; elle augmente avec la vitesse d'évacuation des gaz ; elle est favorisée par l'injection de vapeur surchauffée et elle se termine vers 880°.

Quant au soufre, il se retrouve partiellement dans le coke ; pour le reste, il forme H^2S dès 350°, et du sulfure de carbone, CS^2, à haute température ; si alors le distillat contient encore de l'eau, on obtiendra aussi l'oxysulfure COS.

Distillation à basse température et à haute température. — Il résulte de cette formation progressive du distillat que les produits obtenus dans la carbonisation de la houille différeront profondément en quantités et en qualités suivant la température à laquelle on portera et on maintiendra le charbon pour le distiller ; si cette opération se fait au-dessous de 600°, on distillera à basse température et on obtiendra un goudron appelé goudron primaire. Ce sera effectivement le goudron primitif, formé par la décomposition du combustible à condition qu'il soit soustrait aussitôt à l'action de la chaleur aidée par l'activité catalytique des parois et du charbon lui-même ; précisément, ce sera la grande préoccupation des inventeurs de fours pour la distillation à basse température que de soustraire le goudron à toute décomposition pyrogénée ultérieure. Si, au contraire, on distille vers 1 100°, on réalise une distillation à haute température ; le goudron primaire est craqué dès son apparition ; des produits supplémentaires sont dégagés et le coke résiduel, si le charbon est agglutinant ou « cokéfiant », devient beaucoup plus résistant et peut, par exemple, être employé comme combustible dans les hauts fourneaux : c'est le coke métallurgique.

Ainsi une même houille à gaz contenant 25 à 30 % de matières volatiles donnera, par tonne distillée :

à 550°, 170 mc. de gaz d'un pouvoir calorifique de 6 000 à 6 500 ca. ; 80 à 90 litres de goudron, 6 kg. 8 de sulfate d'ammoniaque, 700 kg. de semi-coke ;

à 1 100°, en cornue à gaz, 340 mc. de gaz d'un pouvoir calorifique de 4 800 à 5 000 ca., 45 litres de goudron, 11 kg. 5 de sulfate d'ammoniaque et 680 kg. de coke ;

à 1 100°, dans un four à coke, 325 mc. de gaz d'un pouvoir calorifique de 4 000 ca., 36 litres de goudron, 12 kg. 7 de sulfate d'ammoniaque et 720 kg. de coke ;

Des essais systématiques de M. Thau, de Gelsenkirchen, effectués en distillant du charbon de Durham dans un four à coke à des températures croissantes, ont montré, quand la température passe de 550° à 860°, que, pour 1 000 mc. de gaz formés :

le poids de goudron recueilli passe de 30 kg. 2 à 12 kg. 1 ; sa densité passe de 1,06 à 1,19 ;

le poids d'huiles légères recueillies passe de 17 kg. à 17 kg. 1 ; elles sont d'abord complètement paraffiniques, mais leur teneur en paraffines devient nulle dès que la distillation se fait à 710° ; en revanche, leur teneur en produits aromatiques, encore nulle à 550°, est totale à 710°.

Le poids de brai passe de 31 kg. 8 à 57 kg.

Dans les gaz, la teneur en benzol, nulle à 550°, atteint 1,2 % à 860° ; la teneur en éthylène passe de 6,8 à 2,3 % ; celle en méthane de 52,6 à 32,8 ; celle en azote de 4,2 à 2,5 ; celle en hydrogène de 27,6 à 51,1 ; le pouvoir calorifique passe de 6 341 ca. à 5 092 ca. et la densité de 0,412 à 0,399.

Le poids de sulfate d'ammoniaque passe de 1 kg. 44 à 6 kg. 71.

On obtient donc une proportion beaucoup plus grande de goudron dans la distillation à basse température ; malheureusement, ces goudrons ne contiennent guère plus de 10 à 12 % d'hydrocarbures légers distillant avant 200° ; ils ont 35 à 50 % d'hydrophénols et de polyphénols ; 40 à 45 % distillent au-dessus de 300°. Ce goudron de basse température n'a guère eu d'emploi

jusqu'à ce qu'on ait pu l'hydrogéner et le transformer intégralement en mélange d'hydrocarbures.

Le semi-coke de la distillation à basse température est beaucoup moins compact et cohérent que le coke de fours à coke ou d'usine à gaz ; en revanche, il est beaucoup plus « réactif », grâce à sa porosité plus grande et à sa plus forte teneur en matières volatiles (8 à 10 % au lieu de 1 à 2 %) ; il s'enflamme, tient le feu et se réallume beaucoup plus facilement ; c'est pourquoi on a pu, par la distillation à basse température, réaliser des combustibles pour foyers domestiques, appelés anthracites artificiels, qui concurrencent maintenant l'anthracite naturel, même en Angleterre, producteur attitré des meilleurs anthracites naturels.

Distillation à haute température : coke métallurgique et gaz de ville. — La distillation de la houille a commencé par la haute température, pour deux fins bien différentes, à peu près à la même époque : au début du XIX^e^ siècle.

La sidérurgie avait d'abord employé le charbon de bois, mais, dans un pays pauvre en forêts comme l'Angleterre, l'État dut intervenir pour limiter sa production et empêcher le déboisement. A la fin du XVI^e^ siècle, Dud Dudley essaie la houille qui, dès 1713, est employée par Abraham Darby dans ses fourneaux ; un siècle plus tard, le coke, offrant par sa porosité une grande surface d'attaque à l'air, assez solide pour résister au poids des charges, devient le combustible normal des hauts fourneaux. La distillation qui le produit s'oriente vers l'obtention d'un coke poreux, dur et résistant à l'écrasement.

Dans un autre domaine, le Français Philippe Lebon avait proposé en 1786, au Havre, d'utiliser à l'éclairage des villes le gaz provenant de la distillation du

bois ; revenu à Paris, il substitue la houille au bois et éclaire, par le nouveau gaz, ses jardins et son appartement de la rue Saint-Dominique ; mais ce gaz, mal épuré, fétide, n'obtient aucun succès. L'Anglais Murdoch, ayant eu connaissance des essais de Lebon, éclaire dès 1798 la Manufacture de James Watt. Enfin, l'Allemand Winsor fonde en 1804, à Londres, la première société gazière. Dans cette direction, le produit intéressant est le gaz et ce n'est que progressivement qu'on cherche des débouchés au coke de gaz, moins compact, moins réactif et plus friable que le coke métallurgique.

Ces deux industries, qui s'intéressaient, l'une au coke, l'autre au gaz, se sont longtemps développées parallèlement, mais un souci commun d'utiliser au mieux tous leurs produits les rapproche maintenant.

Fabrication du coke métallurgique. — *a. Houilles à coke.* — L'expérience a montré que la meilleure houille à coke, telle quelle ou par mélange de constituants divers, doit avoir la composition suivante : matières volatiles, 18 à 24 % ; cendres, 7 à 10 % ; soufre, 0,8 à 1,5 % ; carbone fixe, 75 à 66 %.

On peut, par des essais de laboratoire, vérifier sa qualité essentielle qui est la faculté d'agglutination. Dans ces essais, on mélange à du sable marin, lavé à l'acide chlorhydrique, passant au tamis 40 (225 mailles par cmq.) et ne passant pas au tamis de 500 (335 mailles), du charbon séché, passant au tamis de 80 (860 mailles) ; on introduit le mélange dans un creuset en porcelaine de 25 cmc. et on chauffe au mouffle à 900°-950°.

L'indice d'agglutination est le nombre de grammes de sable fin agglutinés par 1 gr. de charbon sec par chauffage, sans que le résidu non aggloméré dépasse 1 gr. Le poids de ce résidu est constant tant que l'indice n'est pas atteint ; il croît ensuite.

L'indice de fabrication du coke s'obtient en mélangeant 17 gr. de sable et 1 gr. de charbon ; on pèse le déchet D, comme dans l'épreuve précédente, et on détermine la résistance R à l'écrasement par cmq. du culot de coke obtenu dans le creuset ; l'indice est égal à $17 \frac{R}{D}$; voici l'indice d'agglutination et la résistance du culot donnés par divers charbons :

NATURE DU CHARBON	*Matières volatiles*	*Indice limite d'agglutination*	*Résistance du culot*
Lignite ou houille sèche à longue flamme.....	> 35	0 à 2	0
Houille sèche faiblement cokéfiée	> 35	2 à 6	< 3
Houille à gaz	> 35	2 à 9	3 à 8
Charbon gras à coke.....	18 à 32	14 à 16	5 à 7
Charbon à coke métallurgique	18 à 24	17 à 24	4 à 8
Charbon à coke métallurgique fortement cokéfié.	18 à 24	17 à 24	> 8
Charbon 3/4 gras.....	16 à 22	11 à 13	< 6
Charbon 1/2 gras.....	14 à 18	6 à 11	< 6
Charbon maigre	8 à 11	0 à 2	< 6
Charbon anthraciteux ...	< 8	0 à 2	< 6

On voit ainsi que la houille à gaz donnera un coke moins compact et moins résistant que la houille à coke ; pour cette dernière, le déchet est d'environ 0 gr. 7, la résistance d'au moins 7 et l'indice de fabrication sera de l'ordre de 170 ; on peut admettre qu'on aura un

bon coke si cet indice est compris entre 150 et 250. Il est essentiel que R soit au moins égal à 6, même si D est très faible. Le plus souvent, la matière première est préparée par mélange de qualités différentes, par exemple un charbon peu cokéfiant, un charbon avec grand R et grand D, un charbon très agglutinant ayant un D très faible.

b. Schéma de fabrication. — A l'origine, le coke a été fabriqué comme le charbon de bois, par le procédé des meules ; plus tard, on employa le four de boulanger, constitué par une sole plate et une voûte surbaissée munie d'une cheminée ; dans les meules et dans le four de boulanger, on allumait la houille ; elle brûlait partiellement, le reste se transformant en coke ; dans le four de boulanger, on pouvait déjà employer des menus qui s'agglomératent au cours de la cokéfaction. Un grand progrès fut constitué par l'emploi d'un chauffage externe, la houille distillant dans une chambre de carbonisation et le chauffage étant assuré par le gaz dégagé ; ce dernier est surtout produit vers la fin de l'opération, alors que le chauffage est surtout nécessaire au début ; on pallia à cet inconvénient en groupant les fours deux par deux, de telle façon que l'un produisait du gaz pendant que l'autre en avait besoin ; finalement, on en vint à recueillir tout le gaz d'une batterie de fours, à l'épurer et à le distribuer aux fours. En même temps, on a réalisé la dernière amélioration fondamentale, consistant dans la récupération et la valorisation des sous-produits de la distillation : gaz, goudron et eau ammoniacale. Cette transformation, développée rapidement en Allemagne, s'est étendue assez lentement aux autres pays ; c'est ainsi qu'aux États-Unis, en 1913, 27,5 % seulement du coke provenaient de fours à récupération ; en 1925, ce pourcentage était passé à 79 %.

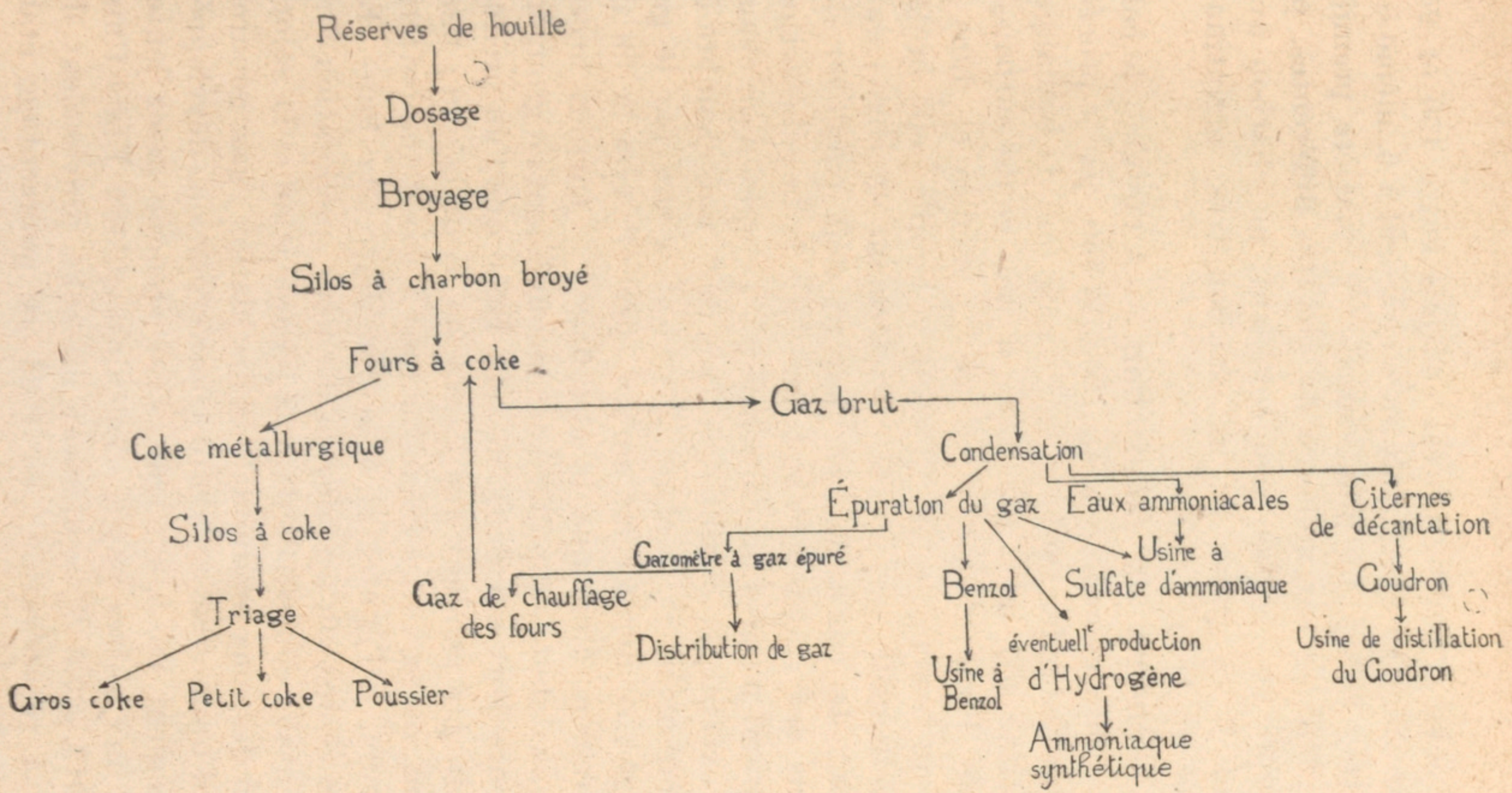


SCHÉMA DE LA FABRICATION DU COKE MÉTALLURGIQUE.

La fabrication du coke métallurgique comprend donc maintenant : la préparation du mélange de houilles à traiter, la distillation, la récupération et le traitement des sous-produits. On peut la représenter par le schéma ci-dessus (p. 111).

Nous allons exposer maintenant les principes suivant lesquels est réalisé l'appareillage moderne pour la fabrication du coke ; quant à la récupération et au traitement des sous-produits, ils sont les mêmes, qu'il s'agisse d'une usine à coke ou d'une usine à gaz, et nous en parlerons après avoir traité la distillation de la houille pour la fabrication du gaz.

c. Le four à coke. — Le charbon destiné à la fabrication est conservé, de préférence, en silos, mais souvent encore en tas ; nous avons déjà signalé que la houille exposée à l'air s'oxyde lentement ; si les tas sont hauts, la température intérieure peut s'élever sous l'influence de l'oxydation et, quand elle atteint 48°-50°, il y a danger d'inflammation, on éteint le tas en combustion avec de la bouillie d'argile ; du charbon à gaz conservé un an à l'air a eu un rendement en gaz diminué de 15 % et en ammoniaque de 50 % ; le dosage des mélanges s'effectue soit avec des doseurs à secousses dans lesquels les déplacements d'un clapet en tôle règlent la distribution du charbon, soit avec des doseurs à plateau tournant sous une trémie, au-dessus duquel un couteau détermine l'épaisseur de la couche entraînée par le plateau. Le broyage en poudre fine et le mélange sont effectués dans des broyeurs, broyeurs Carr dans lesquels des axes décentrés projettent le charbon contre les parois, et quelquefois broyeurs à marteaux qui, sous l'action de la force centrifuge, écrasent le charbon contre les parois. Le mélange ainsi préparé est amené au four à coke.

Dans le four (Fig. 12), le charbon se trouve entre deux

parois verticales en maçonnerie réfractaire, chauffées sur leur face externe. La carbonisation, qui commence aux parois, avance d'une trentaine de centimètres par 24 h. ; en donnant au four une largeur intérieure de 45 cm., on pourra effectuer la cuisson en 18 heures ; en fait, d'après Still, la durée de la cokéfaction totale est proportionnelle au carré de la largeur, parce que la vitesse de son cheminement augmente avec l'avancement de la cuisson ; la hauteur utile de la paroi atteint maintenant 3 m. 25, et sa longueur 11 m. 65 ; une sole, également réfractaire, limite le four à sa partie inférieure ; sa voûte porte l'orifice de chargement et il est fermé à ses deux extrémités par des portes en fonte garnies de réfractaires, qu'on peut soulever par des câbles et des poulies.

Le charbon est amené au-dessus du four par des wagonnets qui se vident par une trappe dans les trémies de chargement ; il est ensuite pilonné mécaniquement dans le four et sa surface est égalisée par une repaleuse ; ou bien il est pilonné en dehors du four dans l'enfourneuse ; on obtient alors un gâteau dont le gabarit est légèrement inférieur à celui du four et qui y est introduit d'une seule pièce. Le pilonnage, qui exige une humectation préalable du charbon, augmente de 18 à 20 % la charge du four ; la résistance à l'écrasement du coke obtenu est très notablement augmentée et, les rentrées d'air ayant une action moindre sur la masse compacte, le rendement en coke est augmenté de 2 à 3 %, la proportion de gros coke augmentant également de 2 à 3 % ; quand le pilonnage est fait en dehors du four, comme il existe un jeu entre les dimensions du gâteau et celles du four, on peut supprimer les divers élargissements qu'on donne d'ordinaire aux parois vers la sortie pour faciliter le défournement du coke. Pendant le remplissage, on isole le four de la tuyau-

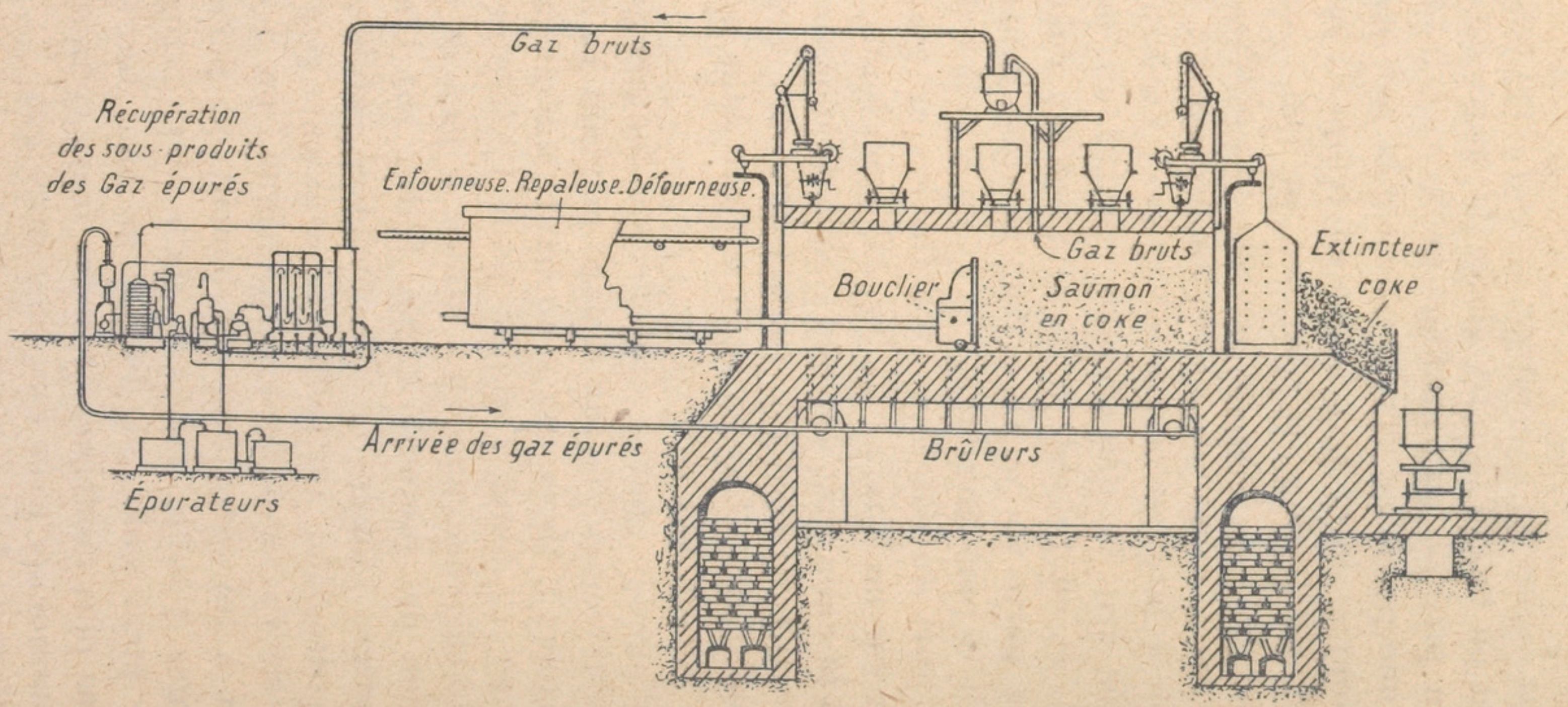


FIG. 12. — SCHÉMA DE LA FABRICATION MODERNE DU COKE.

terie des gaz au moyen de vannes. Quand il est terminé, on ferme et on lute à la terre glaise la porte de chargement. On procède au chauffage et on suit la distillation par une petite ouverture placée à la partie supérieure du four et lutée à la glaise en temps ordinaire.

Quand la distillation est terminée, on isole de nouveau le four de la tuyauterie des gaz ; on amène, face à l'une de ses extrémités, la défourneuse qui va sortir le coke ; on délute les portes verticales ; l'une d'elles est soulevée par la défourneuse, l'autre au moyen d'un treuil, et on procède à l'extraction du coke ; la défourneuse porte un bouclier qu'une roue dentée et une crémaillère poussent dans le four : le bouclier chasse le coke qui sort du côté opposé à travers un guide et tombe, soit sur un quai avec des dalles en fonte, où il est arrosé à la main, soit dans un wagon à coke à parois en fonte où il est éteint en passant sous une tour de pulvérisation d'eau ; il est conduit ensuite dans un silo à coke ou mis en tas.

Le chauffage du four a été effectué longtemps en brûlant exclusivement le gaz dégagé pendant la fabrication du coke ; mais ce gaz a un haut pouvoir calorifique ; on en a trouvé l'emploi pour l'éclairage des villes, en concurrence avec les usines à gaz, et pour l'alimentation des moteurs à gaz. Enfin, sur l'initiative de Georges Claude, on l'a considéré comme une source d'hydrogène, utilisable notamment pour la fabrication de l'ammoniaque synthétique ; on a donc été conduit à lui substituer totalement ou partiellement du gaz pauvre fabriqué dans des gazogènes utilisant le menu coke, ou du gaz de haut fourneau. Les fours les plus modernes sont des fours compounds pouvant fonctionner avec l'un ou l'autre gaz.

Le chauffage se fait dans les piédroits séparant les fours consécutifs et où sont ménagés les carneaux de

combustion. Sous chaque four se trouvent deux régénérateurs de chaleur, l'un en chauffage par les fumées, l'autre cédant sa chaleur avant la combustion. Quand on marche au gaz pauvre, l'air et le gaz sont réchauffés dans deux parties distinctes du régénérateur ; quand on emploie le gaz des fours, seul l'air est réchauffé. L'air et le gaz se mélangent et brûlent dans deux carneaux ascendants, le long des parois, et redescendent par un carneau central vers les régénérateurs ; quand on marche au gaz pauvre, le mélange est fait tout entier à la base, car la flamme est longue. Quand on marche au gaz du four, une partie de l'air est injectée vers le haut du carneau pour allonger la flamme. L'air est aspiré par le tirage ; le gaz est entraîné par sa pression propre et par le tirage. Des registres permettent de régler les débits ; sur le gaz, le réglage se fait par des orifices munis de tampons calibrés. Les inversions aux régénérateurs se font progressivement (3/4 de minute), pour éviter les pertes de gaz.

En dix ans, de 1914 à 1924, l'encombrement des fours a été réduit d'un quart, la durée des opérations est passée de 24 à 18 heures, la consommation de calories par tonne de charbon traité est passée de 750 000 à 600 000, la main-d'œuvre a été réduite de moitié ; le nombre de fours nécessaires pour traiter 200 000 t. de charbon par an est passé de 68 à 30.

Les 600 000 calories nécessaires à la distillation d'une tonne de charbon se répartissent ainsi :

Rayonnement des fours.	54 000	soit 9 %
Dans les gaz brûlés.	102 000	soit 17 %
Coke	264 000	soit 44 %
Dans le distillateur.	180 000	soit 30 %

On obtient 750 kg. de gros coke par tonne de charbon sec, 24 kg. de goudron, 10 kg. de sulfate d'ammoniaque, 6 kg. 5 de benzol contenant lui-même 82 % de produits rectifiés.

Les qualités d'un bon four à coke sont :

Un rendement maximum en coke assuré par la rapidité de la cuisson, conditionnée elle-même par une bonne distribution et un bon mélange de l'air et des gaz, une répartition convenable des calories évitant toute surchauffe ;

Un rendement maximum en sous-produits et en gaz provenant d'une température des gaz de distillation aussi basse que possible à leur dégagement dans le four, sans surchauffe par la voûte. Parmi ces produits, les plus importants sont l'ammoniaque et le benzol. L'ammoniaque apparaît entre 350° et 500°, à la suite de la décomposition des produits azotés contenus dans la houille, puis vers 850° par action de l'hydrogène sur l'azote ; or il commence à se détruire dès 700° ; il faut donc le soustraire le plus tôt possible à l'action de la température. Les constituants du benzol (benzène, toluène, xylène) proviennent de la décomposition, en partie, à température moyenne, des composants, hexahydrures et phénols, du goudron primaire, en majeure partie, à température plus élevée, des hydrocarbures de la série grasse ; une température plus élevée les décompose à leur tour.

Ce rendement est notablement abaissé s'il y a des rentrées d'air ou de gaz brûlés dans le four ; il faut donc, pour les éviter, qu'il n'y ait pas de dépression sensible dans la chambre de carbonisation.

Un bon coke se caractérise par sa grande dureté, sa faible friabilité et une faible perte au feu (5 % en moyenne). Sa densité réelle varie de 1,7 à 2,3 (2 en moyenne) ; sa densité apparente varie de 0,70 à 1,25 (0,85 en moyenne). Sa porosité, due au dégagement de gaz pendant le ramollissement du charbon, varie de 26 à 51 % ; c'est le volume des vides qu'il contient et qu'on détermine par différence de pesées, en le plaçant

dans de l'eau distillée, froide, puis portée à l'ébullition. Il doit être réactif, cette propriété étant caractérisée par sa faculté de réduire plus ou moins vite CO^2 en CO ; c'est, multiplié par 100, le rapport au volume de CO^2 initial du volume de CO^2 réduit par des grains de coke de dimensions supérieures à 7 mm. chauffés dans un tube de porcelaine de 1 000°-1 100°, traversé par un courant de CO^2 pur et sec à la vitesse de 5 litres à la seconde. Cette dernière propriété est caractéristique du rôle que le coke aura à remplir dans le haut fourneau.

Le gaz de ville. — La première qualité qu'on a demandée au gaz de ville, d'abord employé exclusivement à l'éclairage, ce fut d'avoir un grand pouvoir éclairant, mesuré par comparaison avec une lampe Carcel étalon. Cette qualité exigeait la présence dans le gaz de produits à forte teneur en carbone, libérant temporairement ce dernier pendant la combustion, donc des hydrocarbures dont l'hydrogène brûlait d'abord, le carbone incandescent assurant le rayonnement de la flamme. Les hydrocarbures sont : le méthane, l'éthylène et le benzène existant à l'état de vapeur dans le gaz. Au contraire, l'hydrogène libre ne participait pas à ce pouvoir éclairant. Le problème était donc de produire, avec une tonne de houille, le maximum possible d'un tel gaz ; la dureté, la compacité du coke résiduel avaient d'autant moins d'importance que, par leur situation, les usines à gaz ne pouvaient le plus souvent penser à alimenter des industries métallurgiques ; leur coke sert à alimenter des gazogènes, des foyers domestiques pour lesquels une moindre compacité ne constitue pas un inconvénient. On prit donc comme matière première des charbons moins cokéfiants, mais contenant plus de matières volatiles. Les houilles à gaz en renferment plus de 35 %, tandis

que les charbons à coke métallurgique en ont de 18 à 24 %. Une houille à gaz type contient : carbone, 80 % ; hydrogène, 5,5 % ; oxygène, 8,8 % ; azote, 1,5 % ; soufre, 0,8 % ; cendres, 3,4 %.

Pour un même poids de combustible traité, la distillation est effectuée beaucoup plus rapidement que dans un four à coke et à une température plus basse ; on évite le plus possible la pyrogénation des gaz, car si à 800° un mélange d'hydrogène et de méthane contient : CH^4 49,5 % ; H^2 50,5 % ; à 1 100° il aura : CH^4 6,6 % ; H^2 93,4 %. Enfin on évite plus soigneusement les rentrées d'air.

Les compositions moyennes d'un gaz de four à coke et d'un gaz de ville sont les suivantes :

	Gaz de four	*Gaz de ville*
H^2	54 %	51 %
CH^4	22	33
Autres hydrocarbures	1	3,5
CO	6	8,5
CO^2	3	2
O^2 et N^2	14	2
Pouvoir calorifique inférieur	3 800 ca.	5 000 ca.

L'apparition du manchon à incandescence, inventé par Auer, dans lequel les radiations lumineuses sont produites par le chauffage d'oxydes des terres rares, a enlevé tout intérêt au pouvoir éclairant du gaz ; ultérieurement, et malgré ce perfectionnement, l'emploi du gaz pour l'éclairage a diminué progressivement devant le développement et les commodités de l'éclairage électrique, la consommation du gaz ne se développant elle-même que pour le chauffage, si bien que sa qualité primordiale devenait le pouvoir calorifique et non plus le pouvoir éclairant.

Entre temps, et pour en réduire le prix de revient, les sociétés gazières étaient autorisées à y introduire

une certaine quantité de gaz pauvre, ce qui diminuait son pouvoir calorifique, à condition que la teneur en CO ne dépassât pas 15 % ; ainsi les propriétés du gaz de ville se rapprochaient de celles du gaz de four à coke. Par ailleurs, ce dernier, fabriqué le plus souvent sur le carreau des mines, dans des régions où la main-d'œuvre industrielle était moins chère que dans les villes, avait un prix de revient moins élevé, d'autant plus qu'il était exploité par des groupes puissants, beaucoup moins fermés que l'industrie gazière, dont la préoccupation dominante a été pendant longtemps l'aménagement du cahier des charges fixé par la municipalité concédante. C'est dans ces conditions que les cokeries ont été amenées, dans de nombreux endroits, à distribuer leur gaz. C'est en Allemagne que s'est développée, au début, cette distribution, et, déjà avant la guerre de 1914-1918, Essen était alimenté par des cokeries. En France, la cokerie de Roche-La Molière a été la première à desservir Firminy et le Chambon-Feugerolles. L'emploi de fours compound, chauffés au gaz pauvre, très étanches, libère tout le gaz de distillation à un pouvoir calorifique moyen de 4 500 ca.

Le gaz de four à coke constitue aussi une source importante d'hydrogène ; cet emploi n'est pas incompatible avec la distribution de gaz aux villes, car le gaz le plus riche en hydrogène est celui qui a le plus faible pouvoir calorifique. On installe à la sortie des fours deux canalisations de gaz ; la première, destinée à la distribution, est alimentée pendant les premières heures de chauffage, lorsque la température de distillation est assez basse pour que la teneur en hydrogène soit réduite et celle en CH^4 aussi grande que possible ; la seconde est alimentée pendant les heures suivantes.

Mais la grande majorité des villes dans le monde sont alimentées par des usines à gaz dont les appareils de

distillation, très différents au début du four à coke, tendent à s'en rapprocher.

La production du gaz de ville. — Le premier appareil employé pour la carbonisation de la houille a été

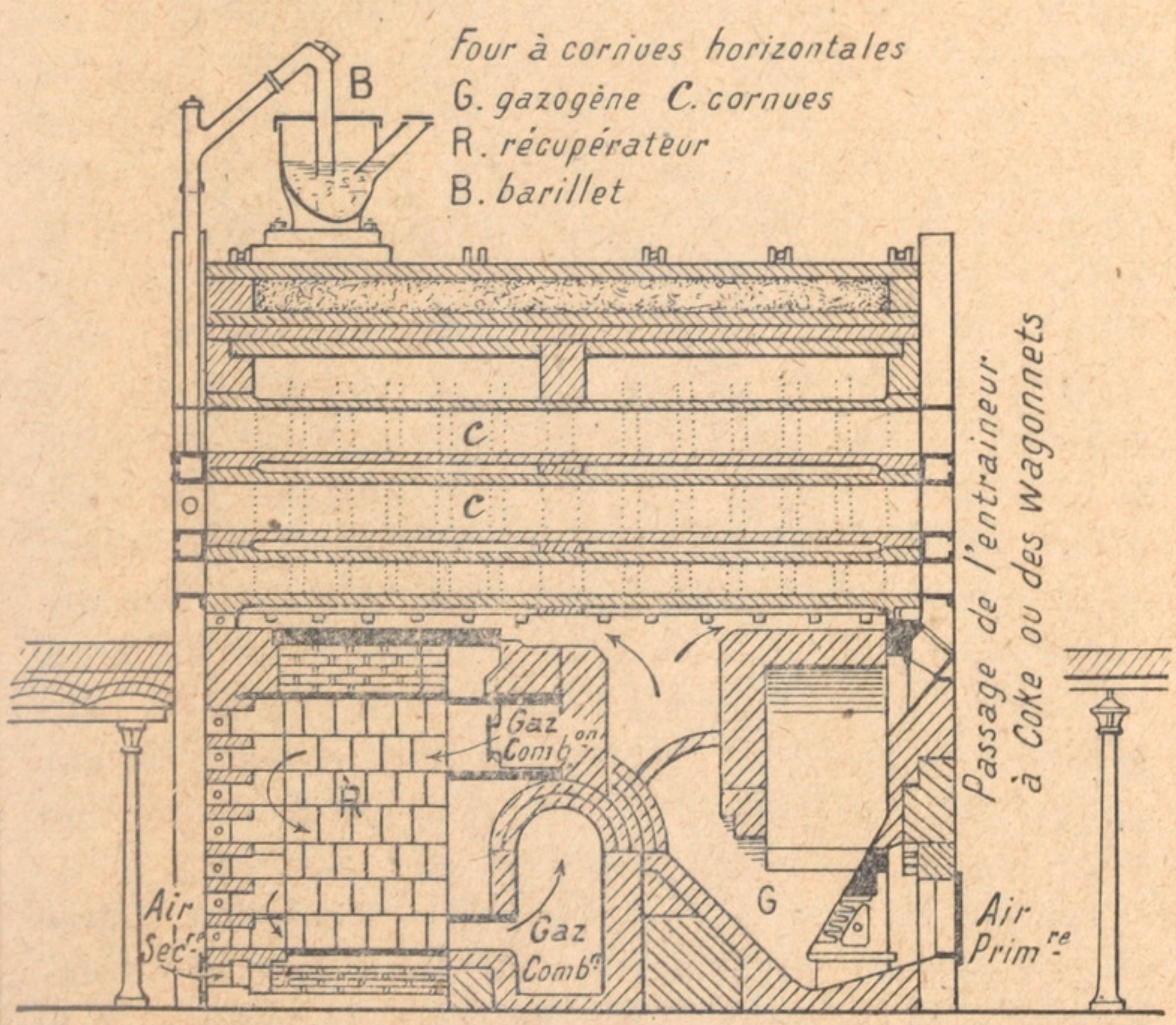


FIG. 13. — PRODUCTION DU GAZ DE VILLE PAR LE FOUR A CORNUES HORIZONTALES.

la cornue horizontale, en fonte ou terre réfractaire ; sa section droite a la forme d'une demi-ellipse à axe horizontal ; cette forme a pour but de réduire l'épaisseur de la couche de combustible. Ces cornues ont un fond à une extrémité ou sont ouvertes aux deux bouts ; on les munit de portes de fermeture pendant la distillation. Le défournement du coke est plus facile avec

la deuxième disposition ; on en place de 6 à 9 dans un four. On les a d'abord chargées à la main ; on emploie maintenant des chargeurs mécaniques de types variés, qui utilisent la force centrifuge pour projeter le charbon horizontalement dans la cornue ; elle est ainsi mieux bourrée, ce qui augmente sa capacité de production et, laissant moins de vide, oblige le gaz à sortir plus vite et à moins se pyrogéner. La distillation est effectuée en 6 heures pour des cornues ayant 2 m. 70 à 3 m. de longueur, 0 m. 47 à 0 m. 52 de largeur et 0 m. 35 d'épaisseur. Les cornues sans fond sont placées dans les fours en files de 2, ce qui donne une longueur totale de 6 mètres. La distillation est donc beaucoup plus rapide que dans les fours à coke ; il en résulte une surchauffe des parois qui se traduit par un cracking des produits avec dépôt de carbone solide, graphite ou charbon de cornue ; ce dépôt, qui réduit le volume utile, ralentit la transmission des calories, oblige à dégraphiter périodiquement les cornues ; on y parvient en envoyant dans la cornue de l'air qui brûle le carbone. Le chauffage des fours se fait soit par grille, soit par gazogène indépendant brûlant le menu coke, soit par gazogène accolé au four ; ce dernier dispositif est moins coûteux à établir et il fait bénéficier le four d'une partie de la chaleur dégagée dans le gazogène par la formation du CO ; l'air pour la combustion du CO est réchauffé par échange de calories avec les fumées qui ont chauffé les cornues et non par régénération. Le coke est extrait mécaniquement par des défourneuses constituées, pour les cornues avec fond, par des ringards mécaniques qui retirent le coke par la porte, et, pour les cornues sans fond, par un racloir qui pousse le coke hors de la cornue (Fig. 13).

Un premier progrès sur cet appareillage a été constitué par la cornue inclinée à 32° sur l'horizontale,

ce qui facilite les manutentions, puis par la cornue verticale ; elle est légèrement tronconique avec base inférieure plus large pour faciliter le défournement du coke ; elle a 4 à 5 mètres de hauteur ; on en groupe 2 ou 3 sur un même gazogène dont le gaz circule de bas en haut en spirale autour des cornues ; elles consomment en coke 12 à 15 % du poids de houille traitée et produisent moins de naphtaline que les cornues horizontales.

Les Anglais ont mis au point des fours à cornues ou à chambres verticales constitués par des troncs de pyramides à base rectangulaire, dont le fonctionnement est continu. Le charbon arrive constamment à la partie supérieure et le coke est évacué en bas à travers un joint hydraulique ; à Budapest, ces fours, d'une hauteur de 7 m. 60, avaient une épaisseur variant de 0 m. 20 à 0 m. 50 en bas. Le coke sort de l'appareillage à 50° avec 1 à 2 % d'humidité.

Enfin, avec les fours à chambre, on en arrive à de vrais fours à coke adaptés à la distillation des houilles à gaz ; ils sont chauffés en général par gazogènes ; certains sont à chambre inclinée (fours à chambres du type Munich), et leurs manutentions sont simplifiées comme pour les cornues inclinées. On y charge de 4 000 à 7 000 kg., suivant les dimensions, et on distille en 24 heures. Avec ces grosses charges et ces durées de distillation, la qualité du gaz varie beaucoup du commencement à la fin de la distillation et son pouvoir calorifique décroît de 8 000 à 4 000 calories. C'est le phénomène que nous avons déjà signalé pour les fours à coke ; pour avoir un bon gaz moyen, il est alors nécessaire d'en pouvoir stocker un grand volume.

Chapitre VI

GAZ ET SOUS-PRODUITS DE LA DISTILLATION DE LA HOUILLE DISTILLATION A BASSE TEMPÉRATURE

C'est la distillation de la houille qui, par la multitude des produits auxquels elle donne naissance, a ouvert à la chimie organique ses voies les plus fécondes en démontrant l'aptitude du carbone à former avec l'hydrogène les combinaisons les plus variées ; de tous ces composés, seuls nous intéressent ceux qui sont employés comme combustibles, et c'est de ce point de vue que nous allons examiner les produits qui sortent des appareils de distillation. Ils subissent un premier classement, d'après leur température de condensation et leur solubilité dans l'eau, en gaz, eaux ammoniacales et goudron, traités eux-mêmes ensuite par voies physique et chimique, pour obtenir des produits commerciaux.

Traitement, stockage et emplois du gaz. — Le gaz sort de l'appareil de distillation par une colonne montante qui, courbée deux fois à sa partie supérieure, débouche dans un collecteur, appelé barillet ; la colonne montante commence la réfrigération et le dépoussiérage du gaz ; elle est en général munie d'une garniture

réfractaire évitant une décomposition brutale du goudron qui s'y dépose ; la partie descendante plonge à l'intérieur du barillet dans les liquides condensés, goudron et eaux ammoniacales, qui forment ainsi une garde isolant chaque four ou cornue de l'ensemble de la condensation ; le goudron et les eaux, séparés en deux couches, s'écoulent par des trop-pleins dans des citernes en béton. Le gaz, qui est à environ 225°, passe dans le condenseur, constitué par des jeux d'orgue en fonte, autrefois refroidis à l'air, maintenant refroidis le plus souvent par un courant d'eau, ce qui diminue légèrement la quantité de benzol entraînée par le gaz et augmente la quantité d'ammoniaque dans les eaux ; les liquides condensés sont également envoyés aux citernes.

A la suite se trouve l'extracteur qui aspire le gaz du côté de l'appareil producteur et le refoule à travers les appareils d'épuration dans les gazomètres ; on emploie généralement dans ce but des pompes rotatives, et la pression est réglée, soit par la vitesse de l'appareil, soit en renvoyant à l'aspiration une partie plus ou moins grande du gaz refoulé ; l'automaticité du réglage est assurée par une cloche qui tend à se soulever si la pression monte, ou à descendre si elle baisse, et qui agit sur la vitesse de l'extracteur ou sur le by-pass ; un extracteur d'une puissance de 55 CV suffit pour une production de 100 000 mc. de gaz par 24 heures.

Il s'agit maintenant d'épurer le gaz froid ; on le débarrasse :

des particules de goudron entraînées (10 à 15 gr. par mc.), dans des séparateurs à choc (par exemple appareil Pelouze et Audoin, formé d'un panier perforé et de lames soumettant le gaz à un laminage et à des chocs qui en séparent les vésicules liquides), ou quel-

quefois par précipitation électrostatique sous une tension de 40 000 volts ; il doit rester moins de 0 gr. 042 de goudron par mc. à la sortie des appareils ;

de la naphtaline, qui, en se précipitant dans les conduites par temps froid, les obstrue et serait une gêne considérable pour l'exploitation ; les séparateurs de naphtaline sont des laveurs rotatifs à axe horizontal dont les palettes répandent dans le gaz de l'huile lourde qui retient la naphtaline ; un bon gaz ne doit pas contenir plus de 0 gr. 45 de naphtaline par mc. D'ailleurs, l'appareillage actuel produit beaucoup moins de naphtaline que les cornues horizontales ;

de l'ammoniaque, en le mettant en contact avec de l'eau ayant 10 à 20 gr. d'ammoniaque par litre, soit dans des colonnes vides ou remplies de coke ou remplies de matériaux assurant une grande surface de contact, soit dans des laveurs rotatifs à axe vertical et à plateaux superposés assurant une grande division de l'eau. On doit laisser dans le gaz une certaine quantité d'ammoniaque (0 gr. 5 à 1 gr. par mc.) pour faciliter l'épuration à sec.

On extrayait autrefois également le cyanogène par voie humide en lavant le gaz avec une solution saturée de sulfate ferreux, mais l'introduction sur le marché des cyanures synthétiques a rendu cette opération moins intéressante, et maintenant le cyanogène est retenu dans l'épuration à sec.

Dans toutes ces opérations, la difficulté à laquelle l'appareillage doit parer, c'est le grand volume du gaz à traiter ; ce gaz est sensiblement à la pression atmosphérique ; le volume de l'appareillage serait réduit et l'efficacité du traitement considérablement augmentée s'il était fortement comprimé ; mais la dépense nécessaire à la compression n'a pas permis, jusqu'ici, d'adopter cette solution. D'ailleurs, comme il est produit dans

les fours et stocké dans les gazomètres sans pression notable, une faible partie des installations seulement aurait son encombrement réduit.

Après ces divers lavages, le gaz subit une épuration chimique, dite épuration à sec, qui a pour but de le débarrasser de la majeure partie de l'hydrogène sulfuré et de l'acide cyanhydrique qu'il contient. On y parvient en le faisant réagir sur de l'oxyde ferreux répandu sur deux ou trois claies en bois contenues dans des caisses en fonte munies de couvercles en tôle, dont les bases plongent dans un joint hydraulique et qui sont maintenues contre la pression du gaz par des étriers ; des vannes sur la tuyauterie permettent d'orienter à volonté le courant de gaz à travers les épurateurs et de les mettre également hors circuit. La masse d'épuration courante est le mélange de Laming, constitué par 400 kg. de sulfate ferreux, 110 kg. de chaux et 10 hectolitres de sciure de bois destinée à rendre la matière perméable au gaz. La chaux dégage l'oxyde ferreux du sulfate. On peut également recourir au sesquioxyde de fer hydraté contenu dans des minerais naturels, ou résidu de la fabrication de l'alumine à partir de la bauxite ; quand ces masses ont perdu leur activité, on les régénère par brassage à la main ou mécanique dans les caisses ou sur des aires ; en introduisant 1 % d'air dans le gaz on augmente leur durée. Quand elles arrivent à contenir 40 % de soufre, on les vend, soit pour la fabrication de l'acide sulfurique, soit comme engrais, soit aux fabricants de cyanure, car elles contiennent 6 % d'acide cyanhydrique sous diverses formes.

Le gaz, mesuré par des compteurs, est ensuite stocké dans des gazomètres qui ont des volumes de plusieurs centaines de milliers de mètres cubes ; leur prix au mètre cube est d'autant plus bas que leur volume est

plus grand. Ce sont de vastes cloches plongeant dans l'eau et que l'afflux de gaz soulève. Les tuyauteries d'arrivée et de départ débouchent dans le fond, au-dessus du niveau d'eau, ou, au moyen de genouillères articulées, avec presse-étoupes, sur la cloche. Ce dernier dispositif évite mieux les obstructions des conduites. Pour les petits gazomètres, la cloche est simple ; pour les plus grands, elle est télescopique, comportant jusqu'à 4 levées. Ces appareils laissent le gaz en contact avec une masse importante d'eau par une large surface ; on emploie quelquefois des gazomètres secs dans lesquels la cloche est fixe, le toit muni de lanterneaux, et c'est une cloison mobile, soulevée par le gaz, qui se déplace à son intérieur, les joints étant assurés soit par une toile goudronnée, soit par des rouleaux.

A la sortie des gazomètres, des régulateurs de pression règlent l'admission du gaz dans les conduites de distribution.

L'emploi principal du gaz riche est le chauffage : chauffages domestique et industriel, chauffage des manchons à incandescence pour l'éclairage urbain ; il donne de hautes températures sans régénérateur ni récupérateur de chaleur, il permet le réglage précis des températures, notamment pour le traitement thermique des métaux ; il est cher, d'un emploi très commode, et ses calories sont, en général, mal utilisées. On l'emploie également dans les moteurs à gaz pour les petites installations urbaines, mais, pour cette application comme pour l'éclairage domestique, l'électricité le supplante de plus en plus.

C'est dans cette voie, cependant, qu'on lui cherche depuis quelques années un débouché de qualité ; il s'agit de l'alimentation des véhicules automobiles par le gaz comprimé ; une question essentielle reste celle du poids du récipient ; M. Drouilly est arrivé, avec des

récipients en alumag frettés par un fil d'acier enroulé sur le tube, à un poids de 700 gr. par litre de capacité sous une pression de 200 kg. par cmq. ; avec des bouteilles en acier frettées, le poids est de 1 kg. 05 par litre ; ces bouteilles, constituées par deux coquilles embouties soudées à la soudure électrique ou à l'hydrogène atomique, sont inexplosibles ; sous un excès de pression, elles s'allongent, et la soudure, moins ductile, se pique de petits trous par où le gaz s'échappe.

Traitement du goudron. Combustibles qu'on en tire. — Le goudron est constitué par la masse, liquide à la température ambiante, des hydrocarbures dégagés dans la distillation ; il est extrêmement complexe : on a pu y déceler plus de 2 000 composés définis ; sa composition varie suivant le combustible traité, la température et la conduite de la distillation, l'appareillage employé ; ainsi, la même houille distillée dans une cornue d'usine à gaz donne un goudron plus dense que celui que l'on obtient dans un four à coke. Le traitement essentiel qu'on lui fait subir consiste dans une distillation fractionnée qui permet d'en séparer des groupes de produits d'après leur volatilité ; bien que l'opération soit simple en principe, l'appareillage est assez compliqué à cause de la nature spéciale de la matière traitée.

Les produits combustibles qu'on tire du goudron de haute température sont : d'abord le goudron lui-même après déshydratation, le benzol, les huiles légères, moyennes, lourdes et anthracéniques, la naphtaline. Le benzol, les huiles légères, la naphtaline servent ou peuvent servir de carburants pour les moteurs à explosion, les huiles moyennes et lourdes de combustibles pour les moteurs à combustion interne, les huiles anthracéniques de combustibles pour le chauffage ;

mais, tandis que, pour les autres combustibles, le carburant, par exemple, constitue un débouché qui les valorise, pour ceux-ci ce serait encore un pis-aller, à côté de leurs emplois possibles pour la fabrication de matières colorantes, de produits pharmaceutiques et d'explosifs, sans les droits considérables qui pèsent sur les carburants et dont ils sont exonérés en grande partie quand ils sont employés à la carburation.

Déshydratation du goudron. — Bien que le goudron ait été séparé par décantation des eaux ammoniacales, il renferme encore 4 à 5 % d'eau, cette teneur pouvant atteindre 10 et même 20 % si les phénols et le carbone libre sont abondants ; cette eau est incorporée très finement à toute la masse, s'attachant par capillarité au carbone libre, très fin lui-même et qu'on ne peut extraire par filtration ; elle ne part qu'au-dessus de 100°, à 110°-120°, par des séries d'explosions qui entraînent le débordement dangereux de la masse de goudron. C'est pourtant par chauffage qu'on l'enlève. On peut déshydrater dans la cornue même de distillation, en chauffant très lentement, mais le procédé est délicat et peu pratique. L'artifice utilisé consiste dans le chauffage à la température voulue portant constamment sur de petites quantités ; plusieurs procédés sont employés pour le réaliser : dans l'appareil Mallet, on pompe le goudron dans un réservoir où il est chauffé par un thermosiphon placé en contre-bas ; le goudron s'échauffe et l'eau se vaporise dans le thermosiphon ; elle entraîne en même temps hors du réservoir les huiles légères ; on condense le distillat dans un serpentin suivi d'un séparateur donnant, d'une part, les huiles légères, d'autre part, les eaux ammoniacales. On peut aussi employer une cornue surmontée d'une colonne à plateau, qu'on remplit de goudron et qu'on chauffe

très lentement ; quand la température du goudron atteint 200°, on alimente l'appareil en envoyant le goudron brut en haut des plateaux sur lesquels il se déshydrate ; on peut enfin faire circuler le goudron en couche mince sur une surface chauffée, dans un espace clos de façon à capter les vapeurs. Le goudron est considéré comme déshydraté si sa teneur en eau est inférieure à 1,5 %.

Distillation du goudron. — En France, elle a été pendant longtemps exclusivement discontinue et ce n'est que dans ces dernières années qu'on a pu vaincre les difficultés inhérentes à une distillation continue ; elles tiennent à la haute température de distillation des produits lourds, risquant de provoquer un cracking encrassant les appareils par formation de coke, aux risques d'obstruction par la naphtaline, l'anthracène, risques d'autant plus grands que les tuyauteries sont plus petites, à la difficulté d'évacuer le brai qui devient pâteux à la sortie des appareils.

Dans l'appareil Lenhard, le goudron chauffé dans un four passe dans un très long serpentin également chauffé où il circule à une vitesse de 4 mètres à la seconde ; le distillat prélevé sur le serpentin se condense dans des réfrigérants successifs débitant les diverses fractions liquéfiées ; le brai sort du serpentin à 350° ; l'appareil continu Ab der Halden met à profit le fait qu'un mélange distille plus bas que le composé le plus volatil et que le nombre de molécules débitées dans un mélange est proportionnel à la tension de vapeur du corps correspondant à la température où il se trouve ; les produits les plus volatils sont extraits au-dessous de 100° par une injection de vapeur d'eau ; on chauffe ensuite le goudron à 350° et on surchauffe également les vapeurs en les soumettant ensuite à

une condensation fractionnée ; cet appareillage exige un espace réduit, n'offre pas de risques d'incendie, peut traiter directement des goudrons très humides et fournit sans nouveau traitement une bonne huile pour l'extraction du benzol par lavage du gaz.

Enfin, signalons le procédé Hennebutte, employé encore parfois à cause de sa grande simplicité ; on traite le goudron par de l'air chaud en présence d'acide sulfurique ; le brai s'oxyde, épaissit, se sépare des huiles qui surnagent et qu'on soumet sans difficulté à la distillation fractionnée.

L'huile légère a une couleur qui varie du jaune au brun, une densité entre 0,910 et 0,950 ; elle contient 5 à 13 % de phénols, 1 à 3 % de bases, 1 à 2 % d'acétone, des nitriles, du CS^2, du thiophène, etc... ; le solde est constitué par des hydrocarbures ; ceux-ci renferment 5 à 6 % d'oléfines, paraffines, carbures non saturés ; le reste est formé de carbures aromatiques qui constituent les éléments essentiels du benzol brut pour 50 %, avec un pourcentage de 25 % de naphtaline.

L'huile moyenne a une consistance pâteuse à la température ordinaire ; elle devient liquide vers 40°-50° ; sa couleur est brunâtre ; elle a une odeur de naphtaline et phénol. On peut en séparer la naphtaline par cristallisation et essorage ; sa teneur en naphtaline passe ainsi de 40-60 % à 15 % environ ; elle a en outre 25 à 35 % de phénols, dont 1/3 environ est le phénol proprement dit, le reste des homologues supérieurs.

L'huile lourde donne environ 20 % de naphtaline brute et 80 % d'huile égouttée.

L'huile anthracénique donne environ 25 % d'anthracène brut et 75 % d'huile filtrée.

Après ce fractionnement et l'extraction de la naphtaline, les diverses fractions sont redistillées et frac-

tionnées de nouveau pour obtenir des produits répondant aux exigences commerciales.

Après distillation, terminée sous vide, puis cristallisation pendant une dizaine de jours, la naphtaline est lavée à l'acide sulfurique, à l'eau chaude, à la soude et à l'eau chaude, puis distillée dans un alambic à plateaux ; elle a alors un point de fusion de 70°-80° ; elle est ensuite sublimée, comme la fleur de soufre, dans une grande chambre ; une chambre de 100 mètres cubes permet de recueillir en 12 heures 270 kg. de naphtaline avec une surface de chauffe de 4 mq. La matière recueillie, pulvérulente, peut être pressée en petites boules. La naphtaline qui se produit dans la distillation de la houille vers 770° n'existe pas dans le goudron de basse température ; elle y est remplacée par la paraffine.

Le rendement du goudron à la distillation est : eau ammoniacale 5 % ; huile légère brute 2 % ; huile moyenne brute 9 % ; huile lourde brute 11 % ; huile anthracénique brute 18 % ; brai 53 % ; pertes 2 % ; on en tire : eau ammoniacale 5 % ; benzols commerciaux 1 % ; huile moyenne filtrée 3,6 % ; huile lourde filtrée 8,8 % ; huile anthracénique filtrée 13,5 % ; dont anthracène brut 45 % ; brai 53 %.

Récupération et traitement du benzol. — Nous venons de voir qu'on ne tire du goudron que 1 % de benzol, ce qui représente 7 % au maximum du benzol produit par la houille ; le reste se trouve dans le gaz à l'état de vapeur non saturée ; la teneur du gaz en benzol varie de 20 gr. à 40 gr. par mc. quand la teneur de la houille en matières volatiles varie de 10 % à 35 %. Il se forme à partir de 700°, sa production la plus forte ayant lieu vers 800°-850°, et se décompose rapidement à 1 100° en présence de coke. D'après Cobbs et Hollins

le schéma des transformations avec la montée de la température serait le suivant : paraffines — oléfines (acétylène, naphtène, composés polycycliques) — cumène — xylènes — toluène — benzène — diphényle — naphtaline — anthracène — carbone et gaz (CH^4 et H^2).

Ce sont les cokeries qui, les premières, ont pratiqué le débenzolage déjà avant 1914 ; elles avaient, en effet, moins à se préoccuper des répercussions de cette opération sur la qualité du gaz. Le débenzolage diminue considérablement le pouvoir éclairant du gaz ; nous avons déjà signalé que, depuis l'apparition des becs à incandescence, le pouvoir éclairant avait beaucoup moins d'importance. Mais il diminue aussi le pouvoir calorifique à raison d'environ 10 calories par gramme de benzol enlevé ; comme les compagnies gazières ont pris l'habitude, pour améliorer leur prix de revient, de se rapprocher du minimum de pouvoir calorifique fixé par leur cahier des charges, il a fallu une intervention des pouvoirs publics pour les amener à débenzoler. Les principales ont dû le faire pendant la guerre de 1914-1918, à cause de nos besoins en benzène et toluène pour la fabrication des explosifs ; cette réglementation, disparue en 1919, a été reprise par la loi du 22 juillet 1923 qui autorise l'Administration à imposer le débenzolage par décret à telle ou telle usine à gaz ; corrélativement, le pouvoir calorifique du cahier des charges est ramené à une valeur minima compatible avec le débenzolage.

Tous les procédés employés pour cette opération ont pour principe d'abaisser les tensions maximums des constituants du benzol, de telle façon que leur majeure partie se liquéfie :

Lavage du gaz par un solvant de ces composés qui les dissout jusqu'à ce que leur tension de vapeur dans

le solvant soit égale à leur tension de vapeur résiduelle dans le gaz ;

ou refroidissement du gaz qui liquéfie les composés également jusqu'à ce que l'égalité des tensions de vapeur dans les phases liquide et gazeuse soit atteinte ;

ou encore absorption par le charbon actif ou le gel de silice dont le fonctionnement, expliqué de bien des façons, nous paraît être identique à celui d'un réfrigérant : en effet, les atomes du carbone et du silicium solides qui s'écartent notablement de la loi de Dulong et Petit, ayant une chaleur spécifique atomique relativement faible, possèdent à une température déterminée une énergie de déplacement beaucoup plus petite que celle des molécules gazeuses qui, à la même température, sont en contact avec eux. Einstein a montré que, néanmoins, gaz et solide sont en équilibre énergétique stable, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de transfert d'énergie du gaz au solide, ce qui abaisserait la température du gaz et élèverait celle du solide, si on suppose que les échanges d'énergie se font par quanta et qu'il y a un grand nombre de molécules en contact successif avec chaque atome ; c'est ce qui se passe pour les atomes d'une paroi enfermant un gaz, car le nombre des atomes est de la dimension d'une surface, et le nombre des molécules de la dimension d'un volume. Mais il en ira tout autrement avec le charbon actif ou le gel de silice, caractérisés par l'existence dans leur masse d'une infinité de petits pores, de volume très faible relativement à la surface de leur paroi, et dans lesquels les conditions nécessaires à la stabilité de la différence d'énergie entre les atomes solides et les molécules gazeuses n'existent plus. Les molécules vont céder une grande quantité d'énergie, se refroidir, pendant que le solide va s'échauffer ; ce refroidissement extrêmement énergique amènera la liquéfaction et même la solidification

des produits les plus lourds contenus dans le gaz et qui seront retenus dans les pores par tension superficielle.

Le procédé le plus répandu, applicable tant au gaz de cokerie qu'au gaz de ville, est le procédé par lavage ; on met le gaz en contact aussi intime que possible avec le liquide ; ce dernier est ensuite désessencié par chauffage et repasse sur le gaz. En Amérique, on utilise pour le lavage des huiles de pétrole distillant entre 250° et 400° ; le benzène y est soluble en toutes proportions ; en Europe, on emploie les huiles lourdes à naphtaline ou huiles moyennes, débarrassées le mieux possible de leur naphtaline et de leur anthracène ; 90 % distillent avant 300°, et le reste avant 350°. Cette huile devient visqueuse à l'usage et il faut la renouveler périodiquement. Elle ne se charge guère que de 2 % de benzol ; il faut en mettre en circuit 1,3 l. par mc. de gaz à traiter et elle laisse un minimum de 3 gr. de benzol par mc. de gaz traité. L'emploi comme solvant de la tétraline, mélange de tétrahydrure et de pentahydrure de naphtaline, proposé par Brégeat, permettrait d'extraire pratiquement tout le benzol du gaz.

Le procédé au charbon actif, exploité en France par la Compagnie des Produits chimiques et Charbons actifs Ed. Urbain, s'est développé notablement dans ces dernières années et a été appliqué récemment à la Compagnie du Gaz de Paris. Dans ce procédé, le gaz traverse des absorbeurs garnis de charbon actif ; ils sont successivement mis hors circuit pour la régénération du charbon par injection de vapeur d'eau surchauffée qui extrait le benzol du charbon ; ce procédé revendique la production d'un benzol plus léger que dans la récupération à l'huile ; sa teneur en CS^2 est inférieure à 0,5 %, sa teneur en naphtaline inférieure à 1 % ; par l'addition d'un inhibiteur approprié, on

entrave la formation ultérieure de gommes par les produits résinifiables qu'il contient, si bien que les petites usines à gaz peuvent le vendre comme carburant sans rectification ultérieure ; la consommation de charbon actif varie entre 0 kg. 65 et 1 kg. par 100 litres de benzol récupéré, et la consommation de vapeur entre 300 et 350 kg., tandis que dans les appareils à huile, avec échangeurs de calories entre l'huile désessenciée et l'huile à traiter, la consommation de vapeur est encore de l'ordre de 800 kg. par 100 litres de benzol.

Les benzols récupérés sont presque toujours lavés et rectifiés avant emploi. L'épuration chimique consiste dans un lavage à l'acide sulfurique concentré, suivi de lavages aqueux et alcalins ; on y procède d'ordinaire après une première rectification qui a pour but d'éliminer les éléments huileux qui souillent le benzol et entraîneraient une consommation trop importante de réactifs ; elle est suivie d'une deuxième rectification opérée en continu pour la production des produits commerciaux, et en discontinu ou en continu quand il s'agit d'obtenir des produits à points d'ébullition bien définis.

Les produits provenant du benzol brut sont :

Le benzol 90 %, dont 90 % passent à la distillation avant 100° et la totalité avant 120° ; il ne donne aucune coloration à l'acide sulfurique ; sa densité est 0,883 ;

Le benzol 96-97 %, dont 96-97 % passent de 76° à 100° ; aucune coloration à l'acide sulfurique ; densité, 0,884 ;

Le benzol 50 %, dont 50 % passent de 86° à 100° et la totalité avant 130° ; sa densité est 0,871 ;

La benzine pure, qui passe entre 79° et 85° ; donne une teinte jaunâtre à l'acide sulfurique ; densité, 0,899 ;

Le solvent naphta, dont 20 % passent à 130°, 90 % à 160° ; teinte rougeâtre ; densité, 0,873 ;

Le toluol, dont 80 % passent de 105° à 115° et la totalité avant 135° ; teinte jaunâtre ; densité, 0,872 ;

Le benzol lourd, qui passe avant 200° ; teinte rouge ; densité, 0,884 ;

Le benzol auto, dont 92,5 % passent de 81° à 100° ;

Le benzol régie, dont 90 % passent avant 190°.

Distillation à basse température. — Nous avons déjà signalé que les premières applications de la distillation à basse température ont été faites en Angleterre ; il s'agissait de transformer des charbons à haute teneur en matières volatiles en semi-cokes pouvant être employés dans les foyers domestiques ; la basse température convenait à cette application, parce qu'elle laissait encore 8 à 10 % de matières volatiles dans le semi-coke, que celui-ci s'enflammait facilement et brûlait sans fumée ; c'est donc sous ce premier point de vue du résidu solide que la distillation à basse température a été réalisée industriellement.

Par ailleurs, les recherches de Vernon-Wheeler et ses élèves, celles d'Amé Pictet de Genève ont montré qu'on obtenait un goudron plus abondant que celui de haute température et d'une composition complètement différente ; ce goudron est appelé goudron primaire, non qu'il préexiste dans la houille, mais parce que c'est de sa transformation par la chaleur que résulte le goudron de haute température. C'est un liquide assez fluide, rougeâtre ; il renferme des hydrocarbures saturés identiques à ceux des pétroles bruts, des phénols complexes et des traces de produits azotés ; une houille grasse longue flamme en donnera jusqu'à 14 %, tandis qu'elle ne donne guère que 3 à 4 % de goudron de haute température ; sa production relativement abondante, la possibilité d'en tirer jusqu'à 60 % d'essence ont fait espérer, après la guerre de 1914-1918, qu'on va-

loriserait par lui des combustibles pauvres comme les lignites. Ce semi-coke obtenu, en général de très mauvaise qualité, serait employé, souvent à l'état pulvérisé, au chauffage des fours ou des chaudières. Quant au gaz, peu abondant (en général 60 mc. à la tonne), il a une densité à peu près double de celle du gaz d'éclairage ; le méthane en forme près de la moitié, accompagné de ses homologues supérieurs et de ceux de l'éthylène ; le soufre lui-même s'y trouve en partie sous forme de mercaptans à grosses molécules ; son pouvoir calorifique dépasse en général 6 000 calories : c'est donc un gaz très riche.

Tandis que la fabrication de combustibles pour foyers domestiques est, dès maintenant, réalisée en France sur une échelle importante, la valorisation des lignites et autres combustibles inférieurs est pratiquement inexistante ; la raison essentielle de cette différence est la suivante : comme toutes les matières minérales restent dans le semi-coke, pour ne pas avoir un résidu trop cendreux, on doit, lorsqu'on veut valoriser l'opération par le semi-coke, partir de charbons d'assez bonne qualité ; les mines qui les produisent sont déjà en exploitation et entre les mains de compagnies puissantes, bien armées, tant au point de vue technique qu'au point de vue commercial ; au contraire, lorsque le combustible est de qualité inférieure, il est inexploité, et aux difficultés techniques s'ajoutent le plus souvent des difficultés financières considérables.

La valorisation même du goudron constituait un problème délicat, car il contient des quantités importantes de phénols complexes dont l'élimination par lavage à la soude est onéreuse et dont on ne savait que faire jusque dans ces dernières années ; lorsqu'il s'agit de valoriser le semi-coke, on peut, après extraction des huiles légères par distillation, oxyder et poly-

mériser le résidu lourd par le procédé Hennebutte et augmenter la quantité de brai dont on dispose pour agglomérer ce semi-coke ; lorsqu'on veut surtout obtenir des combustibles et carburants liquides, on peut recourir maintenant à l'hydrogénation ou au cracking catalytique qui permettent de transformer les phénols en hydrocarbures.

On a procédé néanmoins à des études et des essais

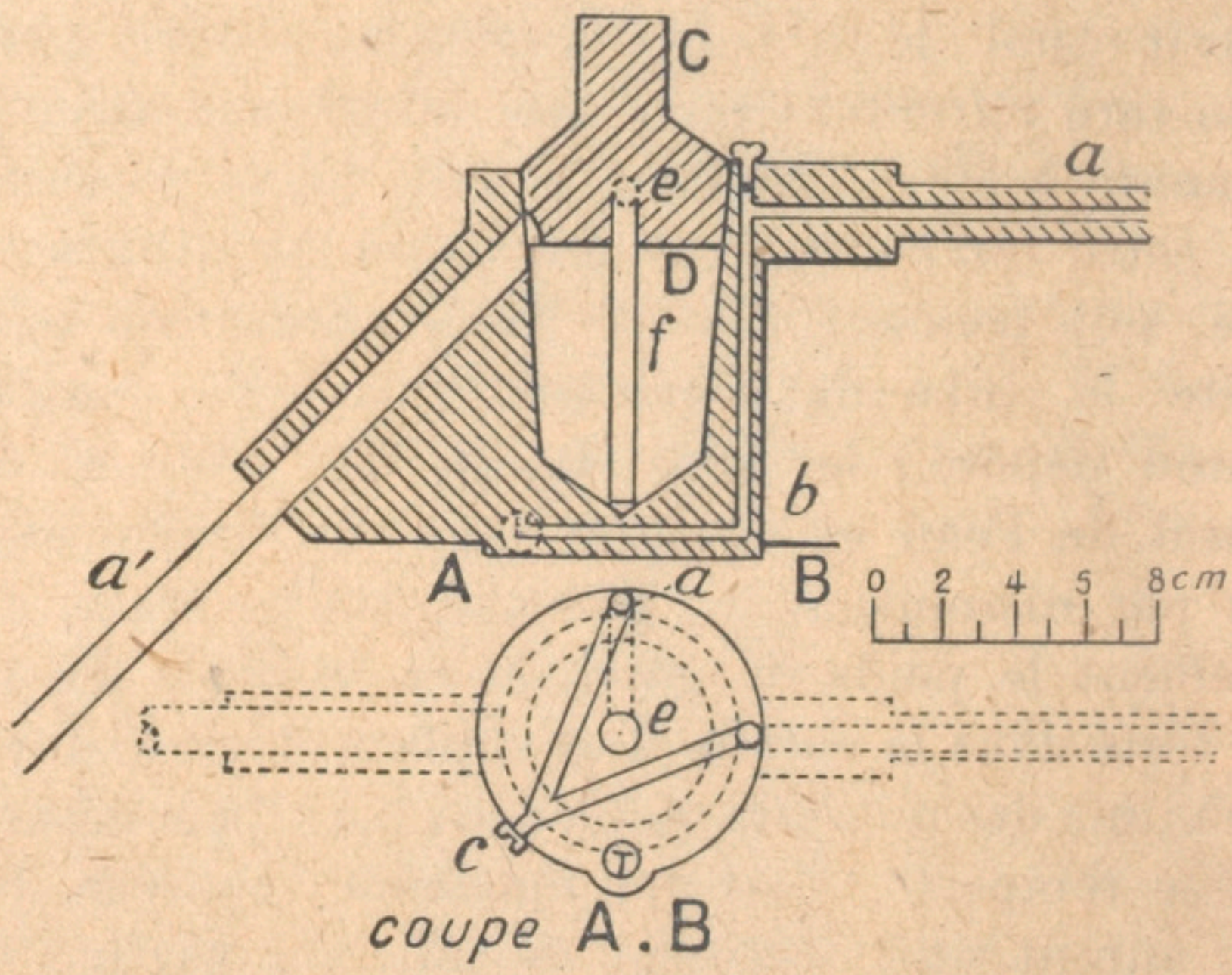


FIG. 14. — COUPES VERTICALE ET HORIZONTALE DE LA CORNUE FISCHER.

AB, corps de la cornue ; C, bouchon ; *a'*, tuyau abducteur des gaz ; *abcef*, circuit de chauffage.

très nombreux sur la plupart de nos gisements inexploités. L'organe essentiel pour la détermination du pourcentage et de la qualité du distillat de basse température est la cornue Fischer, préconisée par le grand spécialiste allemand du traitement des combustibles ; elle répond aux préoccupations suivantes : pour obtenir le maximum de goudron primaire, on doit pouvoir distiller tout le combustible traité sans qu'aucune de

ses parties soit surchauffée et dans des conditions telles que les vapeurs soient soustraites le plus tôt possible au chauffage. La cornue Fischer, qui traite 20 gr. de combustible pulvérisé, est en aluminium bon conducteur de la chaleur, à parois épaisses (Fig. 14) ; la température est donnée par un thermomètre ou un couple électrique placé dans le couvercle ; pour faciliter l'entraînement des produits, on injecte une petite quantité de vapeur qui se surchauffe en circulant à travers le métal dans un petit canal ; le tube de dégagement aboutit dans un ballon taré refroidi et relié à un réfrigérant ascendant. On monte à 500°/520° en une demi-heure et on maintient cette température tant que du goudron se condense, soit pendant 1/4 d'heure environ ; on chauffe ensuite le tube de dégagement pour en chasser le goudron déposé ; le poids du distillat obtenu donne le total de l'eau et du goudron ; on élimine ensuite l'eau par dissolution du goudron dans l'éther. On a finalement le poids de goudron et le poids du semi-coke resté dans la cornue. Les chiffres obtenus donnent les maxima des produits qu'on peut tirer du combustible à basse température, et les meilleurs appareils industriels auront un rendement de 90 % à partir de ces maxima. Voici, d'après M. Petroff, les résultats donnés par quelques lignites :

	Goudron primaire anhydre.	*Semi-coke.*
Lignite de Mailhac (Aude). . . .	12,94 %	56,4 %
Lignite de Saint-Lon (Landes) .	8,2	59,2
Lignite de Nousty (Pyrénées) .	7,3	50,2
Lignite de Manosque (Basses-Alpes).	13,0	77,5
Lignite de Fuveau (Bouches-du-Rhône)	7,5	72,0
Lignite saxon	24,0	
Lignite rhénan	7,6	

Industrie de la distillation à basse température. — L'organe essentiel est le four de distillation ; c'est un domaine où l'ingéniosité des inventeurs s'est donné le plus libre cours, et la multiplicité des solutions proposées, dont aucune ne s'est encore imposée, prouve la difficulté du problème lorsque le goudron joue un rôle important dans l'économie de l'opération ; cette difficulté tient :

aux propriétés calorifiques du charbon, mauvais conducteur de la chaleur ; si on veut éviter la surchauffe et la pyrogénation, il faut traiter le combustible sous une faible épaisseur, ou le remuer et le déplacer au cours du chauffage ;

à la friabilité fréquente du combustible ; si on fait du chauffage intense, par des gaz chauds ou de la vapeur surchauffée, le poussier empêche le passage du fluide dans la masse ; une partie des poussières passe dans le goudron et rend la déshydratation plus difficile ;

à la tendance à l'agglutination des charbons fins et humides ; il peut en résulter des obstructions dans les fours ; avec la distillation à haute température, le charbon, agglutiné d'abord, se dessèche et se cokéfie ensuite ; dans la basse température, il est extrait précisément au moment où le phénomène est le plus gênant ;

à la facile pyrogénation du goudron primaire, qui conduit à ménager plusieurs sorties aux vapeurs réparties dans le four, de façon à les soustraire rapidement au chauffage.

Les fours sont à chauffage interne ou à chauffage externe ; lorsqu'on emploie les gaz brûlés au chauffage interne, ils diluent les gaz et le goudron dont la récupération devient très difficile ; quant à la vapeur surchauffée, son emploi est onéreux ; aussi presque tous les fours sont à chauffage externe. Nous citerons cepen-

dant, comme application industrielle du premier type, le foyer de chaudière à récupération de la Société Julius Pintsch de Berlin ; on annexe à la chaudière un générateur à goudron, dans lequel arrive le charbon frais et qui est traversé par une partie des fumées ; le distillat traverse un réfrigérant à eau et un laveur à huile lourde ; le gaz est ensuite renvoyé dans le foyer où arrive aussi, sur la grille mécanique, le semi-coke obtenu dans le générateur.

Les fours à chauffage externe se divisent en :

fours fixes, dérivant la plupart du four à coke, dont on réduit l'épaisseur pour activer le chauffage et la sortie des gaz (fours Illingworth, Pieters), ou de la cornue verticale d'usine à gaz (four Migeon, constitué par une grande cornue verticale métallique où la température croît jusqu'à 375°/425°, suivie de cornues réfractaires où la cokéfaction s'achève à température beaucoup plus élevée) ;

fours à brassage mécanique (four Kainscop), à propulseurs, à tablier mobile ;

fours tournants horizontaux (cornue Fischer, cornue Thyssen), rappelant les fours à ciment ;

fours tournants verticaux (four Ab der Halden à sole mobile en fonte spéciale chauffée par un foyer au gaz, employé, notamment, aux houillères de Sarre et Moselle).

Ces appareils sont précédés d'un sécheur destiné à enlever l'humidité adventice du combustible. Ils sont complétés par les appareils de récupération et de traitement du goudron et de désessenciement du gaz.

La plupart des installations industrielles de basse température ont pour objet la fabrication de charbons domestiques appelés anthracites artificiels (coalite, Tozer en Angleterre ; carbocoal en Amérique ; carbolux, anthracine, etc., en France). Nous allons parler brièvement de l'anthracine ; cette fabrication, mise au point

aux Mines de Nœux, par M. l'Inspecteur général des Mines P. Weiss, a pour objet la fabrication de boulets ayant les propriétés de l'anthracite gallois, c'est-à-dire brûlant lentement, sans fumée, en donnant des cendres peu agglomérées, sans mâchefer adhérant aux grilles. Ces boulets sont préparés avec des menus 1/4 gras à 12/13 % de matières volatiles, additionnés d'une proportion variable de charbon gras. Une des caractéristiques essentielles du procédé, qui le distingue notamment du carbocoal, est de préparer et de cuire directement le boulet à partir du charbon cru. L'agglomération se fait au brai dans les presses rotatives habituelles ; il s'agit ensuite de ne pas en détruire la cohésion pendant le chauffage ; on y parvient grâce à la progressivité de la cuisson ; jusqu'à une température critique, qui oscille autour de 350°, suivant la nature des constituants, la chauffe peut être conduite rapidement, à raison de 3° à 4° par minute ; ensuite, jusqu'à une nouvelle température comprise entre 450° et 500°, la chauffe doit être conduite d'autant plus lentement que la teneur en matières volatiles est plus élevée, et on peut être amené à ralentir sa montée jusqu'à 1/10 de degré par minute.

Cette allure nécessaire de la distillation est liée à l'allure du dégagement gazeux quand on chauffe un charbon ; jusqu'à 200° on recueille seulement 1 litre de gaz par kg. de charbon ; de 200° à 300° ce dégagement s'arrête ; c'est la zone de stabilité du bitume du charbon ; à partir de 300° la décomposition recommence et reste faible jusqu'à 340°, température à laquelle elle s'accélère ; il s'agit donc dans la cuisson des boulets de réaliser une progression de la température telle que les gaz se dégagent assez lentement pour ne pas détruire ni gonfler l'aggloméré, et ainsi, en opérant convenablement avec une densité initiale de 1,350, on aura finale-

ment des produits à une densité de 1,27, avec une teneur résiduelle en matières volatiles de 7 %. Le four employé est un four fixe, genre four à coke incliné ; la cuisson y est poussée jusqu'à 750°. Le gaz produit est brûlé dans les fours ; quant au goudron, il est oxydé par le procédé Hennebutte et concourt, pour moitié environ avec du brai de cokerie, à la fabrication des agglomérés ; ceux-ci ont un poids de 42/43 gr. après la cuisson qui dure 3 heures et demie ; à la sortie des fours l'anthracine est éteinte dans un coke-car ; un groupe de 6 fours produit 50 tonnes par jour. La consommation de ce combustible, moins réactif que le coke, mais beaucoup plus que l'anthracite, donnant des cendres sans mâchefers et dont la qualité est vérifiée soigneusement en fin de fabrication, se répand rapidement dans toute la France.

Chapitre VII

GAZÉIFICATION DU CARBONE PAR COMBUSTION MÉNAGÉE
ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS ET FONCTIONNEMENT DES GAZOGÈNES. — HAUTS FOURNEAUX

Réactions de gazéification. — Les gazogènes sont des appareils dans lesquels on gazéifie le carbone par une combustion limitée le transformant en oxyde de carbone ; on dispose dans ce but de deux sources d'oxygène suffisamment bon marché et abondantes : l'air et l'eau. Avec l'air, la réaction peut être représentée schématiquement par la formule :

$$2\,C + O^2 + 4\,N^2 = 2\,CO + 4\,N^2 + 52{,}8\text{ ca.} \qquad (1)$$

Quand on utilise le gaz formé, les 2 CO se transformeront en 2 CO^2 et dégageront 136,2 ca., au lieu des 189 ca. qu'aurait données la formation directe de CO^2 ; comme, la plupart du temps, les calories dégagées dans le gazogène sont perdues, on perd, pour gazéifier le carbone, 28 % des calories qu'il peut fournir et il faut que la forme gazeuse du combustible soit bien intéressante pour qu'on consente fréquemment à cette perte.

Avec l'eau, la réaction est :

$$C + H^2O = CO + H^2 - 9{,}8\text{ ca.} - 31{,}3\text{ ca.} \qquad (2)$$

La première perte de 9,8 ca. correspond à la chaleur

de vaporisation de l'eau ; il s'agit de calories à consommer vers 100°, c'est-à-dire de calories de basse température, qu'on peut assez fréquemment trouver comme déchet de fabrications accessoires ; il en va tout autrement de la perte de 31,3 ca. ; elle correspond à la décomposition de la vapeur d'eau par le carbone, qui commence à être effective vers 1 300° ; il s'agit donc de calories de haute température, donc de grande valeur, qu'on doit en général produire spécialement et qu'on ne peut passer dans les gaz que par des régénérateurs.

Il en résulte que cette deuxième réaction serait beaucoup moins intéressante que la première, si elle n'avait pas l'avantage de donner un gaz totalement combustible et à pouvoir calorifique beaucoup plus élevé ; en effet sa combustion dégagera par mc. $\frac{68{,}1 \text{ ca.} + 57{,}7 \text{ ca.}}{2 \times 0 \text{ mc. } 02224}$ ou 2 828 ca., tandis que la combustion du gaz de la première réaction dégage $\frac{2 \times 68{,}1 \text{ ca.}}{6 \times 0 \text{ mc. } 02224}$ ou 1 020 ca. ; ce faible pouvoir calorifique du gaz à l'air l'a fait appeler gaz pauvre ; on devrait donc recourir au gaz à l'eau toutes les fois qu'on a besoin d'un pouvoir calorifique élevé, c'est-à-dire d'une température de combustion élevée. Mais, si on remarque que le gaz à l'eau a lui-même un pouvoir calorifique très inférieur à celui du gaz de distillation, gaz de four à coke ou gaz de ville, même dans ce cas il sera peu employé ; en fait, il a surtout servi comme source d'hydrogène, puisqu'il en contient 50 % en volume ; toutefois, dans ce domaine encore, il a été combattu efficacement par le gaz de four à coke.

Gaz pauvre, gaz mixte à la vapeur et gaz de régénération. — La réaction produisant le gaz à l'air dégage

une notable quantité de chaleur qui porte les gaz à une température dépassant 1 600° ; il est indiqué d'utiliser cette haute température pour améliorer la qualité du gaz en recourant à la deuxième réaction, c'est-à-dire en introduisant dans le gazogène le plus possible de vapeur d'eau, et on obtiendra alors un gaz mixte à la vapeur d'eau. On y recourt déjà automatiquement du fait que l'air employé contient toujours une certaine quantité d'humidité, de même que le combustible employé. Pratiquement, c'est donc toujours un mélange d'air et de vapeur d'eau qui réagit sur le combustible.

Quand l'air arrive au contact du charbon, il se forme d'abord du CO qui, en présence de l'excès d'air, donne du CO^2 ; ce dernier rencontre de nouvelles quantités de charbon qui le réduisent suivant la réaction :

$$CO^2 + C = 2\,CO - 41{,}7\ ca. \qquad (3)$$

Cette dernière réaction commence dès 700° et c'est précisément parce que cette température est relativement basse, très inférieure à celle dégagée par la formation de CO^2, que le fonctionnement du gazogène est possible ; il en résulte aussi que la gazéification exige une couche de combustible assez épaisse pour que tout l'oxygène soit employé et pour que le CO^2, lui-même, fonctionnant comme comburant du carbone, soit décomposé en CO.

L'épaisseur du combustible a encore un autre avantage : elle permet au gaz produit d'abandonner une partie de ses calories pour préchauffer le charbon et vaporiser son humidité.

La quantité de vapeur qu'on peut injecter varie de 0 kg. 300 à 0 kg. 500 par kg. de charbon ; elle abaisse vers 1 300° la température au voisinage de la grille ; les réactions se passent alors dans l'ordre suivant : l'air et le charbon donnent du CO, l'eau et le charbon CO^2 et H^2 suivant la réaction :

$$C + 2H^2O = CO^2 + 2H^2 - 21{,}1 \text{ ca.} \qquad (4)$$

moins endothermique que la réaction correspondant à la formation de CO ; quand l'oxygène a disparu, CO^2 est réduit par le charbon rencontré et donne un supplément de CO suivant l'équation (3) ; le gaz contient toujours en outre un certain excès de vapeur d'eau, si bien qu'intervient alors une dernière réaction, appelée réaction du gaz à l'eau :

$$CO + H^2O = CO^2 + H^2 + 10{,}4 \text{ ca.} \qquad (5)$$

Cette réaction est réversible aux températures où se trouve le gaz ; comme elle ne produit pas de changement de volume, l'état d'équilibre qui en résulte est indépendant de la pression, mais il varie avec la température. Si on désigne par p_1 p_2 p_3 p_4 les pressions partielles de CO, H^2O, CO^2, H^2 dans le mélange ou, ce qui revient au même, leurs nombres respectifs de molécules, le rapport stoechiométrique $K = \frac{p_1\, p_2}{p_3\, p_4}$ satisfait à la relation :

$$\text{Log } K = -\frac{2206}{T} + 0{,}91 \text{ Log } T - 0{,}97 \frac{T}{1000} + 0{,}148 \frac{T^2}{1\,000\,000} + 0{,}118$$

K croît lorsque la température augmente ; la teneur en CO augmente donc, avec reformation de vapeur d'eau ; pour 1 473° absolu, c'est-à-dire pour 1 200° C, K est égal à 1,6 ; s'il y a un faible excès de vapeur d'eau, il y aura peu de CO^2 dans le gaz, mais ce dernier en contiendra toujours et la teneur croîtra avec l'excès de vapeur d'eau.

Du gaz pauvre fabriqué avec du coke peu humide aura une composition voisine de : CO^2, 0,5 % ; CO, 33,5 % ; H^2, 1 % ; CH^4, 0,5 % ; N^2, 64,5 %, et un pouvoir calorifique de 1 045 ca.

Du gaz mixte fabriqué avec du coke et comportant une injection de 0 kg. 450 de vapeur a donné dans les essais de Kurt Neumann la composition suivante : CO^2, 3,8 % ; CO, 27,6 % ; H^2, 9,5 % ; CH^4, 0,2 % ; N^2, 58,9 %, et un pouvoir calorifique de 1 100 ca.

Lorsqu'on peut se contenter de gaz pauvre ou de gaz mixte et qu'on veut simplifier les installations, on emploie un combustible très pauvre en matières volatiles, anthracite, charbon de bois, coke ; on n'obtient pas alors de goudron en quantité notable pendant la gazéification, et l'épuration du gaz peut être très simplifiée ; c'est ainsi que les gazogènes de camions automobiles emploient le charbon de bois ; pour des exigences différentes : grande réactivité et résistance à l'écrasement du combustible, le haut fourneau a employé d'abord du charbon de bois, puis du coke.

Pour absorber l'excès de calories dégagé par la formation de CO, on peut employer CO^2 comme agent réfrigérant, au lieu de vapeur d'eau ; il réagit sur le carbone suivant l'équation (3) et donne du CO ; dans les quelques applications faites, jusqu'ici, de ce procédé, le gaz carbonique provient précisément des fumées résultant de la combustion ; c'est pourquoi le gaz obtenu s'appelle gaz de régénération ; le bénéfice qu'on peut en espérer, ce n'est pas, comme avec le gaz mixte, une amélioration du pouvoir calorifique, car l'oxygène contenu dans le CO^2 provient tout entier de l'air, qu'il soit de gazéification ou de combustion, et s'accompagne du même ballast d'azote ; c'est une diminution de la quantité de combustible nécessaire à la production d'un volume déterminé de gaz, puisqu'on réintègre dans le circuit du carbone déjà brûlé. On a aussi proposé de remplacer les fumées par du gaz de four à chaux, plus riche en CO^2 et qui, lui, peut améliorer le pouvoir calorifique du gaz de régénération ; mais cet emploi

n'est possible que si on dispose de fours à chaux à proximité des gazogènes ; enfin on a proposé d'employer le gaz de haut fourneau, dont la composition moyenne est : CO^2, 12 % ; CO, 24 % ; H^2, 2 % ; CH^4, 2 % ; N^2, 60 %, et dont le pouvoir calorifique, d'environ 900 ca., serait amélioré par passage dans un gazogène réduisant sa teneur en CO^2.

Gaz à l'eau. — Dans le procédé de fabrication du gaz à l'eau, tout le gaz est obtenu par réaction de la vapeur d'eau sur le carbone conformément à l'équation (2), avec une forte absorption de chaleur ; théoriquement on devrait pouvoir assurer l'équilibre thermique par un apport externe de calories, mais pratiquement le seul procédé viable a été d'emprunter la chaleur nécessaire à la combustion complète d'une partie du combustible lui-même. Le processus est obligatoirement intermittent ; pendant une première période on introduit dans le gazogène de l'air qui brûle une partie du combustible ainsi porté à l'incandescence ; les gaz brûlés traversent la couche et la réchauffent ; on ne peut employer que du coke, car de la houille distillerait dans cette période et le distillat serait perdu. Quand le réchauffage est suffisant, on arrête l'envoi d'air et on le remplace, en sens inverse, par une injection de vapeur d'eau : c'est la phase utile pendant laquelle se dégage le mélange CO + H^2. Quand le gazogène est suffisamment refroidi, on arrête la vapeur et on recommence le soufflage à l'air. On juxtapose en général deux appareils dont l'un est en combustion pendant que l'autre gazéifie.

Dans les premiers appareils, on travaillait à de hautes températures et, à cause de l'épaisseur de combustible, les fumées renfermaient des quantités importantes de CO, à tel point qu'on les utilisait au chauffage des

chaudières produisant la vapeur d'eau ; or c'est seulement entre 750° et 900° qu'on a un bon rendement à la combustion, c'est-à-dire peu de formation de CO dans les fumées, mais, d'autre part, ce n'est qu'à partir, également, de 750° qu'on a un bon rendement à la gazéification ; on est donc conduit à ne pas trop élever la température pendant le soufflage et à multiplier les inversions qui, en fait, ont lieu toutes les 2 à 5 minutes ; la composition du gaz à l'eau est : H^2, 50/55 % ; CO, 29/42% ; CO^2, 2/6% ; CH^4, 0/1% ; O^2, 0/1% ; N^2, 3/5% ; on obtient en général 1 mc. 7 de gaz pour 1 kg. de coke et 1 kg. de vapeur d'eau ; son pouvoir calorifique est de 2 600 ca. Il sert le plus souvent comme succédané du gaz de ville, après avoir été carburé à l'aide de vapeurs d'huile, ou comme diluant du gaz de ville quand le pouvoir calorifique du gaz de distillation dépasse celui qui a été fixé par le cahier des charges.

Oxygaz. Gaz d'huile. — Depuis que, par les procédés de Linde et de Georges Claude, on a pu, en liquéfiant l'air, en extraire industriellement l'oxygène, il pouvait paraître intéressant de remplacer dans la gazéification tout ou partie de l'air par de l'oxygène pur ; on obtient ainsi l'oxygaz qui, à la limite, serait constitué exclusivement par du CO et aurait un pouvoir calorifique de 3 062 ca. ; mais, là encore, on a reculé devant la complication des installations résultant de l'adjonction d'une fabrique d'oxygène, d'autant plus que le pouvoir calorifique du gaz produit ne lui permet pas de lutter avec le gaz de ville ; on a fait néanmoins des applications du surdosage en oxygène dans le gazogène à fusion de cendres, dont nous parlerons plus loin.

Enfin on a eu recours aux combustibles liquides pour améliorer le pouvoir calorifique du gaz de gazo-

gène ; nous avons déjà signalé que, si on expose brutalement des hydrocarbures lourds à une haute température, il se fait dans cette opération de craquage une migration de l'hydrogène conduisant d'une part à des produits légers dont les derniers termes CH^4, H^2, sont gazeux ; le gaz ainsi formé est appelé gaz d'huile ; son pouvoir calorifique va de 9 000 à 12 000 calories.

Ce très haut pouvoir calorifique permet, en juxtaposant cette fabrication à celle du gaz à l'eau, d'obtenir un gaz ayant un pouvoir calorifique égal à celui du gaz de ville. Dans les procédés Rincker-Wolter, par exemple, on utilise deux gazogènes accouplés ; on souffle de l'air sous la grille de l'un des gazogènes ; sa charge se réchauffe ; le gaz qui s'en dégage est aussitôt brûlé par une nouvelle injection d'air, et les gaz brûlés sont envoyés sur le deuxième gazogène qu'ils traversent de haut en bas, en réchauffant sa charge, puis ils sont évacués. La température dans cet appareil est assez basse pour que le CO^2 des fumées ne s'y transforme pas en CO et ne consomme pas de carbone ; quand cette phase est terminée, on remplace dans le premier gazogène le soufflage d'air par une injection de vapeur et on pulvérise dans le deuxième l'hydrocarbure — du goudron par exemple ; on forme ainsi du gaz à l'eau dans le premier et du gaz d'huile dans le second, qui se mélangent tous deux en sortant de l'appareillage ; on obtient ainsi avec du goudron de densité 1,08 un gaz contenant : hydrocarbures divers, 4,1 % ; CH^4, 11,1% ; CO, 25,8 % ; H^2, 47,1 % ; CO^2, N^2, O^2, 8,9 %, et d'un pouvoir calorifique de 4 500 calories.

Le même appareil permet d'obtenir exclusivement du gaz d'huile formé vers 600° et appelé improprement gaz à l'eau bleu (c'est le gaz Blau proposé par Riedinger et Blau d'Augsbourg). Ce gaz, comprimé vers 20 atmosphères, donne un liquide dont l'intérêt s'est beaucoup

amoindri depuis le développement du gaz butane obtenu dans les raffineries de pétrole.

Utilisation des matières volatiles du combustible. — Même lorsqu'on emploie dans les gazogènes de l'anthracite ou du coke, on trouve encore dans le gaz des traces de goudron. Quand, avec le temps, on employa de plus en plus des combustibles à teneur notable en matières volatiles, la teneur du gaz en goudron augmenta ; on pensa d'abord à s'en débarrasser, notamment au moyen de gazogènes à double foyer, comme l'appareil Rincker que nous venons de décrire, ou en l'extrayant du gaz et en le renvoyant dans le gazogène ; puis, quand on s'est avisé de la valeur de ce goudron, qui ne pouvait être obtenu en grande quantité qu'à l'état de goudron primaire de basse température, on modifia le fonctionnement du gazogène de façon à avoir une distillation lente précédant la gazéification et sans surchauffe notable des produits dégagés ; le combustible frais tombe dans une chambre de distillation distincte de la zone de combustion partielle. On s'aperçut vite qu'il était impossible d'employer un chauffage externe, à cause de la grande quantité de combustible à traiter et de calories à transmettre, et on employa pour la distillation une partie du gaz chaud fabriqué, ce gaz produisant la distillation dans une gaîne surmontant le gazogène, ou placée dans le gazogène et chauffée par les gaz qui en sortent ; on a alors deux sorties de gaz de l'appareil : l'une donne du gaz mixte ordinaire, l'autre donne un mélange de gaz distillé avec le solde de gaz mixte qui a traversé la couche de charbon introduit. Dans un appareil Mond alimenté en houille de Bohême, les deux gaz avaient la composition suivante ;

	Température	CO^2	O^2	CO	H^2	CH^4	*Autres hydrocarbures*	*Pouvoir calorifique*	*Goudron* en gr. par mc.
Gaz chaud.	578°	5,3	0,5	28,5	12,1	0,6	--	1227	0,29
Gaz de distillation.	132°	2,7	—	29,2	18,6	6,3	1,2	1890	53,6

On arrive à opérer la distillation en trois heures. On passe ainsi au gazogène en Allemagne des quantités importantes de briquettes de lignite brun ; souvent, avec ces combustibles, il est nécessaire de sécher partiellement le combustible avant sa gazéification et on y procède avec les chaleurs sensibles des gaz.

En injectant de la vapeur d'eau, 900 gr. par mc. d'air, on récupère aussi 60 % de l'azote contenu dans le combustible, sous forme d'ammoniaque. On obtient un gaz analogue avec des combustibles aussi différents que la houille, la tourbe ou le lignite ; son pouvoir calorifique varie de 1 265 ca. pour la tourbe à 1 445 pour le lignite ; on obtient de 50 à 100 kg. de goudron anhydre par tonne de charbon sec et on récupère en ammoniaque 63 % de l'azote du combustible.

Éléments constitutifs et fonctionnement des gazogènes. — *Le combustible.* — La couche de combustible joue un rôle essentiel dans le fonctionnement du gazogène, car c'est elle qui délimite les zones attribuées à l'air de combustion et au gaz formé ; il faut donc non seulement qu'elle soit apte à une gazéification complète, mais encore qu'elle constitue une séparation infranchissable sans réaction par l'air. Comme la gazéification est encore une opération entre l'air et

un solide, il faut que ce dernier offre une surface aussi grande que possible, qu'il assure une répartition régulière de l'air à travers toute sa masse et que sa résistance à l'entraînement par le courant d'air soit suffisante et uniforme ; un charbon criblé de 6/15 mm. est le plus convenable ; quant à l'épaisseur de la couche incandescente, elle est en moyenne de 1 mètre ; si le combustible est irrégulier, le feu chemine dans sa masse et apparaît à la couche supérieure ; les morceaux trop gros sont entourés de courants gazeux accélérés qui font remonter la zone de réaction ; des poches de poussier sont imperméables, se vitrifient souvent en surface et présentent alors les mêmes inconvénients qu'un gros morceau.

Évacuation des déchets et introduction de l'air et de la vapeur. — Les plus anciens gazogènes ont été des gazogènes à grille fixe ; depuis, les inventeurs se sont ingéniés à réaliser des dispositifs qui empêchent l'agglomération des scories et assurent leur enlèvement automatique ; lorsque le fonctionnement du gazogène est convenable, ces résidus doivent être privés complètement de matières combustibles quand ils arrivent à la grille ; le maintien sur la grille d'une couche de 30 à 50 cm. de cendres, où les réactions sont à peu près arrêtées, assure une bonne répartition de l'air ; en outre, ce dernier se réchauffe tout en refroidissant les cendres. Quand le combustible est très cendreux, on adjoint à la grille fixe ordinaire une grille de secours constituée par des barreaux qu'on introduit à 50 cm. au-dessus de la grille normale et qui supportent la charge de combustible pendant le décrassage. On a profité de la présence de cette grille de secours pour rendre mobile dans une certaine mesure la grille normale, soit en lui faisant basculer les scories dans le cendrier, soit en la plaçant sur un chariot, en soulevant l'enveloppe, et en enlevant

la grille avec sa charge de résidus, pendant qu'un autre chariot amène une grille de remplacement.

Dès l'origine, on s'est rendu compte de l'intérêt de l'emploi de vapeur d'eau pour refroidir les scories, en empêcher l'agglomération ou les briser par refroidissement brusque ; on en vint ainsi à installer une cuvette pleine d'eau formant garde hydraulique à la base du gazogène. Les scories pénétrant dans cette cuvette s'y refroidissent et vaporisent une partie de l'eau. L'arrivée d'air se fait, soit par une grille à gradins aboutissant à la cuvette, soit par un tuyau central débouchant au bas de la masse de combustible et couvert par un chapeau laissant échapper l'air latéralement dans le combustible.

Mais les grands gazogènes modernes sont munis de grilles tournantes ; c'est Kerpely qui en a réalisé le premier modèle industriel (Fig. 15) ; la partie centrale de la grille qui est tronconique est constituée par des gradins qui laissent passage à l'air ; elle est en outre dissymétrique, de façon à soulever périodiquement le combustible pendant sa rotation et à éviter ainsi les accrochages. Les scories tombent à la périphérie dans une cuvette d'où elles sont extraites par un racloir fixe ; dans d'autres modèles où les cendres sont extraites à sec, la cuvette n'a plus de rebords ; des racloirs font tomber les cendres dans des trémies d'où elles sont évacuées par wagonnets.

En Amérique, pour l'emploi de houilles plus ou moins collantes, on a adjoint au gazogène des dispositifs mécaniques de tisonnage de la charge de charbon ; dans le dispositif Hughes, la cuve tourne avec la charge de combustible ; un doigt vertical en acier, refroidi à l'eau, est fixé au couvercle et pénètre dans la masse qu'il brasse pendant qu'elle se déplace ; pour agir sur toute la hauteur, ce doigt est animé d'oscillations verti-

cales ; signalons également que le gazogène est souvent muni sur sa surface latérale d'une enveloppe d'eau ou *water-jacket* qui utilise la chaleur rayonnée pour la

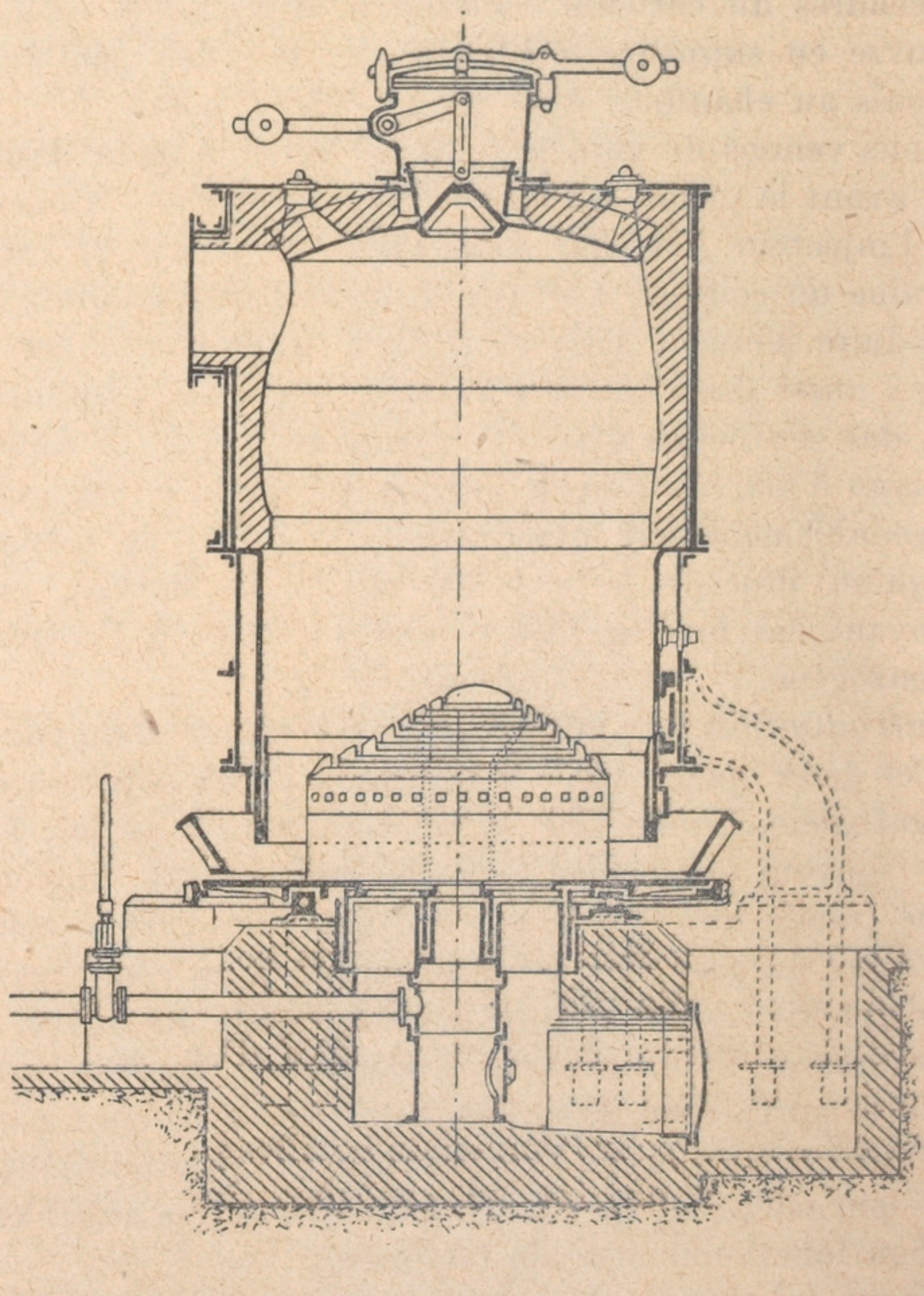


FIG. 15. — GAZOGÈNE KERPELY A GRILLE TOURNANTE.

production de vapeur d'eau ; le refroidissement de la paroi qui en résulte s'oppose aux collages, qui ne peuvent plus se produire que dans la masse du combustible.

L'emploi de ces dispositifs mécaniques a augmenté la gamme des combustibles utilisables, rendu régulière la composition du gaz, débarrassé plus complètement les cendres du carbone résiduel, et diminué la main-d'œuvre en supprimant les travaux les plus pénibles imposés au chauffeur dans les modèles anciens.

Nous venons de voir qu'on introduit la vapeur dans l'air avant la grille ; on emploie encore parfois dans ce but l'injecteur Koerting dans lequel le jet de vapeur entraîne un courant d'air ; mais on est ainsi conduit à introduire souvent plus de vapeur qu'il n'est nécessaire ; aussi dans les installations modernes emploie-t-on des souffleries d'air et on injecte la vapeur dans le tuyau d'arrivée d'air de chaque gazogène, en réglant convenablement son introduction. On opère de même lorsqu'on procède à la régénération de fumées, en envoyant ces fumées dans le courant d'air à l'entrée du gazogène.

Introduction du combustible et extraction du gaz. — Ces deux opérations se font par la partie supérieure du gazogène. L'introduction du combustible se fait le plus souvent d'une manière discontinue, au moyen d'une trémie formant sas, et envoyant le charbon soit au centre du gazogène, soit, au moyen d'un cône, vers la périphérie ; on a proposé des dispositifs mécaniques pour assurer l'alimentation continue et régulière sur toute la surface du gazogène, mais ils ne se sont pas répandus, car, en sus de leur complication, ils produisent, dans leur malaxage du charbon, des poussières nuisibles au bon fonctionnement de l'appareil.

Quant à la sortie du gaz, pratiquée en haut sur la paroi latérale, elle est précédée d'un espace vide laissé au-dessus de la couche de combustible ; la vitesse du gaz y est faible et il s'y dépose une partie des poussières qu'il a extraites de la masse du combustible.

Haut fourneau. — Le haut fourneau est le plus ancien gazogène realisé industriellement ; il a la caractéristique d'être un gazogène et d'utiliser immédiatement le gaz produit à une réaction chimique ; il a pour but d'obtenir de la fonte, fer chargé de faibles quantités de carbone, à partir du minerai de fer, mélange des oxydes FeO, Fe^3O^4, Fe^2O^3 et d'une gangue. La réduction de ces oxydes s'opère au moyen du carbone employé sous forme de coke ; on ajoute en outre un fondant, castine calcaire ou erbue siliceuse, suivant la nature de la gangue, de façon à la rendre fusible. Le haut fourneau constitue une des plus belles réussites industrielles, car, chargé avec des produits solides, il libère des produits liquides : fonte et laitier, et du gaz. La réaction entre le coke et le minerai, tous deux à l'état solide, serait impossible, et la difficulté est tournée en gazéifiant le carbone à l'état de CO. Le haut fourneau est constitué par deux troncs de cône verticaux raccordés par leur base ; le minerai et le coke sont enfournés à la partie supérieure, appelée gueulard, par une benne-trémie déposant des lits alternés de coke ou de minerai et fondant. L'air est injecté, par des tuyères, à la partie inférieure sous une pression de 0 kg. 5 à 1 kg. et réchauffé vers 900° dans des récupérateurs chauffés eux-mêmes par la combustion d'une partie du gaz dégagé par le haut fourneau. La température atteinte alors dans l'appareil est voisine de 1 800°/1 900°.

Les opérations successives réalisées dans le haut fourneau sont les suivantes : l'air forme avec le coke du CO qui, rencontrant immédiatement l'oxyde de fer à haute température, le réduit à l'état de fer. Ce dernier, environné du carbone formant le coke, en absorbe et se transforme en fonte relativement fusible ; il se charge en même temps d'impuretés empruntées à la gangue, qui fond elle aussi, et on obtient ainsi la fonte brute

et le laitier qui se rassemblent, tous deux à l'état liquide, en deux couches superposées à la base du haut fourneau. Le CO^2 formé par l'oxydation du CO au contact des oxydes de fer se réduit ensuite partiellement en traversant de nouvelles couches de coke, si bien que le gaz débouchant à la partie supérieure a la composition moyenne suivante : CO^2, 12 % ; CO, 24 % ; H^2, 2 % ; CH^4, 2 % ; N^2, 60%, avec un pouvoir calorifique de 900 ca. Autrefois ce gaz était perdu : le gueulard était ouvert et le gaz brûlait dans l'atmosphère ; actuellement, il est recueilli, épuré et sert au réchauffage du vent et à la production de force motrice dans des moteurs à gaz.

Gazogène à fusion des cendres. — Inventé par Ebelmen en 1839, étudié de nouveau par Sépulchre à Audincourt en 1900, cet appareil est entré dans la pratique industrielle après la guerre de 1914-1918. La mise au point sous sa dernière forme en a été faite aux houillères de Saint-Étienne par M. Philipon.

Le principe consiste à fondre sous l'action du vent, réchauffé entre 400° et 600°, un mélange de combustible et de calcaire en proportions convenables pour donner un bon laitier à ciment ; comme combustible, on emploie des schistes à 50 % de cendres notablement ferrugineuses ; le vent est introduit à la base du gazogène par des tuyères en bronze refroidies par une circulation d'eau et développe aussitôt une température très élevée, de 1 800° à 2 000°. Il en résulte la transformation instantanée en CO de tout le carbone contenu dans le schiste, la formation et la fusion du laitier, ainsi que la transformation en fonte des oxydes de fer apportés par les schistes ; plus la température du vent est élevée, plus l'épaisseur de la zone de réaction est faible et plus les gaz sortent froids, ayant traversé une plus

grande hauteur de produits non en réaction. Le gaz est réchauffé, non par un régénérateur, mais d'une façon continue, dans un échangeur tubulaire. Le pouvoir calorifique du gaz, très constant avec des charges constantes, peut varier, suivant le combustible employé, de 1 000 à 1 400 ca. La fonte obtenue a une teneur élevée en silicium (8 à 10 %) : elle contient de 2,8 à 3,2 % de carbone et est moins carburée que celle de haut fourneau. On peut ajouter à la charge des déchets de fonte et obtenir des quantités plus grandes de fonte siliceuse de haute valeur. Le laitier additionné de chaux donne un bon ciment ayant une résistance de 16 à 31 kg. quand la durée de la prise passe de 3 jours à 28 jours.

Cet appareil paraît susceptible de nombreuses applications ; signalons en particulier qu'en incorporant du phosphate de chaux à la charge, on dégage, grâce au milieu réducteur, du phosphore qu'on peut soit recueillir sous cette forme, soit réoxyder par de la vapeur d'eau en acide phosphorique ; en traitant des minerais complexes, on volatilise les métaux tels que le zinc, le plomb, l'étain, le potassium ; le cuivre, l'argent, le nickel sont réduits et se rassemblent dans le creuset à l'état métallique ou, quand les charges sont sulfurées, à l'état de matte.

Gazogènes pour véhicules automobiles. — Ces appareils sont entrés depuis quelques années dans la pratique industrielle : ils doivent assurer, avec un poids et un encombrement réduits : un allumage facile, une bonne reprise de la combustion après une longue période de ralentissement, une épuration poussée du gaz produit qui est immédiatement employé dans le moteur du véhicule et ne doit pas l'encrasser ; ces générateurs marchent la plupart du temps soit au bois, soit au charbon de bois.

Parmi les gazogènes au bois, signalons les appareils Berliet et de Dion-Bouton ; ces appareils procèdent au séchage et à la carbonisation partielle du bois avant sa combustion ; en outre, les produits de la distillation du bois sont pyrogénés et transformés en gaz pour leur majeure partie en traversant une couche de charbon incandescent. Dans le gazogène Berliet, le bois est introduit dans une trémie terminée par deux troncs de cône reliés par leur petite base aboutissant au cendrier ; c'est un peu au-dessus de ce raccordement que l'air est injecté ; dans cette zone le bois est transformé déjà en braisette (dans la période d'allumage les deux troncs de cône et une partie du cendrier sont garnis de braisette) et cette braisette se gazéifie sous l'action de l'air et de la vapeur d'eau provenant de la distillation du bois ; le gaz traverse la couche de braisette incandescente et, remontant le long de la trémie avant de sortir, provoque la distillation du bois. On allume le gazogène au moyen d'un ventilateur auxiliaire, n'envoyant, comme dans tous ces appareils, le gaz dans le moteur que lorsque la gazéification normale est réalisée. Ce ventilateur sert également à maintenir l'appareil en veilleuse. Le gazogène de Dion-Bouton (Fig. 16) est sensiblement plus compliqué, mais il peut fonctionner avec du bois vert ou résineux. La colonne de charbon se trouve au centre et elle est entourée par la charge de bois ; le gazogène est ainsi alimenté pour la plus grande partie en bois et pour une partie en charbon de bois ; l'air arrive par une gaine descendant entre les deux combustibles ; il est distribué par des tuyères vers le bas de la colonne de bois, après s'être réchauffé dans la gaine ; il assure dans le bas la combustion de la braisette et du charbon et remonte à travers la colonne de charbon avant de sortir de l'appareil ; une seconde gaine, parcourue par de l'air de refroidissement, aspiré

par un électro-ventilateur, entoure jusqu'à mi-hauteur la gaine d'air de combustion. Quand le moteur a marché au ralenti, un dispositif automatique appelé compen-

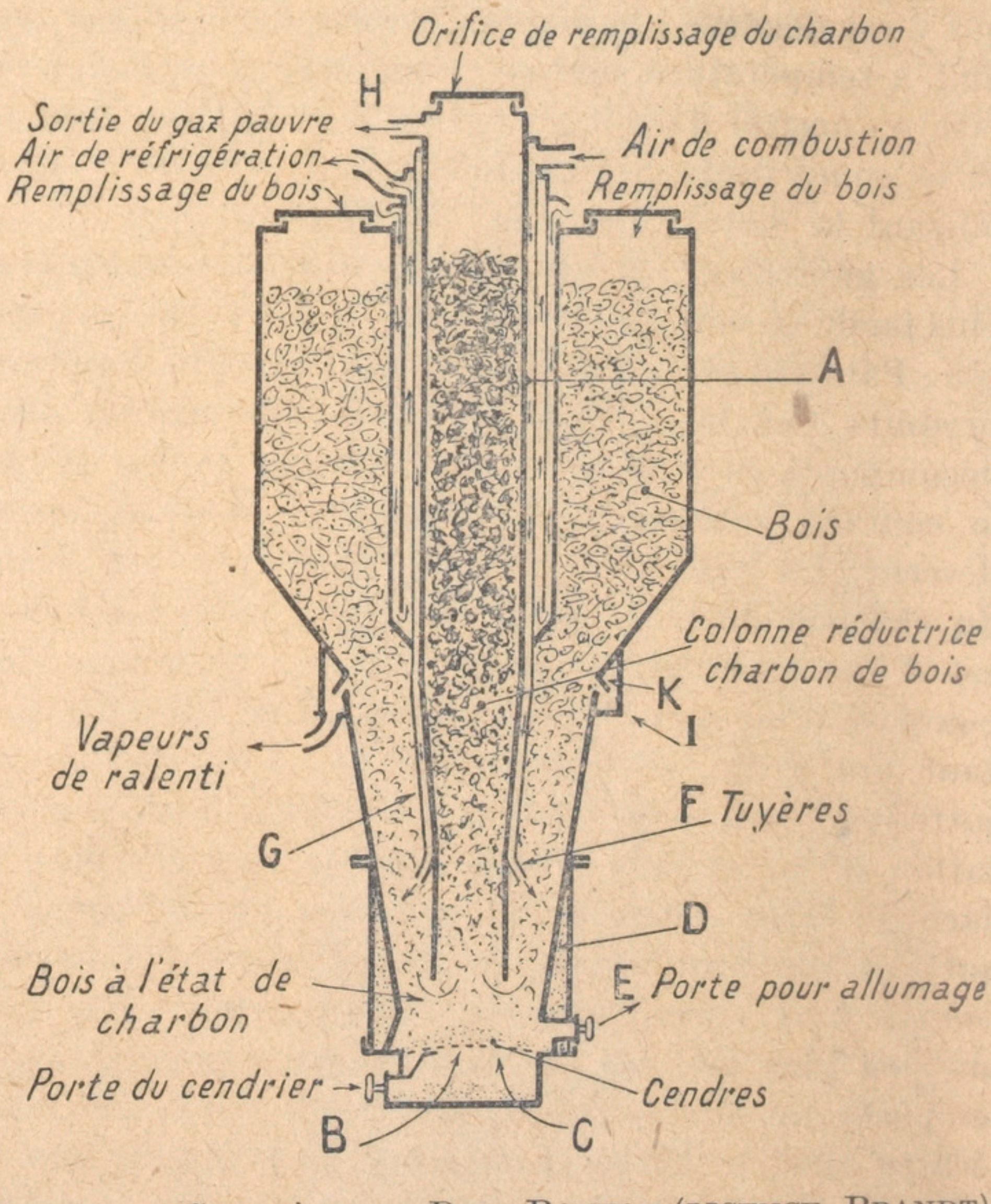


FIG. 16. — GAZOGÈNE DE DION-BOUTON (LICENCE BRANDT).

A, charbon de bois ; BC, cendrier ; D, trémie à bois ; E, porte d'allumage ; FG, tuyères d'air de combustion ; H, sortie du gaz pauvre ; IK, gaine collectrice des vapeurs dégagées par le bois.

sateur permet, au moment de la reprise, d'éviter tout excès de vapeur d'eau sur la couche de charbon gazéifiée; à ce moment, la production du gazogène étant faible

par rapport à l'aspiration du moteur, une dépression se produit, déclenchant un mécanisme qui ferme l'aspiration du ventilateur sur le circuit de réfrigération et fait aspirer à mi-hauteur dans la trémie à bois la vapeur qui y est dégagée ; le moteur recevra donc un gaz produit à température suffisamment élevée ; cette température s'accroît dans le gazogène, la dépression diminue et le compensateur fonctionne en sens inverse, rétablissant la marche normale de l'appareil.

Les générateurs à charbon de bois ont un travail plus facile et sont de construction plus simple. Le gazogène Panhard est à combustion renversée : les goudrons produits par la prédistillation du combustible sont décomposés en majeure partie lorsque, entraînés par le courant gazeux, ils traversent le charbon incandescent. Le gazogène Gohin-Poulenc, qui peut brûler du charbon de bois, de l'anthracite ou du semi-coke, est d'une construction simplifiée au maximum ; il se compose d'un corps cylindrique dont la base, comportant une grille, se termine par le cendrier ; l'air est introduit par une tuyère horizontale refroidie par circulation d'eau et débouchant dans le combustible ; en face de cette tuyère et un peu plus bas se trouve la sortie de gaz, protégée par une grille, à peu près verticale, contre tout entraînement de combustible ; une tôle, un peu plus inclinée sur la verticale que cette grille, empêche le combustible de descendre contre elle et en écarte ainsi le feu ; cet appareil ne comporte pas en général de ventilateur d'allumage et il est alors nécessaire d'employer un carburateur auxiliaire assurant la marche du moteur et, par conséquent, l'aspiration jusqu'à ce que le gaz produit puisse remplacer l'essence.

CHAPITRE VIII

CONSTITUANTS DU PÉTROLE BRUT FRACTIONNEMENT. — DÉGAZOLINAGE DES GAZ NATURELS ; PURIFICATION DES PRODUITS CRACKING. — GAZ BUTANE ET PROPANE

Constituants du pétrole brut. — Le pétrole brut est un corps de composition très variable, dont la formule est $C_nH_mO_xN_yS_z$; m est inférieur à $2n + 2$, n oscille autour de 20 ; x, y et z sont toujours faibles. La teneur en C varie de 83 à 87 %, en H^2 de 11 à 14 % ; la teneur en O est inférieure à 3 %, en S en général à 3 % et en N à 0,5 % ; la partie intéressante du pétrole est constituée par les hydrocarbures. Au point de vue chimique, on peut les classer en quatre groupes principaux :

les hydrocarbures paraffiniques saturés $C_n H_{2n+2}$, homologues du méthane CH^4 ;

les hydrocarbures oléfiniques non saturés $C_n H_{2n}$, homologues de l'éthylène C^2H^4 ;

les hydrocarbures naphténiques, cycliques saturés, $C_n H_{2n}$, homologues du cyclopropane C^3H^6 ;

les hydrocarbures benzéniques, cycliques, $C_n H_n$, homologues du benzène C^3H^6.

Les composés oxygénés sont constitués par des acides gras ou naphténiques, des phénols, des aldéhydes, des

cétones et surtout par des asphaltes et des résines qui jouent un rôle important dans l'industrie du pétrole ; d'après Holde on distingue :

1. Les asphaltes durs insolubles dans le mélange éther-alcool et dans l'éther de pétrole ;

2. Les asphaltes mous solubles dans l'éther de pétrole, insolubles dans le mélange éther-alcool ;

3. Les résines solubles dans l'éther-alcool, dans l'alcool à 70°, partiellement solubles dans l'éther de pétrole.

Les produits asphaltiques sont mal définis ; si la plupart contiennent du soufre et de l'oxygène, certains n'en ont pas ; ils sont analogues au brai qui forme le résidu de la distillation des huiles de houille ; ils semblent exister dans l'huile brute à l'état colloïdal ; la chaleur en augmente progressivement la teneur dans l'huile ; l'oxygène et le soufre paraissent en favoriser la formation. Bien que les asphaltes aient trouvé un emploi important pour le revêtement des routes, ils constituent un produit gênant dans l'industrie du pétrole qui, recourant constamment au chauffage, tend à provoquer au cours du raffinage la formation de résines ou d'asphalte.

Les composés sulfurés sont surtout sous forme de thiophanes, thiophènes et mercaptans ; on trouve quelquefois aussi du soufre libre ; quant aux composés azotés, ils se trouvent dans les fractions les moins volatiles et sont surtout constitués par des bases pyridiques ou quinoléiques.

Le raffinage a d'abord eu pour but de répartir par distillation le pétrole brut en fractions caractérisées par leur point d'ébullition et de purifier ces fractions de façon à les stabiliser et en éliminer les éléments nocifs ; il s'agit surtout, dans cette dernière opération, de les rendre moins sensibles à l'action de l'oxygène

et de la lumière, qui provoquent la formation d'acides ou de gommes, et de les débarrasser de la majeure partie de leur soufre. Ultérieurement, les besoins mondiaux en produits du pétrole croissant constamment, mais de manière inégale pour chacune des fractions, on s'est efforcé de valoriser les fractions les moins demandées en les transformant en produits recherchés. Enfin, même pour la fraction de plus grande vente et qui est actuellement l'essence, des exigences nouvelles ont apparu chez les consommateurs, et les raffineurs se sont efforcés, en modifiant les traitements, de satisfaire à ces besoins nouveaux de leur clientèle. Il en résulte que le raffinage proprement dit comprend trois opérations : la distillation ou topping, le traitement chimique et le cracking qui, lui-même, a été perfectionné dans ces dernières années de façon à produire des essences à nombre d'octane élevé, recherchées pour les moteurs d'aviation.

Les principales fractions que donne la distillation sont : la gazoline ou essence, le kérosène ou pétrole lampant, le gas-oil, le fuel-oil, les résidus asphaltiques ; leurs frontières empiètent les unes sur les autres ; c'est ainsi que l'essence passe entre 60° et 220°, le kérosène entre 150° et 270°, le gas-oil entre 270° et 350°, le fuel-oil au-dessus de 300° ; les huiles de graissage sont extraites de ces dernières parties.

Les pourcentages de ces fractions existant dans l'huile minérale varient considérablement d'une région pétrolifère à une autre ; ils varient également dans une région déterminée et même pour un puits, du début à la fin de son activité. La teneur en soufre peut passer de 0,02 à plus de 5 %, La teneur en essence, de 1,7 % à plus de 15 % ; la teneur en lubrifiants peut être nulle pour certains pétroles de l'Oklahoma et dépasser 35 % pour certains pétroles de Perse.

Les raffineries sont établies en général à proximité des champs de pétrole ; il n'en a pas été de même pour les raffineries françaises, dont la véritable justification se trouve dans une amélioration de notre balance commerciale ; en dehors de celles des trusts, dont la matière première peut avoir une qualité régulière, les autres ont dû s'équiper pour traiter des produits d'origines très variées.

Raffinage du pétrole brut et combustibles qu'on en tire. — Comme pour tous les combustibles liquides, le premier traitement du pétrole consiste dans une distillation permettant de le fractionner en produits à points d'ébullition croissants. Ainsi que pour le goudron de houille, une première difficulté se rencontre : la présence d'eau qui, pour l'huile minérale, est salée et reste incluse dans la masse à des teneurs très variables ; quand une simple décantation ne suffit pas pour l'éliminer, on a employé la centrifugation, le chauffage sous pression, l'addition de colle, de savon, de phénol, etc., l'électrolyse ou une combinaison de ces divers moyens. On procède ensuite à la distillation. Deux considérations essentielles ont présidé à l'évolution de sa technique : l'une de prix de revient, tendant à réduire le plus possible la main-d'œuvre et la consommation de calories, l'autre de qualité des produits, tendant à éviter les surchauffes.

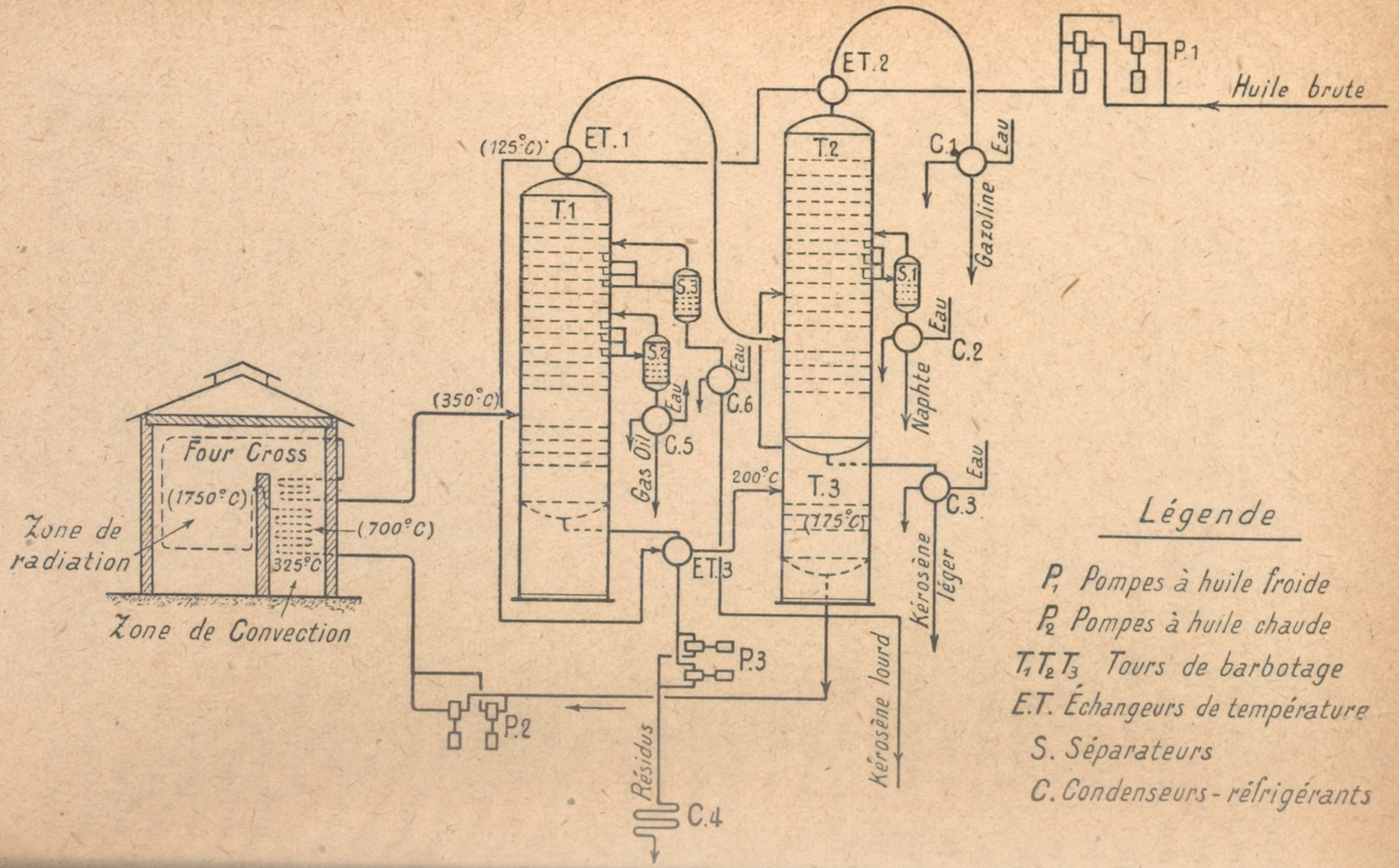
A l'origine, la distillation s'effectuait de façon discontinue, en envoyant l'huile déshydratée dans une chaudière constituée par un réservoir cylindrique horizontal d'une capacité de 30 à 200 t., chauffé à feu nu ; on traitait une tonne de distillat par 24 heures et par mq. de surface de chauffe ; la chaudière était remplie aux 2/3 ; on chauffait progressivement et, quand la température atteignait 125°, on aidait le départ des

vapeurs par une injection de vapeur d'eau ; le distillat était recueilli dans un condenseur et, de là, envoyé dans des réservoirs successifs au fur et à mesure de l'avancement de l'opération. Ce procédé, appelé *Batch Still*, a cédé ensuite la place au procédé des chaudières en cascades, *Continuous Still*. Dans ce mode de distillation, 3 à 12 chaudières parallèles sont placées en gradins avec une chute de 15 à 30 cm. d'une chaudière à l'autre. Chacune est chauffée à une température déterminée, et l'huile, passant d'une chaudière à l'autre, distille progressivement ses éléments jusqu'à ce qu'on arrive au résidu évacué de la batterie et qui cède ses calories à l'huile brute dans un préchauffeur ; dans ces appareils, l'huile garde un niveau constant ; on peut donc les munir de tubes de fumées et répartir la chaleur dans toute la masse, d'où meilleure utilisation de la chaleur des fumées et suppression de tout risque de surchauffe.

Enfin s'est imposé le système des alambics tubulaires, dit *pipe-stills*. Il a d'abord été employé pour l'obtention sans déshydratation préalable des produits de tête, d'où le nom de *topping* donné à cette opération ; cette prédistillation est encore employée fréquemment. L'élément essentiel de l'appareillage est un tuyau de 6 à 10 cm. de diamètre, placé dans le four de chauffage et traversé par un courant continu d'huile minérale. On voit immédiatement les avantages du procédé : du fait de la vitesse de l'huile, du petit diamètre de l'appareil de chauffe, un brassage énergique de l'huile en mouvement se produit et toute sa masse est échauffée progressivement d'une façon homogène ; à la sortie du pipe-still le mélange de vapeurs et de liquide résiduaire s'en va dans un séparateur d'où le résidu passe dans un préchauffeur du pétrole brut et les vapeurs dans des tours de condensation fractionnée ; en raison

de la faible quantité d'huile en traitement dans une zone déterminée, l'eau qu'elle peut contenir au début se sépare sans à-coup nuisible ; ce dispositif permet un réglage précis des températures par une distribution convenable des calories le long du tuyau et par la vitesse donnée au liquide ; la masse qui est en cours de traitement est relativement faible ; aussi les dangers d'incendie sont-ils très réduits ; les réglages n'ont pas d'inertie importante et peuvent parer rapidement aux variations accidentelles. Les pertes de chaleur sont réduites au minimum, parce que l'installation est plus concentrée et qu'il n'y a pas de stockage intermédiaire d'un appareil à l'autre ; lorsque des redistillations sont nécessaires, on y procède au moyen des chaleurs de condensation de produits à points d'ébullition plus élevés.

Le schéma ci-contre (Fig. 17) montre une installation réalisée par la *M. W. Kellogg Cy* avec four Cross. Dans les installations Borrmann, les appareils de distillation sont divisés en deux groupes ; le pétrole passe d'abord dans le premier qui fractionne les huiles légères ; le résidu est ensuite surchauffé et passe dans le deuxième groupe qui fractionne les huiles lourdes lubrifiantes avec l'aide de vapeur d'eau surchauffée. Ce dispositif évite la surchauffe de l'huile légère ; en ce qui concerne les huiles lourdes contenant des huiles de graissage, il est intéressant d'abaisser les températures d'extraction, soit par l'emploi de vapeur surchauffée, comme dans le procédé Borrmann, soit par l'emploi du vide, car une température excessive diminue la qualité des lubrifiants. Inversement, une partie des opérations peut se faire sous pression, par exemple lorsqu'il s'agit de débarrasser une essence des gaz qu'elle a dissous : c'est la stabilisation, ou lorsqu'il s'agit d'extraire des gaz l'essence qui s'y trouve vaporisée : c'est le dégazo-



Légende

P_1 Pompes à huile froide

P_2 Pompes à huile chaude

$T_1 T_2 T_3$ Tours de barbotage

E.T. Échangeurs de température

S. Séparateurs

C. Condenseurs - réfrigérants

linage ou désessenciement des gaz. Cette dernière opération est analogue au débenzolage du gaz de houille et on peut la pratiquer, comme celui-ci, par lavage des gaz avec des huiles ou par adsorption au charbon actif ; mais très souvent, dans l'industrie du pétrole, on comprime et refroidit le gaz qui est très riche en essence ; c'est ainsi qu'on opère avec les gaz naturels si abondants aux États-Unis et qui, en 1929, ont fourni 11 % de la production totale d'essence dans ce pays ; le gaz qui a abandonné l'essence condensée peut être détendu dans un moteur et restituer une part notable de l'énergie de compression ; nous parlerons d'une façon plus détaillée de ce procédé à propos de la fabrication du gaz butane.

Les fractions séparées du pétrole brut subissent pour la plupart un traitement chimique qui comporte généralement un lavage à l'acide sulfurique suivi d'un lavage à la soude ; ce traitement élimine une grande partie des produits sulfurés qui sont oxydés et solubilisés dans l'eau, ainsi que des composés azotés basiques et oxygénés acides. Quand la teneur en soufre est élevée, on complète le raffinage par un lavage avec une solution de plombite de soude appelée *Doctor solution*, obtenue avec un mélange de soude, de litharge et de fleur de soufre ; l'acide sulfurique dissout aussi les oléfines, ce qui est devenu un inconvénient depuis qu'ont été mises en évidence les propriétés antidétonantes de ces oléfines.

On a également essayé d'extraire les impuretés, non plus par voie chimique, mais par voie physique, au moyen de solvants appropriés ; seul dans cette voie, le procédé Edeleanu a atteint le stade industriel ; le solvant utilisé est l'anhydride sulfureux liquide ; il enlève les carbures aromatiques, éthyléniques et les impuretés sulfurées, tandis que les composés paraffiniques y sont complètement insolubles ; le traitement

se fait à —10° ; les produits solubilisés sont isolés ensuite par simple évaporation du gaz sulfureux ; on l'a surtout appliqué au traitement des huiles de graissage et des paraffines. Enfin un dernier traitement physique est constitué par la filtration des huiles sur des terres spéciales, dont le prototype a été la terre à foulon, et qui permettent de les décolorer ; dans le procédé Gray, ce sont les vapeurs d'hydrocarbures qui sont soumises à l'action de la terre à foulon ; elle polymérise les dioléfines qui sont éliminées sous forme d'huiles visqueuses, mais laisse les oléfines intactes.

Les combustibles qu'on extrait ainsi du pétrole sont :

Les *essences* employées dans les moteurs à explosion, caractérisées commercialement par leur densité, comme suit : essence d'aviation, poids spécifique de 0,680 à 0,700 ; essence tourisme, 0,715 à 0,725 ; essence légère, 0,725 à 0,735 ; essence poids lourd, 0,730 à 0,745 ; essence lourde, 0,760 à 0,770. Elles sont très fluides, se congèlent à —20° et ont un point éclair inférieur à —20° pour les trois premières, à +35° pour les dernières ; le point de distillation le plus élevé de cette fraction, qui était de 185° il y a une vingtaine d'années, a été élevé progressivement jusqu'à 250°. Depuis quelque temps, les essences sont également caractérisées par leur indice d'octane, dont nous parlerons au chapitre suivant ;

Les *pétroles lampants* ou *kérosènes*, divisés en pétrole ordinaire de densité 0,814 à 0,820, et pétrole de luxe de densité 0,800 à 0,810 ; ils constituaient le produit essentiel à l'origine de l'industrie du pétrole ; ils sont toujours employés à l'éclairage et alimentent certains types de moteurs industriels (semi-Diesels). Leur importance ayant considérablement diminué, leurs limites de fractionnement ont été rapprochées au profit de

leur qualité et de la production d'essence d'une part, de gas-oil d'autre part ;

Les *gas-oils*, de densité 0,833 à 0,870 ; ils servent de combustibles dans les moteurs semi-Diesel et Diesel type marine ; on les emploie également dans les gazogènes pour la fabrication du gaz carburé. Leur point d'inflammation est supérieur à 60°, leur pouvoir calorifique varie de 9 800 à 10 000 calories ; ils ne doivent contenir aucune matière asphaltique insoluble dans l'éther de pétrole de densité 0,645 et ne laisser qu'un résidu infime de coke à la distillation sèche dans un creuset ;

Les *fuels-oils*, de densité 0,875 à 0,920 ; on les appelle également huile lourde, pacoura ou mazout ; on en exige en général un point d'inflammation supérieur à 80° ; leur fluidité à 15° varie de 5° à 70° à l'ixomètre Barbey ; leur pouvoir calorifique varie de 10 200 à 10 800 calories ; suivant leur qualité, ils sont employés dans les moteurs Diesel ou pour le chauffage des fours et des chaudières ; dans leurs conditions de réception, on limite en général leur teneur en soufre et leur viscosité ; les plus lourds sont constitués par les résidus de la distillation et du cracking.

La répartition des produits du pétrole en volume était la suivante en 1900 : essence, 12 % ; pétrole lampant, 60 % ; huiles de graissage, 8 % ; huiles combustibles, pertes et divers, 20 %.

En 1920, elle était devenue : essence, 25 % ; pétrole lampant, 10 % ; huiles de graissage, 10 % ; huiles combustibles, pertes et divers, 55 %.

Depuis, la proportion d'essence n'a cessé de croître et, en 1937, elle atteignait 43 %.

Jusque vers 1920, les besoins en essence ont pu être satisfaits par un meilleur aménagement des coupures à la distillation ; à partir de cette époque, l'industrie

du pétrole a dû procéder à une transformation des produits qu'elle obtenait, de façon à augmenter la quantité d'essence par destruction pyrogénée des produits lourds : cette opération, le cracking, s'est considérablement développée et perfectionnée dans les quinze dernières années.

Le cracking. — Son origine a été l'inattention d'un ouvrier qui, en 1861, laissa surchauffer une chaudière de distillation ; la tôle fut portée au rouge ; on y constata ensuite un dépôt de coke, mais en même temps les produits de la distillation contenaient une quantité plus grande d'essence ; c'est en 1913 seulement que cette constatation fortuite amena une première réalisation industrielle.

Le cracking s'effectue entre 450° et 650° ; à ces températures, les carbures saturés, méthane et premiers homologues, sont pratiquement inaltérés ; en effet, ce n'est qu'à 985° que Cautelo a obtenu au bout d'une heure la décomposition de 36 % de méthane en carbone et hydrogène ; mais dès 450° l'octane et le décane se décomposent en donnant des oléfines, du méthane et de l'hydrogène. Les oléfines, et déjà l'éthylène, donnent à des températures relativement basses des produits de condensation et de polymérisation, notamment des carbures cycliques saturés qui, par déshydrogénation, peuvent aboutir à des carbures aromatiques. Les carbures cycliques saturés sont déjà sensibles à une température de 500° et conduisent à des carbures aromatiques ; ces derniers, en l'absence de catalyseurs, sont stables au moins jusqu'à 600°, mais le fer, notamment, favorise leur décomposition dès 500° avec formation d'hydrogène, de goudron et de dépôt de charbon.

Il résulte déjà de ces constatations que pour assurer un cracking sélectif, avec production minima de gaz

et de carbone, il faut laisser les produits peu de temps à haute température et les brasser énergiquement pour que le fer des parois exerce une action catalytique minime, parce qu'elle sera répartie sur toute la masse.

Dans le cracking, le grand ennemi est le dépôt de carbone ; en effet, ce carbone est peu conducteur ; la paroi à laquelle il adhère se surchauffe, et il en résulte une extension du dépôt, accroissant la surchauffe jusqu'à déformation et rupture de la paroi à l'emplacement de ce dépôt.

Le cracking peut porter sur des liquides ou des vapeurs ; de là, deux classes de procédés : ceux en phase liquide et ceux en phase vapeur ; ils ont débuté simultanément, mais les premiers ont d'abord conquis toute l'industrie pétrolifère, parce qu'ils étaient plus maniables ; toutefois, dans ces dernières années, ils sont délaissés au profit des seconds qui, maintenant bien au point, donnent les essences oléfiniques qu'on recherche pour les moteurs à forte compression ; enfin le cracking catalytique (procédé Houdry) a effectué fin 1939 une offensive vigoureuse.

Parmi les appareils travaillant en phase liquide, le premier, industrialisé dès 1913, a été l'appareil Burton, mais les deux systèmes les plus répandus sont le système Dubbs et le système Cross.

Le procédé Dubbs utilise d'une manière très ingénieuse l'intervention du facteur temps dans la réalisation du cracking : l'huile préchauffée par les produits traités est portée dans la zone de chauffage à la température de 460°, adoptée pour le cracking ; dès qu'elle a atteint cette température, elle sort du four et passe d'une tuyauterie de 0 m. 10 de diamètre dans la chambre de réaction, constituée par un réservoir cylindrique vertical de 3 mètres de diamètre, calorifugé, ce qui maintient sensiblement la température de l'huile ;

le craquage s'opère dans cette chambre qui n'est pas chauffée, ce qui évite tout inconvénient grave même quand il se forme du carbone. L'opération se fait sous une pression de 8 à 21 kg. ; l'emploi de la pression a les conséquences suivantes : il maintient liquides un plus grand nombre d'hydrocarbures et, pour les autres, les vaporisant à plus haute température, diminue la quantité de chaleur nécessaire à leur changement d'état ; enfin il réduit la production de gaz.

Le liquide sortant de la chambre de réaction est détendu ; c'est l'opération de flashing, adjointe au procédé Dubbs en 1926 ; ses produits les plus légers distillent et vont à un condenseur, de même que les gaz et vapeurs extraits de la chambre de réaction ; la paroi interne de la chambre de réaction est garnie d'une chaîne ; quand on veut nettoyer la chambre de son coke, on arrache la chaîne et on enlève le coke en morceaux ; ce coke dépourvu de cendres sert notamment à la fabrication des électrodes. Le flashing diminue la production de gazoline, mais laisse un résidu de meilleure qualité vendable comme fuel.

Dans le procédé Cross, on empêche la vaporisation de la gazoline elle-même en opérant à une pression telle qu'elle reste liquide à la température de cracking ; on épargne ainsi toutes les chaleurs latentes de vaporisation. Dans cet appareil, l'huile préchauffée à 325° circule à 42 kg. par cmq. dans un four chauffé au gaz désessencié, où sa température est portée à 450° ; elle passe dans la chambre de réaction constituée par un cylindre horizontal de 1 m. 20 de diamètre et 12 mètres de longueur, calorifugé, où elle séjourne environ 1/4 d'heure et où les réactions endothermiques de cracking abaissent la température d'une trentaine de degrés. L'huile est ensuite détendue à la pression atmosphérique et arrive dans une tour d'évaporation ; les

vapeurs formées vont à un déphlegmateur, puis à des condenseurs de la gazoline. Les résidus de la chambre de réaction et du déphlegmateur sont vendables tels quels ; c'est la formation de coke qui limite la durée de marche ; on le fragmente en envoyant de l'eau dans la chambre encore chaude ; le fonctionnement continu dure de 3 à 15 jours quand la matière traitée va du fuel-oil au kérozène. On transforme environ 1/3 de l'huile de charge en essence contenant beaucoup de carbures cycliques, mais ni oléfines ni aromatiques. Si cette huile n'a pas de soufre, il suffit d'un traitement par le procédé Gray, avant condensation de l'essence, pour obtenir celle-ci complètement décolorée (*water-white*).

Parmi les procédés en phase vapeur, le premier qui ait eu un fonctionnement réellement industriel est le procédé Gyro de la *Pure Oil Cy* ; on y trouve en outre l'intervention d'un facteur intéressant, la vapeur d'eau surchauffée destinée à empêcher la formation de coke qu'elle transforme en CO avec dégagement d'hydrogène tendant à alléger les produits.

Le procédé en vogue actuellement est le procédé Knox, dit T.V.P. (*True vapor phase process*, procédé réellement en phase vapeur). Il fonctionne à la pression atmosphérique. Sa caractéristique essentielle est de réaliser le chauffage des vapeurs pour le cracking par mélange avec du gaz incondensable porté à une température suffisamment élevée ; au début, cette introduction de calories dans le gaz permanent se faisait au moyen de régénérateurs ; on emploie maintenant le chauffage direct, les gaz circulant dans des tubes en acier sans soudure de 12 mm. de diamètre enroulés autour de tubes en carborundum (Fig. 18) ; ainsi se trouve résolue élégamment la principale difficulté du cracking en phase vapeur : transmettre à toute la masse de vapeurs, très rapidement, les calories les amenant à la tempé-

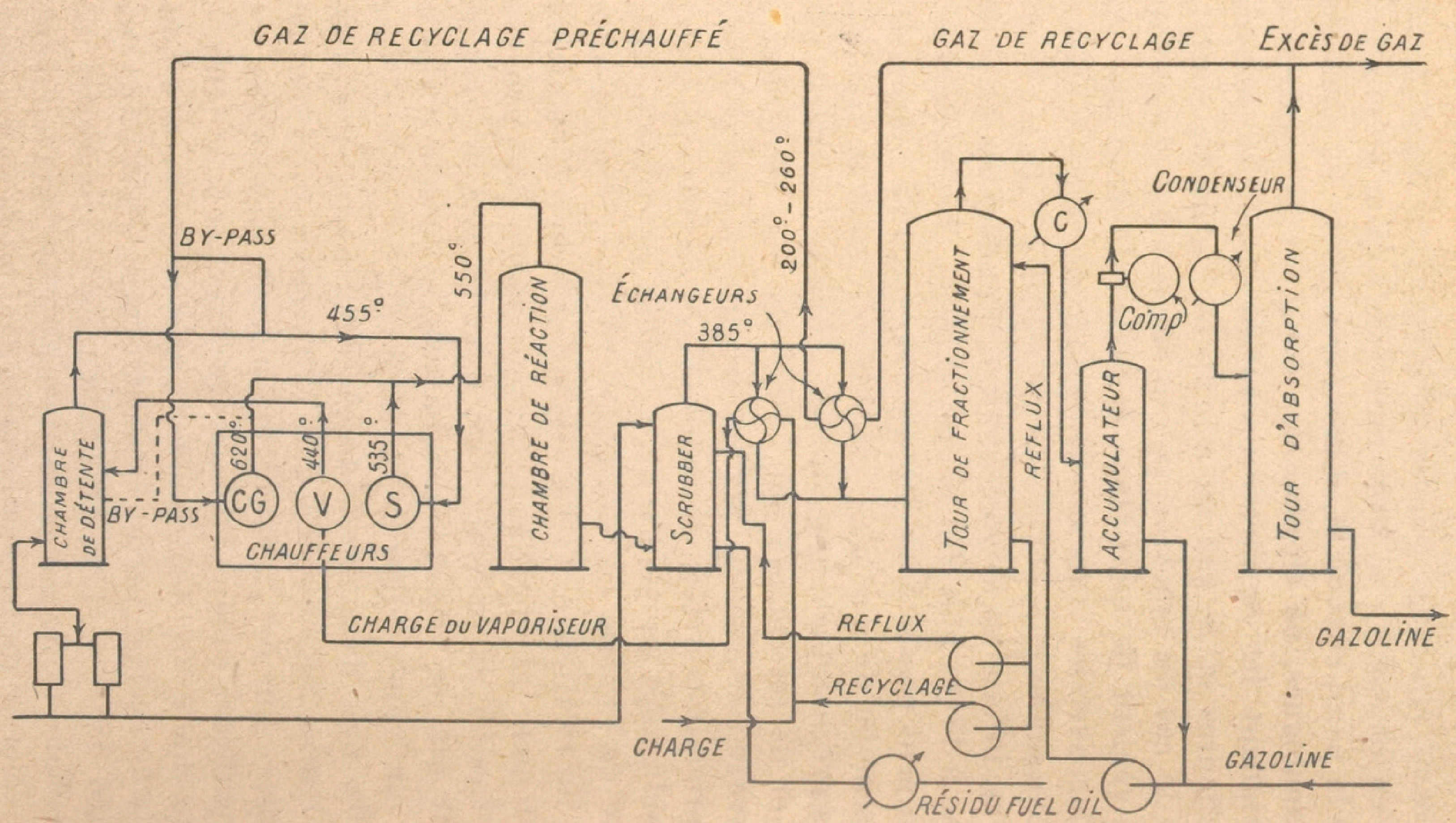


FIG. 18. — SCHÉMA DE CIRCULATION DANS LE PROCÉDÉ T.V.P.

rature de cracking. Dans le procédé Gyro on y parvenait en réalisant une lame mince de vapeur en contact avec la paroi chaude et, d'une façon générale, dans des cas analogues, on emploie des tubes de petit diamètre multipliant les surfaces d'échange entre les fumées chauffantes et le gaz ou la vapeur à chauffer ; mais, dans le cas du cracking, ce procédé normal a le grave inconvénient de multiplier les surfaces métalliques en contact avec les vapeurs chaudes et, par suite, le dépôt de coke sur les parois. Dans le dispositif T.V.P. le chauffage est interne et le coke produit, réparti dans toute la masse à l'état pulvérulent, est entraîné par les fluides.

On peut passer dans cet appareil du pétrole brut, du kérosène ou du gas oil ; si on emploie du brut, celui-ci, après préchauffage au moyen des chaleurs de condensation et de refroidissement, est dirigé sur une colonne de lavage traversée par les gaz craqués ; il y abandonne ses produits de tête qui suivent le circuit des gaz ; le résidu mêlé au condensat du laveur constitue le fuel, résidu de l'opération. Les gaz et vapeurs vont ensuite dans un rectificateur ; c'est dans cet appareil qu'arrive directement l'huile d'alimentation quand on passe du kérosène ou du gas oil ; c'est le condensat du rectificateur qui est envoyé au cracking. Il passe d'abord dans un vaporisateur à chauffage direct d'où il sort à 440°, puis dans une chambre de détente où se fait un premier mélange de gaz permanent, dit « gaz de cyclage », qui est à 620° ; le mélange passe dans un surchauffeur, encore à chauffage direct, où sa température monte de 455° à 535° ; une nouvelle addition de gaz de cyclage porte cette température à 550° avant l'entrée dans la chambre de réaction ; à la sortie de cette chambre, les gaz et vapeurs passent dans le laveur et la colonne de fractionnement dont nous avons déjà parlé ; ils subissent ensuite une condensation fractionnée

et les gaz sont comprimés et désessenciés par lavage avant leur recyclage ou leur envoi au gazomètre. La durée de séjour dans la chambre de réaction est de 2 minutes environ.

Une telle installation donne avec un brut dont 17 % passent avant 150° et 32 % avant 205° : 16 % d'essence de distillation, point sec 138°, nombre d'octane 60, et 59 % d'essence craquée, point sec 208°, nombre d'octane 73,5 ; leur mélange a un nombre d'octane de 72,5 ; on a 12 % de fuel-oil et 13 % de gaz et pertes.

Les essences obtenues en phase vapeur sont très peu sulfurées ; elles sont formées surtout d'oléfines et d'aromatiques ; leur impureté la plus gênante est constituée par les dioléfines qui, par oxydation à la lumière, donnent des gommes. On les élimine par polymérisation en les faisant passer à l'état de vapeur sur des terres activées. Le nombre d'octane élevé de ces essences a rendu intéressant le *reforming*, procédé dans lequel on fait passer au cracking les essences de topping pour les transformer en augmentant leur nombre d'octane.

On a également effectué le cracking en présence de catalyseurs, d'abord en phase liquide (procédé Mac Afee employant le chlorure d'aluminium et produisant surtout des hydrocarbures saturés), puis en phase vapeur (procédé Houdry, en plein développement aux États-Unis).

Liquéfaction des gaz du pétrole, gaz butane et propane. — Les gaz naturels dégagés dans les champs de pétrole, les gaz produits dans le cracking sont des mélanges d'hydrocarbures, — les uns permanents ou à bas point de liquéfaction, comme le méthane, le propane et l'éthylène, termes en C^1 et C^2, — les autres liquéfiables à la température ordinaire sous pression modérée, comme le propane C^3H^8, ayant une tension de vapeur

de 9,2 atm. à 25°, et le butane C^4H^{10}, ayant une tension de vapeur de 2,4 atm. à 25°. Un gaz naturel de pétrole contient, par exemple, en volume : carbure C^1, 79 % ; C^2, 5 % ; C^3, 6 % ; C^4, 4 % ; C^5, 6 %.

Les gaz de cracking, qui sont seuls utilisables en France, fournissent, par exemple, pour 1 mc. de kérosène craqué, 103 litres de propane et 106 litres de butane liquéfiés, pour 1 mc. de gas oil craqué, 63 et 86 litres. L'industrie du pétrole tire parti maintenant de ces gaz facilement liquéfiables et ils sont employés notamment comme succédanés du gaz de houille dans les régions où il n'existe pas de distribution de gaz de ville.

Quand il s'agit de mélanges de gaz, les procédés les plus couramment employés sont ceux qui servent également pour recueillir la gazoline ; on opère par compression et refroidissement du mélange ou par absorption au moyen d'un solvant constitué, dans le cas actuel, par de l'essence lourde, du gas-oil ou du pétrole ; l'absorption se fait, en général, sous une pression voisine de 5 kg.

En traitant un gaz contenant :

C^1 : 40,8 % C^2 : 22,9 % C^3 : 19 % C^4 : 12,3 % C^5 : 4,9 %

on obtient, par distillation fractionnée de l'huile ayant servi à la récupération, un liquide contenant :

C^1 : 0,1 % C^2 : 3 % C^3 : 21 % C^4 : 49,3 % C^5 : 26,8 %.

Lorsqu'il s'agit de stabiliser une essence, on lui fait subir une distillation fractionnée sous une pression de 10 à 15 kg. ; on a, par exemple, les résultats suivants :

	C^1	C^2	C^3	C^4	C^5	C^6
Essence à stabiliser.	1,02	4,88	13,93	26,41	21,63	32,10
Essence stabilisée .	—	—	0,68	32,68	26,82	39,80
Gaz de stabilisation.	5,36	26,86	67,58	0,2	—	—

Le butane s'est concentré dans l'essence stabilisée ; on détend celle-ci à une pression de 3 à 6 kg. et on la fractionne de nouveau ; le butane séparé est condensé

et stocké ; le gaz sous pression qui contient le propane est refroidi ; le liquide ainsi condensé qui contient le propane est envoyé à une nouvelle colonne qui travaille à 20/30 kg. par cmq. ; le propane, qui est ici l'élément le plus lourd, est recueilli liquide et stocké. On les débarrasse ensuite de leurs impuretés sulfurées par traitement à l'acide sulfurique et à la soude ; on les stocke sous pression dans des réservoirs cylindriques ou sphériques ; pour le butane, moins volatil, il est possible de le conserver dans des réservoirs calorifugés, à la température de —10° ; un procédé extrêmement ingénieux permet de maintenir cette basse température : une certaine quantité de butane est évaporée, ce qui fournit des frigories au réservoir ; le gaz formé, repris par un compresseur, refroidi et liquéfié, est réexpédié au réservoir.

Le butane est livré à la consommation domestique en bouteilles d'une contenance de 13 kg. Le propane a des emplois plutôt industriels ; il est distribué par canalisations ou livré en bouteilles de 40 kg., munies de détendeurs permettant d'alimenter directement les appareils d'utilisation, par exemple les fourneaux à gaz.

1 mc. de butane gazeux, d'une densité de 2 par rapport à l'air, a un pouvoir calorifique inférieur de 28 000/29 000 ca. (gaz de houille 4500/4700 ca.) ; 1 mc. de propane gazeux, d'une densité de 1,52, a un pouvoir calorifique inférieur de 21 500/22 200 ca. En fait, le butane commercial est un mélange de butane normal et d'isobutane avec une certaine quantité de butylènes. Les limites d'inflammabilité du butane sont très étroites (1,9 à 8,5 %), ce qui exige des brûleurs répartissant bien l'air primaire dans le gaz ; sa pression doit être assez élevée (20 gr.) pour entraîner la grande quantité d'air qui est nécessaire à sa combustion (31,1 mc. d'air par mc. de butane, contre 4,9 mc. d'air pour 1 mc. de gaz de houille).

Chapitre IX

LA COMBUSTION DANS LES MOTEURS
MOTEUR A EXPLOSION
MOTEUR A COMBUSTION INTERNE

La combustion dans les moteurs. — Toutes les combustions dont nous avons parlé jusqu'ici sont employées uniquement à élever la température de gaz, liquides ou solides, en vue, soit d'un simple chauffage (chaudières de chauffage central), soit de la formation de réactions chimiques (fours de l'industrie chimique, cokéfaction du charbon, etc.), soit de la production ultérieure de force motrice (chaudières avec machines à vapeur); leur caractéristique est de se développer à pression constante, le plus souvent à la pression atmosphérique. Or, depuis une soixantaine d'années se sont répandus des dispositifs dans lesquels les calories de la combustion sont transformées immédiatement en énergie mécanique : la première réalisation en avait été le moteur à poudre de Huyghens, constitué par un tube vertical dans le fond duquel la combustion d'une charge de poudre soulevait un piston dont les allers et retours auraient permis de monter une charge ; les dernières sont, après le moteur à gaz, le moteur à essence ou moteur à explosion et le moteur Diesel ou moteur à combustion interne ; ces deux moteurs sont à la base

du développement formidable de l'industrie du pétrole dans ces dernières années.

Dans ces appareils, les calories dégagées par la combustion sont l'aliment du moteur ; conformément au principe de l'équivalence mécanique de la chaleur, elles en déterminent la puissance, mais, en elles-mêmes, elles sont incapables d'aucun effet mécanique, et c'est par l'intermédiaire d'une pression exercée sur des organes mobiles qu'est produit le travail utile.

Les deux cycles des moteurs à explosion et à combustion interne comportent une compression de l'air préalable à la combustion ; cette compression, bien que très rapide, n'est pas complètement adiabatique, c'est-à-dire qu'elle comporte un certain transfert aux parois des calories dégagées dans les gaz par la compression ; on dit qu'elle est polytropique. Si r est le taux de compression, c'est-à-dire le rapport de la pression finale à la pression initiale, T_0 la température absolue initiale, γ le rapport de la chaleur spécifique à pression constante C_v, du mélange, à sa chaleur spécifique à volume constant, dans une compression adiabatique, la température T_1 atteinte en fin de compression adiabatique sera :

$$T_1 = T_0 \, r^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}$$

Si la compression est polytropique, elle sera donnée par la même formule, mais avec un exposant γ plus faible. Si C_v est la capacité calorifique à volume constant du gaz comprimé, l'énergie qu'il a reçue pendant la compression est mesurée par le produit :

$$C_0 \, (T_1 - T_0) = C_v \, T_0 \, (r^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1)$$

Il a fallu fournir en outre les calories absorbées par les parois et vaincre les forces de frottement. Si

on détendait maintenant le gaz au même rapport r sans en modifier au préalable la température, on reviendrait à la température initiale et, aux doubles pertes près, on récupérerait l'énergie fournie ; mais si, avant cette détente, on l'échauffe à une température $T_1 + K$, par exemple par une combustion, on aboutira, après détente, à une température

$$T_2 = (T_1 + K)\left(\frac{1}{r}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}$$

et, durant sa détente, le fluide aura fourni une quantité de travail qui, évaluée en calories, sera :

$$Co\,(T_1 + K - T_2) = C_v\,(T_1 + K)\left[1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}\right]$$

$$= C_v\left[T_0\, r^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} + K\right]\left[1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}\right]$$

Cette énergie est diminuée en raison des pertes thermiques et mécaniques ; elle est un peu plus grande du fait que la capacité calorifique moyenne augmente avec la température moyenne à laquelle elle s'applique et que, la combustion ayant incorporé le combustible au gaz, le nombre de molécules dans le gaz a augmenté ; en effet, le combustible comporte toujours de l'hydrogène qui donne deux molécules d'eau avec une seule molécule d'oxygène comburant ; finalement, le travail effectivement disponible sera :

$$C_v\,(T_0\, r^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} + K)\left[1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}\right]$$

$$- C_v\, T_0\,(r^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1) = C_v\, K\left[1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}\right]$$

Avec le degré d'approximation dans lequel nous nous trouvons, il est donc le même que si le gaz, porté

à la température K, subissait une détente au taux $\frac{I}{r}$;

C_vK représente l'énergie fournie au gaz par la combustion ; le rendement théorique est donc :

$$1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}$$

Il résulte de ces brèves considérations :

1. Qu'il faut fournir de l'énergie aux moteurs des types envisagés, avant d'en recevoir ; d'où nécessité du démarrage à la main ou par accumulateur ;

2. Que le rendement augmente quand *r* augmente, c'est-à-dire quand on augmente le taux de compression, bien que le travail négatif préalable augmente en même temps.

Quand il s'agit du moteur à explosion, fonctionnant normalement à l'essence, le combustible est mélangé à l'air au moyen d'un carburateur avant admission de l'air dans le cylindre et c'est le mélange ainsi préparé qui est comprimé, puis brûlé ; la combustion de ce mélange est très rapide : c'est, dans les conditions normales de fonctionnement, une déflagration.

Quand il s'agit du moteur à combustion interne, fonctionnant au gas-oil ou au fuel léger, l'air est comprimé seul ; le taux de compression est suffisant et la température atteinte assez élevée pour que, lorsqu'on injecte dans le cylindre le combustible, celui-ci s'enflamme à peu près immédiatement ; la combustion s'étale sur toute la durée de l'injection et se complète encore ensuite ; dans certains types de moteurs de petite puissance, les semi-Diesel, le taux de compression est trop faible pour provoquer l'auto-allumage et le combustible s'enflamme au contact de surfaces chauffées.

La combustion de l'essence ou du gas-oil, surtout

dans de l'air échauffé par la compression préalable, dégage des températures telles que l'acier fondrait si le phénomène était continu ; en fait, le fonctionnement du moteur n'est possible que grâce à la détente des gaz brûlés, qui abaisse très vite cette température, et à l'introduction d'air frais précédant une nouvelle compression ; la température des parois oscille périodiquement entre deux limites ; elles restituent à la cylindrée une partie des calories absorbées et transmettent les autres à l'extérieur, à de l'eau ou à de l'air de refroidissement.

Moteur à explosion. — Pour le moteur à explosion, la combustion s'opère vers la fin de la compression, au moment où, le piston arrivant à un point mort, sa vitesse s'annule avant de changer de signe ; le volume offert aux gaz varie très peu pendant cette période ; c'est pourquoi ce type de combustion, contrairement à tous ceux que nous avons examinés jusqu'ici, est dit à volume constant.

La pratique de l'automobile a rendu familiers les divers organes du moteur à explosion ; nous rappellerons que, fonctionnant suivant le cycle Beau de Rochas, il comporte 4 temps : dans un premier temps, le moteur aspire l'air carburé et en remplit la cylindrée ; dans un deuxième temps, il comprime le fluide dans le fond du cylindre qui constitue la chambre d'explosion ; vers la fin de sa course, l'étincelle d'une bougie provoque l'inflammation du mélange ; la température et la pression s'élèvent ; dans le troisième temps, le piston revient et les gaz se détendent en produisant le travail moteur ; enfin, dans le quatrième temps, le piston expulse du cylindre les gaz brûlés. Il n'y a donc qu'un temps moteur sur quatre ; il en résulte un handicap sérieux pour la puissance massique ou volumique du moteur,

qui est réduite au quart de ce qu'elle serait pour un moteur à vapeur à double effet, c'est-à-dire travaillant par les deux faces de son piston. Néanmoins, le moteur regagne, et bien au delà, cette déficience par l'absence de tout organe accessoire de chauffe du fluide, par la quantité de calories utilisables qu'on peut dégager dans un volume déterminé de cylindrée et, aussi, par son aptitude à une grande vitesse de rotation ; en effet, comme ce sont les gaz de la combustion qui servent de fluide moteur, la chaudière et l'alimentation en eau sont supprimées, ainsi que le condenseur ; l'ordre de grandeur du nombre de calories dégagées est d'une calorie par litre de cylindrée ; c'est un chiffre qui n'a été atteint et dépassé que par les moteurs à vapeur les plus modernes, dans lesquels la vapeur est utilisée à des pressions dépassant 150 atm. et des températures dépassant 500° ; enfin, leur rendement, c'est-à-dire le rapport du nombre de calories utilisables sur l'arbre du moteur au nombre de calories fournies, est excellent ; son maximum atteint actuellement 31 % et n'a été dépassé que par les plus récentes installations à vapeur dans lesquelles le rendement atteint 36 % (et même 40 %, pour le cycle à vapeur d'eau et vapeur de mercure de la *General Electric Co.*). Les seuls accessoires essentiels de ce moteur sont le carburateur, introduisant le combustible dans l'air, le radiateur, quand les parois des cylindres sont refroidies par l'eau, et le mécanisme d'allumage ; il n'exige qu'un seul approvisionnement, celui de combustible, puisqu'il trouve l'air comburant partout sur place. C'est grâce à ces diverses qualités, se traduisant par un poids suffisamment faible d'appareillage et d'approvisionnement par CV produit, qu'il a rendu l'aviation possible.

Dans les installations courantes, l'air aspiré par le moteur traverse d'abord le carburateur ; sous l'in-

fluence de la dépression provoquée par le moteur, du carburant est pulvérisé dans le courant d'air ; une partie se volatilise, le reste est entraîné sous forme de très fines gouttelettes. C'est ce mélange qui pénètre dans le cylindre par la soupape d'admission ; quand la température ambiante est élevée, le liquide peut se vaporiser plus complètement, diminuant ainsi le volume laissé à l'air ; il en résulte une perturbation de la carburation et du fonctionnement du moteur qui constitue le *vapor lock* ; un carburant aura d'autant moins tendance au vapor lock que sa tension de vapeur sera plus faible vers 35°-40° ; par exemple cette tension devra être inférieure à 500 gr. à 37°8. Quand la cylindrée est pleine, la soupape d'admission fermée, le piston revient et comprime le mélange ; la température et la pression montent simultanément et l'essence continue à se vaporiser ; on a cru pendant longtemps que, seuls, ces phénomènes physiques se produisaient pendant cette phase ; nous verrons plus loin qu'ils sont accompagnés de phénomènes chimiques de préoxydation, malgré la durée très brève de la compression. Le taux de compression, c'est-à-dire le rapport du volume initial au volume final, qui était, avec l'essence comme carburant, de 4 à 5, est passé, sur les moteurs d'aviation, à 7 pour ceux de fabrication courante, à 9 pour ceux de compétition, et à 10 pour ceux employant un carburant à 100 d'octane. Pour un certain angle de rotation avant que le piston n'arrive au point mort et qui constitue l'avance à l'allumage, un courant électrique alternatif, provoquant une étincelle entre les deux pôles de la bougie d'allumage, déclanche l'inflammation du mélange ; celle-ci se propage à partir de l'étincelle suivant une onde de déflagration séparant la zone en combustion de la zone encore intacte ; la température et la pression montent rapidement, mais, le piston ayant

dépassé le point mort haut, la détente commence, amenant le refroidissement de la masse gazeuse. Cette détente ne doit pas être trop tardive, c'est-à-dire que l'avance à l'allumage ne doit pas être trop grande, eu égard à la vitesse de rotation du moteur et à la rapidité de combustion du mélange gazeux, sinon il se produit une surpression faisant cliqueter les organes du moteur d'autant plus fort que les jeux entre pièces sont plus grands ; sous cette réserve, l'avance à l'allumage doit être aussi forte que l'on pourra, afin que, la température atteinte par la masse gazeuse étant aussi élevée que possible, on réalise le maximum de rendement. Un élément essentiel de la bonne marche du moteur est la vitesse de combustion du mélange, c'est-à-dire la vitesse de propagation de la flamme au sein de la masse gazeuse ; on admet en général que cette vitesse est proportionnelle à la racine carrée de la pression et qu'elle augmente suivant une exponentielle de la température ; si cette vitesse était trop faible, la combustion s'étalerait exagérément dans la détente et pourrait même être incomplète au moment de l'expulsion des gaz brûlés ; une combustion incomplète peut provoquer la formation de dépôts de carbone sur les parois ; ceux-ci résultent également de la présence et de la combustion imparfaite d'huile de graissage dans la cylindrée ; la présence de tels dépôts, appelés improprement calamine, gêne le refroidissement normal des parois du cylindre, use les surfaces portantes et nuit au bon fonctionnement des soupapes ; elle peut provoquer en outre des allumages prématurés.

La quantité de carburant qu'on peut brûler dans la cylindrée et, par conséquent, le nombre de calories qu'on peut y dégager sont proportionnels à la quantité d'air introduite, et on conçoit que, si cet air est comprimé au préalable, on en introduira davantage et on

augmentera la puissance du moteur ; un tel gain est très important pour l'avion, d'où l'idée d'annexer au moteur un compresseur et de suralimenter le moteur. D'après Ricardo, ce qui limite dans cette voie, ce n'est pas le comportement du carburant dont la déflagration tend à se transformer en explosion quand la compression finale de l'air carburé augmente, mais la résistance mécanique des organes ; l'augmentation de la compression agit peu sur la pression moyenne et, par conséquent, sur la fatigue moyenne des organes, mais beaucoup sur la valeur de la pression maxima ; avec un moteur ayant un taux de compression de 6,5, on pourrait, en passant d'un carburant à nombre d'octane 87 à un carburant à nombre d'octane 100, augmenter la pression moyenne de 52 % par suralimentation sans risquer la combustion explosive. Cette suralimentation est devenue indispensable quand on a voulu maintenir aux hautes altitudes la puissance des avions ; en effet, vers 6 400 m., la densité de l'air est la moitié de la densité au sol ; à 12 000 m., elle en est le quart et à 18 000 m. le dixième. C'est Rateau qui a résolu le premier le problème avec son turbo-compresseur alimenté par les gaz d'échappement ; on fait maintenant des compresseurs commandés directement par le moteur et qui pèsent une quarantaine de kg. pour des moteurs de 1 200 CV. Quand on suralimente le moteur, les carburateurs sont placés en général entre le compresseur et l'admission ; on évite ainsi, dans une certaine mesure, le givrage du carburateur, résultant du refroidissement provoqué par l'évaporation de l'essence dans le carburateur.

Cognement. Nombre d'octane du carburant. Antidétonants. — Nous avons vu que le rendement du moteur à explosion augmente avec le taux de compres-

sion ; quand ce dernier passe de 6 à 12 et à 18, le rendement théorique passe de 51 % à 63 % et à 68 % ; il y avait donc intérêt à augmenter ce taux le plus possible ; on était limité dans cette voie par l'accroissement de température du mélange par la compression, car, si on atteignait le point d'inflammation du carburant, ce dernier, réparti dans tout le volume d'air, provoquerait une détonation brisante. Voici, d'après Tausz et Schulte, les températures d'inflammation de divers combustibles sous des pressions croissantes :

	Températures d'allumage.				
Atmosphères absolues	5	7,5	10	15	25
KÉROSÈNE	328	294	256	223	202
ESSENCE	333	327	309	285	265
BENZOL	—	657	585	525	483

Mais, déjà avant ce taux de compression limite, on constatait l'apparition dans la marche du moteur de cognements préjudiciables à son bon fonctionnement ; l'alcool, le benzol permettaient des taux de compression plus élevés que l'essence, et leur mélange à l'essence en améliorait le fonctionnement à ce point de vue. On conçoit qu'on puisse avoir tous les intermédiaires entre la combustion régulière et la détonation affectant toute la masse carburée.

En raison de l'importance considérable pour l'aviation d'une amélioration du rendement, cette question a donné lieu à une multitude de recherches.

Le phénomène important dans les cognements est le phénomène mécanique, la montée plus ou moins rapide en pression, mais il est conditionné par les phénomènes chimiques qui précèdent ou accompagnent la combustion.

D'après M. l'Inspecteur général des Mines Jouguet, grand spécialiste de l'onde explosive, découverte par Berthelot et Vieille, le changement de constitution du mélange carburé peut s'accomplir suivant deux modes de propagation de la flamme : par détonation ou par déflagration, mais, dans les deux cas, la flamme constitue une onde de choc et la combustion n'est possible que grâce aux vitesses énormes que peuvent atteindre les réactions.

Le domaine des détonations correspond à des pressions élevées, immédiatement en arrière du front de la flamme et à une grande vitesse de propagation ; la variation de pression et la vitesse sont beaucoup moindres dans le domaine des déflagrations. Ces deux modes de propagation ont chacun une formule stable : l'onde explosive et l'onde régulière de déflagration.

La propagation de l'onde explosive se fait à des vitesses de l'ordre de milliers de mètres (1 800 mètres par seconde pour le mélange $2H^2 + O^2 + 4N^2$ initialement à la pression normale et à la température de 15°) ; elle est plus rapide que la vitesse du son ; aussi aucun ébranlement mécanique ne peut-il la précéder ; les gaz brûlés se déplacent eux-mêmes derrière la flamme qui, par rapport à eux, a une vitesse égale à la vitesse du son dans ces gaz ; pour l'exemple considéré, ces gaz ont une vitesse de 800 m. ; la pression au passage de l'onde atteint 14,4 atm. et la température 2 300°. La pression n'est donc pas excessive et les effets mécaniques constatés sont surtout imputables aux vitesses élevées de propulsion des gaz brûlés.

Au contraire, la vitesse de l'onde de déflagration est toujours très notablement inférieure à la vitesse du son et elle provoque un ébranlement mécanique en avant de la flamme, appelé par M. Taffanel « chasse préalable ». Dans le cas de la déflagration, la pression reste uniforme dans la cylindrée, mais il n'en est pas de même pour la température, plus élevée suivant l'axe de la cylindrée qu'au contact des parois refroidissantes ; cette différence de température, accentuée par la compression, pourrait atteindre et dépasser 500°, d'après MM. Véron et Ribaud.

Les deux modes de combustion étant ainsi nettement caractérisés, l'état préalable du mélange carburant dans lequel avance l'onde de déflagration peut intervenir dans le passage de l'un à l'autre ; dans cet ordre d'idée, on constate que, si on chauffe un mélange d'hexane et d'air, la pression monte régulièrement ; elle s'infléchit à 150°, et repart à 220°, pour aboutir à 260° à l'inflammation spontanée, si les proportions d'air et de combustible sont convenables. L'infléchissement de la pression est caractéristique de l'apparition de réactions chimiques endothermiques et il s'agit d'un phénomène général pour les carburants ; Mondain-Monval et Peletier, en se servant d'un moteur commandé électriquement, ont extrait les gaz de la cylindrée après compression sans allumage, et y ont constaté la présence de peroxydes d'alcoyles ; l'intensité des réactions croît avec le taux de compression ; du condensat de ces gaz on extrait deux couches liquides, l'une formée par de l'essence contenant peu de ces peroxydes, l'autre par de l'eau contenant 5 % en poids d'oxygène actif ; une goutte de ce liquide aqueux introduite dans l'alimentation d'un moteur fonctionnant normalement provoque une violente détonation.

Quant à la combustion elle-même, elle a été étudiée

dans des tubes de 15 à 30 mm. de diamètre par Laffitte. Si la flamme se propage dans un mélange susceptible de détoner, sa vitesse s'accélère jusqu'à la détonation, passant brusquement de centaines à des milliers de mètres par seconde ; si le mélange n'est pas susceptible de détoner, la vitesse s'accélère d'abord, par exemple à 10/20 m., puis elle ralentit à 2/3 m., puis elle repart et prend un caractère vibratoire au bout du tube ; toute agitation, tout étranglement, etc., accroissent la vitesse, et l'expérimentateur a pu arriver ainsi, sans détonation, à des vitesses de 1 600/2 000 m. ; or, bien que dans un moteur les conditions soient peu favorables à de telles accélérations, Sokolio a pu y constater des vitesses de 2 000 m. qui ne peuvent s'expliquer que par des chasses de gaz chaud en avant de la flamme, provoquant l'inflammation rapide de toute la cylindrée.

Enfin, la combustion a pu être photographiée dans le moteur lui-même par Withrow et, dès 1927, par M. Duchêne. Ce dernier emploie une chambre cylindrique de combustion prolongeant la cylindrée d'un moteur ; cette chambre porte une fente longitudinale fermée par une glace ; un film porté par un tambour se déroule devant un objectif photographique et enregistre, avec son intensité, la lumière de la flamme et sa progression dans le cylindre ; l'avancement est proportionnel aux ordonnées, le temps aux abscisses ; 1 milliseconde est représentée par 12 mm. de longueur du film ; dans ces épreuves, on constate que la réaction produit d'abord une luminescence, ou flamme froide, suivie d'un ralentissement, puis d'une montée rapide en pression. L'inflammation provoque la libération de ces radicaux actifs = C =, CH, dont le rôle général, mis en lumière par Victor Henry, est de provoquer des réactions chimiques accélérées. Leur présence fugitive se constate par leurs raies caractéristiques

apparaissant dans la lumière dégagée par l'inflammation.

Ces recherches d'ordre scientifique, dont les conclusions sont nécessairement fragmentaires, en raison de la complexité du phénomène, se sont accompagnées de recherches pratiques en vue de trouver des carburants permettant des taux élevés de compression. Un carburant particulièrement indétonant est l'isoctane, et on a pris l'habitude de lui comparer les divers carburants au point de vue de leur aptitude à la détonation. Il faudrait une méthode applicable à tous les combustibles et ayant même signification pour tous les moteurs ; en réalité, on a adopté une méthode empirique ne donnant aucun renseignement sur les causes qui déterminent le degré d'indétonance du carburant.

Les premiers travaux sur la question après ceux de Ricardo ont été les travaux de la *Cooperative Fuel Research* ; elle emploie un moteur monocylindrique, avec soupape en tête et dont le taux de compression peut être modifié par déplacement du cylindre par rapport au piston ; un diaphragme élastique se trouve placé dans le fond de la culasse ; une tige qui repose librement sur ce diaphragme peut, par ses déplacements, fermer un circuit électrique ; lorsque la détonation apparaît, le diaphragme se déforme, la tige saute et le circuit est fermé d'autant plus longtemps que la détonation est plus forte ; on réalise ainsi un *knock meter*. Le dispositif porte le nom de *bouncing-pen*, ou « aiguille sauteuse » de Midgley. Pour favoriser le cognement, la vitesse du moteur n'est que de 600 tours à la minute, l'eau de la chemise est portée à l'ébullition. Pour essayer un carburant, on l'emploie avec une certaine ouverture de gaz et une certaine avance à l'allumage ; on recherche la richesse de gaz donnant le maximum de cognement ; on recommence ensuite avec la

même ouverture et la même avance, chaque fois la richesse étant celle qui donne le maximum de cognement ; on recherche quel est le pourcentage d'isoctane qu'il faut ajouter à de l'heptane pour avoir la même intensité de cognement qu'avec le carburant essayé : ce pourcentage est le nombre d'octane.

La méthode a été modifiée en 1932 pour les moteurs d'aviation, la vitesse est portée à 900 tours, la température du mélange à l'admission est à 127°, au lieu de la température ambiante.

La sévérité de l'épreuve a été renforcée dans la *Motor Method* ; la température de l'air a été portée à 150° et, au lieu de rechercher le maximum de détonation, on a pris comme intensité standard celle que donne au taux de compression de 5,3 une essence à 65 d'octane.

Enfin, dans l'*U.S. Army Method*, on opère avec un moteur tournant à 1 200 tours, le détecteur étant un couple thermoélectrique. La première méthode est la plus employée ; la dernière sert aux essais des carburants de l'armée et de la marine américaines.

On a proposé de substituer au moteur monocylindrique un moteur polycylindrique permettant de tenir compte des irrégularités de la pratique, mais on invoque en faveur du monocylindrique la grande expérience qu'on en a, le coût modique des essais et la possibilité de percevoir le bruit à l'oreille ; c'est d'ailleurs ce dernier mode de détection qui est le plus employé en Angleterre.

M. Champsaur a mis au point, d'autre part, un procédé thermique de mesure du cognement ; il est basé sur le fait que la mesure des quantités de chaleur reçues par l'eau de refroidissement différenciait les combustibles, suivant leur nombre d'octane, parce que le phénomène de la détonation s'accompagne d'une élévation de la température des parois du cylindre qui

transmettent alors plus de chaleur à l'eau ; on peut ainsi classer le carburant en employant le moteur même qui sera destiné à l'utiliser. La détermination se fait en se plaçant dans des conditions identiques de régime pour le carburant en essai et pour le témoin, et en choisissant ce témoin de façon qu'il donne la même différence de température pour l'eau de refroidissement à son entrée et à sa sortie du moteur. Les résultats sont tout à fait comparables à ceux de la méthode américaine.

Ce sont les carbures éthyléniques qui se sont révélés les plus indétonants, et il en est résulté une véritable révolution dans l'industrie du pétrole au profit de ces carburants et aux dépens des carbures saturés. L'alcool et le benzol, les cétones, l'isoctane, l'éther isopropylique augmentent également l'indétonance des mélanges.

L'industrie a été conduite à rechercher des substances qui, ajoutées en très petites quantités à l'essence, en augmentent notablement le pouvoir antidétonant ; les plus actives ont été le fer carbonyle, employé surtout en Allemagne, et le plomb tétraéthyle $Pb\,(C^2H^5)^4$, fabriqué et répandu par l'*Ethylgazoline Corporation* ; ce liquide huileux, extrêmement toxique, très détonnant à haute dose, agit, à des doses extrêmement faibles, comme un puissant antidétonant ; l'addition de 0,4/1000 de cette substance à l'essence peut augmenter d'une dizaine de points le nombre d'octane ; c'est en l'ajoutant à des essences ayant déjà un nombre d'octane très élevé qu'on arrive aux essences à 100 et plus d'octane, recherchées pour l'aviation. On l'emploie mélangé à 35,7 % de bromure d'éthyle, pour que, dans le cylindre, le plomb soit libéré sous forme de bromure assez tendre pour ne pas rayer les cylindres. C'est Thomas Midgley qui en a découvert les propriétés et préconisé l'emploi

en 1922 ; c'était alors une curiosité de laboratoire ; en 1938 sa fabrication s'est élevée à 40 000 t. On le prépare en traitant en autoclave à 4,5 kg. de pression un alliage de plomb à 10 % de sodium par le chlorure d'éthyle.

Moteur à combustion interne. — C'est en 1892 que l'ingénieur allemand Rudolph Diesel entreprit les recherches qui devaient le conduire au moteur à combustion interne, et en 1895 qu'il réalisa son premier appareil donnant un rendement de 33 %, double de celui que réalisaient les meilleures installations à vapeur de l'époque.

Les moteurs à combustion interne se classent en deux groupes : les *moteurs à quatre temps*, dans lesquels, après la détente, le piston expulse les gaz brûlés et aspire l'air frais, et les *moteurs à deux temps*, dans lesquels, en fin de détente, une pompe de balayage remplace dans la cylindrée les gaz brûlés avant que la compression ne recommence. Leurs rendements sont à peu près équivalents et peuvent atteindre actuellement 36 % ; ces valeurs sont plus élevées que pour le moteur à explosion, parce que, le taux de compression étant beaucoup plus grand, la détente est poussée assez loin pour que les gaz sortent du moteur à température relativement basse, voisine de 350°.

Afin d'assurer une combustion complète, la quantité d'air admise est surabondante et peut aller jusqu'au double de la quantité nécessaire théoriquement ; l'inconvénient correspondant ne résulte pas du travail supplémentaire de compression, récupéré en grande partie à la détente, mais de l'abaissement de la température maxima atteinte par la masse gazeuse, qui conduit à une réduction du rendement. La diminution de l'excès d'air résultera de deux facteurs :

La perfection de l'injection : celle-ci devra pulvériser le liquide aussi finement que possible ; on a d'abord pratiqué l'injection au moyen d'air comprimé à 40/70 kg., puis on a obtenu une régularité beaucoup plus grande avec l'injection dite mécanique ou solide, effectuée au moyen d'une pompe ; ce dispositif est devenu

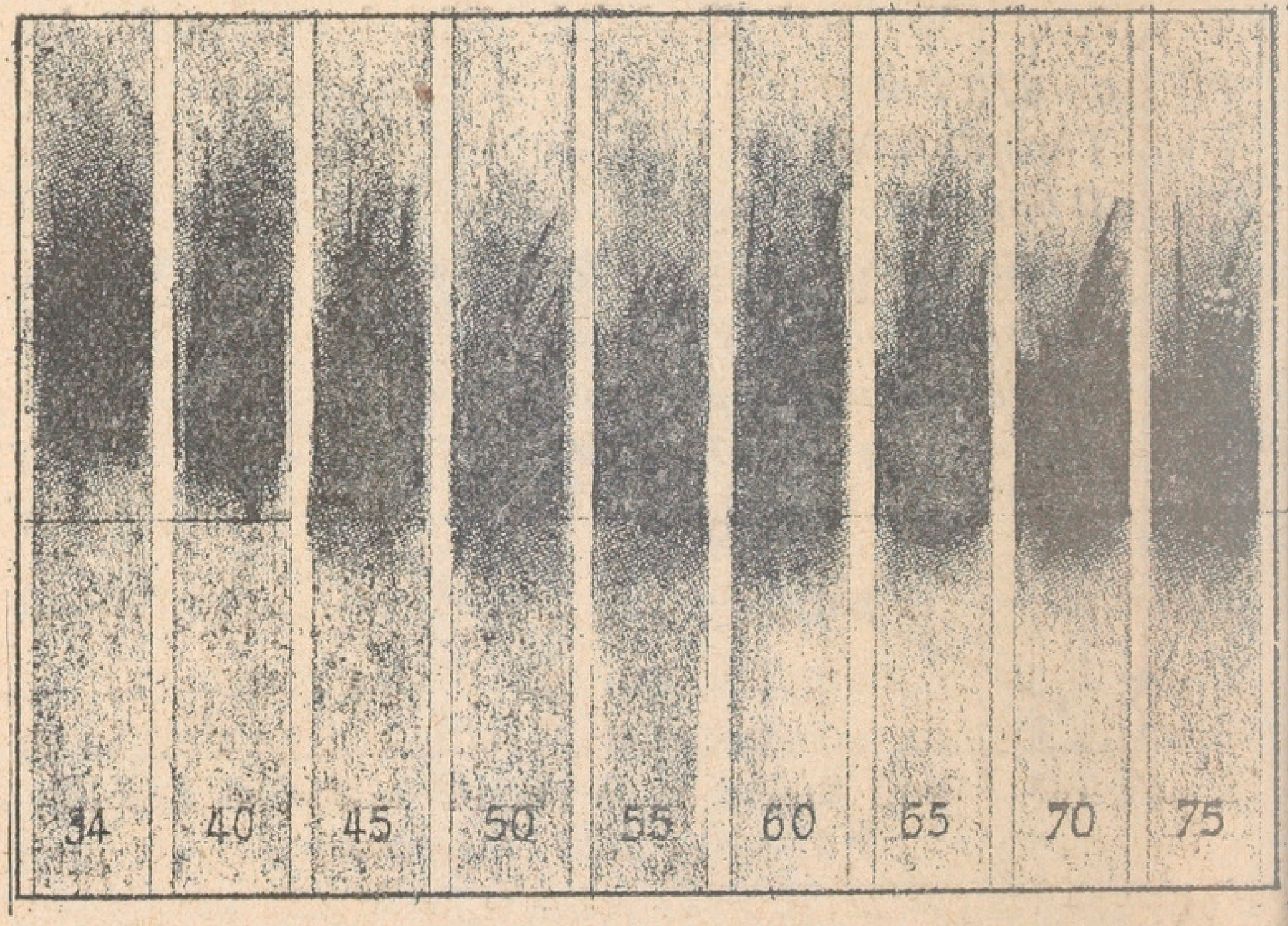


FIG. 19. — FLAMMES DE NEUF COMBUSTIBLES PAR RAPPORT AU POINT MORT DÉTERMINANT LE NOMBRE DE CÉTÈNE.

assez précis pour qu'on commence à l'appliquer aux moteurs à explosion de l'aviation ; toutefois, pour ces moteurs, cette injection se fait encore dans la pipe d'admission d'air et remplace simplement le carburateur ; cependant on envisage dès maintenant de la pratiquer dans le cylindre, comme pour le Diesel ; mais la température de l'air, beaucoup moins élevée dans le moteur d'avion que dans le Diesel, le temps

beaucoup plus court dont on dispose, à cause de la plus grande vitesse de rotation, obligent à perfectionner cette injection pour assurer une bonne combustion de l'essence, malgré l'absence de mélange préalable à l'air ;

La nature même du combustible : dans cet ordre d'idées, sa qualité essentielle est le délai d'allumage, c'est-à-dire le laps de temps qui s'écoule entre le début

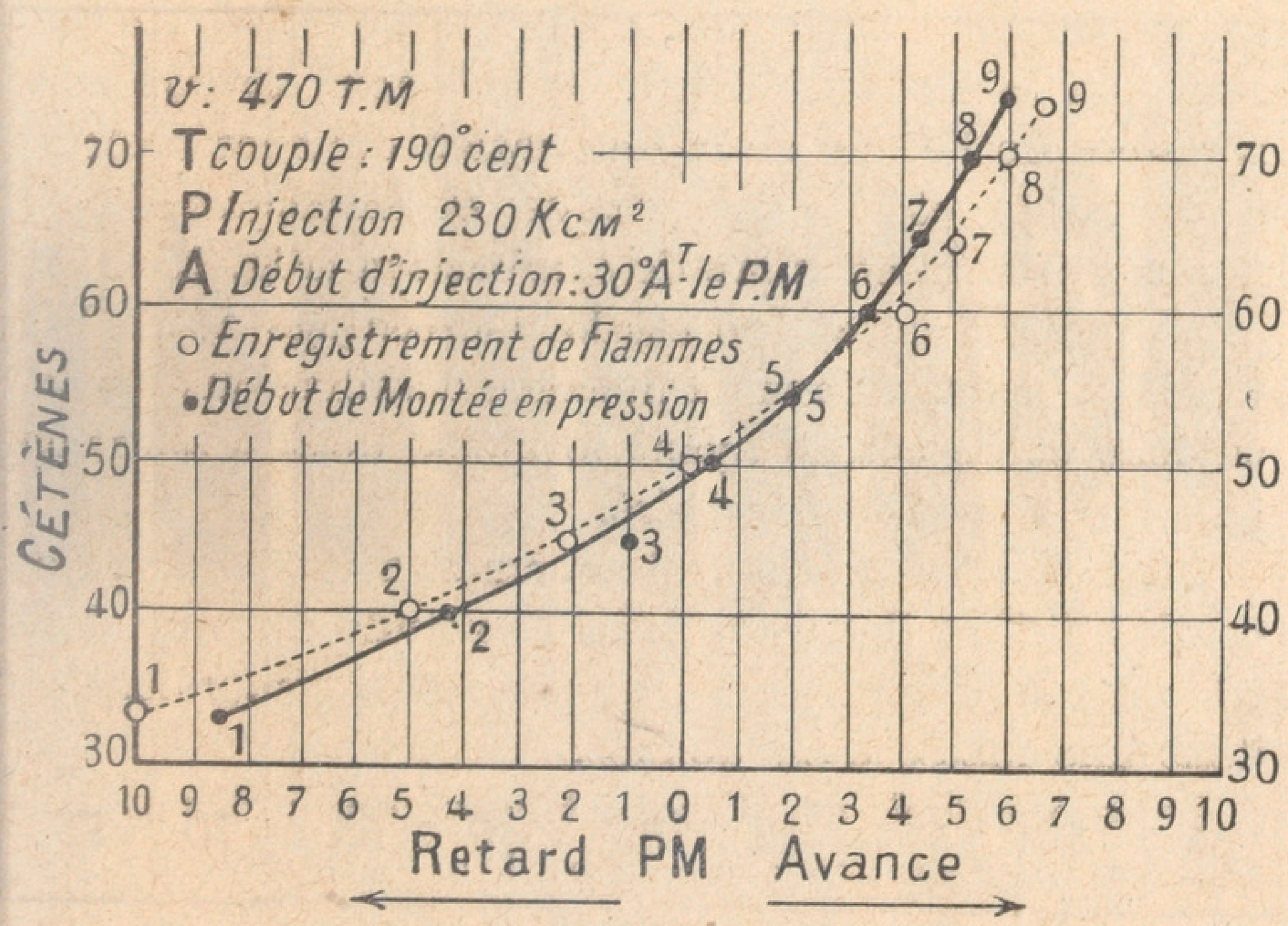


FIG. 20. — DÉTERMINATION DES NOMBRES DE CÉTÈNE PAR LES AVANCES FLAMMES ET PRESSIONS.

de l'injection, instant où la soupape d'injection, ayant décollé, commence son ascension rapide, et le commencement de la combustion franche, instant où la montée en pression devient rapide. Cette qualité est caractérisée par le « nombre de cétène » de l'huile. Le délai d'allumage se mesure par comparaison avec une huile type, soit de façon que l'allumage se produise toujours au même point de la course du piston (au point mort haut, ou à 12° de rotation après) et en no-

tant les positions où doit commencer l'injection pour obtenir ce résultat, soit de façon que l'injection commence au même point, en notant les positions où commence l'allumage, soit en faisant commencer l'injection au même point et, avec un moteur à compression variable, en faisant varier le taux de compression de façon à avoir toujours le même délai d'allumage. On peut également employer pour cette détermination le dispositif Duchêne que nous avons décrit à propos de l'étude de la détonation dans les moteurs à explosion et qui permet de cinématographier la flamme dans la chambre de combustion (Fig. 19 et 20).

Le nombre de cétène est le pourcentage de cétène, C_{10} H_{32}, contenu dans un mélange d'aniline ou de mésithylène et de cétène ayant le même délai d'allumage que le combustible considéré.

Le délai d'allumage varie comme la température de combustion et il mesure bien l'aptitude d'un combustible à brûler rapidement et, par suite, complètement, dans une masse d'air donnée.

Le combustible du Diesel est beaucoup moins inflammable que l'essence et, comme l'incendie est toujours le danger le plus grave auquel soit exposé l'avion, on s'efforce depuis plusieurs années de réaliser un moteur Diesel léger à grande vitesse, adaptable à l'avion ; en France, c'est M. Clerget qui est à la tête de ces recherches ; en Allemagne, plus de 1 500 moteurs Junkers, type Jumo, d'une puissance maxima de 600 CV, d'un poids de 520 kg., ont été mis en service et 500 mis en fabrication à la fin de 1937.

CHAPITRE X

LES CARBURANTS DE REMPLACEMENT LE CARBURANT NATIONAL. — SYNTHÈSE DES CÉTONES PAR FERMENTATION

Les carburants de remplacement ; le carburant national. — Nous avons vu l'importance primordiale prise par le pétrole dans ces quarante dernières années. Or le fait qu'il est entre les mains des Anglo-Saxons devait inciter les autres pays à lui trouver des succédanés pour la carburation ; il y allait, pour ces pays, de la sécurité de leurs approvisionnements en cas de guerre et de l'équilibre de leur balance commerciale ; d'autant plus qu'on annonce périodiquement l'épuisement des réserves mondiales de pétrole. En Allemagne, une solution très substantielle a été trouvée dans les produits de la distillation des charbons : benzol et gaz de houille comprimé, dans l'hydrogénation des charbons, des lignites et des goudrons, enfin dans l'exploitation du pétrole du Hanovre. En Italie, on s'efforce de développer la distillation et l'hydrogénation des lignites et de tirer parti des pétroles d'Albanie. En France, l'effort entrepris tout de suite après la guerre de 1914-1918 a porté sur la création d'un carburant national à base d'alcool.

Si on examine l'ensemble de nos ressources natio-

nales, l'alcool apparaît d'ailleurs comme un combustible dont la production peut être suffisamment développée pour constituer une source importante et complètement autonome de carburant ; mais, dans l'état actuel de sa production, toutes les quantités fabriquées seraient réservées en temps de guerre au Service des Poudres, si bien qu'il ne nous apporterait, dans une telle éventualité, ni sécurité de notre ravitaillement, ni allégement de nos importations. Il n'en reste pas moins qu'il est, en France, le carburant le plus employé après l'essence, et, d'ailleurs, en mélange avec celle-ci.

Deux nombres caractérisent la puissance énergétique d'un carburant. Le premier, qui en représente la valeur au kg., est, d'après Ricardo, son pouvoir calorifique inférieur augmenté de sa chaleur latente de vaporisation : il faut prendre le pouvoir calorifique inférieur, parce que le carburant brûle dans le moteur sans condensation de l'eau formée, et il faut y ajouter la chaleur de vaporisation, parce qu'il se vaporise avant la combustion en empruntant des calories aux parois (en fait, il en emprunte aussi à l'air, et celles-là ne devraient pas entrer en ligne de compte) ; on caractérise ainsi la quantité d'énergie qu'il fournit au moteur par kg. Pour l'essence, dont la chaleur de vaporisation est de 70 ca., ce nombre est de 10 750 ca. Pour le benzol, dont la chaleur latente est de 95 ca., ce nombre est de 9 695 ca., inférieur de 10 % à celui de l'essence. Pour l'alcool, dont la chaleur latente est de 220 ca., ce nombre est de 6 720 ca., inférieur à celui de l'essence de près de 40 %.

Le second, qui détermine la puissance développée par le moteur avec le carburant ou la quantité de calories qu'on peut introduire dans la cylindrée, c'est le nombre de calories contenues dans un mètre cube d'air carburé à la proportion correspondant exactement à

la combustion complète, et on trouve que ce nombre est voisin de 860 ca. pour l'essence, le benzol et l'alcool ; par ailleurs, Ricardo a prouvé définitivement que, pour ces divers carburants, le rendement à taux de compression égal est le même. D'après Tizard et Pye, il est donné par les deux formules suivantes, en fonction du taux de compression, la première : $R = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{0,258}$ pour la carburation au dosage de la combustion complète, et la seconde : $R = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{0,298}$ pour le mélange à rendement maximum (renfermant un excès d'air de 20 % pour l'essence). Or, à l'époque héroïque du carburant national, on ne dépassait pas avec l'essence un taux de 4,5/5, le taux de 4 étant le plus fréquent ; avec l'alcool on pouvait atteindre sans risque de cognement le taux de 7,5, et, en passant de 4 à 7,5, le rendement augmentait de 40 % ; par rapport à l'essence, les 6 720 ca. de l'alcool en valaient 9 400 et n'étaient plus inférieures que de 10 % à celles de l'essence ; il n'en est plus de même aujourd'hui, à cause des taux de compression qu'il est possible d'employer avec l'essence, et, si la puissance du moteur reste équivalente, la quantité d'alcool nécessaire pour effectuer le même travail est bien supérieure de 40 % à la quantité d'essence nécessaire.

Actuellement, l'alcool n'est consommé qu'en mélange avec l'essence, et ces mélanges ont été répartis par la Régie en trois catégories :

a, l'essence tourisme, dans laquelle la proportion d'alcool en volume varie de 11 à 15 % d'essence ;

b, le mélange appelé carburant national, dans lequel la proportion d'alcool varie de 15 à 105 % d'essence et qui doit être vendu coloré en rose ;

c, le carburant poids lourd contenant 25 à 35 %

d'alcool ajoutés à 100 litres d'essence poids lourd.

Ces chiffres varient d'ailleurs suivant les disponibilités annuelles en alcool.

Ce dernier est employé à l'état d'alcool absolu, obtenu à partir d'alcool à 95°, soit en faisant passer ses vapeurs sur de la chaux vive, soit en les faisant barboter dans de la glycérine qui est ensuite déshydratée, soit encore en traitant en contre-courant, dans une colonne de rectification, un mélange d'alcool et d'un liquide dissolvant l'alcool absolu, par du carbonate de potasse qui s'hydrate et se liquéfie. Actuellement, l'État, qui reprend l'alcool aux particuliers, le fait déshydrater avant de le livrer aux pétroliers.

Les autres carburants d'origine nationale qu'on peut ajouter à l'essence sont le benzol, dont nous avons déjà parlé, et l'huile de houille distillant avant 250°. Mais les très faibles quantités dont on peut disposer ne les rendent intéressants que pour de petits distributeurs qui, dans le fatras des autorisations, des réserves et des interdictions qui régissent notre marché des carburants, trouvent parfois, avec eux, le moyen de constituer des mélanges légèrement plus avantageux pour eux que les mélanges d'emploi courant. On utilise également l'alcool méthylique, dont nous parlerons à propos des carburants de synthèse.

Enfin, parmi les carburants de remplacement, on peut citer deux combustibles gazeux : le gaz de ville comprimé et le gaz de gazogène.

Le gaz comprimé peut être livré par les cokeries ou par les usines à gaz ; dans ces dernières, il est souvent fabriqué avec du charbon importé et il est alors national dans la même mesure que l'essence raffinée en France à partir de pétroles bruts étrangers. Le pouvoir calorifique du gaz, après la compression qui le débenzole partiellement, est de 4 300 ca. en général, et un mètre

cube de cylindrée au dosage théorique de la combustion complète dégagera environ 700 ca., au lieu de 860 pour l'essence. Il en résulterait une baisse de puissance de 20 % pour un moteur passant de l'essence au gaz, si une homogénéité plus grande du mélange carburant ne réduisait cette chute à 12 % en dégageant les calories plus vite et plus complètement ; d'autre part, l'air carburé au gaz supporte un taux de compression de 8, tandis que les moteurs de camions fonctionnant à l'essence n'ont encore qu'un taux de 5 ; si on profite de cette possibilité offerte par le gaz, on augmente la puissance de 21 %, ce qui compense le pouvoir calorifique moindre de la cylindrée. Le gaz de ville constitue donc un excellent carburant, mais il faut en assurer la distribution et, en conséquence, le comprimer dans des stations-services rechargeant les bouteilles des véhicules. Jusqu'en 1938, il était interdit en France de comprimer dans les stations le gaz carburant à plus de 250 kg. ; dès maintenant, des pressions de 350 et 400 hectopièzes sont autorisées. Une station de compression type comporte un compresseur de 200 mc./heure et une batterie permettant de stocker 7 mc. de gaz comprimé ; la compression à 250 kg. prend environ 1/3 de kwh. par mc. de gaz à comprimer. Une telle station doit, pour subsister, pouvoir alimenter au moins 20 véhicules. En 1938, il existait 200 véhicules en service dans le Nord, 40 véhicules en service à Paris, 20 à Lyon, quelques-uns à Montpellier, Toulon et Saint-Raphaël, mais il semble que ce mode de carburation soit sur le point de se développer ; l'importance de l'industrie qui l'alimente le justifierait amplement, puisqu'en France la production du gaz de ville est de 1 milliard et demi de mètres cubes, et celle du gaz de cokerie de 2 milliards et demi de mètres cubes, dont chacun équivaut à environ 0,600 l. d'essence.

Le gaz de gazogène, qui n'exige pas d'installations spéciales de distribution, s'est répandu plus vite ; pourtant, son pouvoir calorifique ne dépasse pas 1 100 ca. au mètre cube et le nombre de calories par mc. de cylindrée est de l'ordre de 580 ; il en résulte que, par rapport à l'essence, la puissance des moteurs l'employant diminue de 38 % et, si on pousse à 8 le taux de compression, encore de 20 % ; cette réduction est particulièrement gênante en côte ; elle diminue également le poids utile transporté. Le meilleur remède paraît être de suralimenter le moteur par compression préalable de l'air. Malgré cet inconvénient, le gaz de gazogène procure une économie de 15 % sur la tonne kilométrique par rapport aux camions à Diesel ; 1 litre d'essence est remplacé par 1,2 à 1,4 kg. de charbon de bois et 1 kg. de carbonite.

Les carburants de synthèse. — La fabrication des carburants de synthèse part soit du charbon, soit des produits qu'on tire de sa gazéification (oxyde de carbone), ou de sa distillation (goudron), soit des résidus lourds du traitement des hydrocarbures naturels (fuels de topping ou de cracking), soit même des gaz de cracking convenablement polymérisés. Elle a pour but l'obtention d'hydrocarbures plus légers, constituant une essence de synthèse,et elle procède par hydrogénation des produits primitifs ; le premier problème qu'elle a donc à résoudre, c'est la production économique de l'hydrogène.

Production de l'hydrogène. — On peut obtenir ce gaz par électrolyse de l'eau, par la fabrication du gaz à l'eau et la conversion du gaz à l'eau, par le traitement du gaz de fours à coke, par la distillation d'agglomérés d'anthracite, enfin par la conversion du méthane et de ses homologues.

L'électrolyse de l'eau n'est employée industriellement que dans les pays où l'énergie électrique est à très bon marché ; c'est ainsi qu'à Rjukau, en Norvège, une usine produit 25 000 mc. d'hydrogène à l'heure.

Le gaz à l'eau obtenu suivant la réaction théorique $C + H^2O = CO + H^2$, contient en général 52 % d'hydrogène en volume, 35 % de CO, le solde étant formé de CO^2, N^2 et de carbures divers ; nous avons vu que cette fabrication est intermittente, car la réaction est endothermique et il faut réchauffer périodiquement le gazogène en remplaçant la vapeur d'eau par de l'air. On peut, dans le cas actuel, la rendre continue en insufflant dans le gazogène un mélange d'oxygène et de vapeur d'eau ; pour que le bilan thermique soit positif, il faut que la production finale du CO dépasse les deux tiers du total. C'est ainsi qu'on opère, par exemple, à Leuna, en Allemagne, dans l'usine d'hydrogénation des lignites et de leurs goudrons. On convertit ensuite le mélange $CO + H^2$ d'après la réaction :

$$CO + H^2 + H^2O = CO^2 + 2\,H^2$$

Cette réaction exothermique se fait vers 450° sur un catalyseur approprié ; on enlève ensuite le gaz carbonique en faisant passer le mélange sous 30 atm. de pression dans de l'eau qui dissout ce gaz et laisse l'hydrogène. Ce procédé est appliqué notamment à l'usine d'ammoniaque synthétique de Toulouse, mais on ne l'emploie que lorsqu'on ne dispose pas de gaz de fours à coke ; en effet, ce dernier gaz, considéré comme un sous-produit des cokeries, est d'un prix de revient assez bas pour que l'hydrogène qu'on en tire soit à environ moitié prix de l'hydrogène extrait du gaz à l'eau.

Le gaz de four à coke contient 60 % d'hydrogène ; le procédé d'utilisation qui a finalement prévalu est celui qu'a proposé Georges Claude ; il consiste dans

une liquéfaction partielle du gaz, qui ne laisse gazeux que l'hydrogène, dont le point de liquéfaction est à —252°, tandis que l'azote, le plus volatil ensuite, se liquéfie à —196° ; on obtient ainsi l'hydrogène, puis, par une distillation fractionnée, les autres constituants et, notamment, l'éthylène et le méthane.

La distillation d'agglomérés d'anthracite est justifiée par une curieuse observation du professeur Lebeau : tous les charbons donnent dans la distillation à haute température sensiblement le même volume de gaz quelle que soit leur teneur en matières volatiles. Ainsi le charbon de Bruay à 38,4 % de matières volatiles donne 278 mc. de gaz, celui de Courrières à 23,3 % de matières volatiles, 332 mc. de gaz, et l'anthracite du Gard à 9 % de matières volatiles, 321 mc. de gaz qui est alors formé par 90 % d'hydrogène, et, même si on recueille à part les gaz se dégageant à partir de 800°, on obtient 200 mc. d'hydrogène pur. Le bilan pondéral de l'opération se justifie par l'extrême légèreté de l'hydrogène, huit fois plus léger que le méthane venant immédiatement après lui ; ce procédé extrêmement élégant ne paraît pas avoir encore reçu d'application industrielle.

Voyons maintenant la conversion du méthane et de ses homologues. Ces hydrocarbures se trouvent dans les gaz naturels, dans le gaz de fours à coke, dans les gaz de cracking, enfin dans les gaz résiduaires de l'hydrogénation ; ce fait souligne l'importance de l'opération qui permet d'en retirer l'hydrogène. Elle se fait en deux phases ; dans la première, le carbone est transformé en CO par la vapeur d'eau ; par exemple :

$$CH^4 + H^2O = CO + 3H^2$$

la deuxième comporte la conversion du CO suivant la réaction :

$$CO + H^2O = CO^2 + H^2$$

On obtient ainsi en hydrogène le double de la quantité contenue dans le méthane, les sept tiers pour l'éthane, etc.

M. Hirsch a exposé en 1926 à la Société des Ingénieurs Civils la réalisation industrielle de cette conversion du méthane, sans catalyseur. A 1 400°, on obtient la décomposition complète de CH^4 en carbone et hydrogène, sans intervention de la vapeur d'eau, mais ce carbone, partiellement graphitique, n'a pas grande valeur et l'emploi de H^2O est beaucoup plus intéressant ; à 1 300° l'addition de 1,5 molécule de H^2O pour une molécule de CH^4 permet de décomposer 97,5 % du CH^4.

La *Standard Oil*, de son côté, a mis au point l'emploi de catalyseurs qui permettent d'effectuer la première partie de l'opération entre 650° et 850° dans des tubes garnis du catalyseur et chauffés directement dans un four par radiation. La seconde partie de l'opération (conversion du CO) s'effectue à 450° en présence d'un second catalyseur ; grâce à l'emploi de catalyseurs, l'opération devient tout entière continue et la consommation de calories est bien moindre. Les gaz doivent être désulfurés avant passage sur les catalyseurs.

Ce procédé de fabrication de l'hydrogène est le plus économique.

Fabrication d'essence synthétique à partir du charbon et du lignite. — Berthelot, en publiant en 1867 sa méthode universelle d'hydrogénation en tube scellé par l'acide iodhydrique, HI, exposait qu'elle était applicable à l'ulmine, la houille et le charbon de bois. L'hydrogénation s'effectuait ainsi avec le concours de la chaleur et de la pression. C'est à Sabatier, aidé de Senderens et de Mailhe, qu'il appartint de dévoiler les ressources innombrables de la catalyse en chimie orga-

nique, notamment dans le domaine de l'hydrogénation. Enfin, c'est l'Allemand Bergius qui, par l'emploi simultané du chauffage, de la pression et des catalyseurs, a, le premier, liquéfié industriellement le charbon. Ses procédés, repris par le grand consortium chimique allemand *I.-G. Farben Industrie*, perfectionnés et

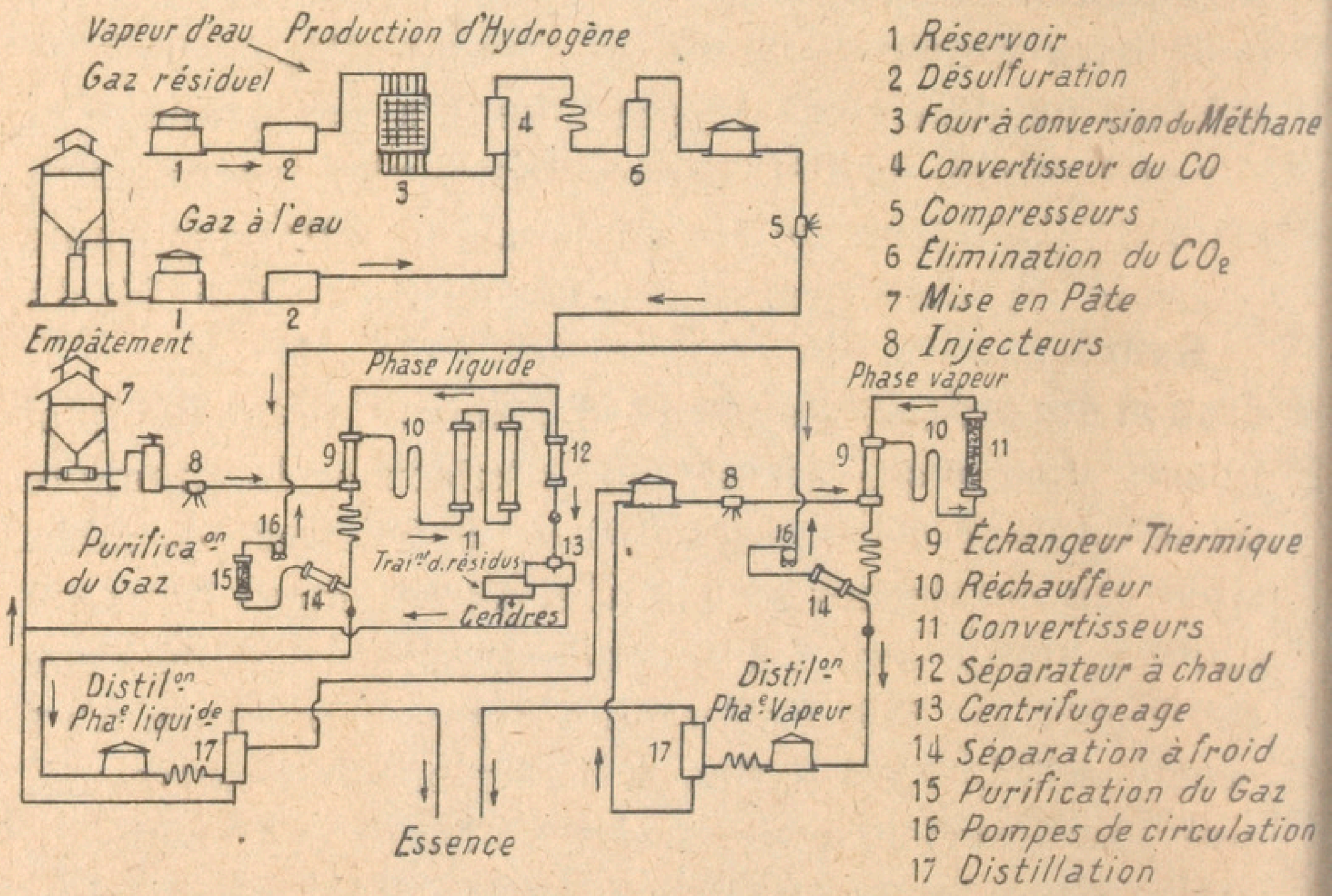


FIG. 21. — SCHÉMA D'UNE INSTALLATION SERVANT A L'HYDROGÉNATION DU CHARBON.

joints à des procédés de la *Standard Oil* américaine et de l'*Imperial Chemical Industry* anglaise, sont entre les mains d'un organisme international domicilié à La Haye : l'IHEC, chargé d'en assurer la diffusion mondiale. En France, les recherches poursuivies ces dernières années ont abouti à la création de deux usines pilotes, à Béthune et à Liévin.

Cette technique procède à l'hydrogénation par attaque directe des combustibles solides ou des goudrons et produits lourds obtenus dans le traitement des

charbons et des pétroles ; Fischer, le grand spécialiste allemand de la semi-distillation, a mis au point un procédé complètement différent dans lequel on gazéifie le charbon sous forme de gaz à l'eau qu'on condense en hydrocarbures divers ; sur l'initiative de M. Raymond Berr, administrateur délégué des Établissements Kuhlmann, une usine basée sur ce procédé a été montée pour le traitement du charbon de Courrières, sans aucune subvention de l'État, et fonctionne depuis juin 1937.

Nous allons décrire sommairement ces divers procédés.

Hydrogénation directe du charbon, du lignite, du goudron et des produits lourds du pétrole.— Dans la première phase, dite *phase liquide* (Fig. 21 et 22), les particules du catalyseur sont mélangées intimement au combustible solide broyé fin et mis en pâte avec son poids d'huile lourde provenant de l'opération elle-même, à 80°/100° ; la pâte est comprimée à 200/350 atm. et rentre, avec l'hydrogène, dans des échangeurs de calories où elle est chauffée par les produits évacués, vers 300° ; elle passe ensuite dans des réchauffeurs, chauffés au gaz, où elle atteint la température de réaction voisine de 460° ; elle rentre alors dans les convertisseurs, grands cylindres en acier, placés en série, où s'achève la réaction ; des convertisseurs les produits passent dans un séparateur à chaud où on extrait, d'une part, l'hydrogène restant, les gaz formés, l'essence, l'eau, l'huile moyenne, une partie de l'huile lourde, le tout volatilisé, et d'où on soutire un magma d'huile lourde, de charbon non attaqué, en faible quantité, et de cendres. La partie volatile traverse l'échangeur thermique, puis un condenseur. L'hydrogène purifié par lavage à l'huile sous pression réintègre le cycle ; l'huile lourde sert à une nouvelle mise en pâte ; l'essence est

raffinée par les méthodes usuelles, et l'huile moyenne passe à la phase suivante. Le magma extrait du sépa-

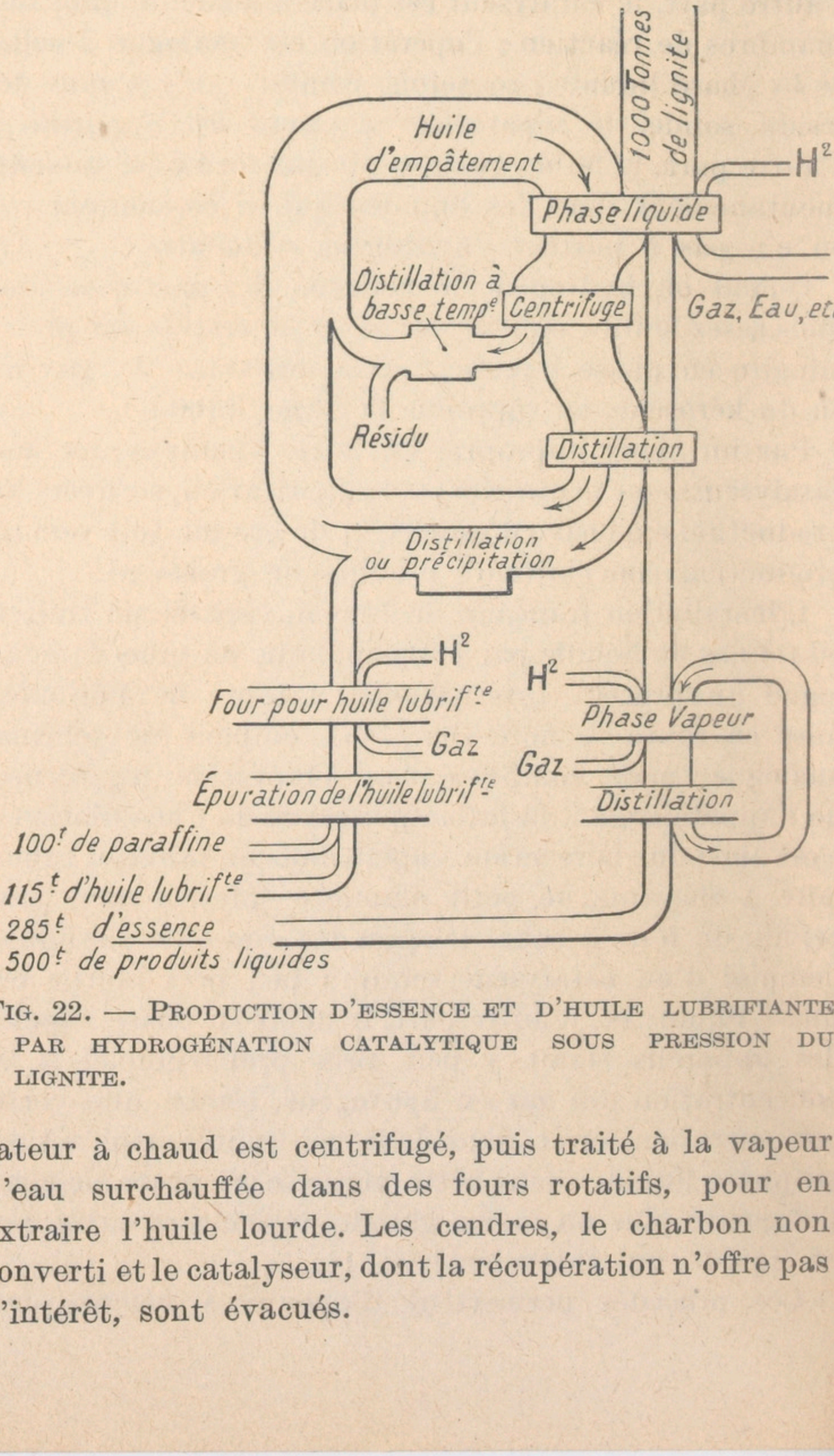


FIG. 22. — PRODUCTION D'ESSENCE ET D'HUILE LUBRIFIANTE PAR HYDROGÉNATION CATALYTIQUE SOUS PRESSION DU LIGNITE.

rateur à chaud est centrifugé, puis traité à la vapeur d'eau surchauffée dans des fours rotatifs, pour en extraire l'huile lourde. Les cendres, le charbon non converti et le catalyseur, dont la récupération n'offre pas d'intérêt, sont évacués.

Dans la deuxième phase, dite *phase vapeur*, l'huile moyenne est totalement vaporisée avant traitement ; d'autre part, le catalyseur est placé à demeure dans les chambres de réaction ; l'opération est analogue à celle de la phase liquide ; toutefois, comme il n'y a plus de résidu solide, le séparateur à chaud est supprimé ; d'autre part, la faible quantité de gaz formés se dissout spontanément dans les liquides qui se condensent, et on n'a pas à purifier l'hydrogène résiduaire.

Quand on hydrogène le goudron de lignite ou des fuels assez lourds, on leur fait subir un traitement préliminaire en phase liquide ; quand on traite du gas-oil ou du kérosène, on supprime la phase liquide.

Par un choix approprié du mode opératoire et des catalyseurs, on peut orienter la fabrication, soit vers la production exclusive d'essence et de gas-oil, soit vers la production concomitante d'huiles de graissage.

L'installation française de Liévin, capable de traiter 50 tonnes de houille par jour, applique un procédé analogue au procédé international. L'usine de Béthune, mise en route en décembre 1935, emploie un schéma analogue, mais comporte une adaptation ingénieuse de l'appareillage à la faible puissance de l'installation : c'est ainsi que la réaction s'opère dans un faisceau tubulaire à éléments de petit diamètre enfermé dans une cellule de four à coke. D'après les essais de Béthune, l'emploi d'un catalyseur serait à peu près inutile en phase liquide et, d'autre part, le débit en phase vapeur des appareils serait à peu près proportionnel à la concentration des gaz en hydrogène, tandis que cette concentration serait, dans de larges limites, sans action en phase liquide (dans cette phase, c'est probablement l'efficacité plus ou moins grande du contact entre gaz et liquide qui intervient).

Ces procédés permettent d'obtenir à volonté des

essences à nombre d'octane élevé ou des produits aromatiques, benzène et toluène, utilisés dans la fabrication des explosifs :

Les deux types de condensation du gaz à l'eau surhydrogéné. — Dès 1902, Sabatier et Senderens réussirent à produire le méthane par passage d'un mélange d'oxyde de carbone et d'hydrogène sur du nickel chauffé entre 150° et 200°. Après une étude approfondie de cette réaction, Fischer publiait en 1926 qu'il était possible, sans l'emploi des hautes pressions, d'aménager la réaction de Sabatier de façon à obtenir toute une gamme de produits allant du méthane aux hydrocarbures solides, suivant la réaction

$$nCO + (2n+1)\,H^2 = C^nH^{2n} + (n+1)H^2O$$

Les catalyseurs sont le fer, le cobalt, le nickel, accélérés par le chrome, le zinc ou le cuivre. La réaction est délicate, car elle dégage une grande quantité de chaleur et si la température sort de la région optima, située vers 300°, la production de CH^4 devient prépondérante. La composition du gaz convenable pour la synthèse est voisine de $CO + 2\,H^2$.

C'est à partir de cette même composition que dans le procédé Patard, breveté en 1921, on fabrique l'alcool méthylique par passage de ce mélange gazeux sur un catalyseur convenable, toujours entre 220° et 300°, mais à une pression de 150 à 250 atm. La réaction, complètement différente, devient alors :

$$CO + 2H^2 = CH^3OH.$$

Procédé Fischer-Tropsh pour la fabrication de l'essence. — Le surdosage en hydrogène du gaz à l'eau se fait par un appoint de gaz de four à coke dont le méthane a été converti préalablement ; les gaz sont débar-

rassés des produits sulfurés, puis catalysés ; l'opération se passe à 190° et la marge de température disponible est extrêmement faible ; d'autre part, la réaction dégage environ 700 ca. par mc. de gaz traité, ce qui pourrait porter à 2 000° la température. Le problème posé par ce dégagement de chaleur a été résolu en employant ces calories à la production de vapeur. La température relativement basse, l'absence de toute pression notable permettent de se servir d'un matériel tout à fait ordinaire.

Le gas-oil est d'excellente qualité ; l'indice d'octane de l'essence primaire n'est pas très élevé, mais, en craquant les produits plus lourds en phase vapeur, on peut, avec un rendement final de 80 %, obtenir une essence à 65 d'octane.

Alcool méthylique de synthèse. — Le surdosage du gaz à l'eau en hydrogène se fait également avec du gaz de cokerie converti ; il doit être également débarrassé de ses produits sulfurés avant compression et envoi à la catalyse ; la conduite de l'opération est simple et la formation de CO^2 et de CH^4 pratiquement nulle ; 1 mc. de mélange gazeux donne 475 gr. de méthanol. En dehors de ses emplois chimiques, l'alcool méthylique constitue un carburant intéressant. D'après M. l'Ingénieur général Dumanois, 1,5 l. de CH^4O est équivalent à 1 litre d'essence ; il augmente de 25 % la puissance du moteur. Son bas point d'inflammabilité le rend sensible à l'auto-allumage ; mais cet inconvénient disparaît si on l'additionne d'alcool éthylique ou de benzol ; par ailleurs, il a un nombre d'octane de 135 qui le rend apte à la préparation de supercarburants par mélange à l'essence au moyen d'un tiers solvant, alcool absolu ou benzol. Sa production s'est développée notablement en Allemagne et en Italie ; en France,

l'opposition manifestée au début contre lui par les producteurs d'alcool agricole a retardé jusqu'en 1938 les mesures administratives permettant de généraliser son emploi.

Carburants synthétiques pour le surdosage des essences d'aviation. — L'obtention d'essence à 100 d'octane nécessaire aux plus récents moteurs d'aviation ne peut être réalisée par simple addition de plomb éthyle à l'essence ordinaire, car cet anti-détonant, si efficace aux très faibles doses, accroît au contraire l'aptitude des essences à la détonation, lorsqu'on augmente exagérément sa teneur dans le carburant ; par ailleurs, sa grande toxicité engage également à ne pas en exagérer l'emploi, qui est limité à une teneur de 8 % par l'aviation américaine.

C'est dans la polymérisation des gaz de cracking qu'a été trouvée la première solution ; elle part de la fraction butane/butylène de ces gaz et fait subir aux butène et isobutène une interpolymérisation en présence d'acide sulfurique servant de catalyseur. Suivant les méthodes employées pour cette polymérisation, on obtient du diisobutylène pur ou un mélange d'octènes. Par hydrogénation, on obtient soit de l'isoctane pur (indice d'octane 100), soit un mélange d'octanes à indice 95/97 ; ce mélange étant obtenu avec un rendement beaucoup plus grand que l'isoctane, on préfère le plus souvent le fabriquer au prix d'une perte très légère sur le nombre d'octane. Le propylène conduit de même à l'éther isopropylique dont l'indétonance est analogue à celle de l'isoctane.

Une autre source de carburants éminemment indétonants, dont le protagoniste en France est M. Naldi, est constituée par les cétones supérieures, et aussi l'éther isopropylique qu'on peut obtenir soit par la

chimie organique, à partir de l'acétone, soit par fermentations appropriées, à partir de l'amidon et des sucres ; ces derniers peuvent être obtenus à partir de la cellulose, c'est-à-dire du bois. MM. Meunier en France, Scholler et Bergius en Allemagne ont mis au point des procédés d'hydrolyse de la cellulose la transformant en sucres. Dans les procédés Meunier et Scholler, on traite le bois à chaud par des solutions diluées d'acide sulfurique ; dans le procédé Bergius, on traite à froid le bois par de l'acide chlorhydrique concentré. M. Meunier a montré le premier que l'acide détruit le sucre qu'il a formé et qu'on n'obtient un bon rendement que par des attaques successives de la cellulose avec élimination du sucre déjà formé.

L'opération se fait avec de la vapeur à 7 kg. de pression, soit vers 170°, et donne 40 à 55 % d'extrait fermentescible, 35 à 25 % de lignine, excellent combustible très pur, et 2 à 10 % de sous-produits divers (furfurol, méthylène, acides acétique et formique). Dans le procédé Meunier, l'extrait est obtenu directement à une concentration suffisante pour la fermentation.

Celle-ci, qu'elle porte sur ces extraits ou sur toute autre matière amylacée, conduit à la production d'acides gras (acétique, propionique, butyrique, valérianique) en proportions diverses au bout de 5 à 7 jours ; il se dégage en même temps de l'hydrogène et du gaz carbonique très purs. La distillation sèche des sels de chaux de ces acides donne les cétones par une réaction classique. Ce sont des carburants à nombre d'octane voisin de 120 qui, additionnés à l'essence, donnent des mélanges plus sensibles à l'action du plomb éthyle que les mélanges formés avec l'isoctane ; on aura, par exemple, une essence à 100 d'octane en mélangeant moitié d'essence à 70 avec moitié de carburant Naldi et ajoutant 3 % de plomb éthyle.

Jusqu'ici, l'antique fabrication de l'alcool à partir des jus sucrés offrait le seul exemple de production de combustible par fermentation ; cette production de carburants cétoniques montre les ressources nouvelles que la chimie moderne des ferments met à la disposition de l'industrie, et l'un des avantages essentiels d'un tel cycle, c'est la quantité extrêmement variée de matières premières d'où il est possible de partir pratiquement, conséquence heureuse, dans ce domaine, de la faculté d'adaptation de la cellule vivante.

Signalons enfin le procédé des Fabriques de Produits Chimiques de Thann et de Mulhouse pour l'obtention de l'oxyde d'isopropyle à partir de l'acétone. Celle-ci, hydrogénée à froid sans pression, catalytiquement, avec un rendement intégral, donne l'alcool isopropylique qui, déshydraté par un procédé également catalytique, se condense en éther isopropylique ou oxyde d'isopropyle. Les ressources variées en acétone dont nous pouvons disposer rendent ce nouveau procédé très intéressant.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

COMBES. — *La vie de la cellule végétale* (Coll. Armand Colin).

ROSZAK (Charles). — *La chaleur reçue du soleil et le cycle terrestre du carbone* (Chaleur et Industrie, nos 32 et 33).

CHABANIER. — *Le milieu pétroligène* (La Revue pétrolifère, nos 403 et 404).

HAVRE. — *Origine et technique des terrains salifères et pétrolifères* (La Revue pétrolifère, n° 678).

SABATIER et SENDERENS.. — Annales de Chimie et de Physique (8), 4, 445, 1905.

TRENKLER. — *Les gazogènes* (Payot).

BLOCH. — *Théorie cinétique des gaz* (Collection Armand Colin).

BLANC. — *Rayonnement, éclairage* (Collection Armand Colin).

CHARTROU. — *Les pétroles naturel et artificiels* (Coll. A. Colin).

DUMÉNY, NOYER. — *L'industrie chimique des bois* (B. Tignol).

BARON (Ch.). — *Le charbon de bois, matière première métropolitaine* (Journal du Commerce, 29 avril 1937).

LE MONNIER. — *La tourbe considérée comme combustible* (Chaleur et Industrie, 2e Congrès du Chauffage Industriel, 1928).

BERTHELOT (Ch.). — *Le classement et le lavage des charbons* (Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils, 718 et 9, 1923).

BERTHELOT (Ch.). — *Le lavage du charbon par flottage* (Ingénieurs Civils, 7 et 8, 1926).

BOGITCH (B.). — *Propriétés et emplois des matériaux réfractaires* (Chaleur et Industrie, Congrès du Chauffage Industriel, 1923, t. II).

SOHM (M.). — *L'évacuation mécanique des cendres dans les chaudières à vapeur* (Chaleur et Industrie, 2e Congrès du Chauffage Industriel, 1928, t. I).

BARJOU. — *Les chambres de combustion à parois froides* (Ingénieurs Civils, 1, 2, 1935).

MATTHIS. — *Distillation des combustibles solides* (Béranger, Liége).

SAINTE-CLAIRE-DEVILLE (J.). — *De l'adaptation à la carbonisation à basse température des procédés des cokeries et usines à gaz* (2e Congrès du Chauffage Industriel, 1928, t. I).

PHILIPON. — *Le gazogène à fusion des cendres* (Revue de l'Industrie minérale, 1er mars 1934).

FROC. — *Les véhicules à gazogènes*, Motocycle Club de France.

BOST. — *La fabrication des gaz de pétrole liquéfiés* (Ingénieurs Civils, 1937, fasc. 6).

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE 5

CHAPITRE PREMIER. — La combustion comme source d'énergie ; matières premières de la combustion ; combustibles naturels, artificiels et de synthèse 7

CHAPITRE II. — Les éléments actifs de la combustion ; réactions de combustion ; impuretés des combustibles ; pouvoirs calorifiques des combustibles ; températures de combustion ; contrôle. 30

CHAPITRE III. — Les combustibles solides ; leur préparation industrielle. 48

CHAPITRE IV. — Combustion industrielle 73

CHAPITRE V. — Les différents procédés de liquéfaction et de gazéification du carbone 102

CHAPITRE VI. — Gaz et sous-produits de la distillation de la houille. Distillation à basse température 124

CHAPITRE VII. — Gazéification du carbone par combustion ménagée. Éléments constitutifs et fonctionnement des gazogènes. Hauts fourneaux 146

CHAPITRE VIII. — Constituants du pétrole brut ; fractionnement. Dégazolinage des gaz naturels ; purification des produits. Cracking. Gaz butane et propane 166

CHAPITRE IX. — La combustion dans les moteurs. Moteur à explosion. Moteur à combustion interne. 185

CHAPITRE X. — Les carburants de remplacement. Le carburant national. Synthèse des cétones par fermentation 205

BIBLIOGRAPHIE 223

Imprimé en France par les Etabl. André BRULLIARD,
Saint-Dizier (Hte-Marne). — 1941

Avril 1941

COLLECTION
ARMAND COLIN

Directeur :

PAUL MONTEL

Membre de l'Académie des Sciences
Professeur à la Sorbonne

LIBRAIRIE ARMAND COLIN
103, Boulevard Saint-Michel — PARIS

P. 4890

N° 1. **Rayonnement** (Principes scientifiques de l'Éclairage) (*2e édition*), par A. BLANC, Doyen de la Faculté des Sciences de Caen (*35 figures*).

N° 2. **La Construction du Vaisseau de guerre**, par E. JAMMY, Ingénieur en chef aux Forges et Chantiers de la Méditerranée (*183 figures, 4 planches hors texte*).
(*Ouvrage couronné par la Ligue maritime et coloniale française.*)

N° 3. **Cinématique et Mécanismes** (*3e édition*), par R. BRICARD, Professeur à l'École Centrale et au Conservatoire des Arts et Métiers (*79 figures*).

N° 4. **L'École classique française** : Les doctrines et les hommes (1660-1715) (*3e édition*), par A. BAILLY, Professeur au Lycée Pasteur.

N° 5. Éléments d'Agriculture coloniale : **Plantes à huile**, par Yves HENRY, Ingénieur agronome, Inspecteur général de l'Agriculture aux Colonies (*35 figures*).

N° 6. **Télégraphie et Téléphonie sans fil** (*Nouvelle édition, 9e, entièrement refondue*), par C. GUTTON, Membre de l'Institut, Directeur du Laboratoire National de Radioélectricité (*85 figures*).

N° 7. **Théorie cinétique des Gaz** (*5e édition*), par E. BLOCH, Professeur à la Faculté des Sciences de Paris (*7 figures*).

N° 8. **Traité pratique de Géométrie descriptive** (*2e édition*), par J. GEFFROY, Ingénieur des Arts et Manufactures (*248 figures*).

N°s 9 - 10. **Statique et Dynamique** : Tomes I et II (*3e édition*), par H. BÉGHIN, Professeur à la Faculté des Sciences de Paris (*227 figures*).

N° 11. **Éléments d'Électricité** (*6e édition*), par Ch. FABRY, Membre de l'Institut, Professeur honoraire à la Sorbonne et à l'École Polytechnique (*70 figures*).

N° 12. **La Fonte** : Élaboration et Travail (*2e édition*), par le Colonel J. ROUELLE (*29 figures*).

N° 13. **L'Hérédité** (*3e édition entièrement refondue*), par Et. RABAUD, Professeur honoraire à la Faculté des Sciences de Paris (*34 figures*).

N° 14. **Principes de l'Analyse chimique** (*2e édition*), par V. AUGER, Professeur de Chimie analytique à la Sorbonne (*77 figures*).

N° 15. **Les Pyrénées** (*3e édition*), par M. SORRE, Professeur à l'Université de Montpellier (*6 cartes, 6 photographies*).

N° 16. **Chimie et Fabrication des Explosifs** (*3e édition*), par P. VEROLA, Ingénieur en chef des Poudres (*9 figures*).

N° 17. **La Révolution française**, par A. MATHIEZ, Tome I : **La Chute de la Royauté** (*7e édition*).

N° 18. **Les grands Marchés des Matières premières** (*8e édition*), par F. MAURETTE, Directeur du Bureau international du Travail (S. D. N.) à Paris (*11 cartes et graphiques*).

N° 19. **L'Industrie du Fer en France** (*2e édition refondue et mise à jour*), par J. LEVAINVILLE, Docteur ès lettres, Vice-Président de la Chambre Syndicale des Mines de fer de l'Ouest (*4 cartes*).

(*Ouvrage couronné par la Société de Géographie de Paris.*)

N° 20. **L'Acier :** Élaboration et Travail (*2e édition*), par le Colonel J. ROUELLE (*45 figures*).

N° 21. **Le Droit ouvrier :** Tableau de la Législation française actuelle (*2e édition revue et mise à jour*), par G. SCELLE, Professeur à la Faculté de Droit de Paris.

N° 22. **Les Maladies dites Vénériennes** (*3e édition*), par le Dr P. RAVAUT, Membre de l'Académie de Médecine, Médecin de l'Hôpital Saint-Louis (*22 figures*).

(*Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences, Prix Bélion.*)

N° 23. **La Houille blanche** (*2e édition*), par H. CAVAILLÈS, Prof. à la Faculté des Lettres de Bordeaux (*8 cartes et 4 fig.*).

N° 24. **Propriétés générales des Sols en Agriculture** (*2e édition*), par G. ANDRÉ, de l'Institut, Professeur à l'Institut Agronomique.

N° 25. **Vue générale de l'Histoire d'Afrique** (*3e édition*), par G. HARDY, Recteur de l'Académie d'Alger.

N° 26. **Les Instruments d'Optique** (3e *édition*), par H. PARISELLE, Inspect. général de l'Instruction publique (*82 fig.*).

N° 27. **Le Naturalisme français** : 1870-1895 (*3e édition revue et corrigée*), par P. MARTINO, Recteur de l'Académie d'Aix.

N° 28. **Théorie du Navire :** Tome I (*2e édition*), par M. LE BESNERAIS, Ingén. en chef du Génie Maritime (*61 fig.*).

Nos 29 - 30. **Éléments de Paléontologie :** Tomes I et II (*3e édition revue et mise à jour*), par L. JOLEAUD, Professeur à la Faculté des Sciences de Paris (*93 figures*).

N° 31. **Le Ballon, l'Avion, la Route aérienne,** par M. LARROUY, Ingénieur de l'École Sup. d'Aéronautique (*25 fig.*).

N° 32. **La Société Féodale** (*4e édition*), par J. CALMETTE, de l'Institut, Professeur à l'Université de Toulouse.

N° 33. **Les Bois coloniaux** (*2e édition*), par H. LECOMTE, de l'Institut, Professeur au Muséum d'Histoire naturelle (*28 fig.*)

N° 34. **Probabilités, Erreurs** (*5e édition*), par Emile BOREL, de l'Institut, Professeur à la Sorbonne, et R. DELTHEIL, Recteur de l'Académie de Toulouse (*10 fig.*).

N° 35. **Physique du Globe** (*3e édition revue et mise à jour*), par Ch. MAURAIN, de l'Institut, Doyen de la Faculté des Sciences de Paris (*21 figures*).

N° 36. **L'Atmosphère et la prévision du Temps** (*3e édition*), par J. ROUCH, Capitaine de Frégate, ancien Chef du Service Météorologique des Armées (*36 figures*).

N° 37. **Les Méthodes actuelles de la Chimie** (*Nouvelle édition, 3e, entièrement refondue*), par P. JOLIBOIS, Professeur à l'École Nationale Supérieure des Mines (*49 figures*).

N° 38. **Les Coopératives de consommation en France,** par B. LAVERGNE, Prof. à la Faculté de Droit de Lille.

N° 39. **La Grande Guerre** (1914-1918), par le général THEVENET, ancien Gouverneur de Belfort (*15 cartes*).

N° 40. **Mines et Torpilles,** par Henri STROH, Ingénieur en chef de la Marine (*40 figures*).

N°s 41, 42, 43. **Chimie minérale** (*4e édition*), par H. COPAUX, Professeur à l'École de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris, et H. PERPÉROT, Chef de travaux pratiques à l'École de Physique et de Chimie (3 volumes illustrés de *136 figures*).

N° 44. **Éléments de Géométrie analytique** (*4e édition*), par A. TRESSE, Docteur ès sciences, Inspecteur général honoraire de l'Enseignement secondaire (*91 figures*).

N° 45. **Le Félibrige** (*2e édition*), par Émile RIPERT, Professeur à la Faculté des Lettres de l'Université d'Aix-Marseille.

N° 46. **Le Blocus et la Guerre sous-marine,** par A. LAURENS, Capitaine de Vaisseau, Chef de la Section historique de l'État-Major de la Marine.

N°s 47 - 48. **Alternateurs et Moteurs synchrones** : Tomes I (*3e édition*) et II (*2e édition*), par E. ROTH, Ingénieur en chef à la Société Générale Als-Thom (*167 figures*).

(Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences. Prix Hébert.)

N° 49. Éléments d'Agriculture coloniale : **Plantes à fibres,** par Yves HENRY, Ingénieur agronome, Inspecteur général de l'Agriculture aux Colonies (*55 figures*).

N° 50. **Astronomie générale** (*3e édition*), par Luc PICART, de l'Institut, Dr de l'Observatoire de Bordeaux (*42 fig.*).

N° 51. **L'Après-guerre et la Politique commerciale** (*2e édition*), par Cl.-J. GIGNOUX.

(Ouvrage couronné par la Société de Géographie Commerciale.)

N° 52. **La Révolution française,** par A. MATHIEZ, Chargé du Cours d'histoire de la Révolution française à l'Université de Paris. Tome II : **La Gironde et la Montagne** (*7e édition*).

N° 53. **L'Angleterre au XIX^e siècle,** *son évolution politique* (*2^e édition revue et complétée*), par Léon CAHEN, Professeur au Lycée Condorcet.

N° 54. **Balistique extérieure** (*2^e édition revue et complétée*), par J. OTTENHEIMER, Ingénieur en chef d'Artillerie navale (*52 figures et 4 planches*).

N° 55. **Piles et Accumulateurs électriques** (*2^e édition*), par L. JUMAU, Ingénieur (*76 figures*).

N° 56. **Les Alpes françaises** (*4^e édition*), par R. BLANCHARD, Professeur à l'Université de Grenoble (*23 cartes et graphiques*).

N° 57. **Les Courants alternatifs** (*5^e édition*), par Pierre SÈVE, Professeur à la Faculté des Sciences de Marseille (*118 fig.*).
(*Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences, Prix Hébert.*)

N° 58. **Rome et les Lettres latines** (*2^e édition*), par A. DUPOUY, Professeur au Lycée Michelet, à Paris.

N° 59. **Théorie du Navire** (Tome II), par M. LE BESNERAIS, Ingénieur en chef du Génie Maritime (*35 figures*).

N° 60. **Calculs numériques et graphiques** (*4^e édition*), par Émile GAU, Rect. de l'Académie de Lyon (*33 fig. et graphiques*).

N° 61. **Les Industries de la Soie en France,** par P. CLERGET, Directeur de l'École de Commerce de Lyon (*10 graphiques, 15 tableaux statistiques*).

N° 62. **Les Industries de fixation de l'Azote** (*2^e édition*), par Marcel GUICHARD, Professeur à la Sorbonne (*21 fig.*).

N° 63. **Le Saint-Siège, l'Église catholique et la Politique mondiale** (*2^e édition revue et mise à jour*), par Maurice PERNOT, ancien Membre de l'École française de Rome.

N° 64. **La France économique et sociale au XVIII^e siècle** (*3^e édition revue et mise à jour*), par Henri SÉE, Professeur honoraire à l'Université de Rennes.
(*Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences morales et politiques.*

N° 65. **Les Submersibles,** par G. RABEAU, Ingénieur du Génie Maritime, et A. LAURENS, Capitaine de Vaisseau, Chef de la Section historique de l'État-Major de la Marine (*44 figures*).

N° 66. **Les Doctrines économiques en France depuis 1870** (*4^e édition*), par G. PIROU, Professeur agrégé à la Faculté de Droit de Paris.

N° 67. **Introduction à la Géologie** (*5^e édition*), par John LEUBA, Docteur ès sciences (*60 figures*).

N° 68. **La Renaissance des Lettres en France,** *de Louis XII à Henri IV* (*3^e édition*), par J. PLATTARD, Professeur à la Sorbonne.

N° 69. **Parnasse et Symbolisme** : 1850-1900 (*5e édition*), par P. MARTINO, Recteur de l'Académie d'Aix.

N° 70. **Les Moteurs à explosion,** par Ed. MARCOTTE, Professeur à l'École spéciale des Travaux publics. — *3e édition entièrement refondue*, par Henri MOYNOT, Ingénieur civil de l'Aéronautique (*56 figures*).
(*Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences, Prix Trémond.*)

N° 71. **Le Magnétisme** (*3e édition*), par P. WEISS, Membre de l'Institut, Professeur des Facultés des Sciences, et G. FOEX, Professeur des Facultés des Sciences (*69 figures*).

N°s 72-73. **Éléments de Calcul différentiel et de Calcul intégral :** Tomes I (*6e édition*) et II (*5e édition*), par Th. LECONTE, Inspecteur général de l'Instruction publique, et R. DELTHEIL, Recteur de l'Académie de Toulouse (*144 figures*).

N° 74. **Peuples et Nations des Balkans.** *Géographie politique* (*2e édition revue et mise à jour*), par Jacques ANCEL, Professeur à l'Université de Paris (*3 cartes*).
(*Ouvrage couronné par la Société de Géographie, Médaille d'or.*)

N° 75. **Transport de l'Électricité,** par René COUFFON, Ingénieur des Arts et Manufactures (*45 figures*).

N° 76. **Les Alpes,** *Géographie générale* (*2e édition revue et corrigée*), par Emm. DE MARTONNE, Professeur à la Sorbonne (*24 cartes et graphiques*).

N° 77. **Les Moteurs à combustion** (*2e édition revue et corrigée*), par Ed. MARCOTTE, Professeur à l'École Spéciale des Travaux publics (*37 figures*).
(*Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences, Prix Trémond.*)

N° 78. **La Transformation de l'énergie électrique : I. Transformateurs** (*2e édition*), par R. CARTON, Ingénieur E.M.I., et P. DUMARTIN, Ingénieur A.M. et I.E.G. (*89 figures*).

N° 79. **Les Origines du Capitalisme moderne.** *Esquisse historique* (*4e édition*), par Henri SÉE, Professeur honoraire à l'Université de Rennes.
(*Ouvrage recommandé par le Comité du Livre français France-Amérique*)

N° 80. **Balistique intérieure,** par J. OTTENHEIMER, Ingénieur en chef d'Artillerie navale (*37 figures*).

N° 81. **La Pensée française au XVIIIe siècle** (*5e édition*), par Daniel MORNET, Professeur à la Sorbonne.

N° 82. **Mesures Électriques** (*3e édition*), par Jean GRANIER, Professeur à la Faculté des Sciences de Besançon (*85 figures*).
(*Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences, Prix Hébert.*)

N° 83. **La Littérature italienne** (*2e édition revue et mise à jour*) par Th. LAIGNEL, Directrice du Lycée de jeunes filles de Bourges.

N° 84. **L'Organisation scientifique du Travail** (*3e édition*), par G. BRICARD, Ingén. en chef du Génie Maritime (*34 fig.*).

N°s 85-86. **Les Courants de la Pensée philosophique française :** Tomes I et II (*3e édition*), par A. CRESSON, Professeur de Philosophie au Lycée Louis-le-Grand.

N° 87. **Principes de l'Électrochimie** (*2e édition*), par J. PONSINET, Ingénieur des Manufactures de l'État (*35 figures*).

N° 88. **Syndicats et Coopératives agricoles** (*2e tirage*), par Michel AUGÉ-LARIBÉ, Secrétaire général de la Confédération nationale des Associations agricoles.

N°s 89-90. **La Tuberculose** (*2e édition, entièrement refondue*), par le Docteur Édouard RIST, Membre de l'Académie de Médecine, Médecin hre de l'Hôpital Laënnec et du Dispensaire Léon Bourgeois. Un volume double (*22 figures et 4 planches*).

(*Couronné par l'Académie des Sciences. Prix Bréaut 1928.*)

N° 91. **Les Expériences monétaires contemporaines** (*3e édit.*), par George-Edgar BONNET, Directeur général de la Compagnie du Canal de Suez.

(*Couronné par l'Académie des Sciences morales et politiques, Prix Limantour, et recommandé par le Comité du Livre français France-Amérique.*)

N° 92. **Histoire de la Langue Allemande** (*2e édition*), par E. TONNELAT, Prof. au Collège de France (*1 carte*).

N° 93. **La Révolution française**, par A. MATHIEZ. Tome III : **La Terreur** (*6e édition*).

N° 94. **La Cinématographie**, par Lucien BULL, Sous-Directeur de l'Institut Marey (*36 figures*).

N° 95. **La Littérature française contemporaine** : *Poésie, Roman, Idées* (*6e édition*), par André BILLY.

N° 96. **La Vie de la Cellule végétale.** Tome I : *La Matière vivante* (*2e édition revue et corrigée*), par R. COMBES, Professeur à la Sorbonne (*16 figures*).

(*Couronné par l'Académie des Sciences, Prix de Parville.*)

N° 97. **Psychologie expérimentale** (*4e édition*), par Henri PIÉRON, Professeur au Collège de France et à l'Institut de Psychologie (*11 figures et graphiques*).

N° 98. **La Civilisation athénienne** (*2e édition*), par P. CLOCHÉ. Prof. à la Faculté des Lettres de Besançon (*15 fig., 1 carte*),

N° 99. **Appareils et Méthodes de Mesures mécaniques** (*2e édition*), par le Lt-Cel J. RAIBAUD, Chef des Travaux pratiques de Mécanique à l'École Polytechnique (*87 fig.*).

N° 100. **L'École romantique française** : *les doctrines et les hommes* (*3e édition*), par Jean GIRAUD, Agrégé des Lettres, Directeur de la Fondation Deutsch de la Meurthe.
(*Couronné par l'Académie française, Prix Montyon.*)

N° 101. **Éléments de Thermodynamique** (*4e édition*), par Ch. FABRY, Membre de l'Institut, Professeur honoraire à la Sorbonne et à l'École Polytechnique (*39 figures*).

N° 102. **Introduction à la Psychologie collective** (*3e édit.*), par le Dr Charles BLONDEL, Correspondant de l'Institut, Professeur à l'Université de Paris.

N° 103. **Nomographie** (*2e édition*), par M. FRÉCHET, Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris, et H. ROULLET, Ingénieur, Professeur d'École nationale technique (*79 figures*).

N° 104. **L'Ancien Régime et la Révolution russes** (*2e édition*), par Boris NOLDE, ancien Professeur à la Faculté de Droit de l'Université de Pétrograd.
(*Couronné par l'Académie des Sciences morales et politiques, Prix Perret.*)

N° 105. **La Monarchie d'Ancien Régime en France**, *de Henri IV à Louis XIV* (*2e édition*), par Georges PAGÈS, Membre de l'Institut, Professeur d'Histoire moderne à la Faculté des Lettres de Paris.

N° 106. **Le Théâtre français contemporain** (*2e édition revue et corrigée*), par Edmond SÉE.

N° 107. **Hygiène de l'Européen aux Colonies** (*2e édition revue et corrigée*), par le Dr Ch. JOYEUX, Professeur agrégé à la Faculté de Médecine de Marseille.
(*Ouvrage couronné par l'Académie française. Prix Montyon.*)

N° 108. **Grammaire descriptive de l'Anglais parlé** (*2e édition*), par Joseph DELCOURT, Docteur ès lettres, Professeur au Lycée Pasteur, à Paris.

N° 109. **La Vie de la Cellule végétale.** Tome II : *Les enclaves de la matière vivante* (*2e édition*), par R. COMBES, Professeur à la Sorbonne (*13 figures*).
(*Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences, Prix de Parville.*)

N° 110. **La Formation de l'État français et l'Unité française**, *des Origines au milieu du XVIe siècle* (*2e édition*), par G. DUPONT-FERRIER, Membre de l'Institut, Professeur à l'École Nationale des Chartes.
(*Couronné par l'Académie des Sciences morales et politiques, Prix Audiffred.*)

N° 111. **Nos Grands Problèmes Coloniaux** (*2e édition*), par Georges HARDY, Recteur de l'Académie d'Alger.
(*Couronné par l'Académie des Sciences morales et politiques, Prix Perret.*)

N° 112. **Le Calcul vectoriel** (*4e édition*), par Raoul BRICARD Professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers et à l'École Centrale des Arts et Manufactures.

N° 113. **Ondes et Électrons** (*Nouvelle édition, 3e, entièrement refondue*), par Pierre BRICOUT, Docteur ès sciences, Répétiteur à l'École Polytechnique.

N° 114. **La Littérature en Russie,** par Jules LEGRAS, Professeur à l'Université de Paris.
(*Ouvrage couronné par l'Académie française, Prix Bordin.*)

N° 115. **Essences naturelles et Parfums,** par Raymond DELANGE, Chef des Services scientifiques des Fabriques de Laire.

N° 116. **La Formation de l'Unité Italienne** (*2e édition*), par Georges BOURGIN, Ancien membre de l'École française de Rome, Conservateur adjoint aux Archives nationales.
(*Ouvrage couronné par l'Académie française, Prix Thérouanne.*)

N° 117. **La Justice pénale d'aujourd'hui** (*2e édition*), par H. DONNEDIEU DE VABRES, Professeur à la Faculté de Droit de Paris.
(*Ouvrage recommandé par le Comité du Livre français France-Amérique.*)

N° 118. **Les grands courants de la Pensée antique** (*4e édition*), par A. RIVAUD, Membre de l'Institut, Professeur à la Sorbonne et à l'École libre des Sciences politiques.

N° 119. **Les Systèmes philosophiques** (*4e édition*), par A. CRESSON, Profes. honoraire au Lycée Louis-le-Grand.

N° 120. **Les Rayons X** (*2e édition*), par Jean THIBAUD, Docteur ès sciences, Ingénieur É. S. É., Professeur à la Faculté des Sciences de Lyon (*77 figures*).

N° 121. **Les Quanta** (*2e édition entièrement refondue*), par Georges DÉJARDIN, Professeur à la Faculté des Sciences de Lyon (*34 figures*).

N° 122. **Les Anciennes Civilisations de l'Inde** (*2e édition*), par Gaston COURTILLIER, Chargé de Cours aux Facultés des Lettres (*5 planches hors texte*).

N° 123. **Couleurs et Pigments des Êtres vivants,** par le Docteur Jean VERNE, Docteur ès sciences, Professeur agrégé à la Faculté de Médecine de Paris (*26 figures*).
(*Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences, Prix Gama-Mochado.*)

N° 124. **Pétroles naturel et artificiels** (*2e édition entièrement refondue*), par J.-J. CHARTROU, Ingénieur (*52 figures*).

N° 125. **La Téléphonie,** par Robert DREYFUS, Ingénieur des Postes et Télégraphes.

N° 126. **L'Islam** (*3e édition*), par Henri MASSÉ, de l'Institut, Professeur à l'École Nationale des Langues Orientales.

N° 127. **Principes de Psychologie appliquée** (*2e édition*), par le Dr Henri WALLON, Directeur à l'École des Hautes-Études, Professeur au Collège de France.
(*Couronné par l'Académie des Sciences morales et politiques, Prix Louis Liard.*)

N° 128. **La Belgique contemporaine** (1780-1930), par Franz VAN KALKEN, Professeur à l'Université de Bruxelles.
(*Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences morales et politiques.*)

N° 129. **Soies artificielles et Matières plastiques,** par R. GABILLION, Ingénieur-Chimiste I. C. N., Chimiste principal du Service des Poudres (*21 figures*)..

N° 130. **La Thérapeutique moderne,** par le Dr G. FLORENCE, Prof. agrégé à la Faculté de Médecine de Lyon.

N° 131. **La Transformation de l'Énergie électrique : II. Commutatrices et Redresseurs,** par H. GIROZ, Ingénieur E.S.E. (*65 figures*).

Nos 132-133. **La Musique contemporaine en France,** par René DUMESNIL : *Tomes I et II.*
(*Ouvrage couronné par l'Académie des Beaux-Arts, Prix Bordin*).

N° 134. **Le Sommeil,** par le Docteur J. LHERMITTE, Professeur agrégé à la Faculté de Médecine de Paris.

N° 135. **Constitution et Gouvernement de la France** (*2e édition mise à jour*), par L. TROTABAS, Professeur à la Faculté de Droit d'Aix-Marseille.

N° 136. **Les Problèmes de la Vie mystique,** par R. BASTIDE, Agrégé de Philosophie, Professeur au Lycée de Valence.

N° 137. **Le Maroc** (*2e édition mise à jour*), par J. CÉLÉRIER, Professeur à l'Institut des Hautes-Études marocaines à Rabat (*3 graphiques et 6 cartes*).

N° 138. **Théorie mathématique des Assurances,** par H. GALBRUN, Docteur ès sciences, Actuaire de la Banque de Paris et des Pays-Bas.

N° 139. **Histoire d'Espagne** (*2e édition mise à jour*), par Rafaël ALTAMIRA Y CREVEA, Professeur à l'Université de Madrid.

N° 140. **Électricité et Radiologie médicales,** par le Dr L. GALLY, Radiologiste des Hôpitaux de Paris, et le Dr P. ROUSSEAU, Chef du laboratoire d'Electrologie à la Faculté de Médecine de Paris (*56 figures*).

N° 141. **Cicatrisation et Régénération,** par Jacques MILLOT, Professeur à la Faculté des Sciences de Paris (*32 figures*).

N° 142. **La Crise britannique au XXe siècle** (*5e édition*), par André SIEGFRIED, Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France (*2 cartes et 2 graphiques*).

N° 143. **La Photographie** (*2e édition revue et mise à jour*), par M. HESSE et Cl. AMÉDÉE-MANNHEIM, anciens Élèves de l'École Polytechnique (*80 figures*).

N° 144. **La Littérature comparée** (*2e édition*), par Paul VAN TIEGHEM, Professeur au Lycée Louis-le-Grand, chargé de Conférences de Littérature comparée à la Sorbonne.

N° 145. **Les Vitamines** (*3e édition entièrement refondue*), par Mme L. RANDOIN, Directeur du Laboratoire de Physiologie de la Nutrition à l'École des Hautes Études et au Centre de Recherches sur l'Alimentation, et H. SIMONNET, Docteur en médecine, Professeur d'hygiène à l'École vétérinaire d'Alfort (*4 graphiques, 67 fig., 7 tableaux*).

N° 146. **La Littérature anglaise** (*2e édition revue et mise à jour*), par Paul DOTTIN, Doyen de la Faculté des Lettres de Toulouse.

N° 147. **L'Auvergne** (*2e édition mise à jour*), par Philippe ARBOS, Professeur à l'Université de Clermont-Ferrand (*12 cartes et graphiques*).

N° 148. **Introduction à la Mécanique des Fluides** (*2e édition*), par Adrien FOCH, Professeur à la Sorbonne (*55 fig,*).
(*Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences, Prix Boileau.*)

N° 149. **Socialismes français :** *Du « Socialisme utopique » à la « Démocratie industrielle »* (*3e édition*), par C. BOUGLÉ, Professeur à la Sorbonne, Directeur de l'École Normale.

N° 150. **Les Crises allemandes** (1919-1931), par A. RIVAUD, Membre de l'Institut, Professeur à la Sorbonne et à l'École libre des Sciences politiques.

N° 151. **La France et l'Allemagne depuis dix** siècles, par G. ZELLER, Maître de Conférences aux Facultés des Lettres.

N° 152. **Géographie des Plantes,** par Henri GAUSSEN, Professeur à l'Université de Toulouse (*8 cartes et figures*).

N° 153. **Géographie des Animaux,** par Marcel PRENANT, Professeur à la Sorbonne (*4 cartes*).

N° 154. **Mathématiques financières,** par J. DUBOURDIEU, Docteur ès sciences, Actuaire adjoint à la Banque de Paris et des Pays-Bas (*9 figures*).

N° 155. **Fleuves et Rivières,** par Maurice PARDÉ, Professeur à l'École des Ingénieurs hydrauliciens de l'Université de Grenoble (*18 graphiques et cartes*).
Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences, Prix Gay.)

N° 156. **La Manutention mécanique,** par Marcel LEGRAS. ancien Élève de l'Éc. Polytechnique, Ingén.-Conseil (*95 fig.*),

N° 157. **Les Sociétés italiennes, du XIII^e au XV^e siècle,** par Julien LUCHAIRE, Inspecteur général de l'Instruction publique (*5 cartes*).

N° 158. **Les Phénomènes sociaux chez les animaux,** par François PICARD, Professeur à la Sorbonne (*9 figures*).

N° 159. **Le Problème moral et les Philosophes** (*2^e édition*), par A. CRESSON, Professeur de philosophie au Lycée Louis-le-Grand).

(*Couronné par l'Académie des Sciences Morales et Politiques, Prix Louis Liard.*)

N° 160. **Les Principes du Droit Civil** (*2^e édition*), par Henry SOLUS, Professeur à la Faculté de Droit de Paris.

N° 161. **Les Bases historiques de la Finance moderne,** par Robert BIGO, Prof. à l'École des Hautes Études Sociales.

N 162. **Télévision et Transmission des images** (*2^e édition revue et mise à jour*), par René MESNY, Prof. à l'École Supérieure d'Électricité (*97 figures*).

N° 163. **Machines automatiques, mécaniques et électriques,** par P. MAURER, Ingénieur en chef de la C. P. D. E., Professeur à l'École d'électricité et de mécanique industrielles et à l'École d'électricité Bréguet (*42 figures*).

N° 164. **La France méditerranéenne** (*2^e édition*), par Jules SION, Professeur à l'Université de Montpellier *(8 cartes)*.

(*Couronné par l'Académie des Sciences. Prix Delalande-Guérineau.*)

N° 165. **La Science française depuis le XVII^e siècle,** par Maurice CAULLERY, Membre de l'Institut, Professeur à la Sorbonne.

N° 166. **Acoustique,** par Adrien FOCH, Professeur à la Sorbonne (*67 figures*).

N° 167. **Les Régimes électoraux,** par Georges LACHAPELLE.

N° 168. **Histoire des Pays Baltiques,** par Jean MEUVRET, Agrégé de l'Université (*5 cartes*).

(*Médaille décernée par l'Académie des Sciences morales et politiques.*)

N° 169. **L'Afrique centrale,** par Maurice ROBERT, Professeur à l'Université de Bruxelles (*8 cartes et graphiques*).

(*Ouvrage couronné par la Société de Géographie, Médaille Grudy.*)

N° 170. **L'Irlande,** par A. RIVOALLAN, Professeur au Lycée Janson-de-Sailly (*2 cartes*).

(*Ouvrage couronné par l'Académie française. Prix d'Académie.*)

N° 171. **La Pensée allemande,** de Luther à Nietzsche (*2^e édition*), par Jean-Édouard SPENLÉ, Recteur de l'Académie de Dijon.

(*Couronné par l'Académie française. Prix d'Académie.*)

N° 172. **Le Monde Egéen avant les Grecs,** par P. WALTZ, Professeur à la Faculté des Lettres de Clermont-Ferrand (*13 fig.*).

N° 173. **Ciments et Mortiers**, par Augustin MACHÉ, Ingénieur E. P. C. I. (*51 figures*).

N° 174. **Statistique et Applications**, par Georges DARMOIS, Chargé de Cours à la Sorbonne (*32 graphiques*).
(*Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences. Prix H. de Parville.*)

N° 175. **Génératrices et Moteurs à courant continu**, par Éd. ROTH, Ingénieur en chef à la Société Als-Thom, et J. BARDIN, Ingénieur à la Société Als-Thom (*85 figures*).

N° 176. **Parasites et Parasitisme**, par P.-P. GRASSÉ, Professeur à la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand (*25 figures*).

N° 177. **Les Céréales** : *Biologie et Applications*, par R. LEGENDRE, Directeur du Laboratoire de Physiologie comparée à l'École des Hautes-Études (*33 figures*).

N° 178. **Les Matières colorantes artificielles**, par G. MARTIN, Directeur à la Société anonyme des Matières colorantes et Produits chimiques de Saint-Denis (*7 figures*).
(*Ouvrage couronné par la Société Industrielle de Rouen.*)

N° 179. **L'Indochine française**, par Ch. ROBEQUAIN, Prof. à la Faculté des Lettres de Paris (*12 graphiques et cartes*).

N° 180. **La Littérature Portugaise**, par G. LE GENTIL, Professeur à la Sorbonne.
(*Ouvrage couronné par l'Académie française, Prix Montyon.*)

N° 181. **Les grands Problèmes de la politique des États-Unis**, par Firmin ROZ.

N° 182. **La Paix économique**, par H. HAUSER, Correspondant de l'Institut, Professeur à la Sorbonne.

N° 183. **La Tchécoslovaquie**, *Étude économique*, par André TIBAL, ancien Professeur à l'Université de Prague, Professeur à la Sorbonne.
(*Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences morales et politiques et par la Société de Géographie, Médaille H. Lorin.*)

N° 184. **Extrême-Orient et Pacifique**, par Roger LÉVY, Secrétaire Général du Comité d'Études des Problèmes du Pacifique, Chargé de Cours à l'École nationale de la France d'Outre-mer.
(*Couronné par l'Académie des Sciences morales et politiques, Prix Drouin de Lhuys, et par la Société de Géographie, Médaille Roulet.*)

N° 185. **Phénomènes colloïdaux**, par R. DUBRISAY, Professeur au Conservatoire des Arts et Métiers et à l'École Polytechnique (*27 figures*).

N° 186. **La Démence**, par le Docteur R. MALLET, Médecin-Inspecteur des Asiles, Expert près le Tribunal de la Seine.

N° 187. **Éléments de Sociologie religieuse**, par Roger BASTIDE, Agrégé de Philosophie, Professeur au Lycée de Valence.

N° 188. **Histoire des Pays-Bas,** *du XVI^e siècle à nos jours*, par Enno VAN GELDER (*1 carte*).

N° 189. **Le Champ électromagnétique,** par Marc JOUGUET, Ingénieur Radio-électricien E. S. E. (*20 figures*).

N° 190. **Mesure des Températures**, par G. RIBAUD, Professeur à la Sorbonne (*83 figures*).

N° 191. **Chimie générale** (*2^e édition, mise à jour*), par A. BOUZAT, Doyen de la Faculté des Sciences de Rennes (*28 figures*).

N° 192. **Les Races humaines** (*2^e édition*), par P. LESTER, Sous-Directeur de Laboratoire au Muséum, et Jacques MILLOT, Professeur à la Faculté des Sciences de Paris (*23 fig.*).

N° 193. **Histoire des États-Unis,** par Edmond PRÉCLIN, Professeur à la Faculté des Lettres de Besançon (*2 cartes*)
(*Couronné par la Soc. de Géographie Commerciale de Paris. Médaille Bourges.*)

N° 194. **Blanchiment, Teinture et Impression,** par G. MARTIN, Directeur à la Société anonyme des Matières Colorantes et Produits chimiques de Saint-Denis (*15 fig.*).
(*Ouvrage couronné par la Société Industrielle de Rouen.*)

N° 195. **Histoire de la Littérature Allemande**, par G. BIANQUIS, Prof. à la Faculté des Lettres de l'Univ. de Dijon.
(*Ouvrage couronné par l'Académie française, Prix d'Académie.*)

N° 196. **Les Thermidoriens,** par G. LEFEBVRE, Professeur à la Faculté des Lettres de l'Université de Paris.

N° 197. **Les Finances publiques et les Impôts de la France,** par L. TROTABAS, Professeur à la Faculté de Droit d'Aix-Marseille (*11 figures*).

N° 198 **Introduction à la Sociologie** (*2^e édition*), par Armand CUVILLIER, Professeur agrégé de Philosophie.
(*Ouvrage récompensé par l'Académie des Sciences morales et politiques.*)

N° 199. **La Réforme et les Guerres de Religion,** par Josèphe CHARTROU-CHARBONNEL, Agrégée d'Histoire, Docteur ès lettres.

N° 200. **Biologie mathématique,** par V. A. KOSTITZIN, ancien Professeur à la Faculté des Sciences de Moscou (*16 figures*).

N° 201. **Le Problème des Nationalités,** par Paul HENRY, Professeur à la Faculté de Lettres de Clermont-Ferrand.

N° 202. **La Chine : Passé et Présent,** par J. ESCARRA, Chargé de Cours à l'Institut des Hautes Études Chinoises (*1 carte*).
(*Ouvrage couronné par l'Académie française et par la Société de Géographie Commerciale de Paris. Médaille Castonnet des Fossés.*)

N° 203. **La Vie de la Cellule végétale.** Tome III : **L'enveloppe de la matière vivante,** par R. COMBES, Professeur à la Sorbonne (*26 figures*).

N° 204. **"1848"**, par Félix PONTEIL, Professeur des Facultés des Lettres.

N° 205. **La Bretagne**, par René MUSSET, Doyen de la Faculté des Lettres de l'Université de Caen (*12 cartes*).
(Ouvrage couronné par la Société de Géographie Commerciale de Paris).

N° 206. **Les Géométries**, par Lucien GODEAUX, Professeur à l'Université de Liége, Correspondant de l'Académie Royale de Belgique (*35 figures*).

N° 207. **La Pensée au Moyen âge**, par Paul VIGNAUX, Directeur d'études à l'École des Hautes Études.

N° 208. **La Troisième République** (*4 Sept. 1870-3 Août 1914*), par G. BOURGIN, ancien Membre de l'École Française de Rome, Conservateur aux Archives Nationales.

N° 209. **La Civilisation**, par Félix SARTIAUX.
(Ouvrage couronné par l'Académie Française, Prix Furtado).

N° 210. **La Préhistoire** (*2e édition*), par A. VAYSON de PRADENNE, Directeur de l'École des Hautes Études, Professeur à l'École d'Anthropologie (*47 figures*).

N° 211. **Morphologie sociale**, par Maurice HALBWACHS, Professeur à la Sorbonne.
(Ouvrage couronné par l'Académie française, Prix Fabien).

N° 212. **Arbres et Forêts**, par Léon PARDÉ, ancien Conservateur des Eaux et Forêts, Ancien Directeur des Écoles forestières et de l'Arboretum National des Barres, et Maurice PARDÉ, Professeur à la Faculté des Lettres et à l'École des Ingénieurs hydrauliciens de l'Univ. de Grenoble.

N° 213. **La Turquie : Passé et Présent**, par Marcel CLERGET, Docteur ès lettres, Ancien Professeur au Lycée Galata-Saray et à l'Université du Caire (*7 cartes et 2 plans*).

N° 214. **Le Cancer**, par G. ROUSSY, Membre de l'Académie des Sciences et de l'Académie de Médecine (*6 figures*).

N° 215. **Le Droit Commercial**, par L. JULLIOT de LA MORANDIÈRE, Professeur à la Faculté de Droit de l'Université de Paris.

N° 216. **Décharge électrique dans les Gaz**, par Marcel LAPORTE, Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Nancy (*41 figures, 20 tableaux*).

N° 217. **Sols et Fondations**, par Armand MAYER, Ingénieur en chef des Mines, Membre du Comité technique du Laboratoire d'Étude des Sols et Fondations (*94 figures*).

N° 218. **Le Panaméricanisme**, par E. PÉPIN, ancien Jurisconsulte Adjoint au Ministère des Affaires Étrangères, Chargé de Mission aux Conférences panaméricaines (*2 cartes*).
(Couronné par l'Académie des Sciences morales et politiques, prix Joseph du Teil).

N° 219. **L'Unité allemande** (1806-1938), par P. BENAERTS, Agrégé de l'Université, Docteur ès lettres (*3 cartes*).

N° 220. **La Reproduction chez les Plantes,** par Roger HEIM, Sous-Directeur au Muséum National d'Histoire naturelle. (*31 figures*).

N° 221. **La Phénicie et l'Asie Occidentale,** *des Origines à la Conquête macédonienne*, par Raymond WEILL, Directeur d'Études à l'École des Hautes Études, Chargé de Cours à la Faculté des Lettres de Paris (*1 carte*).

N° 222. **Radioactivité et Transmutation des Atomes**, par Théodore KAHAN, Docteur ès sciences, Préface de Louis de Broglie (*35 figures*).

N° 223. **Principes de Zoologie agricole,** par Paul VAYSSIÈRE, Ingénieur agronome, Docteur ès sciences, Professeur à l'Institut National d'Agronomie de la France d'Outre-mer (*24 figures*).

N° 224. **Les Chaleurs spécifiques,** par Edmond BRUN, Professeur au Lycée Saint-Louis (*49 figures*).

N° 225. **La Psychologie animale,** par Paul GUILLAUME, Professeur à la Faculté des Lettres de Paris (*21 figures*).

N° 226. **La Terre et l'Homme en Extrême-Orient,** par Pierre GOUROU, Chargé de Cours à l'Université de Montpellier (*20 figures et cartes*).

N° 227. **Grandeur et Décadence de l'Asie:** *L'avènement de l'Europe*, par Fernand GRENARD, Ministre plénipotentiaire.

N° 229. **Le Papier**, par René ESCOURROU, Docteur ès sciences, ancien Ingénieur aux Papeteries Navarre (*13 fig.*).

N° 230. **Introduction aux Sciences biologiques,** par Et. RABAUD, Professeur honoraire à la Faculté des Sciences de Paris (*52 figures*).

N° 231. **La Combustion et les Combustibles**, par Paul VEROLA, Ingénieur en chef des Poudres (*22 figures*).

DESACIDIFIE à SABLÉ 1992

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE

En préparation :

N° 232. **L'Evolution psychologique de l'Enfant,** par Henri WALLON, Professeur au Collège de France, Directeur à l'Ecole pratique des Hautes-Etudes.

N° 233. **La Bourgogne,** par Georges CHABOT, Professeur à la Faculté des Lettres de Dijon.



