

Effectuons d'après ces données les mêmes calculs, et cherchons la température de combustion, les calories apportées et emportées ; puis rapportons ces chiffres au volume unitaire de fumées.

Cherchons d'abord la température de combustion par la méthode graphique connue : on trouve que la température développée avec le gaz riche atteint 2660°, soit près de 300° de plus qu'avec le gaz pauvre (fig. 52).

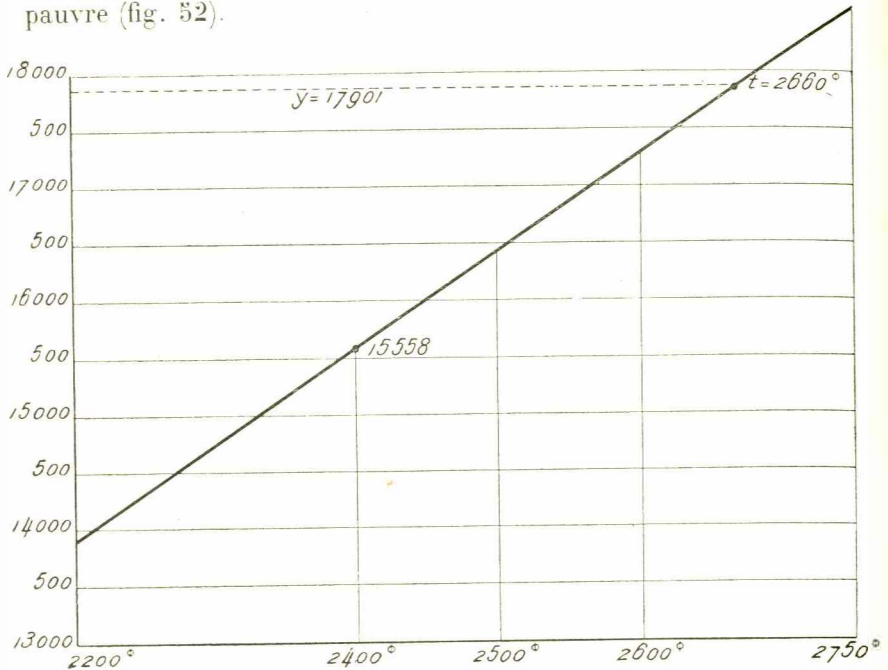


Fig. 51. — Température de combustion du gaz riche.

La chaleur apportée par 100 volumes moléculaires de gaz ou 2232 L. est de 17901 calories.

La chaleur emportée par la quantité correspondante de fumées soit 622 molécules est 9342 calories, ou 1505 pour 100 molécules de fumées

La chaleur absorbée par le laboratoire ou utilisée est la différence :
 $17901 - 9342 = 8559$

sition des hydrocarbures qui serait difficile à éviter si l'on soumet ce gaz à la récupération. Ces carbures disparaîtraient en donnant naissance à un dépôt de noir de fumée.

Mais on sait qu'il est possible de remédier à ce dépôt de noir de fumée par une addition préalable de vapeur d'eau au gaz : et il y aurait intérêt à le faire pour obtenir le maximum de température.

Notre calcul de température combustion et notre bilan sont donc des maxima mais dont on pourra en pratique se rapprocher de très près.



sylvanie distançant les autres districts, même ceux situés sur les meilleurs gisements de houilles américaines, se trouve ainsi expliqué.

Mais le dernier chiffre du tableau ne permet pas encore de juger de la valeur relative des deux combustibles.

C'est ici, en effet, que la question de durée des opérations intervient.

Si le rapport du nombre des calories apportées par unité de temps varie dans le rapport de 1 360 à 913, inversement la durée de l'opération sera raccourcie dans la proportion de 913 à 1 360, c'est-à-dire que telle opération qui durerait une heure, ne durera que quarante minutes, et qu'une fusion d'acier exigeant six heures au gaz pauvre sera ramenée à quatre heures avec l'emploi du gaz riche¹.

Il est intéressant et nécessaire d'évaluer quelle économie de combustible peut résulter de cet avantage.

L'abrègement de l'opération supprimera pendant le tiers du temps toutes les pertes par rayonnement, c'est-à-dire par le laboratoire, une quantité de chaleur sensiblement égale à celle qui est dépensée, et pour les chambres de récupération une quantité de chaleur que des expériences sur un four Siemens m'ont prouvé être d'environ 15 p. 100; seule la quantité de chaleur emportée par les fumées restera la même puisqu'elle ne dépend que du régime du four et des chambres.

En comptant 60 p. 100 pour la chaleur utilisée dans le laboratoire et 15 p. 100 pour les chambres, on arrive ainsi à une économie de combustible de 75 p. 100 pendant un tiers du temps, soit à peu près 25 p. 100.

De ces raisonnements et données expérimentales, on peut conclure que 3/4 de mètre cube de gaz riche produiront effectivement le même effet que celui que nous avons précédemment calculé pour un mètre cube et l'équivalence entre le gaz riche et la houille pourra s'établir sur la formule suivante :

$$x \times 0,750 \text{ m}^3 = 1 \text{ kilogramme} \times \frac{3834}{4608}$$

$$x = 1,095.$$

¹ L'abrègement de la durée d'une fusion d'acier dans un four Martin en raison de l'élévation de la température de combustion nous a été pratiquement confirmée par un maître fondeur qui avait conduit deux fours Siemens, l'un à double récupération à quatre chambres, l'autre à simple récupération (four Siemens nouvelle disposition).

Ce maître fondeur nous a déclaré que telle opération qu'il effectuait en quatre heures dans le premier cas lui demandait six heures avec son nouveau four.

Cette donnée expérimentale que nous donnons sous réserves, n'ayant pu la vérifier nous-même, aurait son éloquence car on conçoit l'intérêt que peut avoir une aciérie à faire par exemple six charges au lieu de quatre en vingt-quatre heures dans un même four, en y élevant la température de combustion par l'emploi de gaz riche.



Donc 1 mètre cube de gaz a la même valeur que 1,095 kg. de bonne houille à gaz.

Ce chiffre est un minimum, même au point de vue thermique théorique, et ne tient aucun compte de tous les avantages accessoires que nous avons signalés.

Si l'on voulait traduire ce chiffre par une valeur à attribuer au gaz riche pour une aciérie qui voudrait l'acheter d'une compagnie minière ou de fours à coke, il convient de remarquer que le prix de la houille sur lequel on se baserait devrait être majoré des frais de gazéification qui, suivant les gazogènes et le taux de la main-d'œuvre, varient de 2 francs à 5 francs par tonne de houille passée au gazogène.

Si par exemple, la tonne de houille a une valeur d'achat de 20 francs, elle vaudra 25 francs après sa gazéification en gaz pauvre, et le prix du mètre cube de gaz équivalent à celui de cette houille serait :

$$0,025 \text{ fr.} \times 1,095 = 0,0275 \text{ fr.}$$

Dans le cas plus conforme à la vérité industrielle de gazéification incomplète de la houille, que nous avons établi comme variante de notre calcul avec le gaz pauvre, l'équivalence de la houille à gaz et du gaz riche s'établit par la formule :

$$x \times 0,750 = 1 \text{ kilogramme} \times \frac{3834}{4013}$$

$$x = 1,278.$$

D'où l'on déduit le prix en francs :

$$0,025 \times 1,278 = 0,032 \text{ fr.}$$

Le chiffre 0,0275 est un minimum: la réalité se rapprochera de 0,032.

L'étude qui précède nous semble mettre au point la question du chauffage des fours à aciers par les gaz riches. Elle indique la méthode de calcul qui dans chaque cas particulier permettra de fixer l'économie ou la dépense de la substitution du gaz riche à la houille c'est-à-dire au gaz pauvre.

Remarquons en terminant que le chiffre auquel le calcul nous a conduit, 0,032 pour le mètre cube, est très intéressant, non seulement pour les fours à coke mais même pour les usines à gaz.

Aujourd'hui où les deux industries gazières se rapprochent, où les usines à gaz des villes commencent à vendre du coke métallurgique, tandis que les usines à coke se préoccupent de fabriquer du



gaz de ville, on peut entrevoir le jour où beaucoup de fours à acier s'alimenteront au gaz riche, soit produit par les fours à coke, soit même acheté au compteur à des usines à gaz. Ce serait certainement un progrès en métallurgie pour la précision dans la conduite des fours, un avantage pour la fabrication des aciers.

§ 4. — LA QUESTION DES CHAUDIÈRES A VAPEUR

Le chauffage des chaudières à vapeur, question si importante au point de vue de la bonne marche des Centrales électriques, n'a pas beaucoup plus progressé que la gazéification et la conduite des gazogènes depuis une vingtaine d'années, au point de vue de la combustion. Dans notre étude « Le chauffage industriel et les fours à gaz » publiée il y a quinze ans, nous avons signalé que le principal défaut de marche des meilleures chaudières — et nous avons pris pour exemple des chaudières marines — était le grand excès d'air constaté dans les produits de combustion; nous disions même, en terminant l'étude des fours à chauffage direct, que c'était du côté de la combustion neutre sans excès d'air qu'il y avait le plus à gagner, et nous avons évalué l'économie possible à 10 ou 20 p. 100 suivant la température relevée dans la boîte à fumées, c'est-à-dire suivant que le feu était plus ou moins poussé.

De nos jours, lorsqu'on interroge un constructeur de l'un des types de chaudières les plus réputées sur la combustion dans le foyer, il est invariablement répondu que la combustion neutre est impossible sur une grille de chaudière et que l'on doit s'estimer heureux quand les fumées contiennent de 10 à 12 p. 100 d'acide carbonique, ce qui correspond, on le sait, à un excès d'air de 100 à 66 p. 100 : le progrès depuis quinze ans est, on le voit, à peu près nul. Seuls les dispositifs des tubes d'eau ont permis d'améliorer la production au mètre carré de surface de chauffe, mais très peu la production par kilogramme de charbon.

Il convient cependant ici de signaler une tentative récemment présentée à l'industrie et qui nous vient des États-Unis, le Tirage équilibré, appareil fort ingénieux qui tend à régulariser la combustion, à éviter les rentrées d'air au moment de l'ouverture des portes et finalement à obtenir une combustion se rapprochant plus de la combustion neutre ($\text{CO}^2 + 4\text{Az}^2$), avec 14 et 15 p. 100 CO^2 .

Nous signalons, en passant, ce Tirage équilibré sans donner la description de cet appareil de réglage, beaucoup plus mécanique que



chimique, parce qu'il est un symptôme de la préoccupation du constructeur d'éviter l'excès d'air si nuisible au rendement maximum d'une chaudière.

La question du rendement maximum des chaudières a pris depuis quelques années une importance beaucoup plus grande dans les Centrales électriques, à cause du travail très irrégulier que l'on demande aux appareils générateurs de vapeur, travail aussi irrégulier que la consommation d'électricité dans les villes, avec des *pointes* de surtravail excessif, suivies de repos presque complet.

La marche des chaudières dans les Centrales électriques est tout à fait différente de celle d'une chaudière ordinaire d'usine, et c'est pour ne s'être pas rendu compte de cette différence et de l'importance de la température de combustion aux heures de pointes que la consommation de houille est si forte et que le prix du kilowatt s'élève tant pendant ces périodes.

Nous nous défendons, ici encore, de vouloir donner une solution universelle d'un problème essentiellement variable suivant les combustibles et suivant les Centrales, nous nous proposons seulement de poser ce problème, de signaler le but et d'indiquer quelques moyens d'y atteindre.

La chaudière de Centrale électrique doit pouvoir passer rapidement d'une production moyenne à une surproduction, et cela sans que la pression de vapeur soit abaissée, car le rendement des turbines s'en trouverait diminué et la consommation s'accroîtrait sans limite jusqu'à chute complète de la pression.

Pour accroître la vaporisation et faire face à cette consommation forcée, le seul moyen est d'augmenter la température de régime des gaz circulant contre les parois de la chaudière ou entre les tubes d'eau. Il y a pour cela deux méthodes : 1° on peut accroître la vitesse de circulation des produits de combustion, c'est-à-dire augmenter le tirage ou la soufflerie du foyer; c'est la méthode généralement usitée; 2° on peut accroître la température de combustion.

Or il est aisé de comprendre que la première méthode est anti-économique : lorsque les gaz de combustion circulent avec une vitesse telle qu'ils n'ont pas le temps de se refroidir et que les surfaces postérieures de la chaudière sont maintenues à une température de régime élevée, 450° ou 500° par exemple, les fumées s'échappent elles-mêmes à cette température et le rendement de combustion s'abaisse, nous l'avons vu, à 75 et même 65 p. 100. Il s'ensuit que c'est aux heures de pointes, aux heures de forte consommation, que



le rendement est le plus mauvais, et que par suite le rendement moyen est souvent très défectueux dans les Centrales, quelque bonnes que soient, en marche normale, les chaudières. De là le haut prix de revient du kilowatt.

Peut-on pour remédier à ce défaut, augmenter par un autre moyen l'échange de calories entre les gaz du foyer et la chaudière? Il suffit pour cela d'accroître la température de ces gaz, ce qui peut s'obtenir soit en neutralisant la combustion, soit en insufflant sous le foyer de l'air chauffé préalablement dans un récupérateur placé en queue de chaudière après le réchauffeur d'eau d'alimentation.

Ces principes ne sont en rien théoriques, et c'est en les appliquant au chauffage d'une chaudière dans un four destructeur de l'usine de la Ville de Paris de Saint-Ouen que nous en avons vérifié l'exactitude et le caractère pratique.

Un four d'incinération d'ordures ménagères est constitué par quatre grilles ou foyers jumeaux, suivies d'une chambre de combustion accolée à une chaudière, et enfin d'un récupérateur à tuyaux de fonte chauffant préalablement l'air de combustion.

Pour obtenir d'un tel appareil, considéré comme une chaudière ordinaire alimentée par un combustible très inférieur, le maximum de vapeur, nous avons opéré de la façon suivante : 1° neutralisation de la combustion en faisant marcher deux des foyers en gazogène et deux autres en combustion oxydante ; 2° chauffage aussi intense que possible de l'air d'alimentation des grilles par le jeu d'un by-pass qui permettait de dévier vers le récupérateur une partie des produits de combustion. Nous avons dit que cette méthode nous avait donné 18 kilogrammes de vapeur par mètre carré avec le plus mauvais des combustibles connu, dans une chaudière à tubes d'eau.

Ce que nous avons pu faire dans un appareil où la production de vapeur n'était que secondaire, rien ne s'oppose à ce qu'on le fasse ou qu'on tente de le faire dans une chaudière alimentée par un combustible quelconque et spécialement étudiée pour la production intensive aux heures de pointes. Rien n'empêche en effet, dans une chambre de combustion suffisamment grande, de neutraliser la combustion et d'obtenir des températures de 1 200 à 1 500°. Rien ne s'oppose non plus, lorsque la circulation plus active expose à ce que les gaz sortent d'une chaudière encore très chauds, à faire de la récupération, et même à consacrer une partie des calories à chauffer l'air, c'est-à-dire à élever la température de combustion.

Ces remarques, ces observations empiriques, et plus encore la



vérité évidente que le moyen le plus efficace d'accroître la production d'une chaudière sans en abaisser le rendement est *l'accroissement de la température de régime et par suite de la température de combustion* ont conduit les auteurs à généraliser la solution que l'un d'eux avait spécialement étudiée dans un four de la Ville de Paris. De là le dépôt de pli cacheté à l'Académie des sciences dont nous donnons ci-dessous le texte¹.

La surproduction de vapeur par élévation de la température de

¹ Copie du pli cacheté déposé par MM. *Enlilio Damour et Jean Carnot* au secrétariat de l'Académie des Sciences, le 30 octobre 1909. — L'objet de cette invention est l'association de deux foyers ou d'un four et d'un foyer, l'un à combustion oxydante, l'autre à combustion franchement réductrice (gazogène) réunissant leurs gaz ou fumées dans une chambre de seconde combustion commune, pour améliorer le rendement et l'effet utile des deux foyers en vue du chauffage d'une chaudière ou de tout appareil similaire.

La première application que nous comptons en faire est une amélioration des fours d'incinération des ordures ménagères, par l'adjonction aux fours existants qui sont à combustion nettement oxydante d'un gazogène Riché, déjà connu de l'Académie des Sciences ou de tout autre gazogène capable de brûler les ordures ménagères passablement humides.

C'est spécialement en vue de cette application initiale que nous voulons nous garantir, mais notre invention s'applique aussi bien à toute combinaison d'un foyer oxydant et d'un foyer réducteur par exemple un foyer de chaudière à vapeur, un four à puddler, un four de grillage Perret et un gazogène quelconque. Elle a encore pour but de permettre ou de faciliter l'emploi de tous les combustibles inférieurs et à bas prix en choisissant pour chacun d'eux le foyer et le mode de combustion les mieux appropriés, soit oxydants, soit réducteurs et en rectifiant par un second foyer inversement réducteur ou oxydant, la combustion, tant au point de vue de la neutralisation des gaz qu'au point de vue de la température de combustion laquelle se trouvera forcément accrue.

Sous cette forme générale, notre invention peut avoir des applications multiples. Il nous suffira pour préciser nos idées d'en donner deux exemples inverses :

1^o Enrichissement en calories des fumées et accroissement de la puissance de vaporisation d'une chaudière à charbon ordinaire par l'envoi à la suite du foyer d'un jet de gaz produits en gazogène par un combustible très inférieur.

Ce cas serait intéressant pour la réalisation des pointes dans les stations électriques.

2^o Amélioration de la vaporisation produite par un four destructeur d'ordures ménagères, par l'envoi des gaz d'un gazogène séparé alimenté par un combustible qui pourrait être du coke ou de la houille (ou même de la gadoue).

Citons encore comme pouvant être intéressant un four de grillage système Perret, brûlant de l'escaillage de charbon (30 à 40 p. 100-C) et conjugué à un gazogène Siemens pour chauffer une chaudière.

La valeur inventive de notre idée réside principalement dans la double et mutuelle réaction des 2 foyers et dans la réciproque amélioration de marche et de rendement de chacun d'eux.

Le gazogène réagit sur le four ou foyer oxydant par l'intermédiaire de la chambre de seconde combustion parce qu'il élève considérablement la température de combustion : par un dosage méthodique du gaz réducteur (CO, H.Az.) avec les fumées oxydantes du four, on peut arriver à neutraliser la fumée résultante, de façon à ne plus obtenir que (CO², H²O, Az) ou à se rapprocher de cette composition théorique. On sait que l'élévation de température qui en résulte peut atteindre 500° et plus, si le foyer est très oxydant.

Inversement le four ou foyer oxydant réagit sur le gazogène et c'est même ici que se place la partie caractéristique de notre invention. Au lieu de brûler notre gaz réducteur à l'aide d'air chaud ou froid, mais avec de l'air seul, nous en assurons la combus-



combustion s'est encore vérifiée dans la chaudière Normand dont nous avons donné la monographie de même que nous y avons démontré la possibilité de porter à 1600 et 1700° les chambres de combustion de chaudières.

Nous indiquons donc ici une méthode générale à laquelle les Centrales doivent se soumettre et que les constructeurs ne doivent pas perdre de vue.

§ 5. — LES GRANDES CENTRALES ÉLECTRIQUES

La question des fours à coke et celle des chaudières nous ont conduit incidemment à aborder l'étude des Centrales électriques établies à côté des houillères, et nous avons indiqué comme nous paraissant la plus rationnelle dans ce cas une solution mixte, comportant d'une part des moteurs à explosion utilisant le gaz pauvre produit dans une batterie de gazogènes, d'autre part des turbines actionnées par des chaudières à foyers spéciaux utilisant les escaillages.

Dans les agglomérations urbaines éloignées des centres miniers et des centres de production de la houille blanche comme la Ville de Paris, la question ne se pose pas de la même manière, car l'écono-

tion par des gaz déjà partiellement brûlés, par les fumées du premier foyer : nous utilisons l'excès d'air contenu dans ces fumées oxydantes sans apport d'air spécial pour la combustion de notre gaz.

Les avantages de ce dispositif nouveau sont multiples :

Le premier est celui qui caractérise la réaction du foyer oxydant sur le gazogène et résulte du fait que la combustion du gaz bénéficie de la température développée dans le premier foyer et s'effectue à une température beaucoup plus élevée que dans les conditions ordinaires : de là amélioration de la combustion qui pourra se faire même dans le cas d'un gaz très pauvre non combustible lui-même à l'air froid.

Le second avantage est l'utilisation de l'excès d'air des fumées du four oxydant et en même temps la récupération indirecte des calories que cet air emporterait finalement de la cheminée s'il n'était neutralisé : il en résulte une amélioration du rendement même du four.

Enfin la température initiale de la chambre de seconde combustion étant donnée par le premier foyer, le gazogène permet, par une admission dosée de gaz, de régler presque à volonté la température de régime jusqu'au maximum donné par la combustion rigoureusement neutre du combustible considéré. Ce dernier avantage est appréciable dans les chaudières à débits très variables, *telles que celles des Centrales électriques.*

En résumé, nous revendiquons comme notre invention le dispositif d'accouplement d'un foyer oxydant et d'un foyer réducteur que nous considérons comme une solution absolument générale du problème de la combustion des combustibles *inférieurs de toute nature*, avec réaction mutuelle de ces deux organes dans une chambre que nous appelons « chambre de seconde combustion » ou « chambre de combustion neutre », et nous revendiquons comme idée secondaire celle de la combustion d'un gaz (CO, H, Az) exclusivement à l'aide de fumées déjà partiellement brûlées et chaudes en n'utilisant que l'air en excès résultant d'une première combustion.



mie des transports oblige à n'employer que des combustibles riches, dans ces immenses Centrales atteignant une puissance de 80 000 à 120 000 kilowatts comme celle que projette la Société d'Electricité de Paris.

Quelle doit être dans ces Centrales urbaines la solution préférable et la plus économique ? Doit-on adopter le gaz pauvre et le moteur à explosion ou faut-il s'en tenir à la vapeur avec les avantages que la turbine et la surchauffe de vapeur lui ont récemment reconquis ?

Si l'on s'en tenait à l'expérience faite récemment à Madrid et aux difficultés énormes qui ont marqué cette entreprise, il semblerait que la question ne se pose presque plus et que la lutte entre le gaz et la vapeur doive se terminer à l'avantage de la dernière.

Mais nous avons dit que le gazogène était loin d'avoir atteint la perfection de sa marche et démontré que la gazéification des charbons courants, gras et demi-gras pour usage de moteurs était un problème d'une solution certaine, prochaine peut-être.

Dans ces conditions, plus que jamais nous devons nous demander quelle est la solution de l'avenir; la question est d'assez d'importance pour que nous cherchions à tirer de notre théorie de la combustion quelques indications précises.

Si nous nous reportons à quelques années en arrière, à l'époque des premières applications des gaz pauvres des hauts fourneaux dans les grands moteurs à explosion, il semblait alors que le moteur à gaz prenait définitivement l'avance sur la vapeur pour la fabrication de l'énergie. Mais, depuis cette époque est venue la découverte de la turbine et surtout de la turbine différentielle qui réalisa sur les meilleures machines alternatives une économie de vapeur de près d'un tiers; plus récemment l'idée de la surchauffe de la vapeur a permis de réaliser un supplément d'économie d'environ 10 p. 100.

La vapeur reprit alors tous ses avantages et la turbine, avec ses avantages de continuité et de faible encombrement, retient actuellement la faveur des constructeurs des centrales électriques.

Donnons à cet égard quelques chiffres. Nous avons vu qu'une très bonne turbine arrive à produire le kilowatt avec 6 kilos de vapeur surchauffée, qu'une très bonne chaudière fournit de la vapeur à raison de 10 kilos par kilogramme de houille brûlée sur la grille.

Nous avons montré, d'autre part, que ces chiffres d'expérience, actuelle correspondent à une utilisation effective de 17 p. 100.

Dans les grands moteurs à explosion alimentés au gaz pauvre on admet actuellement que le rendement en énergie électrique peut



atteindre de 30 à 35 p. 100, l'excédent des calories se répartissant à peu près par moitié entre les produits brûlés de l'explosion et l'eau de refroidissement du moteur.

Il semblerait déjà par ces chiffres que l'avantage se dessine en faveur du gaz.

Examinons aussi les économies qui resteraient à réaliser de part et d'autre.

Dans le domaine de la vapeur, nous ne voyons plus guère d'économie réalisable que celle signalée dans les chaudières par la combustion neutre remplaçant très facilement la combustion très oxydante à 50 p. 100 d'excès d'air actuellement pratiquée partout. Cette économie s'appliquerait aux heures de pointes, mais en marche normale elle ne dépasserait pas de 5 à 10 p. 100.

Dans le domaine des moteurs à gaz, la même économie ou du moins la même amélioration de marche pourrait être obtenue, car nous avons pu constater par des analyses de fumée d'échappement combien rare est le dosage exact de l'air de combustion dans un cylindre de moteur à gaz ; mais en outre il n'est pas interdit d'entrevoir d'autres moyens d'augmenter le rendement par l'utilisation des calories perdues soit dans les fumées, soit dans l'eau de refroidissement.

Depuis que la turbine à basse pression existe, depuis que les découvertes de Rateau ont permis d'utiliser même les vapeurs d'échappement des moteurs sans condensation ; depuis, en un mot, que l'énergie calorifique à très faible potentiel est devenue utilisable, il n'est pas impossible de récupérer les calories contenues soit dans de l'eau à 80 et 90° soit dans des fumées à 200-250°.

Nous n'insistons pas davantage sur ce problème et nous nous défendons absolument de vouloir donner à ce sujet autre chose que de simples indications.

Nous ne voulons pas davantage pronostiquer de l'avenir et affirmer que la lutte entre le gaz et la vapeur se terminera à l'avantage du gazogène.

Nous pensons même que la meilleure solution doit être électorique ; que le moteur à explosion sera plus économique et s'imposera pour la production de la constante de consommation diurne et nocturne dans les Centrales ; mais que pour les pointes la chaudière et le moteur à vapeur reprendront peut-être l'avantage en raison de leur capacité de surproduction et de leur souplesse.

Nous n'avons pas pu passer sous silence la grosse question des



centrales électriques dans une étude des sources de l'énergie calorifique, pour les deux raisons suivantes :

Si le rendement de transformation d'énergie calorifique en kilowatt gagnait quelques unités et arrivait par exemple à 50 p. 100, par suite de l'économie considérable que présente le four électrique par rapport aux fours à chauffage direct au point de vue du rayonnement et des facilités de traitement, on peut prévoir le jour où les Centrales électriques deviendraient de véritables sources de calories utilisables pour le chauffage même dans les grandes villes éloignées des mines et des chutes d'eau : Le kilowatt électrique deviendrait partout une importante source de calories.

En second lieu nous remarquerons en terminant que ce progrès des centrales électriques et l'abaissement du prix de revient du kilowatt qui en serait la conséquence sont liés étroitement à la question des gazogènes dont nous avons signalé tous les défauts actuels. Nous avons indiqué en même temps en nous basant sur les données précises de la thermodynamique les remèdes à apporter et le sens des progrès à étudier pour produire le bon gaz avec un combustible quelconque.

C'est là, nous le croyons, la preuve la plus éclatante des services que peut rendre à l'industrie une science toute mathématique et abstraite; c'est la raison d'être de notre livre.



Tableau des pouvoirs calorifiques rectifiés à pression constante. Eau vaporisée.

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES	ANALYSE ÉLÉMENTAIRE						Pouvoir calorifique observé.	Correction pour pression constante.	Correction pour vapeur d'eau.	Pouvoir calorifique vrai.	
	Carbone.	Hydrogène.	Oxygène.	Eau hygroscopique.	Cendres.						
Anthracites et Houilles anthracit.	Anthracite de Pensylvanie	86,436	4,995	2,199	3,450	5,900	7,484	5,4	106,8	7,383	
	Anthracite de la Muro (Grande couche)	86,564	4,367	2,069	4,700	4,400	7,468	3,7	73,5	7,398	
	Anthracite de Hay-Duong (Tonkin)	86,414	2,000	4,626	3,260	4,000	7,533	5,4	107,3	7,431	
	Houille anthraciteuse de Kébao (galerie U)	85,746	2,733	2,731	2,800	5,450	7,828	7,4	146,5	7,719	
	Houille anthraciteuse de Commentry	84,928	2,892	5,005	1,775	5,400	7,850	7,8	155,0	7,706	
	Houille anthraciteuse de Blanzay, Puits Sainte-Barbe, 1 ^{re} couche.	82,746	2,916	6,278	1,760	6,300	7,773	7,8	136,1	7,625	
	Houille anthraciteuse Grand-Combe, couche Champelauson, Puits Patassas	84,068	3,631	4,220	0,831	7,250	7,850	9,8	194,7	7,663	
	Houille anthraciteuse du Creusot	89,386	3,661	3,703	1,800	4,450	8,404	9,9	196,3	8,318	
	Houilles grasses et demi-grasses à coques.	Demi-grasse d'Anzin, Fosse Saint-Marc, 4 ^e veine du Nord	88,473	4,439	4,338	1,350	4,700	8,392	11,2	222,1	8,181
		Demi-grasse de la Grand-Combe, couche du Puits Saint-Jean	87,164	4,265	4,161	0,610	3,800	8,371	14,5	228,6	8,154
Demi-grasse de la Roche-la-Molière		85,691	4,167	5,242	0,900	4,000	8,417	11,3	223,7	8,205	
Demi-grasse d'Aniche, veine Ferdinand, F. l'Air-chevique		5,934	4,198	5,240	0,625	4,000	8,426	14,3	225,4	8,212	
Grasse d'Anzin, grande veine, Fosse Enclos		83,754	4,385	5,761	1,100	5,000	8,051	14,8	235,0	8,828	
Grasse Ronchamp, Puits Magny, 2 ^e couche		79,200	4,311	5,589	1,200	9,700	7,830	14,6	234,0	7,609	
Grasse de Lens, fosse n° 8, veine de 1 ^{re} 90		87,756	4,678	5,036	1,000	1,550	8,614	12,6	231,0	8,376	
Grasse de Carmaux		83,200	4,724	7,076	1,500	4,500	8,380	12,7	253,2	8,139	
Grasse marchaute de Roche-la-Molière		85,636	4,428	5,386	1,350	3,000	8,482	12,8	248,4	8,246	
Grasse des Houillères de Saint-Etienne, 8 ^e couche, Treuil		81,546	4,772	5,432	1,250	4,000	8,392	12,9	235,9	8,049	
Grasse des Mines de Portes (Gard)	78,240	4,370	7,700	0,780	8,910	8,616	11,8	234,5	8,303		
Houilles grasses et demi-grasses à gaz.	De Béthune (gazogène de la verrerie Follembroy)	82,418	5,089	7,193	1,200	4,100	7,210	13,7	273,1	6,981	
	De Lens (veine Dusouch, fosse n° 5)	83,727	5,216	7,007	1,050	3,000	8,395	14,1	280,4	8,139	
	De Firminy	81,273	5,309	8,593	1,225	3,600	8,161	14,3	284,8	7,890	
	De Montrambert, grande couche, étage 356 mètres.	84,273	5,330	9,553	0,844	3,000	8,268	14,4	285,9	7,996	
	De Commentry	80,182	5,245	8,173	3,000	3,400	7,870	14,1	281,1	7,603	
	Cannel de Wigan (Lancashire). Col. de l'École des Mines	78,382	5,060	5,058	0,600	10,900	7,761	13,7	271,6	7,503	
	Cannel-Coal Nidrie	76,545	6,005	8,800	3,950	4,700	7,703	16,2	321,9	7,397	
	Houilles et lignites.	De Montvic	76,310	5,422	9,468	4,300	4,800	7,790	13,8	274,6	7,439
		De Blanzay (puits Sainte-Marie, 3 ^e couche, 354 mètres)	79,378	4,967	9,855	3,900	1,900	7,866	5,3	105,7	7,766
		De Blanzay (puits Sainte-Eugénie, 1 ^{re} couche, étage 330 mètres)	75,273	5,144	10,083	1,700	7,800	7,486	13,9	275,7	7,221
De Decazeville (Bourran)		74,727	5,167	11,756	3,500	4,850	7,408	14,0	277,4	7,145	
De Decazeville (Tramont)		75,273	5,425	14,922	1,580	2,800	7,494	14,6	290,8	7,218	
De la Terre-de-Feu		43,159	3,862	14,979	16,500	18,500	4,885	10,4	207,1	4,688	
De Trifail (Slyrie). (Col. de l'École des Mines)		65,455	4,782	24,303	0,710	4,750	6,284	12,9	256,4	6,040	
De Vaugirard		59,795	4,542	23,799	3,444	6,750	5,536	12,2	241,9	5,306	
De Bohème		53,183	5,542	34,230	6,125	0,950	5,489	14,9	297,2	5,207	
Bois.		Bois de sapin de Norvège partiellement desséché. Bois de chêne de Lorraine partiellement desséché. Cellulose Guille ^o	47,366 46,568 44,440	5,584 5,427 6,170	39,780 40,385 49,390	6,940 6,920 »	0,333 0,750 »	4,477 4,329 4,200	15,1 14,7 16,7	299,4 294,3 331,0	4,193 4,052 4,886
Cokes.	Métallurgique de la Grand-Combe	89,273	0,212	2,215	0,500	7,800	7,010	0,5	10,7	7,000	
	De houille de Commentry, préparé à l'École des Mines	92,727	0,444	2,629	»	4,200	7,665	3,2	23,6	7,642	
	De houille demi-grasse d'Anzin, préparé à l'École des Mines	94,582	0,633	1,585	»	3,200	7,787	1,7	34,7	7,754	
	D'anthracite de Pensylvanie, préparé à l'École des Mines	91,036	0,685	2,146	0,233	5,900	7,528	1,8	36,4	7,493	
	à chaud de Commentry	70,036	3,314	23,053	»	3,600	6,155	8,9	177,2	5,987	
	à froid de Blanzay, 1 ^{er} échantillon	72,436	4,344	15,020	3,600	4,600	7,119	11,6	231,2	6,899	
	à froid de Blanzay, 2 ^e échantillon	72,546	5,032	13,722	3,500	5,200	7,169	13,6	269,8	6,943	
	Coke de pétrole d'Amérique (Pour mémoire)	97,855	0,489	1,222	»	0,20	8,057	1,3	26,3	8,032	
	Huile lourde de pétrole d'Amérique	86,894	13,107	»	»	»	10,913	35,4	703,4	10,245	
	Pétrole raffiné d'Amérique	83,491	14,216	0,293	»	»	11,047	38,4	762,9	10,322	
Coke de la houille.	Essence de pétrole d'Amérique	80,563	15,101	4,316	»	»	11,086	40,8	810,1	10,317	
	Pétrole brut d'Amérique	83,042	13,889	3,099	»	»	11,094	37,5	745,2	10,386	
	Huile lourde de Bakou (Russie)	83,700	12,944	»	»	0,85	10,805	34,9	694,2	10,146	
	Pétrole de Novorossisk (Caucase)	84,906	11,636	3,458	»	»	10,328	31,4	624,5	9,735	
	Naphte-schiste de la Nouvelle-Galles	74,574	10,576	3,913	»	»	9,246	28,6	567,2	8,707	
	Ozokérite de Boryslaw	83,510	14,440	0,100	»	1,95	10,946	39,0	774,7	10,210	
	Houille de Commentry	75,182	5,176	8,296	7,05	7,423,30	7,423,30	13,9	277,4	7,149	
	Coke de la houille	85,773	0,444	2,105	10,27	»	7,019,4	1,1	122,0	6,998	
	Goudron du barillet, condensé à 70° C.	90,166	4,848	4,986	»	»	8,887,0	42,9	260,1	8,638	
	Goudron du collecteur, condensé à 70° C.	89,910	4,945	5,145	»	»	8,942,8	13,3	265,0	8,694	
Goudron du réfrigérant, température à l'entrée 51° C.	87,222	5,499	6,279	»	»	8,831,0	14,8	274,5	8,551		
Goudron du condensant, température à l'entrée 16° C.	85,183	5,590	9,218	»	»	8,538,4	15,1	300,4	8,253		
Gaz de la houille	55,086	21,460	23,264	»	»	41,111,0	57,9	1231,3	9,918		

Houilles et lignites.	De la Terre-de-Feu	43,159	3,862	14,979	16,500	18,500	4,885	10,4	207,1	4,688	
	De Trifail (Slyrie). (Col. de l'École des Mines)	65,455	4,782	24,303	0,710	4,750	6,284	12,9	256,4	6,040	
	De Vaugirard	59,795	4,542	23,799	3,444	6,750	5,536	12,2	241,9	5,306	
	De Bohème	53,183	5,542	34,230	6,125	0,950	5,489	14,9	297,2	5,207	
	Bois.	Bois de sapin de Norvège partiellement desséché. Bois de chêne de Lorraine partiellement desséché. Cellulose Guille ^o	47,366 46,568 44,440	5,584 5,427 6,170	39,780 40,385 49,390	6,940 6,920 »	0,333 0,750 »	4,477 4,329 4,200	15,1 14,7 16,7	299,4 294,3 331,0	4,193 4,052 4,886
	Cokes.	Métallurgique de la Grand-Combe	89,273	0,212	2,215	0,500	7,800	7,010	0,5	10,7	7,000
		De houille de Commentry, préparé à l'École des Mines	92,727	0,444	2,629	»	4,200	7,665	3,2	23,6	7,642
		De houille demi-grasse d'Anzin, préparé à l'École des Mines	94,582	0,633	1,585	»	3,200	7,787	1,7	34,7	7,754
		D'anthracite de Pensylvanie, préparé à l'École des Mines	91,036	0,685	2,146	0,233	5,900	7,528	1,8	36,4	7,493
		à chaud de Commentry	70,036	3,314	23,053	»	3,600	6,155	8,9	177,2	5,987
à froid de Blanzay, 1 ^{er} échantillon		72,436	4,344	15,020	3,600	4,600	7,119	11,6	231,2	6,899	
à froid de Blanzay, 2 ^e échantillon		72,546	5,032	13,722	3,500	5,200	7,169	13,6	269,8	6,943	
Coke de pétrole d'Amérique (Pour mémoire)		97,855	0,489	1,222	»	0,20	8,057	1,3	26,3	8,032	
Huile lourde de pétrole d'Amérique		86,894	13,107	»	»	»	10,913	35,4	703,4	10,245	
Pétrole raffiné d'Amérique		83,491	14,216	0,293	»	»	11,047	38,4	762,9	10,322	
Coke de la houille.	Essence de pétrole d'Amérique	80,563	15,101	4,316	»	»	11,086	40,8	810,1	10,317	
	Pétrole brut d'Amérique	83,042	13,889	3,099	»	»	11,094	37,5	745,2	10,386	
	Huile lourde de Bakou (Russie)	83,700	12,944	»	»	0,85	10,805	34,9	694,2	10,146	
	Pétrole de Novorossisk (Caucase)	84,906	11,636	3,458	»	»	10,328	31,4	624,5	9,735	
	Naphte-schiste de la Nouvelle-Galles	74,574	10,576	3,913	»	»	9,246	28,6	567,2	8,707	
	Ozokérite de Boryslaw	83,510	14,440	0,100	»	1,95	10,946	39,0	774,7	10,210	
	Houille de Commentry	75,182	5,176	8,296	7,05	7,423,30	7,423,30	13,9	277,4	7,149	
	Coke de la houille	85,773	0,444	2,105	10,27	»	7,019,4	1,1	122,0	6,998	
	Goudron du barillet, condensé à 70° C.	90,166	4,848	4,986	»	»	8,887,0	42,9	260,1	8,638	
	Goudron du collecteur, condensé à 70° C.	89,910	4,945	5,145	»	»	8,942,8	13,3	265,0	8,694	
Goudron du réfrigérant, température à l'entrée 51° C.	87,222	5,499	6,279	»	»	8,831,0	14,8	274,5	8,551		
Goudron du condensant, température à l'entrée 16° C.	85,183	5,590	9,218	»	»	8,538,4	15,1	300,4	8,253		
Gaz de la houille	55,086	21,460	23,264	»	»	41,111,0	57,9	1231,3	9,918		



Analyses et chaleurs de combustion de divers gaz d'éclairage.

DÉSIGNATION	ANALYSE EN POIDS								Chaleur de combustion	
	Carbone.	Hydrogène.	Oxygène, azote et soufre.	Carbone des hydrocarbures.	Hydrogène.	Oxyde de carbone.	Acide carbonique.	Oxygène, azote et soufre.	cal.	Chaleur de combustion du kilogramme.
Gaz de Cannel Niddrie (31 octobre 1891).	52,077	13,598	34,325	43,333	13,598	16,843	9,262	16,964	6,365	7,735
Gaz de houille de Commentry (3 octobre).	55,086	21,460	23,454	43,740	21,460	24,964	7,087	5,749	5,804	41,111
Gaz d'émission de la Villatte (31 octobre).	53,219	21,342	25,439	42,234	21,342	21,237	6,834	8,333	5,602	40,744
Gaz du laboratoire de l'École des mines (septembre 1891).									5,640	

OBSERVATIONS

COMPOSITION VOLUMÉTRIQUE DES GAZ D'APRÈS LES ANALYSES INDUSTRIELLES FAITES A L'USINE

	Gaz de Cannel.	Gaz de Commentry.	Gaz d'émission.
Vapeurs de benzol	4,53	4,41	4,09
Autres carbures absorbables par le brome	44,03	3,88	3,28
Hydrogène protocarboné et azote	38,00	33,56	33,09
Hydrogène	30,41	49,44	50,88
Oxyde de carbone.	11,09	9,15	8,86
Acide carbonique	8,85	4,87	4,80
Oxygène	1,09	0,99	4,00
	100,00	100,00	400,00
Pouvoir éclairant en litres.	72	99	105

Analyses faites suivant la méthode indiquée par M. Sainte-Claire Deville (*Étude sur le gaz de la houille*, Paris, 1888).

DEUXIÈME PARTIE

LES COMBUSTIBLES

PAR

E. RENGAGE



AVANT-PROPOS

Dans les pages qui précèdent, le lecteur a vu quelles étaient les meilleures conditions pour obtenir avec économie une température élevée dans un four quelconque. Il reste, pour répondre complètement au titre de ce volume, comme aussi à la définition générale du chauffage industriel donnée au début de la première partie, à voir de quelles manières on peut utiliser dans ce but un combustible quelconque. Ce sera l'objet de cette seconde partie, dans laquelle nous devons envisager successivement les différents combustibles et leur emploi dans les foyers. Nous ne reviendrons pas sur les théories générales de la combustion et des équilibres chimiques déjà exposées, et nous nous bornerons à étudier à un point de vue plus pratique l'origine, la préparation et les usages des combustibles, ne mentionnant les détails purement techniques qu'autant que ceux-ci nous sembleront indispensables au lecteur désireux d'acquérir une idée suffisamment nette de la question, et insistant surtout sur les idées générales qui se rapportent à cette étude, de manière à rester fidèle à l'esprit de cette Encyclopédie.

E. R.



CHAPITRE PRÉLIMINAIRE

Définition et classification des combustibles. — On appelle combustible toute substance capable de se combiner avec une élévation notable de température à l'oxygène de l'air.

C'est Lavoisier qui a montré le premier que la combustion n'est autre chose qu'une oxydation, c'est-à-dire une combinaison de la matière inflammable avec la partie active de l'air, l'oxygène.

On peut généraliser et traiter de combustion une oxydation quelconque. Seulement la température de la réaction sera très variable suivant les cas : tantôt, soit parce que la chaleur d'oxydation est faible, soit parce que la vitesse d'oxydation est lente, la température ne s'élève pas sensiblement au-dessus de celle de l'air ambiant : on dit qu'il y a *combustion lente*. D'autres fois la chaleur produite est assez grande pour élever notablement la température du corps oxydé ; et alors généralement la réaction s'accélère d'elle-même ; la vitesse d'oxydation augmentant très rapidement avec la température, la quantité de chaleur produite dans l'unité du temps croît dans le même rapport et la masse se trouve rapidement portée à l'incandescence. Le corps oxydé s'enflamme : on dit qu'il y a *combustion vive*. Le même corps pourra d'ailleurs, suivant les circonstances extérieures, donner lieu à l'un ou à l'autre phénomène, mais il est évident qu'au point de vue industriel la combustion vive sera seule intéressante en permettant d'utiliser la chaleur produite ; ce qui explique la restriction apportée au début à notre définition sur la nécessité d'une élévation notable de température.

On peut d'ailleurs généraliser davantage la notion de combustion et l'étendue à toute réaction chimique, même endothermique. C'est ainsi que l'on pourra dire que le charbon brûle dans la vapeur d'eau, avec absorption de chaleur, pour donner du gaz à l'eau. Quelques intéressantes que puissent être ces généralisations, elles ne correspondent pas au point de vue auquel nous devons nous



placer ici, et qui est de produire de la chaleur (et pratiquement une température assez élevée).

Nous diviserons cette étude en classant d'abord les combustibles suivant leur état physique : solides, liquides ou gazeux, ces trois classes correspondant à des procédés d'utilisation très différents. Dans chacune d'elles, nous distinguerons les combustibles naturels et les combustibles artificiels. Enfin les combustibles solides naturels se subdivisent eux-mêmes en combustibles actuels, que la végétation produit sous nos yeux, et combustibles fossiles, qui constituent des réserves accumulées depuis les périodes géologiques¹.

Nous étudierons ainsi successivement :

A) COMBUSTIBLES SOLIDES.

a) Naturels :

1° Actuels : bois ;

2° Transformés ou fossiles : tourbe, lignite, houille, anthracite.

b) Artificiels : charbon de bois, coke.

B. COMBUSTIBLES LIQUIDES.

Naturels : pétroles.

Artificiels	}	Huiles de schistes ;
		Benzol ;
		Alcool.

C. COMBUSTIBLES GAZEUX.

Gaz naturel ;

— d'éclairage ;

— Riché ;

— de générateurs	}	à l'air ;
		à l'eau ;
		mixte ;

Air carburé ;

Hydrogène ;

Acétylène.

Ces différents combustibles présentent une importance très inégale. Tandis que la houille et ses dérivés, le coke et le gaz des géné-

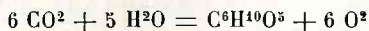
¹ Les agglomérés, souvent classés dans les combustibles artificiels, seront étudiés après chaque catégorie de combustible naturel, l'agglomération ne modifiant pas en général, ou très peu, la nature de la substance primitive.



rateurs, fournissent la presque totalité de l'énergie thermique utilisée dans l'industrie, d'autres, tels que la tourbe, les pétroles, ont une consommation plus restreinte ou plus spécialisée, et certains, acétylène, gaz d'éclairage, ne sont employés qu'en quantités relativement infime et dans des cas tout à fait particuliers. Cependant une étude d'ensemble doit nécessairement les envisager les uns après les autres, quitte à ne s'arrêter que quelques instants à ceux dont l'importance est moindre.

Origine de la puissance des combustibles. — Un combustible constitue une réserve d'énergie que l'on utilise au moment voulu en provoquant son inflammation au contact de l'air. Le combustible et l'air ambiant réalisent donc un système hors d'équilibre, qui peut se transformer en produisant de la chaleur, c'est-à-dire de la puissance motrice. Cette transformation devrait par suite se faire spontanément. Si elle ne se produit pas, cela tient à l'existence de résistances passives qui peuvent être annulées de différentes façons : soit en élevant suffisamment la température, procédé universellement suivi pour enflammer les corps ; soit à l'aide de catalyseurs convenables, permettant à l'oxydation de s'effectuer à la température ordinaire. Les ferments constituent de tels catalyseurs, et l'on sait que le bois qui se putréfie à l'air disparaît peu à peu sous forme d'anhydride carbonique et de vapeur d'eau. La houille s'oxyde aussi spontanément, et les recherches de Moissan ont montré également que le charbon de bois commence à se combiner à l'oxygène dès la température de 100°¹.

Quant à la provenance de cette énergie emmagasinée dans les combustibles, nous la trouvons dans la radiation solaire. Tous les combustibles, en effet, comme nous le verrons (peut-être faut-il en excepter les pétroles, dont l'origine est d'ailleurs encore très mal connue) proviennent de végétaux. Or la croissance du végétal nécessite une dépense d'énergie : la cellulose, qui en constitue l'élément fondamental, a été formée à partir de l'anhydride carbonique et de la vapeur d'eau atmosphériques, suivant une série de réactions certainement très complexes, mais que l'on peut écrire, en se bornant aux termes extrêmes :

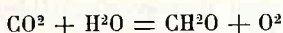


Cette réaction est fortement endothermique, puisqu'elle est préci-

¹ H. Moissan. *C. R.*, 135, 925; 1902.



sément l'inverse de la combustion de la cellulose. Elle n'a pu se produire que grâce à l'énergie solaire. Sous l'action de la lumière, les parties vertes des plantes ont absorbé l'anhydride carbonique de l'air et ont régénéré l'oxygène. Telle a du moins été la réaction définitive, qui n'est évidemment que la résultante d'une suite probablement fort complexe de réactions élémentaires, sur lesquelles on n'a pu jusqu'à présent que faire des hypothèses. La plus vraisemblable, due à Bæyer, consiste à admettre que le premier terme de cette suite serait l'aldéhyde formique, formée d'après l'équation :



Cette aldéhyde se polymériserait et se condenserait au fur et à mesure de sa production en donnant naissance à des sucres, puis à de l'amidon ou de la cellulose ¹.

Quoi qu'il en soit, le rendement de l'énergie lumineuse dans l'assimilation chlorophyllienne est très mauvais : en évaluant successivement le nombre de calories reçues annuellement par une surface donnée du sol sous notre latitude, et le pouvoir calorifique des végétaux formés durant le même temps, on trouve qu'il n'atteint pas un pour cent. Ce rendement déplorable s'explique si l'on réfléchit aux mauvaises conditions dans lesquelles travaille la plante, qui est obligée de puiser son carbone dans un acide carbonique extrêmement dilué : l'air atmosphérique ne renfermant qu'un millième environ en poids de ce gaz ².

Si l'on essaie d'augmenter artificiellement la richesse de l'atmosphère en acide carbonique, on n'obtient aucune amélioration : au contraire la plante, n'étant pas habituée à vivre dans ces conditions, ne tarde pas à mourir ³.

¹ On doit remarquer que l'amidon ne peut pas se transformer *directement* en cellulose car, ainsi que l'a fait observer Skraup, ces deux substances dérivent de deux chaînes différentes : la première donnant par hydrolyse du maltose $\text{C}^{12}\text{H}^{22}\text{O}^{11}$, tandis que la seconde se résout en un isomère, le cellose. Il faut descendre jusqu'au terme en C^6 pour trouver le même produit de dégradation, le glucose. L'amidon ne peut donc se transformer en cellulose que par une hydrolyse préalable. il ne joue par suite dans le développement de la plante que le rôle d'une substance de réserve.

² L'énergie rayonnée par le soleil sur la surface de la terre équivaut à 200 billions de chevaux-vapeurs. De ces radiations les plantes n'absorbent que la partie comprise dans le rouge et le jaune, et assimilent journellement sous cette influence 4 milliards de kilogrammes d'anhydride carbonique, ce qui correspond à 15 milliards de chevaux-vapeur-heure (*Zeit. wiss. Phot.*, 3, 1, 258; 1905).

³ Voyez J. Duclaux, *La Chimie de la matière vivante*, Paris, 1910.



CHAPITRE PREMIER

LES COMBUSTIBLES SOLIDES

A. — LES COMBUSTIBLES SOLIDES NATURELS

a) COMBUSTIBLES ACTUELS

§ 1. — LE BOIS

Le bois est évidemment le premier combustible dont l'homme a dû se servir ; il a été le seul à peu près exclusivement employé soit tel quel, soit après carbonisation, jusqu'au moment où l'usage de la machine à vapeur a fait reconnaître la supériorité du charbon de terre ; il n'est plus aujourd'hui employé industriellement que pour quelques opérations spéciales, et encore peut-on prévoir que dans un avenir assez prochain il ne sera plus utilisé comme combustible.

Les principales essences exploitées en Europe sont : le chêne, le hêtre, le charme, l'ormeau, le tilleul, le châtaignier, le peuplier, le bouleau et les bois résineux : pin maritime et pin sylvestre, sapin, épicéa, mélèze. Ce sont les pins et les sapins qui constituent, avec les bouleaux, les forêts de la Suède, de la Norvège et de la Russie.

Classification des bois. — DENSITÉS. — On divise pratiquement les bois en *bois durs* ou *lourds* et *bois tendres* ou *légers*.

Les premiers ont un grain plus serré et une densité apparente plus élevée, supérieure à 0,55 à l'état sec et à 0,90 pour le bois vert. Ce sont le chêne, le hêtre, le charme, l'ormeau, le châtaignier.

Les bois tendres sont plus mous, leur densité apparente à l'état sec est généralement inférieure à 0,50 : ce sont le tilleul, le peuplier et les essences résineuses.

Quant au bouleau il se place entre les deux catégories. Voici du



reste un tableau extrait du *Traité de Métallurgie* de Babu ; les bois ont été desséchés par un séjour prolongé à l'air :

BOIS DURS	POIDS SPÉCIFIQUES
—	—
Hêtre.	0,77
Chêne.	0,71
Frêne	0,67
Érable	0,64
Ormeau	0,57
BOIS INTERMÉDIAIRES	
Bouleau	0,55
Aulne	0,54
BOIS TENDRES	
Sapin blanc.	0,48
— du Nord (rouge).	0,47
Pin sur terrain sec	0,55
Mélèze.	0,47
Tilleul.	0,44
Saule.	0,48
Érable.	0,43
Peuplier d'Italie.	0,39
— noir.	0,39

Ces différences de densité¹ proviennent de la porosité plus ou moins grande des bois, due aux canaux qui servaient au transport de la sève dans l'arbre vivant. Si l'on cherche au contraire la densité réelle du bois, en le réduisant en poudre et le laissant séjourner plusieurs jours dans un picnomètre où l'on fait le vide, on trouve pour toutes les essences très sensiblement la même densité, 1,50 ; ces valeurs obtenues ne diffèrent guère entre elles de plus de 1 p. 100.

Composition des bois. — Cette constance du poids spécifique fait pressentir une composition identique. En effet, le bois est constitué essentiellement par de la cellulose $C^5H^{10}O^5$, à laquelle vient s'adjoindre la sève, formée en grande partie d'eau, les diverses substances organiques groupées sous le nom de matière incrustante, et de différents sels minéraux. Si l'on dessèche le bois, il ne reste, à côté de la cellulose, que la matière incrustante et les sels minéraux,

¹ Le poids du mètre cube ou stère de bois débité en bûches et séché à l'air varie, d'après les observations de Berthier et Sauvage, depuis 200 kilogrammes pour le peuplier jusqu'à 500 kilogrammes pour le hêtre et le chêne.



dont la proportion relative est d'autant plus faible que l'on a choisi une partie de bois moins riche originairement en sève, c'est-à-dire de formation plus ancienne. Le tableau ci-dessous, extrait de l'ouvrage sur *Les combustibles industriels* de MM. Colomer et Lordier ¹, fait ressortir la presque identité de composition des différentes espèces de bois (échantillons prélevés sur les troncs). Nous y avons ajouté la composition de la cellulose : on voit que le tissu ligneux est plus riche en carbone d'environ 5 p. 100, et plus pauvre en oxygène de la même quantité ; il renferme de plus en moyenne 1 p. 100 d'azote.

NOMS DES ARBRES	C	H	O	Az
Chêne.	48,94	5,94	43,09	2,03
—	49,43	6,07	44,50	—
Hêtre.	48,29	6,00	43,14	0,57
— rouge	48,18	6,28	43,54	—
— blanc	48,53	6,30	43,17	—
Bouleau.	48,89	6,19	43,93	0,99
Charme.	48,08	6,12	44,93	0,87
Aulne.	49,20	6,22	44,59	0,68
Frêne.	49,35	6,07	44,56	—
Marronnier d'Inde	49,08	6,71	44,21	—
Peuplier noir	49,70	6,31	43,99	—
Tilleul	49,41	6,86	43,73	0,63
Pin sauvage (vieux bois)	49,87	6,09	43,41	—
— — (jeune bois)	50,62	6,27	42,58	0,53
Faux sapin	49,95	6,41	43,65	—
Sapin commun	49,59	6,38	44,02	—
Mélèze.	50,11	6,31	43,58	—
Pommier	48,90	6,23	44,83	—
Buis	49,37	6,52	44,11	—
Noyer.	49,11	6,44	44,44	—
Cellulose pure.	44,40	6,17	49,39	—

TENEUR EN EAU. — Le bois fraîchement coupé renferme une grande quantité d'eau, provenant de la sève qui l'imprègne. La proportion en varie naturellement suivant les essences, suivant la saison et suivant la partie de l'arbre que l'on considère : elle est plus abondante dans les bois tendres que dans les bois durs ; au printemps, époque de la montée de la sève, qu'en hiver où la végétation s'arrête ; dans les feuilles, dans l'écorce et les petites branches que dans le tronc. Elle est généralement supérieure à 45 p. 100 d'après Le Play.

¹ Colomer et Lordier. *Les combustibles industriels*, Paris, 1906.



Cette eau s'évapore spontanément après l'abatage, laissant vides les vaisseaux où elle était contenue. Aussi le bois se contracte-t-il pendant la dessiccation de plus de 10 p. 100. Mais cette contraction n'est pas suffisante pour combler tous les vides, car la densité apparente diminue notablement.

La rapidité de la dessiccation augmente beaucoup quand le bois est écorcé au préalable : voici par exemple les chiffres donnés par Uhr :

	PERTE P. 100 DU POIDS PRIMITIF DU BOIS			
	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.
Troncs écorcés (conifères).	34,53	38,77	39,34	39,62
Troncs avec écorce	0,41	0,84	0,92	0,98

La dessiccation à l'air n'est du reste jamais complète ; il reste une proportion de 15 à 20 p. 100 d'eau, suivant l'état hygrométrique de l'atmosphère ambiante. Pour expulser complètement cette eau, il faut porter le bois dans une étuve à la température de 125°. On réalise ainsi une dessiccation absolue. En chauffant plus fortement, il se dégage encore de grandes quantités de vapeur d'eau, mais cette eau provient de la décomposition commençante des tissus ligneux ; tandis que le bois séché à 125° n'est pas altéré, et, replacé à l'air, reprend peu à peu la proportion primitive d'eau hygrométrique de 15 à 20 p. 100.

CENDRES. — Quand on brûle le bois, le carbone, l'oxygène, l'hydrogène et l'azote dont il était formé se dégagent à l'état de composés gazeux, il reste des *cendres* provenant des matières minérales apportées par la sève. La proportion de cendres sera donc, pour un même végétal, d'autant plus grande que la partie calcinée était plus riche en sève : ce seront les feuilles, les menues branches et les écorces qui en donneront le plus. Nous donnons ci-contre un tableau résumant les expériences de M. Violette sur un cerisier¹.

La composition de ces cendres est extrêmement variable. Elle dépend beaucoup moins de l'espèce du végétal que de la nature du sol où il a poussé. Les éléments les plus importants sont la potasse, à l'état de carbonate, la chaux, la magnésie, l'acide phosphorique et la silice. La chaux y existe toujours pour une forte proportion, ce qui explique leur infusibilité.

¹ VIOLETTE, *Ann. Chim. Phys.*, (3), 39, 296 ; 1853.



PARTIE ÉTUDIÉE	CARBONE	HYDROGÈNE	OXYGÈNE ET AZOTE	CENDRES
Feuilles	45,015	6,971	40,910	7,118
Petites branches . . .	écorce. 52,496	7,312	36,737	3,454
	bois. . 48,359	6,605	44,730	0,304
Moyennes branches . .	écorce. 48,855	6,342	41,121	3,682
	bois. . 49,902	6,607	43,356	0,134
Grosses branches . . .	écorce. 46,871	5,570	44,656	2,903
	bois. . 48,003	6,472	45,170	0,354
Tronc	écorce. 46,267	5,930	44,755	2,657
	bois. . 48,925	6,460	44,319	0,296
Racine	écorce. 50,367	6,069	41,920	1,129
	bois. . 47,390	6,259	46,126	0,234

Pouvoir calorifique. — Le pouvoir calorifique du bois complètement desséché est de 4 000 à 4 500 calories. Mais le bois de chauffage usuel, contenant de 20 à 55 p. 100 d'eau, a naturellement un pouvoir calorifique beaucoup plus faible, que l'on peut évaluer à 2400-2800 calories.

Emploi des déchets de bois. — On utilise fréquemment le pouvoir calorifique des déchets et des résidus ligneux fournis par diverses industries : en particulier la sciure de bois, la tannée ou tan épuisé, la bagasse ou résidu de canne à sucre. On doit naturellement disposer de foyers spéciaux pour les brûler ; on peut encore agglomérer la sciure en *briquettes* et la tannée en *mottes*.

Dessiccation du bois. — La dessiccation par la chaleur ou torréfaction du bois est pratiquée toutes les fois que l'on veut utiliser ce combustible à produire des températures élevées, par exemple pour les fours à céramique. La température de dessiccation ne doit pas dépasser 140°, sinon le bois subirait un commencement de décomposition. On utilise généralement pour cet usage les gaz chauds venant des fours, que l'on envoie dans des chambres en maçonnerie au contact du bois à dessécher, après leur avoir fait traverser un espace vide, dit chambre à étincelles, où ils sont mélangés à de l'air frais de manière à éviter une température trop élevée.

Au lieu d'entasser le bois dans ces chambres, il est préférable de le faire circuler, au moyen de wagonnets, dans de longues galeries ou fours-tunnels, que les gaz chauds traversent en sens inverse. On



donne à la galerie une longueur telle que les gaz en sortent sensiblement froids, tandis que les wagonnets, poussés les uns derrière les autres, sont amenés à des températures progressivement croissantes. On prolonge en général la galerie au delà du point d'arrivée des gaz chauds, de manière à permettre au bois de se refroidir dans un courant d'air avant d'être déchargé.

b) COMBUSTIBLES TRANSFORMÉS OU FOSSILES

Nous désignons ainsi les combustibles formés par la décomposition plus ou moins profonde des matières organiques à la suite de leur enfouissement dans le sol ou sous les eaux. Ils comprennent la tourbe¹, les lignites et les différentes variétés de houille. Leur apparence, leur composition, leurs propriétés sont très différentes, et leur ancienneté extrêmement variable : la tourbe se produit d'une manière continue de nos jours, tandis que les houilles et les anthracites remontent aux périodes géologiques. Mais si leurs origines sont différents, leurs transformations paraissent s'être effectuées de façons non pas identiques mais très analogues, à des degrés différents d'ailleurs suivant leur ancienneté ou suivant les conditions où ils se sont trouvés placés.

Formation des combustibles fossiles. — Nous avons vu précédemment que les végétaux étaient formés en majeure partie de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, combinés pour former principalement de la cellulose. Mais on pourrait imaginer une infinité d'autres manières de grouper ces trois éléments. Ces groupements ont naturellement des stabilités différentes, et le plus stable est celui vers lequel tendront à se transformer tous les autres. Il correspond à la formation d'anhydride carbonique, de méthane et de carbone libre. Tel est donc le terme final, l'arrangement définitif vers lequel évolueront par une série d'étapes successives de plus en plus voisines de l'état d'équilibre, et caractérisées par un résidu de plus en plus riche en carbone, les matériaux qui constituaient initialement le végétal.

Mais cette évolution ne se fera pas spontanément à la température ordinaire, par suite de résistances passives. Elle ne se produira

¹ La tourbe est rangée fréquemment parmi les combustibles actuels : il est vrai qu'elle se forme continuellement sous nos yeux ; mais sa formation présente des analogies si évidentes avec ce que dut être la formation de la houille, qu'il nous semble plus logique de la placer dans le même groupe que les combustibles anciennement transformés.



qu'en élevant la température, de manière à diminuer ces résistances, ou par l'emploi de catalyseurs convenables qui joueront le rôle de lubrifiants. C'est par le premier procédé que s'effectue la *carbonisation* du bois dans les meules du charbonnier. En ce qui concerne la formation des charbons fossiles, il est possible également que la température et aussi la pression aient joué un certain rôle. Cependant il paraît bien probable à l'heure actuelle que les catalyseurs aient eu une action importante, peut-être même prépondérante.

Ces catalyseurs seraient intervenus sous forme de ferments, ferments solubles ou ferments figurés.

L'hypothèse d'une formation microbienne de la houille, d'abord entrevue par van Tieghem, qui avait trouvé les premières bactéries fossiles en 1879 dans les silex de Grand Croix, a été développée depuis par B. Renault¹ et surtout par Lemièrè². D'après cet auteur, les végétaux de l'époque secondaire auraient été entraînés au fond des eaux, soient courantes, soient stagnantes, en formant des amas bientôt recouverts par des sédiments détritiques encore meubles, et dans lesquels une fermentation intense devait nécessairement se développer. En effet, ces végétaux avaient entraîné avec eux des microbes de l'atmosphère ; de plus, les fruits et graines qu'ils portaient toujours (puisque, suivant l'opinion des géologues, il n'y avait pas de saisons sensibles à l'époque secondaire) renfermaient des diastases. Ces diastases, ou celles sécrétées par les ferments figurés, transformèrent rapidement la cellulose en une sorte de « gelée humique », base de tous les combustibles fossiles : c'est la période préalable de *macération*. A ce moment, les ferments figurés apportés par les végétaux prolifient, ils brûlent la gelée humique aux dépens de l'air entraîné ; mais celui-ci une fois épuisé, le milieu devient anaérobie, et les hydrates de carbone sont dédoublés en anhydride carbonique, méthane et autres hydrocarbures, qui forment le combustible fossile ; de même que sous l'influence de la levure de bière, le moût sucré se transforme en alcool en dégageant de l'acide carbonique.

La fermentation des végétaux s'arrêtera quand, par suite de la présence des hydrocarbures formés, le milieu sera devenu antiseptique. Enfin la pression graduelle des sédiments supérieurs achèvera la transformation en houille.

Ces hypothèses sont fort séduisantes. Cependant il faut remarquer que l'action microbienne ne peut pas toujours être invoquée : on a

¹ B. RENULT. *Bull. Ind. Minér.*, 1899 et 1900. *passim*.

² LEMIÈRE. *Bull. Ind. Minér.*, 4. 861 et 1249:1905.



parfois démontré au contraire (Ch. E. Bertrand) le caractère aseptique de certaines formations houillères.

Pour beaucoup d'auteurs, l'action microbienne n'aurait fait que commencer la transformation des matières végétales, qui se serait arrêtée aux tourbes et aux lignites. La transformation en houille aurait exigé des pressions élevées ; l'hydrogène et l'oxygène se seraient dégagés en majeure partie sous forme de vapeur d'eau, avec un peu d'anhydride carbonique.

Quelles que soient les théories invoquées, il est certain que la carbonisation des végétaux s'est effectuée par étapes successives, qui n'ont pas été toujours les mêmes, mais dont nous avons une idée par les différents types de combustibles fossiles que nous connaissons : la richesse en carbone augmentant au fur et à mesure de la transformation, de manière à passer graduellement de la composition de la cellulose à celle des anthracites qui représentent la carbonisation la plus parfaite. Voici en effet d'après Mène la composition moyenne de quelques combustibles :

	C	H	O	H en excès après formation d'eau.
Cellulose	100	13,88	111,14	»
Bois	100	12,18	83,07	1,80
Tourbe.	100	9,85	55,67	2,80
Lignite.	100	8,37	42,42	3,07
Houille très grasse (Staffordshire).	100	6,12	21,23	3,47
Houille pour coke	100	5,91	18,32	3,62
Houille sèche (pays de Galles)	100	4,75	5,28	4,09
Anthracite.	100	5,84	1,74	5,63

De nombreuses expériences ont été effectuées dans le but de reproduire artificiellement les combustibles fossiles. C'est ainsi par exemple que Frémy, en chauffant en tubes scellés à 200°-300° différents hydrates de carbone (amidon, sucre, gomme arabique), avait obtenu des produits dont la composition était très analogue à celle de la houille. Tout récemment, M. Dowling, en distillant du bois sous la pression ordinaire, a remarqué que la proportion d'hydrogène qui reste combinée au charbon est inférieure à celle que l'on trouve

¹ D. B. Dowling, *Rev. Métal.*, 7 bis, 484 : 1910.



dans les lignites et les charbons bitumineux. Il en déduit que dans la formation de la houille, il y a eu nécessairement une cause qui s'est opposée au départ de l'hydrogène; ce ne peut être que la pression.

§ I. — LA TOURBE

La tourbe est le produit de la décomposition des matières végétales enfouies de nos jours sous les eaux stagnantes ou dans les sous-sols des prairies marécageuses. C'est le plus récent des combustibles fossiles, puisqu'il se produit d'une façon continue et sous nos yeux. C'est également le moins transformé, c'est-à-dire celui dont la composition diffère le moins de la matière végétale primitive.

La tourbe se forme de préférence dans les plaines marécageuses, sur les bords des cours d'eau : c'est la *tourbe des vallées*, dont l'épaisseur atteint et dépasse 12 mètres. On la trouve en France principalement dans la Somme, l'Oise et le Pas-de-Calais. La *tourbe des plateaux* se forme sur les versants montagneux et les plateaux à sous-sol argileux et imperméable à l'eau. Son épaisseur est beaucoup plus faible et ne dépasse guère 1 mètre; il en existe en France dans le Plateau Central, le Jura et les Vosges; on la rencontre surtout en Bavière, en Suisse, en Irlande; il existe également au centre du Canada de vastes tourbières que l'on cherche actuellement à mettre en valeur.

Les végétaux qui concourent à la formation de la tourbe peuvent être différents : outre les mousses appartenant au genre *Sphagnum*, qui en forment presque toujours, au moins en Europe, l'élément principal, on y trouve toutes les plantes des prairies humides ou des marais : la plupart des cypéracées, les joncs, de nombreuses graminées, et aussi les bruyères, les saules et quelques espèces résineuses. La structure des débris végétaux reste visible dans la tourbe de formation récente à la surface des tourbières, dans laquelle on distingue des brindilles entrelacées, et que l'on nomme *tourbe mousseuse* ou *fibreuse*, tandis que dans les parties profondes, de formation plus ancienne, on n'aperçoit plus que quelques grosses branches ou troncs au milieu d'une matière compacte de couleur foncée; c'est la *tourbe brune* ou *noire*.

L'examen microscopique des tourbes permet le plus souvent d'y reconnaître des cellules et des débris d'organes végétaux, des grains de pollen, etc. M. Eckenberg a remarqué que ces fragments étaient



imprégnés et entourés d'une sorte de gelée transparente, que l'on rend très visible en colorant la préparation avec du bleu de méthylène

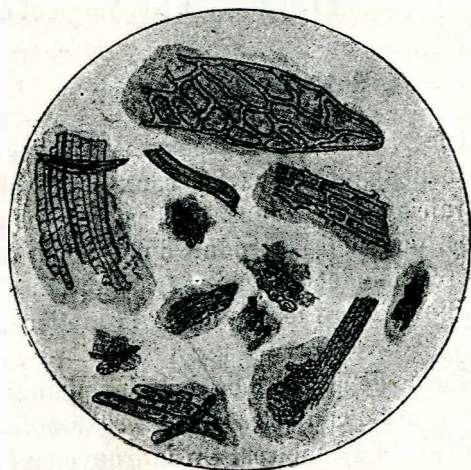


Fig. 52. — Tourbe vue au microscope.

ou de la fuchsine, et qui ne serait autre que de l'hydrocellulose provenant du contact prolongé de la cellulose avec l'eau ; cette hydro-

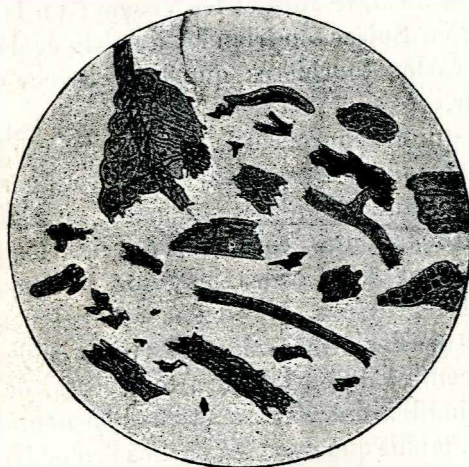


Fig. 53. — La même après chauffage à 200°.

cellulose disparaît complètement si l'on chauffe la tourbe à 200° en présence d'eau (fig. 52 et 53)¹.

¹ Dr ECKENBERG, *Communication au meeting de l'Iron and Steel Institute*, 1909 ; *Rev. Métal.*, 6 bis, 416 ; 1909.

Composition. — **HUMIDITÉ.** — La tourbe, au moment de son extraction, contient une quantité d'eau considérable ; cette eau s'évapore en partie par une exposition prolongée de la tourbe à l'air, mais il en reste toujours de 20 à 30 p. 100. En chauffant la tourbe, elle continue à se dessécher, mais dès 120° elle commence à se décomposer.

CENDRES. — La proportion de cendres contenues dans la tourbe est extrêmement variable, et cela se comprend quand on réfléchit à la manière dont ce combustible s'est formé dans des eaux plus ou moins claires ou limoneuses. On peut admettre comme teneur moyenne 5 à 10 p. 100, mais cette proportion peut dans certains cas atteindre 30 p. 100. Leur composition est également très variable : on y trouve, outre les éléments des cendres proprement dites des végétaux constituants, du sable, de l'argile, du calcaire, de la pyrite, du sulfate de chaux. Celui-ci atteint dans quelques tourbières de la Somme jusqu'à la moitié du poids des cendres.

MATIÈRES VOLATILES. — Déduction faite des cendres, la tourbe séchée à 110° contient en moyenne

C.	60
H.	6
O.	32
Az	1,5 — 2

Voici d'ailleurs la composition de quelques échantillons de tourbe examinés par Regnault (séchés à 120°) :

	C	H	O + Az	CENDRES
Tourbe de Vulcaire près Abbeville	67,03	5,63	31,76	5,58
Tourbe de Long	58,09	5,63	31,37	4,61
— de Framont (Vosges)	57,19	6,11	30,77	5,33

Pouvoir calorifique. — Le pouvoir calorifique de la tourbe est naturellement très variable suivant sa teneur en cendres et en humidité. Fischer a trouvé, pour une tourbe pressée contenant 11,9 p. 100 d'eau et 2,5 p. 100 de cendres, le chiffre de 5 430 calories



(eau condensée) ou 4 961 calories (eau vaporisée). Mais en général la tourbe est plus humide et moins pure. Avec les chiffres moyens de 25 à 30 p. 100 d'humidité et 6 à 8 p. 100 de cendres, on doit compter seulement 3 000 calories, c'est-à-dire la même quantité de chaleur que le bois séché à l'air.

En revanche la tourbe complètement déshydratée par compression, après cuisson préalable suivant le procédé Eckenberg que nous décrirons tout à l'heure, possède un pouvoir calorifique de 6 200 calories.

Exploitation. — L'extraction de la tourbe est conduite différemment suivant les conditions où elle se présente. Quand le marais tourbeux n'est pas profond, on y établit un canal servant à l'écoulement et permettant à la couche de tourbe de se dessécher peu à peu, en même temps qu'elle diminue d'épaisseur de telle sorte que sa densité peut augmenter de 50 et 60 p. 100. Quand cette contraction s'arrête, on découpe la tourbe en longues bandes, que l'on divise ensuite à la bêche de manière à constituer des blocs parallélépipédiques dont il faut achever la dessiccation. A cet effet on les empile les uns sur les autres en forme de muraille à claire-voie, d'abord en plein air¹, puis sous des hangars à l'abri de la pluie.

Quand l'assèchement du marais est impossible, la tourbe extraite soit à la pelle, soit à la drague, est imprégnée d'une proportion d'eau considérable atteignant 8 à 9 fois son propre poids. On expulse généralement une partie de cette eau par un foulage préalable sur une aire battue ou recouverte de foin. Le foulage, effectué d'abord avec les pieds, puis au moyen de battoirs, produit une espèce de gâteau de 20 à 30 centimètres d'épaisseur, qu'on laisse ensuite se dessécher à l'air, et que l'on divise finalement en briquettes, dont on achève la dessiccation comme précédemment.

Ces procédés primitifs ne produisent qu'un combustible de mauvaise qualité : sa dessiccation est loin d'être complète ; il s'émiette et se pulvérise facilement ; enfin son volume est considérable, ce qui en rend l'emmagasinage onéreux et empêche de l'employer dans les locomotives ou les bateaux à vapeur.

On a tout naturellement été conduit à rechercher les moyens de comprimer la tourbe, de manière à réduire son volume, à diminuer sa fragilité et à améliorer sa dessiccation. Malheureusement le pro-

¹ Il faut éviter de laisser la tourbe humide exposée à la gelée, qui l'émiette et lui fait perdre la plus grande partie de sa valeur.



blème est plus difficile qu'il ne le paraît au premier abord : sous l'effet de la pression, la tourbe humide se comporte comme une gelée qui passe à travers les mailles de l'enveloppe, ou les brise si elles sont assez fines et si l'on essaie de la comprimer rapidement. Il faut faire croître la pression lentement et dépenser finalement une assez grande puissance, ou bien on doit commencer par faire subir à la tourbe une préparation préalable.

La meilleure solution paraît avoir été donnée récemment par le Dr Eckemberg, qui a reconnu au microscope, comme nous l'avons vu plus haut, que les fragments de tourbe étaient environnés d'une couche translucide d'hydrocellulose. C'est la présence de cette hydrocellulose qui explique la difficulté que l'on éprouve à comprimer la tourbe, car c'est elle qui constitue une gelée transmettant en tous sens les pressions comme un liquide et faisant éclater les enveloppes. Pour arriver à un résultat, il faut donc commencer par détruire cette substance; on y arrive très simplement par un chauffage préalable, et l'on constate qu'en portant la tourbe à des températures croissantes avant de la comprimer, on arrive à expulser de plus en plus complètement l'eau qui l'imprégnait. Voici par exemple les chiffres donnés par une tourbe noire à haut pourcentage en hydrocellulose et qui contenait 7 kilogrammes d'eau par kilogramme de tourbe. La pression employée était de 20 kilogrammes par centimètre carré :

TEMPÉRATURE DE CHAUFFAGE PRÉALABLE.	KILOGRAMMES D'EAU ÉCOULÉE.	RESTENT
80	—	—
100	0,5	6,5
125	1,0	6,0
150	3,5	3,5
160	5,0	2,0
180	5,5	1,5
200	6,0	1,0
220	6,25	0,75
240	6,50	0,50

Afin d'économiser la chaleur, on fait circuler la tourbe brute à chauffer en sens inverse de la tourbe chauffée à travers une double enveloppe tubulaire, de manière à récupérer autant que possible la chaleur dépensée. Une pompe envoie la pulpe à travers l'appareil sous une pression un peu supérieure à celle de la vapeur d'eau à la



température de cuisson ; la pulpe cuite est refroidie et façonnée en briquettes dans un compresseur (fig. 54).

Les essais effectués sur 227 300 m³ ont donné les résultats suivants :

Température moyenne au bout chauffé des tubes.	152°
— de la pulpe entrant dans l'appareil.	10°
— — déchargée.	80°
Régénération.	72
Nombre net de calories employées à la cuisson .	70 calories.

Les briquettes obtenues ont une densité de 1,29 à 1,35. Elles pré-

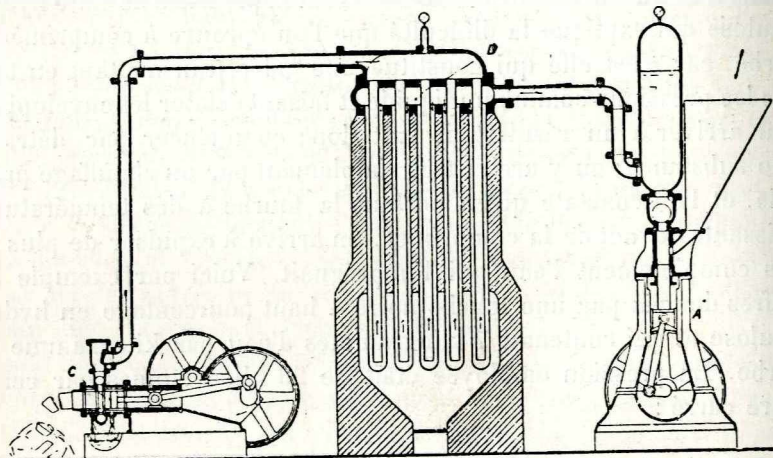


Fig. 54. — Chauffage et compression de la tourbe.

A, Pompe. — B, Caloriseur. — C, Presse.

sentent une surface compacte d'un noir brillant, par suite de la formation pendant la cuisson d'une substance paraffineuse qui agglomère les particules, et qui rend les briquettes pratiquement imperméables à l'eau, sous laquelle elles peuvent rester une semaine sans prendre plus de 0,9 p. 100 d'humidité, tandis que les briquettes de tourbe séchée à l'air en prennent dans les mêmes circonstances plus de 6 p. 100. Le pouvoir calorifique des briquettes fraîches, préparées après cuisson humide à 220° et contenant encore la moitié de leur poids d'eau, est très approximativement de 4 000 calories ; il devient de 4 783 calories après une semaine d'exposition à l'air, qui réduit la proportion d'eau au 1/4 du poids de la tourbe. Enfin après dessiccation complète il atteint 6 200 calories.

La fabrication des briquettes a été d'ailleurs également essayée



en Allemagne : la tourbe d'abord réduite en pulpe est lessivée pour enlever le sable et les matières inertes ; l'excès d'eau est ensuite éliminé par centrifugation ; la pulpe est moulée par compression en bandes minces que l'on fait passer sur des cylindres sécheurs, puis que l'on façonne en briquettes sous une pression de 2 000 atmosphères. Leur pouvoir calorifique serait de 4 800 calories (Colomer et Lordier).

Pouvoir nitrifiant. — Bien qu'il ne s'agisse ici que des combustibles, nous ne pouvons passer sous silence l'aptitude extraordinaire de la tourbe au développement des bactéries nitrifiantes, découverte par MM. Müntz et Lainé¹, et qui pourrait créer un débouché industriel de cette matière, servant à établir des nitrrières à rendement intensif. Ces savants ont trouvé en effet que le rendement en nitrate pouvait atteindre 6,550 kg par mètre cube de tourbe et par vingt-quatre heures à partir de solutions ammoniacales que l'on pouvait elles-mêmes préparer par distillation de la tourbe dans un courant de vapeur d'eau surchauffée. La tourbe constitue également, en raison des mêmes propriétés, une matière précieuse pour l'épuration des eaux d'égouts².

§ 2. — LES LIGNITES

Les lignites représentent un stade de décomposition de la cellulose plus avancé que la tourbe, mais moins que la houille. Comme le bois et comme la tourbe, ils donnent à la distillation des produits volatils à réaction fortement acide. Très riches en matières humiques, ils se dissolvent en partie à chaud dans la lessive de potasse, qu'ils colorent en brun ; cette réaction peut d'ailleurs manquer chez certaines variétés.

Mentionnons également la formation de pyrocatechine par fusion des lignites avec les alcalis caustiques.

Classification des lignites. — On divise les lignites en plusieurs catégories suivant leur aspect, leurs propriétés, et semble-t-il leur ancienneté géologique : les lignites fibreux, ou lignites xyloïdes, ou bois fossiles ; les lignites terreux ; les lignites proprement dits, ou lignites communs, ou lignites secs ; enfin les lignites bitumineux, ou lignites gras.

¹ C. R., 142, 1 239 ; 1906.

² MüNTZ et LAINÉ. C. R., 144. 466 ; 1907 ; 146, 53 ; 1908.



LIGNITES FIBREUX. — C'est la variété la moins ancienne et celle qui a conservé le mieux l'aspect primitif du bois. Certains bois fossiles se coupent à la hache et brûlent dans les foyers à bois avec une flamme claire et pétillante. D'autres sont un peu plus transformés, leur cassure devient conchoïdale. En même temps la proportion du carbone augmente.

Voici la composition moyenne des lignites fibreux :

Carbone	57-67
Hydrogène	6-5
Oxygène et azote	37-28

On voit que la proportion d'oxygène est encore très élevée. Il faut ajouter à ces chiffres environ 30 p. 100 d'eau, jusqu'à 50 p. 100 dans certains échantillons. Cette eau s'en va d'ailleurs en grande partie par simple exposition à l'air comme dans le bois frais. Mais le bois fossile se fendille et se délite en petits fragments.

La proportion de cendres varie entre 5 et 15 p. 100.

Le pouvoir calorifique du bois fossile brut est d'environ 3 000-3 500 calories, il devient de 5 500 calories après dessiccation complète.

LIGNITES TERREUX. — Ces lignites ne présentent plus l'aspect fibreux du bois ; leur cassure est terne et irrégulière ou conchoïdale. Ce sont en quelque sorte des tourbes fossiles ; ils contiennent une forte proportion de cendres, qui les rendent impropres aux usages métallurgiques.

La *terre d'ombre*, ou *terre de Cologne*, employée comme couleur, appartient à cette classe de lignites.

LIGNITES PROPREMENT DITS OU COMMUNS. — Les *lignites communs* sont au contraire très compacts, bruns foncés ou noirs, à cassure conchoïdale ; ils renferment beaucoup moins d'eau que les variétés précédentes, 5 à 10 p. 100.

Ce sont les variétés brunes (*braunkohle*) qui sont le plus répandues. On y distingue encore des formes organisées, aiguilles de conifères, grains de pollen, mousses ; on les trouve dans le miocène et le pliocène ; les lignites noirs au contraire semblent de formation plus ancienne : leurs gisements sont situés à la base du tertiaire et dans le secondaire. Certaines variétés de lignites noirs sont assez brillants et compacts pour être utilisés en joaillerie, sous le nom de *jais* ou *jayet*.

Les lignites communs ont une densité voisine de 1,25 ; leur composition moyenne, déduction faite de l'eau, et des cendres, répond à



une proportion de carbone plus forte et d'oxygène plus faible que dans le bois fossile :

C	65-75 p. 100
H	6-4 —
O + Az	29-21 —

A la distillation, ils donnent des gaz, de l'eau et des matières bitumineuses. Leur pouvoir calorifique varie depuis 4 500-5 000 calories pour les variétés brunes, à 5 500-6 000 calories pour les variétés noires.

LIGNITES BITUMINEUX. — Ces lignites servent de transition entre les précédents et les bitumes proprement dits ou les asphaltes ; ils sont de formation encore plus ancienne que les lignites secs. Leur cassure est conchoïdale, avec éclat gras.

Chauffés, ils s'enflamment facilement et brûlent avec une flamme fuligineuse, en gonflant beaucoup et parfois en fondant complètement. Ils ne renferment pour ainsi dire pas d'eau (1 à 2 p. 100) ; ils sont aussi relativement assez pauvres en oxygène. Leur composition moyenne peut se représenter par :

C	70-80
H	6-8
O + Az	24-12

Leur pouvoir calorifique atteint 8 000 calories.

Principaux gisements. — Les lignites se rencontrent en France principalement dans les départements du Gard et des Bouches-du-Rhône, ainsi que dans les Basses-Alpes, à Manosque, où se trouvent des variétés bitumineuses. On en rencontre aussi quelque peu en Italie. Mais les gisements les plus importants sont en Allemagne, et surtout en Autriche-Hongrie.

Voici quelques analyses de lignites d'après Regnault :

PROVENANCE	COKE par calcination.	C	H	O + Az	CENDRES
Jayet de Sainte-Colombe.	61,4	»	»	»	1,7
Lignite des Bouches-du-Rhône.	41,1	63,01	4,58	18,98	13,43
— des Basses-Alpes	49,3	69,5	5,20	22,74	3,01
— de Grèce	38,9	60,36	5,00	25,62	9,02
— de Cuba	39,0	74,82	7,25	13,99	3,94
Terre d'ombre	36,1	63,42	4,98	27,11	5,49



Nous donnons également les compositions de quelques lignites autrichiens (Colomer et Lordier) :

PROVENANCE	C	H	H ² O	CENDRES	S	O + Az	POUVOIR calorifique.
Csibor	43,56	5,39	31,42	15,05	3,47	4,38	4 888
Millenium	47,29	5,35	30,03	10,65	3,50	6,68	5 046
Theodora	52,44	6,50	27,96	9,20	2,88	3,90	5 895
Saint-Pierre (supérieur)	52,37	6,15	29,00	9,50	1,96	2,98	5 793
Saint-Pierre (inférieur)	51,32	6,15	30,68	7,25	2,67	4,60	5 655

La composition des cendres de lignites est très variable, car, comme pour la tourbe, elle dépend beaucoup plus de la constitution du terrain où s'est formé le lignite que des matières minérales contenues dans les végétaux transformés. La pyrite qui existe dans beaucoup de ces charbons donne des cendres très riches en soufre. Quand elle se trouve associée à l'argile, on peut employer le lignite pour la préparation de l'alun.

Voici la composition des cendres de quelques lignites, d'après le *Traité de Métallurgie* de Schnabel :

	LIGNITE DE TRIFAIL	LIGNITE DE L'HÉRAULT	LIGNITE DE DIOSZYOR
SiO ²	26,15	12,00	34,52
Al ² O ³	7,58	9,00	10,86
Fe ² O ³	9,97	56,21	14,53
CaO	23,96	12,50	13,33
MgO	8,98	2,25	0,86
K ² O + Na ² O	5,39	traces	6,06
SO ³	15,38	7,50	13,40
P ² O ⁵	2,11	0,54	0,84
Zn	0,05	»	»
Cu	traces	»	»
Mn	traces	»	»

Briquettes de lignite. — C'est à Bruhl, en Bavière, que l'on fabrique pour la première fois des agglomérés de lignite, améliorant ainsi notablement la qualité de ce combustible, et le rendant plus facilement transportable en lui enlevant une grande partie de son humidité. Cependant on fut assez longtemps à se rendre compte des avan-



tages de la compression en briquettes. Actuellement, au contraire, cette industrie est très prospère, non seulement en Allemagne, dans la province Rhénane, mais aussi en Italie. Le procédé est d'ailleurs très simple : il suffit de soumettre le lignite, préalablement pulvérisé et séché, à une pression énergique. Les grains se soudent l'un à l'autre sans qu'il soit besoin d'ajouter un agglomérant étranger ; les matières bitumineuses que contiennent tous les lignites en petite quantité suffisent à tenir cet emploi, d'autant que la dessiccation préalable a eu pour effet de faire suinter le bitume à la surface des grains.

Les opérations successives nécessitées par l'agglomération sont en définitive les suivantes :

Broyage, au moyen de cylindres cannelés, suivi d'un tamisage qui ne laisse passer que les parties suffisamment pulvérisées et renvoie les autres dans les cylindres broyeurs.

Dessiccation effectuée dans des appareils à circulation méthodique et chauffés soit par les gaz du foyer, soit par de l'air chaud ou de la vapeur d'eau. Le degré de dessiccation à obtenir dépend de la variété de lignite traitée et doit être surveillé avec soin ; la dessiccation peut être poussée d'autant plus loin que le lignite est plus riche en bitume ; mais si l'on va trop loin, la briquette se délitéra ultérieurement.

Enfin *moulage* au moyen de presses très puissantes, exerçant une pression de 10 tonnes par centimètre carré.

Les modèles de sècheurs employés sont assez nombreux ; un grand nombre sont des fours à plateaux circulaires superposés, sur lesquels on fait circuler de haut en bas le lignite à dessécher : il est poussé par les palettes d'agitateurs mécaniques alternativement vers le bord et vers le centre des plateaux successifs, pendant que le fluide desséchant circule entre les plateaux. Les premiers fours employaient directement les gaz du foyer. On préfère aujourd'hui se servir d'air chaud, ou mieux de vapeur que l'on fait circuler à cet effet dans les plateaux eux-mêmes, qui sont creux, tandis qu'on ménage entre les plateaux une circulation d'air qui emporte l'eau volatilisée.

L'emploi des briquettes de lignite se vulgarise de plus en plus en Allemagne. Dans un rapport présenté au XI^e Congrès des fondeurs allemands, M^r Krumbriegel a montré que ces briquettes étaient couramment employées dans les fonderies. Leur teneur en eau n'est que de 12 à 13 p. 100, et leur pouvoir calorifique atteint 5 000 calories. Elles sont très recommandables pour le chauffage des chaudières,



ainsi que pour le chauffage direct des chambres de séchage, fours à adoucir et fours de goudronnage; on les emploie également au chauffage de fours transportables pour le séchage des moules de grandes dimensions; il faut pour ces fours, à égalité de temps, 50 p. 100 en plus de briquettes que de coke, mais le prix de ce dernier est de 100 à 150 fois plus élevé.

Enfin, les briquettes de lignite peuvent très bien être utilisées dans les gazogènes¹.

§ 3. — LA HOUILLE

On désigne sous le nom de houilles des variétés assez diverses de charbons fossiles, de formation plus ancienne et plus complètement transformés que les lignites, dont elles se séparent par une proportion de carbone plus forte, et une teneur en oxygène et en eau beaucoup plus faible. Elles ne présentent plus la structure fibreuse. Elles ne contiennent pas (du moins à l'état frais) de matières humiques colorant en brun les lessives alcalines, et elles ne donnent pas d'acide acétique à la distillation.

Nous étudierons plus loin avec plus de détails les classifications que l'on en a donné. Mais nous verrons de suite apparaître nettement trois grandes divisions : les charbons maigres ou charbons à gaz, les houilles grasses et les anthracites.

Caractères physiques. — **COULEUR.** — La couleur de la houille est noire, mais avec des teintes assez variables : les houilles riches en matières volatiles, les charbons à gaz, ont un aspect mat tirant sur le brun ; les houilles grasses ont des reflets d'un noir brillant caractéristiques, tandis que les houilles anthraciteuses présentent une teinte plus ou moins grisâtre, vraisemblablement due à la petite proportion de pyrite de fer qu'elles contiennent toujours.

CASSURE. — La cassure des houilles présente aussi des différences suivant leurs qualités : les houilles grasses présentent une cassure conchoïdale, les fragments s'effritent d'ailleurs souvent assez facilement. Dans les anthracites les faces sont plus nettes, semblables à des clivages de cristaux ; ces faces ne sont pas lisses, mais formées par la réunion d'un grand nombre de petites facettes. Les charbons bitumineux ont également une cassure nette, mais les faces sont lisses.

¹ *Rev. Métal.*, 7 bis, 243 ; 1910.



DURETÉ. — La dureté est beaucoup plus grande chez les anthracites et les charbons maigres que chez les houilles grasses.

TRANSPARENCE AUX RAYONS X. — Il résulte des expériences de M. Louis Benoit¹ que la transparence de la matière aux rayons X est une propriété atomique et qu'elle est d'autant plus grande que le poids atomique est plus faible. Le carbone sera donc facilement traversé par les rayons X, qui seront arrêtés au contraire par les gangues formées de silicates.

L'examen radiographique a ainsi permis à M. Courtiot de reconnaître très facilement les parties schisteuses au milieu des fragments de houille. On peut même doser approximativement la teneur en cendre dans les charbons homogènes en les réduisant en poussière fine, radiographiant cette poussière sous une certaine épaisseur et comparant la teinte obtenue avec celle que donnent des lames d'aluminium d'épaisseurs variables servant de repères.

DENSITÉ. — La densité des houilles est d'autant plus grande que leur teneur en carbone est plus élevée : les anthracites atteignent le chiffre de 1,40 à 1,50. Les houilles grasses n'ont guère que 1,30 et les charbons à gaz 1,25.

Le poids du mètre cube varie de 800 à 1 200 kilogrammes.

ASPECT DE LA FLAMME. — La flamme produite par les charbons à gaz est longue et fuligineuse. La fumée est moins grande avec les houilles grasses, mais la flamme est toujours très éclairante. Avec les anthracites, la flamme devient très courte et prend une teinte bleue due au soufre qui y est contenu à l'état de pyrite.

Propriétés chimiques. — **COMPOSITION.** — La teneur en carbone oscille de 75 à 95 p. 100. Nous verrons à propos de la classification des houilles qu'elle est caractéristique de chaque variété. Elle augmente régulièrement depuis les charbons à gaz jusqu'aux anthracites, en passant par les houilles grasses.

On considère aussi souvent dans une houille ce que l'on appelle le *carbone fixe*, c'est-à-dire la proportion de coke qui reste lors de la distillation pyrogénée. Cette proportion est toujours inférieure à la teneur centésimale en carbone puisque la distillation donne naissance à des gaz et vapeurs carburées ; elle varie d'ailleurs dans une

¹ C. R., 132, 324, 545, 727 ; 1911.



certaine mesure avec les conditions dans lesquelles s'est opérée la distillation.

Le rapport entre l'oxygène et l'azote d'une part et l'hydrogène d'autre part qui existent seuls ou combinés dans les gaz dégagés par distillation pyrogénée est également caractéristique. Il varie de 4, pour les charbons à gaz, à 0,5 pour les anthracites.

Le soufre existe dans toutes les houilles, à des états variables : soit sous forme de sulfates, principalement de gypse ; soit à l'état de pyrite de fer ; soit enfin combiné sous forme organique, provenant des plantes dont la décomposition a formé la houille. Sa teneur ne doit pas être trop élevée ; à partir de 3 p. 100, elle peut faire rejeter le charbon pour les emplois industriels.

Le phosphore, qui paraît provenir des spores des végétaux pré-historiques, varie de quelques dix-millièmes à 0,7 p. 100.

CENDRES. — Les cendres des houilles proviennent pour la majeure partie des matières argileuses ou schisteuses qui leur sont mélangées, tantôt de façon très irrégulière ou sous forme de couches stratifiées, tantôt disséminées dans toute la masse. Dans les premiers cas on peut réduire beaucoup la proportion des cendres par un triage convenable effectué, soit à la main pour les gros morceaux, soit par lavage au moyen d'un courant d'eau.

Les principaux éléments des cendres sont la silice, l'alumine, le fer et la chaux, auxquels s'adjoignent assez fréquemment la magnésie ou les alcalis, soude et potasse. Voici la composition de quelques cendres de houilles (d'après Babu) :

ORIGINE DES HOUILLES	SiO ²	Al ² O ³	Fe ² O ³	CaO	MgO	K ² O	Na ² O
La Grand Combe.	51,5	24,4	10,4	7,8	2,0	2,6	0,6
Tréllys.	49,0	29,0	7,3	8,2	2,5	2,35	0,5
Molières.	48,0	26,0	7,3	14,6	3,70	—	—
Aniche.	48,5	33,7	7,9	2,0	—	—	—
Aubin.	50,0	32,0	8,0	5,0	—	—	—
Dowlais.	24,1	20,8	16,0	9,4	9,7	—	—
	39,6	39,2	7,5	1,8	2,6	—	—
	44,6	26,4	16,0	3,6	0,6	—	—
Newcastle.	29,5	22,0	17,8	10,6	1,0	—	—
	61,0	35,0	1,2	1,5	0,1	—	—
Pensylvanie.	34,0	34,1	21,0	1,5	0,1	—	—
	28,4	17,0	27,0	11,2	—	—	—
Durham.	42,1	28,0	12,0	6,0	0,2	—	—



Les meilleures variétés de houilles renferment de 4 à 8 p. 100 de cendres, les qualités moyennes de 8 à 12 p. 100, mais on peut encore utiliser des charbons qui en renferment jusqu'à 30 et 40 p. 100, pourvu qu'elles soient peu fusibles.

FUSIBILITÉ DES CENDRES. — La fusibilité des cendres est en effet plus importante que leur proportion relative. Les cendres fusibles s'agglomèrent en produisant des mâchefers qui bouchent rapidement les grilles et arrêtent la combustion. Le silicate d'alumine pur ne fond guère que vers 1 800°, mais sa fusibilité est augmentée rapidement par la chaux, la magnésie et les alcalis, et aussi par l'oxyde de fer, et s'abaisse à 1 300 ou 1 400°; elle peut même tomber à 1 100°. Il est vrai que le point de fusion se relève quand les cendres sont presque exclusivement ferrugineuses.

Le fait d'avoir une cendre peu fusible augmente notablement la valeur d'une houille.

HUMIDITÉ. — La houille, contrairement au lignite, ne renferme qu'une quantité très faible d'eau de constitution, 2 à 3 p. 100 environ; exposée à l'air humide ou à la pluie, elle se charge d'eau hygroscopique et peut en absorber ainsi jusqu'à 10 et 20 p. 100, mais cette eau est facilement abandonnée par égouttage et exposition à l'air.

Constitution. — Les houilles, et plus généralement les charbons fossiles, ne sont évidemment pas des corps chimiquement définis, mais bien plutôt des mélanges extrêmement complexes de corps différents. La manière même dont elles se sont formées par décomposition lente des matières cellulosiques prouve que le carbone n'y est pas contenu à l'état libre, mais combiné avec les autres éléments. Malheureusement les essais faits jusqu'à ce jour pour tâcher d'isoler ces différentes combinaisons n'ont pas donné encore de résultats définitifs. Le problème est certainement difficile, car les molécules très condensées que l'on doit s'attendre à y trouver sont pour la plus grande partie insolubles dans les dissolvants usuels. Quant à l'emploi de la distillation, il est bien aléatoire, puisqu'on ne pourra jamais savoir si telle substance extraite par ce procédé existait réellement dans le charbon primitif ou si elle ne s'est pas formée par décomposition pyrogénée d'autres substances.

C'est donc l'emploi des dissolvants qui seul a pu donner quelques



indications. C'est ainsi que Donatti, en épuisant certaines houilles par le sulfure de carbone ou le chloroforme, a pu isoler de l'anthracène ou du chrysène. Ces corps n'existent pas dans la nature; leur présence dans la houille témoigne de la décomposition profonde éprouvée pendant la transformation géologique et qui doit être assimilable à une distillation pyrogénée sous pression ¹.

Bedson ² a pu extraire des houilles pulvérisées, par traitement à la pyridine à chaud, de 22 à 33 p. 100 d'une substance solide soluble dans ce solvant, dont le benzène permet de retirer deux combinaisons, l'une $C^{13}H^{18}O^3$ soluble dans l'éther, l'autre $C^{13}H^{20}O$, insoluble. Les mêmes houilles pulvérisées, traitées par le mélange oxydant d'acide chlorhydrique et de chlorate de potasse, fournissent les combinaisons chlorées $C^{38}H^{22}Cl^8O^{10}$, $C^2H^{18}Cl^1O^9$ et $C^{35}H^{36}Cl^4O^{20}$.

C. Hübner ³ a pu retirer d'un charbon bitumineux, par traitements convenables au benzène et à l'éther, différents constituants : un carbure $C^{22}H^{46}$ fusible à 52-53°; deux combinaisons cristallisées en aiguilles, $C^{16}H^{32}O$ fusible à 77°-78°,5 et $C^{12}H^{24}O$ fondant à 82-83°; enfin un acide amorphe $C^{38}H^{34}O^{13}S^2$, voisin des acides humiques, et un autre acide amorphe, brun, non sulfuré, fondant mal vers 100°.

Ces différentes recherches ⁴ prouvent surtout l'extrême complexité du problème : les diverses variétés de charbons se sont produits dans des conditions certainement différentes, souvent même peut-être tout à fait dissemblables; pour chaque charbon, formé à partir de substances très complexes déjà, la lente décomposition a dû créer une série de combinaisons presque illimitée : il suffit d'examiner la complexité des produits renfermés dans le goudron de houille pour avoir une idée de ce que peut renfermer la houille elle-même. Il est possible, cependant, que certains types de composés s'y trouvent en plus grandes proportions, et en expliquent les propriétés principales. Mais jusqu'à présent nous ne pouvons rien dire de certain sur leur existence.

Pouvoir agglomérant. — Toutes les variétés de houilles présentent

¹ *Chem. Zeit.*, **32**, 1271 : 1908.

² *Chem. Ind.*, **27**, 147 : 1908.

³ *Arch. Pharm.*, **244**, 196 : 1906.

⁴ Tout récemment MM. A. Pictet et Ramsayer [*Chem. Zeitg.*, **35**, 865 et 907 ; 1911] ont extrait de la houille, au moyen du benzène bouillant ou par distillation sous pression réduite (10 mm.), de l'hexahydrofluorène $C^{12}H^{16}$ bouillant à 250° sous la pression atmosphérique.



la propriété de se ramollir plus ou moins par une élévation suffisante de température, vers 350-400° ; mais l'intensité de ce phénomène varie beaucoup suivant la variété considérée. Avec les houilles dites grasses, il se produit une fusion presque complète. C'est là une propriété qui peut être gênante dans certains cas mais qui dans d'autres est extrêmement précieuse : c'est grâce à elle que l'on obtient par distillation un coke compact formé par la soudure des fragments primitifs. De même elle est très importante pour la conduite des feux de forge.

Le pouvoir agglomérant d'une houille est donc en rapport avec la proportion de constituants fusibles qu'elle renferme. Comme la température à laquelle se produit le ramollissement est la même pour les diverses houilles, on est conduit à penser que ce constituant est également toujours le même, ou tout au moins qu'il s'agit de composés de constitution voisine.

Des recherches systématiques sur cette question ont été entreprises récemment par M. Boudouard. Elles ont montré que les houilles perdaient complètement leur pouvoir agglomérant quand on les oxydait, soit par une exposition prolongée à l'air à la température de 100°, soit par un réactif oxydant tel que l'acide azotique ; et que les houilles oxydées (phénomène d'ailleurs déjà connu depuis longtemps) renfermaient des produits humiques colorant la potasse en brun, tandis que les houilles primitives n'en contenaient pas.

Le pouvoir cokéfiant est dû par suite à une substance ou à un groupe de substances capables de s'oxyder pour se transformer en produits humiques. M. Boudouard pense que ces substances sont sinon des hydrates de carbone identiques à la cellulose végétale, du moins des corps analogues, bien que plus condensés ; car les produits humiques formés par oxydation sont tout à fait analogues à ceux obtenus artificiellement par l'action des acides sur le sucre, par exemple. Comme vérification, on constate que les houilles perdent complètement leur pouvoir agglomérant quand on les traite successivement par la potasse, par l'acide chlorhydrique et par la liqueur de Schweitzer, qui a la propriété de dissoudre la cellulose¹.

Oxydabilité. — On sait depuis longtemps que les houilles exposées à l'air s'échauffent spontanément, et peuvent même s'enflam-

¹ O. Boudouard, *Bull. Soc. Chim.*, (4), 5, 363, 372, 377, 380 ; 1909. Voyez aussi Fayol, *Bull. Ind. Min.*, 1879.



mer. Cet échauffement avait été attribué à l'oxydation de la pyrite. Mais les houilles non pyriteuses elles-mêmes s'oxydent et s'échauffent. Cependant l'oxydation de la pyrite est un fait très réel, et les houilles contenant de notables proportions de ce sulfure, tels que certains anthracites, sont plus que les autres sujettes à l'inflammation spontanée, les deux phénomènes se produisant en même temps.

L'échauffement des houilles non pyriteuses est dû à leur oxydation propre. Comme le pouvoir cokéfiant disparaît complètement chez les houilles oxydées, on est conduit à penser que l'oxydation se porte sinon exclusivement, du moins en grande partie sur le constituant agglomérant, constituant d'origine cellulosique selon l'hypothèse de Boudouard.

Cette oxydation conduit à de nombreuses conséquences : au point de vue de la variation de poids, elle occasionne d'abord une diminution due à la perte d'eau et de formène ; puis une augmentation, provenant de l'oxygène fixé ; finalement, l'oxydation continuant, on constate de nouveau une perte de poids qui peut atteindre 50 p. 100 au bout d'un temps suffisant.

En même temps on constate :

1° La perte totale du pouvoir agglomérant, ainsi que nous l'avons vu ;

2° Une diminution du pouvoir calorifique et éclairant par perte des gaz combustibles, qui peut atteindre 31 p. 100 en un mois (fig. 55) ;

3° Une diminution des sous-produits atteignant 50 p. 100 des produits ammoniacaux récupérables ; de plus le coke est inutilisable en métallurgie (fig. 56)¹.

On doit donc éviter soigneusement, autant qu'il est possible, de laisser s'oxyder les houilles à l'air. On y parvient en les emmagasinant sous forme de couches de faible épaisseur, ou mieux en les noyant complètement sous l'eau : on a ainsi construit des magasins noyés de 10 000 tonnes à Chicago ; la compagnie du gaz de Stettin en a construit plus récemment de 20 000 tonnes le long du quai de l'Oder².

Suivant des théories récentes, cette oxydation ne pourrait se produire que grâce à l'action de bactéries spéciales qui amorceraient la réaction ; on pourrait donc l'empêcher par l'usage des antiseptiques, lait de chaux ou créosote par exemple.

Enfin dans la préparation et la dessiccation des échantillons de

¹ Fayol, *loc. cit.* ; Lécivain, *Revue G^lc Chim.*, **13** : 123, 1910 ; Kurt Seidl, *Glück.*, 1909.

² *Le Gaz*, **55**, 1 et 33 ; 1911.



houille destinés à l'analyse, on évitera soigneusement le séjour à l'étuve en vase ouvert, qui pourrait fausser comme on le voit complètement les résultats (beaucoup d'analyses anciennes sont complè-

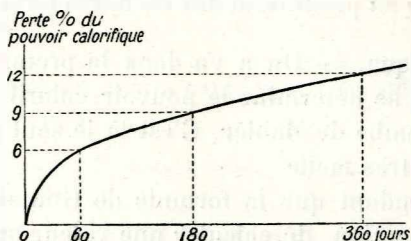


Fig. 55.

tement erronées de ce chef et indiquent une proportion d'oxygène trop considérable).

Rappelons que la houille oxydée se reconnaît très facilement à la

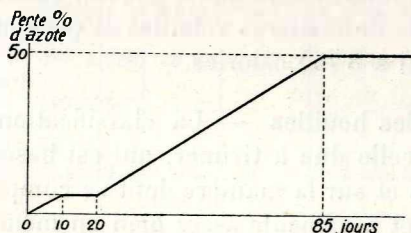


Fig. 56.

coloration brune qu'elle communique à une lessive de potasse, par suite de la dissolution des produits humiques formés.

Distillation pyrogénée. — La houille, soumise à la distillation pyrogénée, dégage des gaz et des produits volatils; ce dégagement gazeux commence vers 450° , température où se produit aussi le ramollissement; il est terminé vers 900° pour les charbons gras, et à 1100° pour les anthracites. A basse température, les gaz sont principalement formés de carbures d'hydrogène, surtout d'éthane et d'homologues supérieurs; mais leur dégagement s'arrête vers 700° pour faire place à de l'hydrogène. La composition des produits volatils est d'ailleurs différente suivant que la distillation a été conduite lentement ou que le charbon a été porté brusquement au rouge vif; dans le second cas la proportion des gaz combustibles est notablement plus



élevée, tandis que la quantité des goudrons est plus faible. Suivant Burgess et Wheeler, tous les charbons renfermeraient un composé se décomposant vers 700° en donnant de l'hydrogène, ou à plus basse température en produisant des carbures forméniques ¹.

Pouvoir calorifique. — On a vu dans la première partie de cet ouvrage comment se détermine le pouvoir calorifique des houilles, au moyen de la bombe de Mahler. C'est là le seul procédé exact, et son exécution est très facile.

Rappelons cependant que la formule de Goutal permet, comme première approximation, de calculer une valeur approchée du pouvoir calorifique connaissant simplement la teneur en cendres et en matières volatiles. L'écart entre le nombre calculé et la valeur expérimentale déterminée avec l'obus Mahler ne dépasse pas en général 2 p. 100 sauf pour les qualités extrêmes, anthracites et houilles très sèches ou lignites.

La formule de Goutal montre que le pouvoir calorifique des houilles varie avec le poids de matières volatiles et présente vers 25 p. 100 un maximum égal à 8 750 calories.

Classification des houilles. — La classification la plus généralement suivie est celle due à Gruner, qui est basée sur la teneur en matières volatiles et sur la manière dont se comportent les houilles à la combustion, et représente assez bien en même temps leur formation géologique. Elle divise les houilles en six catégories :

- 1° Les houilles sèches à longue flamme ;
- 2° Les houilles grasses à longue flamme ;
- 3° Les houilles grasses proprement dites ;
- 4° Les houilles grasses à courte flamme ;
- 5° Les houilles maigres à courte flamme, ou anthraciteuses ;
- 6° Les anthracites.

Le tableau de la page 311 justifie cette classification.

La classification admise par l'Administration française des Mines ne comprend que cinq catégories :

- Houille sèche à longue flamme ;
- Houille grasse à longue flamme ;
- Houille grasse maréchale ;
- Houille maigre à courte flamme ;
- Anthracite.

¹ *Chem. Soc.*, 97, 1917: 1910.



En Angleterre on n'admet que trois types :

Charbons bitumineux } non collants.
 } ou collants.

Charbons à vapeur.

Anthracite.

Nous allons passer en revue rapidement les différents types de la classification de Gruner :

	COMPOSITION déduction faite des cendres et de l'eau.			O + Az H	EAU	COKE	NATURE ET ASPECT DU COKE
	C	H	O + Az				
	Houille sèche à longue flamme.	77,5	5,5	17,0	4-3	2,4	
Houille grasse à longue flamme.	82,0	5,5	12,5	3-2	2,4	60-68	
Houille grasse propre- ment dite.	86,5	5,0	8,5	2-1	2,4	68-74	
Houille grasse à courte flamme.	89,5	4,5	6,0	1	2,4	74-82	
Houille maigre anthra- citeuse	92,0	3,0	5,0	1	2,4	82-90	
Anthracite	94,0	2,0	4,0	1	2,4	90-92	

1° HOUILLES SÈCHES A LONGUE FLAMME. — Ce sont les houilles qui se rapprochent le plus des lignites; elles sont dures, peu friables, mais se délitent assez facilement à l'air; leur couleur est noire, terne, ou d'un brun foncé. Leur cassure est lamelleuse ou conchoïdale; leur densité est faible, 1,25.

Elles s'allument facilement et brûlent avec une longue flamme sans se ramollir sensiblement et sans former de mâchefers. Elles ne peuvent servir à faire du coke, car elles ne fondent ni ne s'agglomèrent à la distillation.

Leur pouvoir calorifique est en moyenne (pour les houilles pures) de 8000 calories, et leur pouvoir évaporatoire de 6 à 6,25 kg.

Ces houilles se trouvent principalement en Belgique, où on les désigne sous le nom de flénus; en Allemagne, dans les couches supérieures des bassins de la Saar et de la Haute Silésie; en Angleterre et en Écosse. D'ailleurs toutes passent graduellement aux houilles grasses à longue flamme quand on pénètre plus profondément dans



l'épaisseur des couches; on trouve de ces houilles de transition en France, dans le bassin de l'Allier principalement.

2° HOUILLES GRASSES A LONGUE FLAMME. — Ces houilles se rencontrent en France dans le bassin de Saint-Étienne et dans le Pas-de-Calais, et surtout en Angleterre, à Newcastle, et aux États-Unis, en Pennsylvanie; on en trouve également en Belgique, à Mons, mais elles se rapprochent alors beaucoup des houilles grasses proprement dites.

Les houilles grasses à longue flamme sont franchement noires, à cassure lamelleuse; elles sont moins dures et plus friables que les houilles sèches, et un peu plus lourdes (densité 1,30).

Elles s'enflamment facilement et brûlent rapidement en donnant une grande flamme et beaucoup de fumée. Elles fondent au feu et donnent à la distillation un coke bien aggloméré, plus ou moins poreux, en même temps que les gaz dégagés ont un grand pouvoir éclairant; aussi sont-elles recherchées pour la fabrication du gaz d'éclairage, bien que leur rendement en matières volatiles soit plus faible que celui des houilles sèches.

Leur pouvoir calorifique est en moyenne de 8 500 calories et leur pouvoir évaporatoire de 7 à 7,5 kg. suivant leur teneur en cendres,

Cannel-coal. — On désigne sous ce nom une houille très riche en produits volatils, et donnant à la distillation des gaz très carburés et très éclairants. On la rencontre principalement dans le Lancashire et en Écosse; on en trouve en France aux mines de Montrambert (Loire) et en Espagne aux mines de Teberga (Asturies). Dans ces mines la couche de cannel-coal, de 30 centimètres d'épaisseur, est directement superposée à la couche de houille, montrant la similitude d'origine.

La distillation des cannels donne de 280 à 420 m³ de gaz par tonne. Voici d'après Lozé la composition de quelques-uns de ces charbons.

	LESMAHAGO	BOGHEAD	CAPELDRAC	LOCHGELLY
Matières volatiles	49,60	68,40	54,50	33,50
Coke	50,40	31,60	45,50	66,50
Cendres	9,10	22,80	10,50	13,10
Soufre dans le charbon	2,23	0,53	0,65	0,75
— — le coke	1,14	0,08	0,20	0,25
— — les matières volatiles	1,09	0,45	0,45	0,50
Cendres dans le coke	48,05	70,25	23,07	29,70



3° HOUILLES GRASSES PROPREMENT DITES. — On en trouve de nombreux gisements en France, dans le Nord, dans le Pas-de-Calais et dans la Loire, et en Belgique, dans les bassins de Liège et de Mons ; on les rencontre également en Allemagne dans le bassin de la Ruhr, et en Angleterre dans le bassin de Bristol et dans le Yorkshire.

Ces houilles possèdent une couleur d'un noir brillant ; elles sont moins dures et plus friables que les houilles à longue flamme ; leur densité est d'environ 1,30.

Elles fondent complètement sous l'action de la chaleur, et sont tout à fait propres au travail de la forge, car elles forment au-dessus des pièces chauffées une voûte qui concentre la chaleur et permet d'atteindre une haute température. Aussi les désigne-t-on couramment sous le nom de houilles grasses maréchales ou charbons de forge.

Elles peuvent remplacer les houilles grasses à longue flamme pour la préparation des gaz d'éclairage, car si leur rendement est un peu inférieur, le gaz produit est un peu plus éclairant ; de plus, leur coke est d'excellente qualité.

Le pouvoir calorifique des variétés pures est en moyenne de 8800 calories, et le pouvoir évaporatoire de 9 kilogrammes.

4° HOUILLES GRASSES A COURTE FLAMME. — Ce sont surtout les houilles du Nord de la France, à Aniche, Béthune, Nœux, Lens, et aussi du centre à Firminy, à Carmaux. En Belgique, on les trouve à Charleroi ; en Angleterre, à Cardiff. On les exploite également en Allemagne, dans le bassin de Sarrebrück, en Westphalie et dans la Haute Sibérie ; en Russie, dans le bassin du Donetz ; en Amérique et en Australie.

Ces houilles présentent un éclat moins vif que celles de la variété précédente, elles sont beaucoup plus friables ; leur poids spécifique est de 1,30-1,35.

Elles sont assez difficiles à enflammer, et brûlent avec une flamme courte, peu éclairante, souvent bleue à la base. Elles se ramollissent beaucoup encore à la distillation, et donnent un coke compact bien aggloméré, et avec un bon rendement car leur teneur en matières volatiles est déjà assez faible. Aussi constituent-elles les *charbons à coke* par excellence, surtout les qualités moyennes à 20-22 p. 100 de matières volatiles. Si cette proportion diminue notablement, le coke n'est plus aussi bien aggloméré.

Ces houilles s'oxydent très facilement à l'air, et nous savons que



dans ce cas elles perdent leur pouvoir agglomérant et ne peuvent plus servir à la fabrication du coke.

Ce sont celles dont le pouvoir calorifique est le plus élevé : il est d'environ 8900 calories; le pouvoir évaporatoire atteint 9,23 kg. pour les houilles pures et 8,93 pour les houilles marchandes.

5° HOUILLES MAIGRES ANTHRACITEUSES. — On les rencontre en France dans les bassins du Nord et du Pas-de-Calais; en Belgique à Charleroi; en Angleterre, à l'Ouest du pays de Galles, et dans la partie Sud du bassin de Pensylvanie aux États-Unis.

On les divise parfois en deux catégories : les charbons demi-gras et les charbons quart-gras, les premiers tenant de 18 à 14 p. 100 de matières volatiles, les seconds de 14 à 10 p. 100.

Ces houilles sont ternes; les charbons quart-gras sont moins friables que les demi-gras. Le poids spécifique est voisin de 1,40.

Elles s'enflamment difficilement, et brûlent avec une flamme très courte, sans presque donner de fumée, et sans se ramollir sensiblement; mais elles décrépitent et se brisent en menus morceaux; aussi les emploie-t-on de préférence dans les gazogènes et pour la fabrication des agglomérés.

Leur pouvoir calorifique est de 8700 calories en moyenne; le pouvoir évaporatoire des houilles à 10 p. 100 de cendres est d'environ 8 kilogrammes.

Ces houilles sont quelquefois désignées sous le nom d'anhracites, bien que cette qualification revienne à la classe suivante.

6° ANTHRACITES. — Ce sont les houilles les plus anciennes et les plus complètement transformées, chez lesquelles la proportion de carbone est la plus forte. On les rencontre surtout en Angleterre et aux États-Unis. En France il en existe un gisement d'excellente qualité à La Mure, dans l'Isère.

La couleur des anthracites est noire ou tire souvent sur le gris. Leur cassure est très nette; leur dureté en général est assez grande, quelquefois considérable. Il est à remarquer que la friabilité du charbon augmente d'abord en suivant la classification de Gruner, puis diminue pour les deux derniers termes. En sorte que ce sont les charbons les plus collants qui sont les moins durs et les plus friables.

D'ailleurs tous les anthracites s'effritent peu à peu à l'air. Leur densité varie de 1,40 à 1,75 quand ils renferment beaucoup de cendres.



L'anhracite s'allume difficilement et ne brûle bien qu'avec un tirage suffisant et une masse assez grande de combustible. Il ne se produit ni agglutination, ni fumée. La flamme est courte et bleue.

Le pouvoir calorifique est d'environ 8 300 calories ; le pouvoir évaporatoire des bonnes variétés atteint 9 kilogrammes.

L'anhracite peut remplacer le coke dans les hauts fourneaux, pourvu qu'il ne se délite pas trop ; on s'en sert également pour la fusion de l'acier au creuset. Enfin, c'est le combustible par excellence des calorifères et des poêles à combustion lente.

UTILISATION DES DÉCHETS DE HOUILLE

Nous ne parlerons pas du triage et du lavage des houilles, les principes et les appareils relatifs à ces opérations devant être étudiés dans un autre ouvrage de cette collection ; nous n'envisagerons ici que les manipulations ayant pour but de permettre l'utilisation des déchets et des poussières de houille.

On peut utiliser ces déchets de trois manières différentes : soit tels quels, sous forme de poussières dans des foyers spéciaux, mais il est nécessaire auparavant de les sécher parfaitement ; soit après les avoir agglomérés et comprimés en briquettes, toujours après un séchage préalable ; soit enfin en les transformant en coke. Nous étudierons plus loin la carbonisation, et nous ne parlerons ici que du séchage et de l'agglomération.

Séchage des houilles. — Le séchage des houilles s'effectue soit dans des fours fixes ou mobiles, soit dans des sécheurs. Parmi les premiers nous citerons le four de Molières qui est un four tournant horizontal chauffé directement par un foyer placé à l'une de ses extrémités ; les gaz du foyer traversent le four dans sa longueur pour sortir à l'autre extrémité par une cheminée. Le charbon est poussé en sens inverse à l'aide de vis sans fin.

On emploie aujourd'hui plus volontiers les sécheurs, qui peuvent se diviser en trois types : les sécheurs à tubes, à plateaux et à trommels. Le chauffage est produit par les gaz d'un foyer, par de l'air chaud ou par la vapeur. Toutefois, ce dernier mode de chauffage est de moins en moins utilisé, comme trop onéreux.

Les sécheurs à tubes comprennent un faisceau de tubes parallèles horizontaux ou inclinés. Le poussier de charbon circule soit à l'intérieur des tubes, soit à l'extérieur, pendant que l'agent de chauffage,



air chaud ou vapeur, circule de l'autre côté de la paroi. Nous représentons ici (fig. 57) le sécheur Mertens, qui est chauffé à la vapeur.

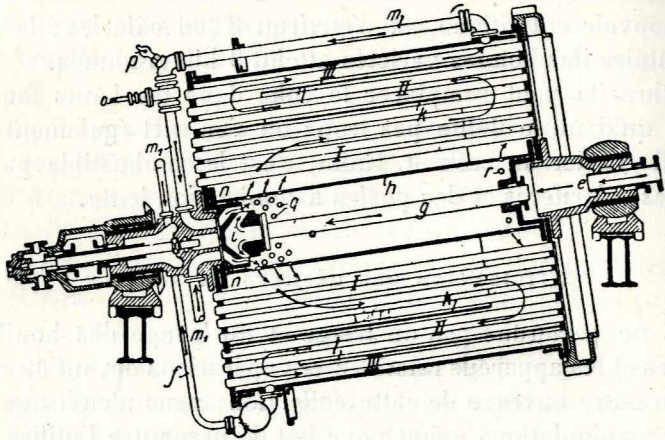


Fig. 57. — Sécheur Mertens.

Les sécheurs à plateaux sont formés d'une série de plateaux horizontaux superposés, fixes ou pouvant tourner autour d'un axe vertical commun. Ce dernier dispositif est réalisé par exemple dans

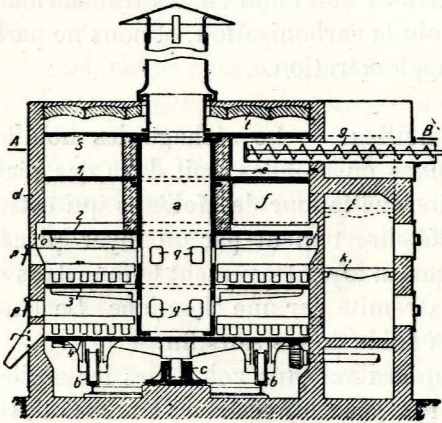


Fig. 58. — Sécheur Ostertag, de Winterthur.

le sécheur Ostertag, de Winterthur (fig. 58) dans lequel le charbon est desséché, sur les deux plateaux supérieurs, par de l'air chaud qui circule dans le même sens que lui, tandis que les deux plateaux inférieurs sont parcourus par un courant d'air froid qui

termine la dessiccation en même temps qu'il ramène le charbon à la température ordinaire.

Les sècheurs à trommels comportent un tambour cylindrique

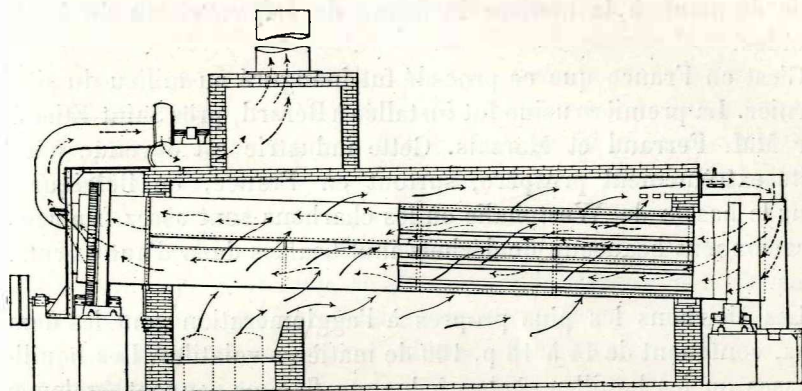


Fig. 59. — Sécheur de la Bartlett and Snow Co.

incliné, tournant autour de son axe ; des cloisons ou des bras sont disposés à l'intérieur de manière à brasser la poussière de charbon pendant son parcours, et à renouveler sans cesse son contact avec

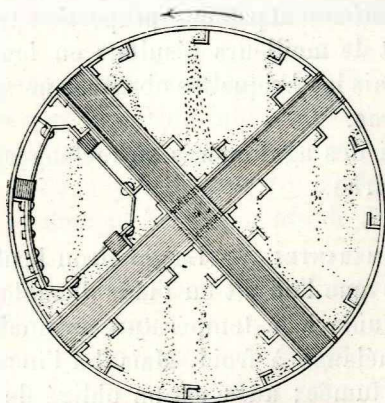


Fig. 60. — Coupe perpendiculaire à l'axe.

l'air chaud qui traverse le cylindre. Nous donnons ici (fig. 59) la figure du sécheur Bartlett et Snow de Cleveland. La figure 60 indique comment l'on obtient un brassage énergique de la poussière dans le courant de gaz chaud venant du foyer¹.

¹ Jordan, *Glück.*, **46**, 607 ; 1910. — W.-D. Ennis, *Eng. Mag.*, **34**, 463 ; 1908. — *Rev. Mét.*, **5 bis**, 751 ; 1908.

Fabrication des agglomérés. — L'agglomération de la houille s'obtient au moyen d'un ciment agglomérant convenable, goudron ou brai, et d'une compression énergique à l'aide d'une presse spéciale donnant à la matière la forme de *briquettes* ou de *boulets* ovoïdes.

C'est en France que ce procédé fut inauguré au milieu du siècle dernier. La première usine fut installée à Bérard, près Saint-Etienne, par MM. Ferrand et Marsais. Cette industrie est devenue par la suite extrêmement prospère, surtout en France, en Belgique et dans le bassin de Westphalie où les charbons sont assez friables et occasionnent beaucoup de déchets inutilisables dans d'autres conditions.

Les charbons les plus propres à l'agglomération sont les demi-gras, contenant de 14 à 18 p. 100 de matières volatiles. Les houilles grasses ou les houilles sèches à longue flamme peuvent également convenir, mais elles ont l'inconvénient de donner beaucoup de fumée, inconvénient que l'on essaie d'amoindrir en diminuant autant que possible la proportion d'agglomérant. Quant aux houilles très maigres, contenant moins de 12 p. 100 de matières volatiles, elles se moulent difficilement et tombent en poussière sur la grille du foyer si elles ne contiennent pas une proportion très élevée d'agglomérant; on obtient de meilleurs résultats en leur mélangeant des houilles grasses, mais les briquettes obtenues ne valent jamais celles de charbon demi-gras.

On prépare aussi des agglomérés en mélangeant à la houille des lignites ou de la tourbe.

SUBSTANCES AGGLOMÉRANTES. — Le goudron brut de houille est la première substance que l'on ait eu l'idée d'employer pour l'agglomération. Il est liquide à la température ordinaire, et permet par suite d'opérer le mélange à froid. Mais il a l'inconvénient de produire beaucoup de fumée; aussi est-on obligé de soumettre à une calcination préalable les briquettes au goudron, afin d'en éliminer les substances les plus volatiles.

Le goudron n'est plus guère employé aujourd'hui, on le remplace par le *brai*.

On désigne sous ce nom le résidu de la distillation incomplète du goudron, après qu'on a éliminé les portions les plus volatiles. On distingue le *brai gras* et le *brai sec*. Le premier s'obtient en arrêtant la distillation à 200°, aux huiles d'anthracène; pour obtenir le



second, on laisse passer une partie de ces huiles, environ $\frac{1}{3}$ p. 100, jusqu'à 220° environ.

Le brai gras est solide à la température ordinaire, mais se ramollit complètement vers 50°. Il produit une bonne agglomération, dans la proportion de 7 à 8 p. 100, mais donne encore beaucoup de fumée. Le brai sec au contraire, tout en présentant tous les avantages du brai gras, ne donne sensiblement pas de fumée; aussi est-il de plus en plus employé. Il se ramollit à 70° et fond vers 100°.

On emploie aussi comme agglomérant la terre glaise, principalement pour les boulets destinés au chauffage domestique.

On a essayé également d'utiliser l'amidon ou les farines avariées, le silicate de soude, la mélasse, le ciment magnésien (magnésie et chlorure de magnésium), le mazout ou résidu de distillation des pétroles — ce dernier paraît devoir donner de bons résultats.

On a aussi tenté de réaliser l'agglomération sans l'aide de substance étrangère, au moyen d'une pression suffisante, comme pour les lignites, mais sans obtenir de résultats satisfaisants.

PRÉPARATION DES AGGLOMÉRÉS. — Cette préparation comprend successivement : le broyage, le lavage et le séchage du charbon; le broyage et la fusion du brai; le malaxage et le chauffage de la pâte; enfin le moulage.

La houille doit d'abord être broyée et triée de manière à assurer aux grains une grosseur uniforme, qui peut être d'autant plus considérable que la houille est plus dure. Avec les houilles très friables, on doit augmenter beaucoup la finesse des grains, mais il faut dans ce cas augmenter également la proportion de brai à ajouter pour l'agglomération.

Le broyage est généralement aujourd'hui suivi d'un lavage, puis d'un égouttage et d'un séchage.

D'autre part le brai doit être également broyé avant d'être mélangé au charbon. On se sert dans ce but d'un appareil à noix. L'emploi des meules tournant sur une aire en fonte a dû être abandonné. Le broyage du brai doit naturellement s'effectuer à une température aussi basse que possible afin d'éviter son ramollissement : on placera les broyeurs à l'ombre et à l'abri du rayonnement des fours ou des courants d'air chaud. Quelquefois pendant les fortes chaleurs le brai est trop mou pour que le broyage puisse se faire dans de bonnes conditions; on le mélange dans ce cas à la moitié de son poids de houille pulvérisée avant de l'envoyer dans le broyeur.



On peut se dispenser d'ailleurs de cette opération du broyage en additionnant le brai sec d'une certaine quantité de goudron à chaud, de manière à obtenir une masse fluide qu'on puisse facilement mélanger à la houille. Il est bon de prendre du goudron déjà débarrassé par distillation de ses huiles les plus légères.

Le mélange du charbon avec le brai pulvérisé ou fondu doit être effectué dans des proportions invariables. On emploie à cet effet, soit le dosage à la main pour des petites installations, soit des chaînes à godets.

Le mélange convenablement dosé passe ensuite dans un malaxeur qui lui donnera l'homogénéité nécessaire avant d'être soumis à la compression. Cet appareil est constitué par des cylindres verticaux en tôle dans lesquels le mélange circule de haut en bas, en même temps qu'il est énergiquement brassé par des bras horizontaux fixés sur un arbre tournant. Le chauffage est obtenu par injection directe de vapeur dans la pâte; mais pour éviter que cette vapeur, en se condensant, n'augmente trop l'humidité de la masse, on la surchauffe préalablement à un degré convenable.

Au lieu des malaxeurs verticaux, on peut également employer des cuves horizontales demi-cylindriques, dans lesquelles la pâte est poussée par une vis sans fin, en même temps qu'elle est chauffée par injection de vapeur. L'évaporation qui se produit à la surface libre de la pâte s'oppose à ce qu'elle se charge d'une trop grande quantité d'eau.

Pour les pâtes très humides on remplace les malaxeurs par des fours dans lesquels le mélange est chauffé par un foyer extérieur, en même temps qu'il est brassé par des agitateurs mécaniques; par exemple le four Biéatrix, dont la sole a la forme d'une plate-forme tournante montée sur un arbre vertical. Il est chauffé par les gaz chauds issus d'un foyer latéral. Le mélange en sort à la température de 95°.

Enfin la pâte doit être moulée au moyen d'une compression énergétique. On emploie dans ce but des presses appartenant à une infinité de modèles, appartenant à différents systèmes: tantôt elles comportent deux roues tangentielles, portant sur leurs jantes des pleins ou des creux se correspondant, de manière à réaliser un moule, tantôt ce sont des moules véritables, à pression hydraulique ou à vapeur; tantôt la pâte est comprimée dans un cylindre dont elle sort sous forme d'un boudin continu, et qu'un couteau coupe en tronçons de longueurs égales. On trouvera dans l'ouvrage sur *Les combustibles*



de MM. Colomer et Lordier, auquel nous avons emprunté la plupart des détails qui précèdent, la description d'un grand nombre de modèles.

AVANTAGES DES AGGLOMÉRÉS. — Non seulement la fabrication des agglomérés est intéressante en ce qu'elle permet l'utilisation de poussières dont la valeur serait beaucoup plus faible, mais encore elle fournit à l'industrie un combustible qui dans certains cas est préféré à la houille : les briquettes présentent en effet sur la houille l'avantage d'économiser beaucoup de place (20 p. 100 au moins) puisqu'elles peuvent être alignées les unes à côté des autres sans vides intermédiaires ; de donner beaucoup moins de poussières, et d'avoir une combustion facile et régulière, n'exigeant pas un chauffeur très exercé. Aussi sont-elles de plus en plus employées pour la navigation et pour le chauffage domestique.



B. — LES COMBUSTIBLES SOLIDES ARTIFICIELS

§ 1. — CHARBON DE BOIS

Le bois, soumis en vase clos à l'action de la chaleur, ne tarde pas à se décomposer. Dès la température de 140° , la transformation commence, caractérisée par le brunissement de la fibre et le dégagement de gaz. La teneur en carbone du résidu augmente, à mesure que la température s'élève, en même temps que sa couleur se fonce graduellement, pendant que les éléments volatils, oxygène, hydrogène et azote, diminuent peu à peu, expulsés à l'état gazeux avec une partie du carbone. Il se produit en définitive, de même que dans la transformation de la cellulose en tourbe et en houille, une dégradation continue de la matière organique, dont le dernier terme, en dehors des produits gazeux, serait le carbone pur. Mais cet état limite ne se trouve jamais atteint, et ce que l'on appelle charbon de bois en diffère d'autant plus qu'il a été préparé à une température plus basse. On s'en aperçoit immédiatement à la couleur du produit obtenu, qui, si l'on s'arrête à $250-270^{\circ}$, est *roux* et ne devient franchement noir qu'au delà de 400° . On s'en rend mieux compte en déterminant la proportion de matière volatile que contient le charbon préparé à différentes températures. On trouve ainsi¹ que la proportion de matières volatiles contenues dans le charbon de bois de bourdaine est

Pour un charbon préparé à 150°	égale au poids du charbon ;
— — — —	250° égale à la moitié du poids du charbon ;
— — — —	300° égale au $1/3$;
— — — —	350° — au $1/7$;
— — — —	400° — au $1/20$;
— — — —	$1\ 500^{\circ}$ — au $1/100$;

¹ Violette, *Ann. Chim. Phys.*, (3), **23**, 476; 1848 et **32**, 322; 1851.



Voici d'ailleurs les analyses effectuées sur ces charbons :

TEMPÉRATURE de la CARBONISATION.	COMPOSITION CENTÉSIMALE DU CHARBON OBTENU			
	C	H	O + Az par différence.	Cendres.
150	47,51	6,12	46,29	0,08
160	47,60	6,06	46,27	0,08
170	47,77	6,19	45,95	0,09
180	48,93	5,84	45,12	0,12
190	50,61	5,11	44,06	0,22
200	51,81	3,99	43,98	0,23
210	53,37	4,90	41,54	0,20
220	54,57	4,15	41,39	0,22
230	57,14	5,50	37,05	0,31
240	61,30	5,50	32,70	0,51
250	65,58	4,81	28,97	0,63
260	67,89	5,04	26,49	0,56
270	70,45	4,64	24,19	0,85
280	72,64	4,70	22,09	0,57
290	72,49	4,98	21,93	0,61
300	73,23	4,25	21,96	0,57
310	73,63	3,83	21,81	0,74
320	73,57	4,83	21,09	0,52
330	73,55	4,63	21,33	0,48
340	75,20	4,40	19,96	0,48
350	76,64	4,13	18,44	0,62
432	81,97	2,29	14,15	1,60
1 020	83,29	1,70	13,79	1,22
1 110	88,14	1,41	9,26	1,20
1 350	90,81	1,58	6,49	1,15
1 500	94,57	0,74	3,84	0,66
au-dessus de 1 500	96,52	0,62	0,94	1,95

Comme une partie du carbone se volatilise avec l'hydrogène et l'oxygène sous forme de composés organiques, il en résulte que le rendement en charbon est d'autant plus faible que la température de carbonisation est plus élevée, c'est-à-dire que le charbon obtenu est plus pur. Violette a ainsi trouvé que le poids de carbone volatilisé est :

- A 200° égal au 1/5 du poids du charbon restant ;
- A 250° égal à la moitié du poids du charbon restant ;
- A 300-350° égal au poids du charbon restant ;
- A 1 500° égal au double du poids du charbon restant.

Ces chiffres n'ont d'ailleurs qu'une valeur comparative, car le rendement en charbon dépend dans une très large mesure de la vitesse de distillation. Il varie par exemple de 15 p. 100 pour une distillation



rapide à 25 p. 100 pour une carbonisation lente. Cette variation s'explique facilement : Les premiers produits volatils dégagés sous l'action d'une élévation graduelle de température renferment principalement de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau. Si la carbonisation est menée très rapidement, ces gaz se trouvant en contact avec du charbon incandescent sont décomposés à son contact, l'acide carbonique en oxyde de carbone, en volatilissant son propre poids de charbon, la vapeur d'eau en oxyde de carbone et hydrogène, ce qui entraîne une perte presque aussi considérable.

Il en résulte que l'on doit toujours chercher, afin d'obtenir un meilleur rendement, à conduire la carbonisation le plus lentement possible et à la température la plus basse possible ; et que l'on doit éviter avec le plus grand soin de mettre en contact avec le charbon incandescent les vapeurs dégagées pendant l'opération.

Propriétés du charbon de bois. — Composition. — Nous venons de voir que le charbon de bois renferme toujours, à côté du carbone, des matières volatiles, en proportions variables suivant les conditions dans lesquelles s'est effectuée la carbonisation. L'essence du bois influe également, comme on peut le penser, sur cette composition. On peut cependant prendre comme moyenne 10 p. 100 de matières volatiles et 2 à 3 p. 100 de cendres. En outre le charbon est très hygroscopique et contient normalement une proportion assez élevée d'humidité, 8 p. 100 en moyenne.

Voici un tableau indiquant, d'après Colomer et Lordier, les variations de composition du charbon suivant l'essence du bois :

BOIS soumis à la carbonisation.	C	H	O + Az	CENDRES
Bourdaine	73,24	4,25	21,96	0,55
Bouleau	71,15	4,55	23,55	0,75
Buis	70,50	3,75	25,10	0,65
Frêne	70,40	4,55	24,37	0,68
Erable	70,05	4,60	24,90	0,45
Cornouiller	69,05	3,85	25,49	0,61
Charme	68,85	4,15	26,38	0,62
Peuplier	68,75	4,85	25,54	0,86
Houx	68,50	4,75	25,89	0,86
Tremble	68,15	5,50	25,73	0,62
Chêne	67,42	4,10	28,48	0,20
Orme	66,85	4,67	28,18	0,30



DENSITÉ. — La densité réelle du charbon de bois réduit en poudre est supérieure à l'unité, et d'autant plus élevée que le charbon a été préparé à plus haute température. Elle varie, d'après Violette, de 1,5 à 2 pour des charbons préparés de 150° à 1 500°. Mais le charbon de bois est très poreux, et contient même un grand nombre de vides et de fissures qui font que sa densité apparente est bien inférieure à l'unité, et oscille de 0,20 à 0,50 suivant l'essence du bois, les bois résineux et les bois blancs donnant les charbons les plus légers, les bois durs donnant les plus lourds. Le poids du mètre cube sera proportionnellement encore plus faible, en raison des vides existant entre les morceaux de charbon. Il oscille, selon Grüner, de 125 à 240 kilogrammes, suivant les essences.

COULEUR. — Les charbons préparés de 270 à 300° sont d'un brun foncé ; ils laissent une trace brune sur le papier, d'où leur nom de *charbons roux*. Ces charbons étaient préparés autrefois spécialement pour la fabrication de la poudre. Ils ne sont plus guère utilisés depuis le développement des explosifs nitrés.

A partir de 350° les charbons sont noirs.

INFLAMMABILITÉ. — Le charbon de bois est d'autant plus inflammable qu'il a été préparé à plus basse température ; préparé entre 260 et 280°, il s'enflamme, d'après Violette, entre 340 et 360° ; préparé à 432°, il s'enflamme vers 400° ; préparé entre 1 000-1 500°, il ne s'enflamme plus qu'entre 600 et 800°. De plus le charbon préparé à basse température continue à brûler très facilement à l'air, tandis que le charbon calciné s'éteint au contraire facilement. Nous trouvons donc encore ici de nouvelles raisons imposant en pratique l'obligation d'effectuer la carbonisation à basse température.

POUVOIR CALORIFIQUE. — Le pouvoir calorifique du charbon de bois est d'environ 8 000 calories.

PRÉPARATION DU CHARBON DE BOIS

On peut effectuer de trois manières différentes la carbonisation du bois : en meules, en fours ou en cylindres. Dans les deux premiers procédés, on sacrifie une partie du bois dont la combustion produit la chaleur nécessaire à la décomposition ; dans le procédé des cylindres on emploie un foyer extérieur.



Carbonisation en meules. — MEULES VERTICALES FRANÇAISES. — La carbonisation en meules se fait pendant la belle saison, sur le terrain de la coupe ou à proximité. On choisit (fig. 61) une aire plane A, on la défriche et la nivelle soigneusement de manière qu'elle aille en s'élevant légèrement du périmètre vers le centre, où l'on plante verticalement dans le sol trois perches ou *mâts* que l'on réunit par des liens en branchages, de manière à former une cheminée rem-

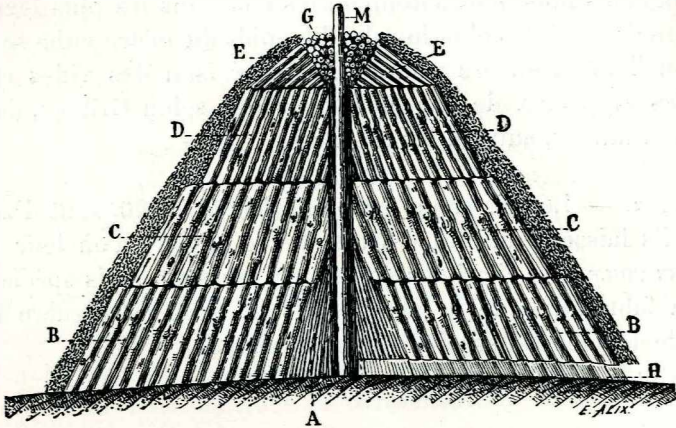


Fig. 61.

plie de brindilles et de feuilles sèches, ou de fumerons provenant d'une opération précédente. Puis on entoure la base de la cheminée de menu bois bien sec, s'appuyant sur elle de manière à former une sorte de cône de 1 mètre à 1,50 m. de diamètre, qui fournira par sa combustion la chaleur nécessaire à la carbonisation. Enfin tout autour on dispose une première assise de bûches B, inclinées à 45°, et reposant sur le sol par leur extrémité la plus large. Ces bûches ont 1 mètre de longueur au maximum, et doivent être tassées autant que possible les unes contre les autres de manière à éviter les vides.

Par-dessus cette première assise, on en dispose une autre C rangée de manière analogue, et qu'on appelle éclisse ; c'est elle qui fournira le meilleur charbon. Enfin on dispose encore généralement une troisième et quelquefois même une quatrième assise, la dernière, appelée chapeau, pouvant être constituée par des rondins placés horizontalement, afin de donner à la meule une forme plus arrondie.

On recouvre ensuite la meule d'une double couverture, la pre-



mière de gazon, de bruyère ou de mousse, la deuxième de terre molle mélangée de poussier, que l'on tasse fortement en la battant au moyen d'une pelle. Cette couverture repose généralement à la base sur un petit mur en pierres sèches de 20 centimètres de hauteur environ, qui laissera circuler l'air et permettra l'allumage. L'épaisseur du revêtement varie de 20 centimètres à la base à 10 centimètres au sommet de la meule.

On introduit alors par le haut de la cheminée des charbons en-

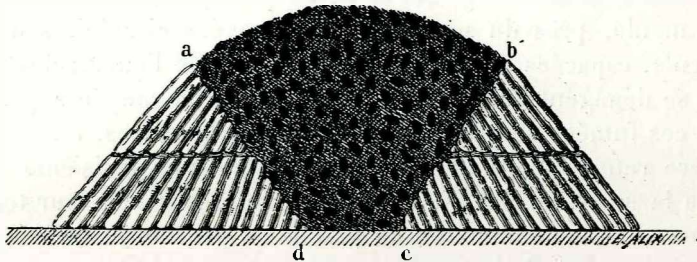


Fig. 62.

flammés ou une boule de résine qui communique le feu aux brindilles remplissant la cheminée, puis au cône de combustion A. Quand le feu est bien pris on bouche la cheminée. L'air continue à pénétrer par les interstices du mur en pierres sèches au bas de la meule, et la combustion se propage régulièrement avec production de vapeurs fuligineuses à odeur âcre qui sont le signe que la distillation est commencée¹.

La vapeur d'eau produite par cette distillation se condense sur les bûches avoisinantes, et se trouve chassée peu à peu vers la périphérie qu'elle atteint au bout de vingt-quatre heures environ. Le revêtement commence alors à suinter; c'est la période dite de *la suée* qui dure environ une huitaine de jours. En même temps la fumée devient de plus en plus claire, et la meule se tasse peu à peu par suite de la diminution de volume due à la carbonisation. Si les tassements sont irréguliers, on renforce la couverture du côté où ils se produisent avec le plus d'intensité, et l'on ouvre des événements aux endroits où la combustion est moins rapide.

Quand la suée a cessé, on ralentit la combustion en augmentant

¹ Quelquefois au lieu de produire l'allumage par le haut de la cheminée, on ménage au bas de la meule un conduit H par où l'on pousse jusqu'à la cheminée un fagot de brindilles enflammées. On bouche ensuite le trou H et l'on continue l'opération comme ci-dessus.



l'épaisseur de la couverture et bouchant en partie les orifices d'aération ou recouvrant le mur de la base. Il se produit alors une distillation lente aux dépens de la chaleur emmagasinée au centre de la meule. La figure 62 montre l'aspect d'une meule à cette phase de l'opération suivant une observation due à Ebelmen¹; on voit que la combustion se propage régulièrement de haut en bas et du centre vers la périphérie.

Pour terminer la carbonisation des couches extérieures, on procède alors à la mise à *grand feu* : on pratique dans le revêtement de la meule, près du sommet, deux rangées circulaires de trous ou événements, espacées d'environ 0,40 m. l'une de l'autre; des fumées noires se dégagent aussitôt abondamment de la rangée supérieure; quand ces fumées sont devenues claires et bleuâtres, on bouche la première rangée d'événements et l'on en pratique une troisième au-dessous de la seconde, par où les fumées se dégagent à leur tour; on continue ainsi la combustion de proche en proche, jusqu'à ce qu'on soit arrivé au bas de la meule.

Voici d'après Ebelmen la composition des fumées qui s'échappent aux différents moments de la distillation :

	COMPOSITION EN VOLUMES P. 100			
	CO*	CO	H	Az et pertes.
Fumées brunes, fuligineuses.	26,7	9,7	9,9	53,7
Fumées blanches, légères . .	22,6	5,7	12,3	59,4

On voit que malgré l'insuffisance de l'accès de l'air et la lenteur de la combustion, ces gaz sont beaucoup plus riches en acide carbonique qu'en oxyde de carbone. Ce fait, qui avait surpris Ebelmen, montre que la température reste très basse dans la meule, et que par suite, en vertu des lois énoncées dans la première partie de ce volume, l'équilibre $CO = CO^2 + C$ se déplace dans le sens de la plus grande chaleur dégagée, et conduit à un mélange riche en acide carbonique.

Une fois la distillation terminée, on bouche tous les événements, et

¹ Recueil des travaux scientifiques d'Ebelmen, 2, p. 194.



On attend plusieurs jours afin de laisser un peu refroidir la meule dont on enlève ensuite la couverture à la partie supérieure. Dès qu'on a mis à nu le charbon, on y jette de l'eau ou de la terre meuble de manière à en empêcher l'inflammation, et on l'enlève peu à peu par couches successives. C'est la deuxième assise, ou éclisse, qui donne le meilleur charbon. Celui du voisinage de la cheminée est trop brûlé et passé à l'état de braise; celui des parties périphériques est souvent incomplètement carbonisé et contient des *fumerons* que l'on sépare et que l'on met de côté pour une nouvelle opération¹.

Le rendement d'une meule est en moyenne de 20 à 25 p. 100 en poids du bois employé, ou de 60 à 65 p. 100 en volume.

MEULES HORIZONTALES. — Dans le nord de l'Europe, surtout en Autriche et en Suède, les bois résineux sont carbonisés dans des meules disposées d'une manière différente :

La trace de la meule sur le sol a la forme d'un rectangle de 10 mètres sur 25 environ; l'aire est inclinée suivant le grand axe du rectangle. On place sur le sol, suivant cet axe et suivant les deux grands côtés, deux longues pièces de bois, sur lesquelles on place perpendiculairement les bûches ou plutôt les tiges coupées à la longueur du petit côté. On maintient ces tiges du côté le plus bas de la meule en enfonçant verticalement dans le sol deux pieux de 2 mètres de hauteur. On empile alors les troncs sur une hauteur de 1,80 m. à l'avant et de 3 mètres à l'arrière, et l'on recouvre le tout d'une couverture en terre, que l'on contient le long des parois verticales au moyen de cloisons en planches maintenues par des piquets ou des contreforts. Enfin on a réservé un canal d'allumage à environ 1,50 m. du sol et à 50 centimètres de la face antérieure de la meule. On met le feu à l'aide de ce canal rempli de brindilles enflammées, et l'on concentre d'abord la carbonisation à la base de la meule, puis on la conduit de proche en proche vers l'arrière, au moyen d'évents que l'on ouvre successivement, en ayant soin de fermer au fur et à mesure ceux qui donnent sur des parties déjà carbonisées. La cuisson complète dure de 2 à 5 semaines.

Le rendement des meules horizontales est sensiblement plus élevé que celui des meules verticales : de 25 à 28 p. 100 en poids, ou de 65 à 70 p. 100 en volume.

¹ O. PETIT, *Emplois chimiques du bois*, Paris 1888.



MEULES A RÉCUPÉRATION DE GOUDRONS. — Dans le procédé des meules tel que nous venons de le décrire, les produits volatils condensables résultant de la décomposition pyrogénée du bois sont perdus. On peut, moyennant une légère modification, recueillir facilement les produits les moins volatils, qui constituent ce que l'on appelle les goudrons, et d'où l'on pourra extraire ultérieurement de l'acide phénique et de la créosote. Il suffit à cet effet de construire la meule sur une cuvette concave en maçonnerie (fig. 63) en forme d'entonnoir, et dont le centre communique, par la conduite A avec un réservoir B où se rassemblera le goudron. Ce dispositif est usité dans le département des Landes, où l'on carbonise les vieux pins d'où l'on a extrait la résine. La meule est construite comme à l'ordinaire, et la combus-

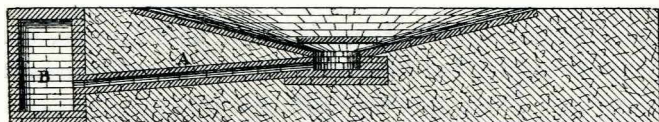


Fig. 63. — Aire en maçonnerie pour meule landaise.

tion réglée comme nous l'avons expliqué précédemment. Le conduit A est bouché au début par un tampon de bois. Les liquides produits par la distillation se réunissent alors dans la cuvette où ils subissent, sous l'action de la chaleur de la meule, une sorte de pyrogénéation qui volatilise les portions les plus légères (alcool méthylique, eau, acide acétique et acétone, benzine) de manière à produire un goudron riche en produits lourds. Au bout de quelques jours de cuisson, on retire le tampon de manière à faire couler les liquides dans le réservoir ; puis on rebouche le conduit, et on le débouche de nouveau à partir de ce moment toutes les six heures pour faire s'écouler les nouvelles portions produites.

Le rendement des meules landaises est d'environ 20 p. 100 de goudron en poids et de 25 à 30 p. 100 de charbon.

En Russie et en Pologne on emploie pour distiller les bois résineux un dispositif (fig. 64) du même genre. L'aire concave est surélevée et construite en argile battue. Au centre est ménagée une sorte de chambre souterraine, où l'on recueille dans des cuves en bois le goudron produit. Les meules sont beaucoup plus grandes que les meules des Landes : elles comprennent jusqu'à 2 000 stères de bois.

On y met le feu par des carneaux réservés à la base, et la combustion se propage de l'extérieur à l'intérieur, aussi le rendement



en charbon est-il beaucoup plus faible ; c'est surtout le goudron que l'on se propose de préparer dans ce cas.

Carbonisation en fours. — La carbonisation en meules fournit les meilleures qualités de charbon de bois. Mais elle présente l'inconvénient de ne pouvoir être exécutée que durant la belle saison. Aussi dans les pays du Nord, en Suède et dans l'Oural, emploie-t-on de

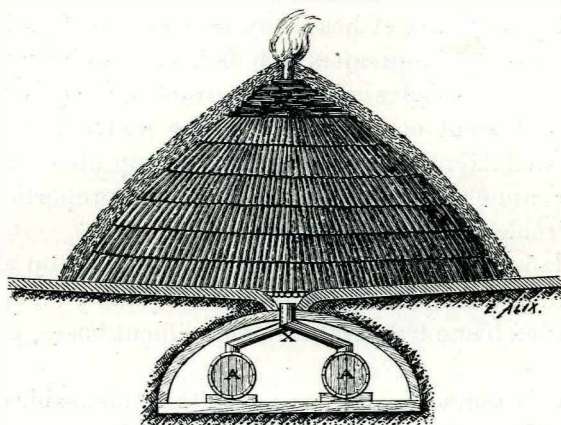


Fig. 64.

grandes chambres construites en briques, qui peuvent être considérées comme des meules à enceinte permanente. Ces chambres présentent la forme rectangulaire, et sont recouvertes par une toiture de bois. Elles sont munies sur chacun de leurs petits côtés d'une porte en tôle que l'on peut luter avec de l'argile. La mise à feu s'effectue au moyen d'un foyer extérieur pénétrant sous le plancher du four et placé au milieu d'un des grands côtés. La combustion se propage peu à peu à partir de ce point, les produits gazeux se dégageant par quatre conduits percés dans le sol aux quatre angles de la chambre et communiquant avec une petite cheminée verticale en planches. Le rendement de ces fours, en tenant compte du bois dépensé pour l'allumage dans le foyer extérieur, est de 15 à 20 p. 100 plus élevé que celui des meules.

Carbonisation en vase clos. — **PRODUITS VOLATILS DÉGAGÉS PENDANT LA DISTILLATION DU BOIS.** — Nous avons vu que le bois, chauffé progressivement à l'abri de l'air, éprouve dès 160° une modification qui



se traduit par le brunissement de la fibre et la transformation graduelle en charbon au fur et à mesure qu'on élève la température. En même temps il se dégage des produits volatils; tout d'abord, uniquement de la vapeur d'eau, puis, dès que la température s'élève, des gaz carbonés et des vapeurs condensables également carbonées. D'ailleurs la manière dont on conduit la distillation exerce la plus grande influence sur la nature et la proportion des produits dégagés : en élevant lentement et progressivement la température, on obtient relativement peu de gaz et beaucoup de produits liquides; au contraire si l'on porte brusquement le bois à la température du rouge, ces produits condensables réagissent avant de se dégager sur le charbon incandescent et en gazéifient une nouvelle proportion, et l'on obtient finalement un rendement beaucoup plus faible en charbon de bois comme en produits liquides, et une proportion beaucoup plus considérable de produits gazeux.

Comme, dans la distillation du bois en vase clos, on cherche surtout à obtenir du charbon et des produits liquides, on conduira toujours l'opération à une température relativement basse, pratiquement vers 400°.

Avec les bois non résineux, les produits condensables se divisent en deux couches non miscibles, la supérieure, aqueuse, brune, d'odeur empyreumatique et de réaction très acide, est appelée *vinaigre de bois*, et la couche inférieure, huileuse, noire, constitue le *goudron*.

Les gaz non condensés sont formés principalement d'acide carbonique et d'oxyde de carbone, avec un peu de méthane et d'hydrogène, et de très petites quantités d'azote et de carbures éthyléniques. La proportion des gaz combustibles est d'environ 40 p. 100.

Le vinaigre de bois contient, outre une forte proportion d'eau (80 p. 100 environ) :

De l'acide acétique, avec ses homologues, acide formique, acides propionique, butyrique, etc. ;

De l'alcool méthylique ;

De l'alcool allylique ;

De l'acétone et quelques autres cétones grasses ;

De l'aldéhyde acétique ; de l'acétal méthylique ; de l'acétate de méthyle ;

Du furfurane et de l'acide pyromucique ;

De la pyrocatéchine ;

De l'ammoniaque et les trois méthylamines ;



Plus une certaine quantité de produits goudronneux.

Le goudron renferme en solution la plupart des produits précédents, et de plus des carbures aromatiques (benzène, toluène, xylènes, cumène, rétène, chrysène), des phénols et leurs éthers méthyliques, dont le mélange des moins volatils constituera la créosote, et de la paraffine.

Quand on distille les bois résineux, au contraire, il passe une assez grande quantité de produits terpéniques plus légers que l'eau, qui maintiennent en solution les produits phénoliques et aromatiques, de sorte que dans ce cas la couche goudronneuse, mélangée d'essence de térébenthine, surnage à la surface et que le vinaigre de bois constitue la couche la plus dense. Enfin si la température s'abaisse beaucoup, la solubilité des phénols dans les terpènes peut devenir assez faible pour qu'il y ait séparation de trois couches : une couche supérieure terpénique, une couche moyenne aqueuse et une couche inférieure goudronneuse.

Le vinaigre de bois est distillé et les vapeurs sont conduites dans un lait de chaux bouillant, qui fixe les acides et donne du pyrolignite de chaux d'où l'on extraira l'acide acétique; les vapeurs qui ne se sont pas combinées à la chaux seront ultérieurement rectifiées dans un appareil à plateaux et fourniront l'esprit de bois ou alcool méthylique brut. Il reste dans la cornue du goudron. 100 parties de vinaigre de bois donnent environ 5 à 10 p. 100 d'acide pyroligineux, 2 à 3 p. 100 d'esprit de bois, 8 à 10 p. 100 de goudron.

Le goudron brut contient en moyenne :

20 p. 100 vinaigre et esprit de bois,

5 p. 100 huile légère,

10 p. 100 huile lourde

que l'on sépare par distillation. Il reste dans la cornue 60 p. 100 de résidu ou *brai*.

Nous allons maintenant passer rapidement en revue les différents dispositifs imaginés pour effectuer la distillation en vases clos et recueillir les sous-produits; nous remarquerons d'ailleurs que les meules landaises et russes à récupération de goudrons constituent déjà une solution approchée de la question; mais les produits les plus volatils, acide acétique et alcool méthylique, ne sont pas conservés.

FOURS SCHWARTZ. — Le principe de ces appareils consiste à sou-



mettre le bois à l'action d'une flamme réductrice qui le décompose sans le brûler.

Le four Schwartz a la forme d'une chambre rectangulaire voûtée dont les parois sont constituées par de la marne argilo-siliceuse : la chaux doit être proscrite, car elle serait rapidement dissoute par l'acide acétique formé pendant la distillation. Le sol du four va en s'abaissant vers les grands côtés, au milieu desquels viennent s'ouvrir deux tuyaux en fonte T, par lesquels les goudrons s'écouleront jusque dans les cuves *f*. Quant aux produits plus volatils, ils sont conduits par les tuyaux *g* jusqu'à des appareils réfrigérants *h*,

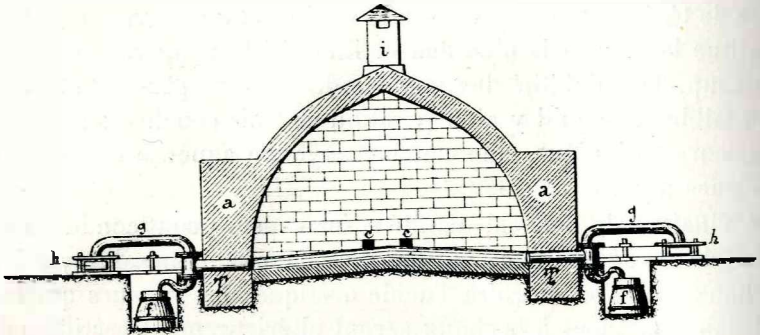


Fig. 65. — Four Schwartz.

où ils se condensent et sont ramenés dans les cuves *f*, tandis que les gaz non condensés s'échappent par une cheminée d'appel.

Les gaz chauds réducteurs qui provoqueront la carbonisation sont produits par la combustion du bois dans deux fourneaux extérieurs, et ils pénètrent dans le four par les orifices *c*.

Au début de l'opération, on garnit complètement le four de bûches que l'on introduit par des portes percées sur un des côtés du four. On ferme ensuite complètement ces portes et l'on allume les deux foyers qui provoquent la distillation. On s'aperçoit que celle-ci est terminée au changement de teinte des fumées sortant par la cheminée, qui passent du brun au bleu clair ; ce résultat est généralement atteint au bout de deux jours. On ferme alors toutes les ouvertures et on laisse refroidir le four, ce qui demande environ trois semaines.

Il faut, pour distiller 100 mètres cubes de bois de sapin, en brûler 10 dans les foyers, et l'on obtient un rendement de charbon de 25 p. 100 et de 14 p. 100 de goudron et acide pyroligneux, calculé à partir du poids total de bois dépensé.



CARBONISATION EN CYLINDRES : APPAREIL KESTNER. — Dans cet appareil (fig. 66), le bois est introduit dans un cylindre en fonte C, fermé hermétiquement par un couvercle et chauffé par un foyer extérieur. Les gaz produits s'échappent par le tube T et traversent une série de tuyaux en cuivre munis de manchons réfrigérants M dans lesquels circule en sens inverse un courant d'eau froide. Les produits condensés se déversent en D dans des bacs, tandis que les gaz non condensés aboutissent par le tube Q jusque dans le foyer où ils brûlent

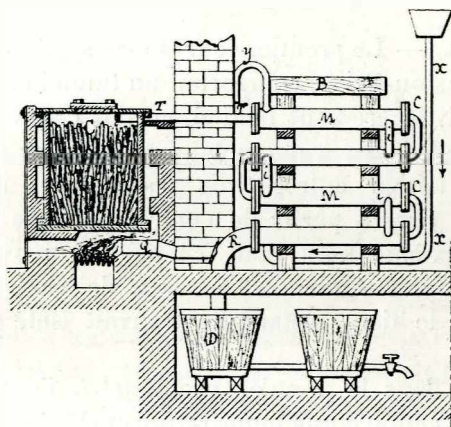


Fig. 66. — Appareil Kestner.

en entretenant la distillation qu'il suffit seulement de mettre en train au début au moyen de quelques fagots.

Quand la distillation est terminée, on laisse refroidir et l'on ouvre, à la partie inférieure du cylindre, un tampon de défournement de manière à faire tomber le charbon dans des étouffoirs. Le rendement de l'appareil Kestner est évalué pour les bois durs à 40-45 p. 100 d'acide pyroligneux et de goudron, et à 22-25 p. 100 de charbon.

APPAREIL A CYLINDRES MOBILES. — On a perfectionné le cylindre Kestner en le rendant mobile de manière à pouvoir être enlevé quand la distillation est terminée et remplacé séance tenante par un nouveau cylindre chargé. A cet effet les cylindres sont placés par couples dans les fours, qui sont munis d'un système de carneaux et de registres permettant de faire circuler les gaz chauds autour des deux cylindres ou d'isoler l'un d'eux à volonté. Quand le contenu d'un cylindre est distillé, on ferme les registres qui amenaient les gaz de



chauffage, on l'enlève au moyen d'une grue, et on le remplace par un cylindre rempli de bois neuf; on rouvre alors les registres de manière à chauffer le nouveau cylindre, et dès que les vapeurs se dégagent abondamment par son orifice, on fait communiquer celui-ci avec une tuyauterie amenant les gaz à l'appareil réfrigérant. On change donc alternativement l'un ou l'autre cylindre de manière à en carboniser six par vingt-quatre heures. L'opération est ainsi rendue continue.

FOURS A TUNNEL. — Le premier four de ce système, construit par MM. Astley et Paston-Price, comportait un tunnel en briques réfractaires dont le sol, légèrement incliné, portait une voie sur laquelle pouvaient descendre des wagonnets. La longueur du tunnel était suffisante pour laisser entrer trois wagonnets; il pouvait être séparé aux deux tiers à partir de l'entrée par une cloison mobile en tôle; le deuxième tiers était chauffé au moyen d'un foyer latéral, qui envoyait également un peu de chaleur au premier tiers, tandis que le tiers restant se trouvait isolé par la cloison mobile.

Le bois placé dans le premier wagonnet à l'entrée du four se trouve soumis à l'action d'une température modérée (environ 140°) qui le dessèche et commence la distillation; le deuxième wagonnet placé dans la partie la plus chaude est carbonisé, et les produits volatils se dégagent par des tuyaux s'ouvrant sur le plafond du tunnel. Quand la carbonisation est terminée, on soulève la cloison mobile et l'on avance d'un wagon la file des wagonnets, de telle sorte que le wagon carbonisé vient prendre place dans le compartiment froid où il se refroidit à l'abri de l'air, tandis que le wagon précédent subit la distillation au milieu du tunnel, et qu'un autre wagon à l'entrée du four commence à se déshydrater. On réalise ainsi une marche continue et dans les meilleures conditions pour assurer le chargement du bois frais ou le déchargement du charbon.

L'inconvénient de ces fours était l'altération rapide des wagonnets sous l'action de la chaleur. On y a remédié en construisant en matières réfractaires la plate-forme qui porte le bois, les roues seules et le châssis restant métalliques; afin de protéger ces parties métalliques contre l'action de la chaleur, on place au-dessous de la plate-forme réfractaire une lame de tôle glissant dans une rainure remplie de sable, de manière à isoler complètement les châssis, que l'on peut alors refroidir par un courant d'air. Ce système est employé



depuis quelques années au Canada et paraît devoir donner de bons résultats¹.

Avantages comparés des différents modes de distillation du bois.

— Au point de vue du rendement, le procédé des meules apparaît comme primitif et barbare; il laisse perdre dans l'atmosphère ou dans le sol la totalité ou la plus grande partie des produits volatils, dont beaucoup ont une valeur industrielle assez considérable; il ne permet pas davantage de récupérer l'énergie calorifique emportée par les vapeurs combustibles; enfin même au seul point de vue du charbon obtenu, c'est lui qui procure encore le rendement le plus faible. Mais en revanche c'est le meilleur procédé au point de vue de la qualité du charbon. Il a de plus l'avantage de pouvoir être appliqué sur le lieu même de l'abatage, et par conséquent d'éviter le transport du bois, dont le poids est environ quatre fois plus considérable que celui du charbon produit. Aussi est-il encore le plus employé.

La carbonisation en fours économise du temps et de la main-d'œuvre, et assure un meilleur rendement en charbon; par contre la qualité de celui-ci est inférieure, et il faut de plus compter le transport du bois et l'amortissement du four. L'économie devient plus grande quand on installe la récupération des produits volatils; mais la qualité du charbon est de moins en moins bonne. Il est vrai que dans ce cas le charbon n'est plus en quelque sorte qu'un sous-produit, les goudrons, l'acide pyroligneux et les produits alcooliques constituant le principal intérêt de l'opération.

Agglomération du charbon de bois. — *Charbon de Paris.* — C'est en 1850 que Popelin-Ducarre imagina de fabriquer avec des déchets de charbon de bois, de la tannée et de la braise de boulanger, mélangés à du goudron, des cylindres agglomérés pouvant remplacer le charbon de bois. Les matières solides, humectées de 10 p. 100 d'eau, sont broyées entre des cylindres, puis additionnées d'une proportion assez considérable de goudron de houille (35 à 40 p. 100), de manière à constituer une pâte qui est triturée par des meules coniques dans une auge circulaire. Cette pâte est ensuite moulée en cylindres au moyen de pistons compresseurs, puis les agglomérés obtenus, après une exposition de quarante-huit heures à l'air, sont

¹ H. Le Chatelier, *Leçons sur le carbone*, Paris, 1908.



calcinés en vases clos dans des caisses de tôle rangées dans un four spécial, chauffé par la combustion des produits de la décomposition du goudron. Celui-ci laisse comme résidu un coke très dur qui donne beaucoup de consistance aux agglomérés. Le charbon obtenu brûle sans flamme ni fumée. Il n'est guère intéressant que pour les usages domestiques.

§ 2. — LA CARBONISATION DE LA TOURBE

La tourbe, calcinée en vase clos, laisse un résidu de charbon représentant à peu près le $\frac{1}{3}$ de son poids, pendant qu'il se dégage en abondance des gaz et des matières volatiles, ces dernières formées principalement, comme pour le bois, par de l'acide acétique.

De même que le bois, la tourbe peut être carbonisée en meules, en fours ou en cornues.

La carbonisation en meules est facilitée par la forme régulière des fragments que l'on empile les uns à côté des autres sans laisser sensiblement de vides, en ménageant seulement sur les quatre côtés du tas des événements dirigés vers le centre où se trouve la cheminée. Le tout est recouvert de terre et d'herbe.

En Angleterre on emploie des fosses circulaires en maçonnerie de 3 mètres de profondeur.

Les fours servant à carboniser la tourbe sont de plusieurs modèles : dans les uns la chaleur est produite par la combustion d'une partie de la tourbe, ils représentent en quelque sorte des meules dont le revêtement extérieur serait en maçonnerie. En Irlande, dans la tourbière de Coy d'Allen, on emploie des fours en tôle, mobiles sur des rails, et dont le fond est formé par une plaque de tôle perforée. On remplit le four de tourbe et on le conduit dans une grande salle, au-dessous d'une cheminée d'appel, et au-dessus d'une fosse que l'on peut remplir d'eau. La tourbe est allumée et la combustion se propage grâce au tirage de la cheminée ; quand la carbonisation est achevée, ce que l'on reconnaît à la teinte claire des fumées, on remplit la fosse d'eau jusqu'à obturer les trous de la grille inférieure, et l'on arrête ainsi l'excès de l'air de manière à produire l'extinction du charbon. Chaque salle contient vingt fours analogues, et la chaleur dégagée par ces fours est employée à la dessiccation de la tourbe qui sera carbonisée à son tour ultérieurement.

Dans d'autres fours, tels que les fours Schenk, on emploie comme



source de chaleur les gaz de gazogènes. Dans les fours de Barff et Thursfield, on se sert de vapeur d'eau surchauffée.

On peut également utiliser la carbonisation en cornues, mais celle-ci est assez peu employée, et n'est économique qu'avec une bonne récupération des produits volatils, qui renferment des goudrons et une forte proportion d'acide pyroligneux.

Un fait intéressant est la faible proportion d'ammoniaque que l'on recueille à la distillation, malgré la teneur relativement très élevée de la tourbe en azote. On ne retrouve guère dans les eaux ammoniacales que la dixième partie de cet azote. Dans des expériences de laboratoire, MM. Müntz et Lainé ont obtenu au maximum 3,92 gr. d'azote dans les eaux ammoniacales pour 1 kilogramme de tourbe compacte de la Somme contenant 20,30 gr. d'azote. La plus grande partie de l'azote reste dans le coke, qui en retient 1,28 p. 100 à un état indéterminé.

Si l'on produit la distillation dans un courant de vapeur d'eau surchauffée, de manière à oxyder et à gazéifier totalement le charbon du coke, on retrouve sous forme d'ammoniaque, dans les eaux de lavage du gaz produit, la presque totalité de l'azote, soit 1,790 p. 100 de tourbe. Ce traitement a été proposé par MM. Müntz et Lainé¹ pour se procurer à partir de la tourbe de l'ammoniaque que l'on pourra ensuite transformer très facilement en nitrate en se servant de la tourbe même comme supports d'oxydation.

D'après des essais de carbonisation effectués par Eckenberg, la composition du charbon préparé avec des briquettes moulées après cuisson préalable (voir p. 295) serait la suivante :

	N° 1	N° 2	N° 3
Cendres.	4,10	5,6	7,8
Phosphore.	0,01	0,017	0,03
Soufre	0,30	0,16	0,34
Carbone.	88,1	84,4	»
Hydrogène	1,9	2,6	»
Oxygène et azote (par différence) . .	6,7	7,4	»

Le pouvoir calorifique serait d'environ 7600 calories.

¹ C. R., 142, 1239; 1906.



§ 3. — LE COKE

Le coke est le résidu de la distillation de la houille ; mais cette définition est insuffisante, car on ne donne le nom de coke qu'à un produit aggloméré, et nous avons vu que les houilles très riches en matières volatiles ou au contraire très pauvres donnent un résidu carbonisé pulvérulent ; pour qu'il se forme du coke à la distillation il est nécessaire que la houille se ramollisse sous l'action de la chaleur, de façon que les fragments ou les poussières se soudent en une masse pâteuse, qui se boursoufflera ultérieurement en laissant s'échapper des gaz. En définitive seules donneront du coke les houilles des catégories intermédiaires de la classification de Gruner.

Les meilleurs charbons à coke sont ceux qui renferment de 18 à 25 p. 100 de matières volatiles. Cependant certaines houilles s'écartant notablement de cette composition fournissent un bon coke ; mais le plus souvent on mélange différentes espèces de charbons de manière à obtenir un mélange moyen à 20 p. 100 de matières volatiles.

Le rendement en coke varie naturellement avec la qualité des houilles employées ; il est d'environ 80 p. 100 avec les bons charbons à coke ; avec les houilles grasses proprement dites il est de 65 à 70 p. 100 ; avec les houilles grasses à longue flamme, de 60 à 65 p. 100. Avec les houilles anglaises du Lancashire, il peut descendre à 52 p. 100.

Mais le rendement varie aussi notablement avec les conditions de la distillation, et en particulier avec la vitesse de chauffe ; on retrouve ici le phénomène dont nous avons déjà parlé à propos de la distillation du bois : l'acide carbonique et la vapeur d'eau peuvent réagir sur le carbone et en volatiliser une certaine quantité sous forme d'oxyde de carbone ; en revanche les goudrons, c'est-à-dire les matières hydrocarbonées volatiles, peuvent être décomposées par le coke incandescent et produire un nouveau dépôt de charbon ; les gaz carbonés peuvent se comporter de même.

D'une manière générale, un chauffage lent et progressif jusqu'à une température élevée augmentera le rendement en goudrons et diminuera le rendement en coke. Celui-ci sera amélioré au contraire par une chauffe rapide à haute température. La chaleur de distillation de la houille est du reste presque nulle, ainsi qu'il résulte des expériences de M. Euchène.



D'ailleurs il n'est pas toujours possible d'appliquer brusquement aux houilles une haute température : les houilles grasses, dans ces conditions, se boursoufflent beaucoup et donnent un coke trop poreux. Il faudra avec elles élever progressivement la température. Au contraire le chauffage brusque sera à recommander avec les houilles demi-grasses, dont il permet l'agglomération, même quand la proportion de matières volatiles ne dépasse pas 18 p. 100. Dans les mêmes conditions un chauffage lent donnerait un coke pulvérulent.

Enfin les qualités du coke dépendent également de la manière dont s'est effectuée la distillation : le coke sera d'autant plus dense et plus dur qu'il aura été porté à une température plus élevée.

La distillation de la houille peut être conduite avec deux objectifs différents : soit la préparation même du coke, pour les besoins de l'industrie (et alors les produits volatils ne sont que des sous-produits qu'on laisse perdre encore souvent), soit la fabrication du gaz d'éclairage ; nous ne nous occuperons dans ce chapitre que de la préparation du coke métallurgique.

Caractères physiques. — *Couleur.* — Le coke de bonne qualité présente généralement une couleur d'un gris clair, ou même d'un blanc d'argent, parfois irisée quand la houille est pyriteuse. Les charbons anthraciteux donnent toujours des cokes rayés de noir. Une couleur gris foncé ou noire est généralement regardée comme un signe de qualité inférieure, cependant il faut remarquer que la couleur dépend en partie du procédé de carbonisation employé, que les fours à récupération ne donnent jamais de cokes de couleur très claire, et que l'eau d'extinction, si elle n'est pas très pure, en altère toujours beaucoup l'éclat.

Sonorité. — Le coke doit être également très sonore, cette propriété est assez caractéristique, et un son lourd et mat est toujours un mauvais indice.

Densité. — La densité du coke varie de 1,20 à 1,90. Le coke destiné à la fusion de la fonte au cubilot doit avoir une densité au moins égale à 1,80. Un coke trop léger donne des pertes importantes par entraînement du laitier. Les cokes riches en cendres sont les plus denses. La densité apparente est beaucoup plus faible. Le poids du mètre cube est en moyenne de 400 à 420 kilogrammes.

Porosité. — Le coke est en effet très poreux, bien que sa porosité varie beaucoup avec le mode de préparation. Cette qualité peut avoir beaucoup d'influence sur les réactions que le coke sera appelé à effec-



tuer, en particulier sur la réduction de l'anhydride carbonique dans les hauts fourneaux. Les cokes les plus poreux réagissent beaucoup plus facilement et donnent par suite un gaz plus riche en oxyde de carbone. En revanche, le coke de fonderie doit être aussi peu poreux que possible, afin de donner surtout un gaz riche en acide carbonique ; il faut, il est vrai, dans ce cas, une pression d'air soufflé un peu plus considérable, mais cette dépense d'énergie supplémentaire est largement compensée par la diminution d'oxyde de carbone.

La porosité du coke (rapport du volume des espaces vides au volume total) varie de 25 à 55 p. 100; elle ne doit pas dépasser 40 p. 100 pour le coke de fonderie. Elle sera d'autant plus faible que le charbon employé sera plus fin, plus sec et moins riche en matières volatiles. La compression du charbon dans les fours à coke diminue également la porosité.

Dureté. — Le coke doit en même temps être dur, afin de ne pas donner trop de déchets pendant le transport. Ce sont les houilles demi-grasses qui donnent les cokes les plus durs, capables de résister sans s'écraser à une pression de 175 kilogrammes par centimètre carré. Les cokes sont en général d'autant plus durs qu'ils contiennent moins de cendres.

Propriétés chimiques. — Le coke est plus riche en carbone que la houille qui a servi à le préparer. Il ne faudrait pas croire cependant qu'il ne contient pas de matières volatiles : la proportion de celles-ci oscille entre 1 et 4 p. 100, l'oxygène et l'azote y étant contenus en général en plus forte proportion que l'hydrogène.

La proportion de cendres est très variable, elle ne doit pas dépasser 40 p. 100 dans les cokes de bonne qualité.

La teneur en soufre du coke est généralement plus faible que celle de la houille qui lui a donné naissance, une proportion notable de ce métalloïde s'échappant dans les produits volatils; elle ne doit pas dépasser 1 p. 100 pour la fabrication de la fonte. Quant au phosphore, il reste au contraire en entier dans le coke.

Les cokes sont toujours légèrement hygroscopiques, et ils absorbent un peu d'humidité à l'air. Une fois mouillés, ils retiennent une proportion d'eau beaucoup plus grande, pouvant aller jusqu'à 40 et 45 p. 100. Aussi faut-il prendre garde de ne pas employer trop d'eau pour l'extinction du coke.

Le pouvoir calorifique, abstraction faite de l'eau et des cendres,



dépasse 8000 calories. Mais la présence des cendres le diminue beaucoup. Il en est de même pour l'humidité.

PRÉPARATION DU COKE

Préparation préliminaire du charbon. — Nous avons déjà mentionné que les meilleurs charbons pour la cokéfaction étaient ceux qui renfermaient de 18 à 20 p. 100 de matières volatiles, et nous avons indiqué qu'on effectuait souvent des mélanges de différentes qualités de manière à réaliser une composition moyenne voisine de celle-là. Les cendres ont aussi une grande influence : elles ne doivent pas exister en trop grandes quantités, car elles se retrouveront presque intégralement dans le coke ; de plus elles peuvent entraver le ramollissement et la fusion de la matière, surtout si elles sont riches en silice ou en fer.

On lave quelquefois les houilles trop cendreuses pour les épurer avant de les transformer en coke. Mais cette pratique n'est pas toujours à recommander, car elle peut altérer les charbons : c'est ainsi que les houilles belges ne peuvent pas être lavées sans perdre complètement leur pouvoir agglomérant, et par suite leur propriété de se transformer en coke. Dans des cas semblables il y aurait intérêt à remplacer le lavage par une épuration magnétique¹.

On broie aussi en général le charbon avant de le distiller, afin de rapprocher les grains de charbon et d'augmenter le densité du produit ; il ne faut pas cependant le pulvériser trop finement, les poussières fines donneraient un coke inutilisable. On choisit d'habitude un grain de 4 millimètres.

Distillation. — De même que la distillation du bois, celle de la houille peut s'effectuer à l'air libre ou en vases clos.

Le *procédé des meules* semblables aux meules de charbon de bois, autrefois très employé, est aujourd'hui abandonné. On formait autour d'une cheminée en briques réfractaires, une meule ronde que l'on recouvrait de coke pulvérisé. On produisait l'allumage par le haut de la cheminée, et la combustion se propageait régulièrement de haut en bas. Quand elle était terminée, on laissait un peu refroidir, puis l'on ouvrait la meule et l'on arrosait le coke incandescent. Le rendement variait de 40 à 60 p. 100 suivant la qualité de la houille.

¹ *Rev. Univ.*, (4), 19, 270 ; 1907.



Au lieu de meules rondes on employait également des *tas* rectangulaires à bords inclinés. Ce mode opératoire est encore parfois appliqué de nos jours à la carbonisation des menus.

Un premier perfectionnement aux meules fut la construction des fours rectangulaires ou *stalles* en briques réfractaires ouverts à la partie supérieure, et dont les parois latérales avaient la forme de murailles verticales percées d'une série de carneaux servant à la mise au feu et au tirage. Les *fours Schaumburg*, qui sont des stalles à deux rangées de carneaux, ont été employés en Russie jusqu'à ces dernières années.

Carbonisation dans les fours.

La carbonisation dans les fours peut s'effectuer de deux manières différentes, suivant que la chaleur nécessaire pour la distillation est produite dans le four même, par de l'air extérieur qui vient brûler une partie de la houille et les gaz dégagés, ou bien en dehors du four, par la combustion des gaz qui échauffent les parois et produisent la carbonisation de la houille contenue à l'intérieur.

a) CARBONISATION AVEC ADMISSION D'AIR

Fours de boulangers. — Ce procédé fut d'abord mis en œuvre à l'aide de fours identiques comme construction aux fours de boulangers : c'étaient des fours ovales, ayant 3 mètres environ de diamètre moyen et 1 mètre de hauteur moyenne; le charbon était introduit par la porte latérale dans le four déjà chaud. Sous l'influence de la température élevée rayonnée par la voûte, la distillation commençait immédiatement à la partie supérieure, et les gaz dégagés, s'enflammant au contact de l'air qui pénétrait par la porte, maintenaient la température. La carbonisation se propageait ainsi horizontalement de haut en bas, la masse s'affaissait et se fissurait verticalement, et finalement le coke se divisait en prismes verticaux.

Ces fours présentaient deux graves défauts : ils étaient d'un chargement — et d'ailleurs d'un déchargement — difficiles, et l'air pénétrant irrégulièrement par la porte brûlait non seulement les gaz, mais une partie du charbon, et occasionnait des déchets assez importants.

On a construit alors des fours munis d'une ouverture sur la voûte, permettant le chargement facile, et portant une série d'ouvreaux ménagés dans les parois du four vers la partie supérieure, de manière à régulariser l'entrée de l'air au-dessus du charbon et à ne brûler



que les gaz de la distillation. La porte du four est alors maintenue fermée pendant l'opération et n'est ouverte que pour le défournement.

La figure 67 représente, d'après Babu, un four construit suivant ces données et employé à Aubin (Aveyron).

Le défournement dans ces fours étant assez pénible, on a construit des fours rectangulaires et légèrement évasés vers la porte, de manière que l'on peut sortir tout à la fois la masse entière du coke au moyen d'un râteau en fer. Tel est le *four Gibson* ou *four de Boulogne-sur-Mer*, qui se charge avec 4 tonnes et demie de charbon. La durée de la carbonisation est de vingt-quatre heures.

Les fours de boulanger ont l'avantage d'être d'une construction peu coûteuse; ils donnent un coke d'excellente qualité; mais ils ne peuvent utiliser que des houilles grasses et s'agglomérant facilement; de plus ils déterminent toujours une certaine perte due à la combustion; enfin ils ne permettent évidemment pas la récupération des sous-produits. Aussi sont-ils à peu près abandonnés en Europe, bien qu'on les ait employés aux États-Unis jusqu'à ces dernières années.

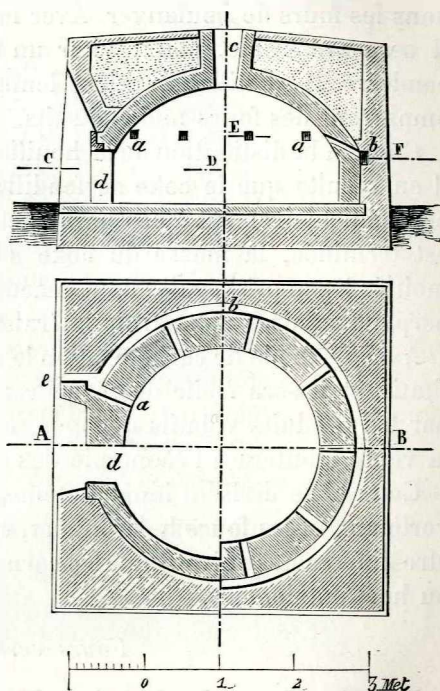


Fig. 67. — Four de boulanger pour la production du coke.

b) CARBONISATION SANS ADMISSION D'AIR

Tous les fours à coke modernes appartiennent à cette catégorie. Ce sont de vastes chambres en maçonnerie ne comportant d'autre ouverture que celles nécessaires pour l'évacuation des produits volatils; les parois latérales sont munies de carneaux, ménagés dans leur épaisseur, et dans lesquels on produit la combustion des gaz



de la distillation. En somme le four est assimilable à une cornue à gaz. La carbonisation se produit à partir des parois verticales en avançant vers le centre. Elle sera donc d'autant plus rapide que le four sera plus étroit. On pourra de la sorte traiter des houilles relativement maigres, qui, étant portées brusquement à une température élevée, pourront encore s'agglomérer, ce qu'elles n'auraient pas fait dans les fours de boulanger. Avec les houilles grasses, au contraire, il sera préférable, pour éviter un trop grand boursoufflement, de conduire la distillation plus lentement, ce qu'on obtiendra en employant des fours moins étroits.

Comme la distillation de la houille produit un retrait considérable, il en résulte que le coke se fendille à partir des surfaces latérales perpendiculairement à ces parois, et que par suite quand l'opération est terminée, la masse du coke sortie du four se divise en deux moitiés à peu près égales dont chacune se fragmente en petits prismes perpendiculaires aux parois latérales du four.

Avec ce mode de carbonisation le rendement sera à peu près quantitatif, et il sera facile de récupérer à la fois les chaleurs entraînées par les produits volatils dégagés, et ces produits eux-mêmes, dont la vente ajoutera à l'économie des fours.

Ceux-ci se divisent immédiatement en deux catégories : les fours verticaux et les fours horizontaux, ces derniers pouvant eux-mêmes être différenciés suivant que les carneaux sont disposés verticalement ou horizontalement.

Fours verticaux.

Four Appolt. — Le four Appolt se compose d'un certain nombre de cuves verticales construites dans la même maçonnerie, et dont la hauteur moyenne est de 5 mètres. Leur section rectangulaire va en s'évasant légèrement vers le bas, ce qui facilitera le défournement. Elles sont fermées dans le bas au moyen de portes en fonte à charnières, que l'on recouvre d'une certaine épaisseur d'escarbilles, et qui les séparent d'une galerie servant à amener les wagonnets de déchargement.

Le charbon est chargé par le haut au moyen d'une ouverture qu'on lute pendant la distillation. Les gaz sortent par des fentes au bas de chaque cuve, à 60 centimètres du fond, et viennent se mélanger à l'air et brûler dans les carneaux ménagés dans les parois.

Ces fours réalisent, avec un minimum d'encombrement, une très grande surface de chauffage relativement à leur volume ; ils donnent



donc une distillation très rapide et produisent un très beau coke; ils conviennent très bien pour les charbons maigres. Leur défaut réside dans le prix élevé de leur établissement, et dans l'obligation où l'on

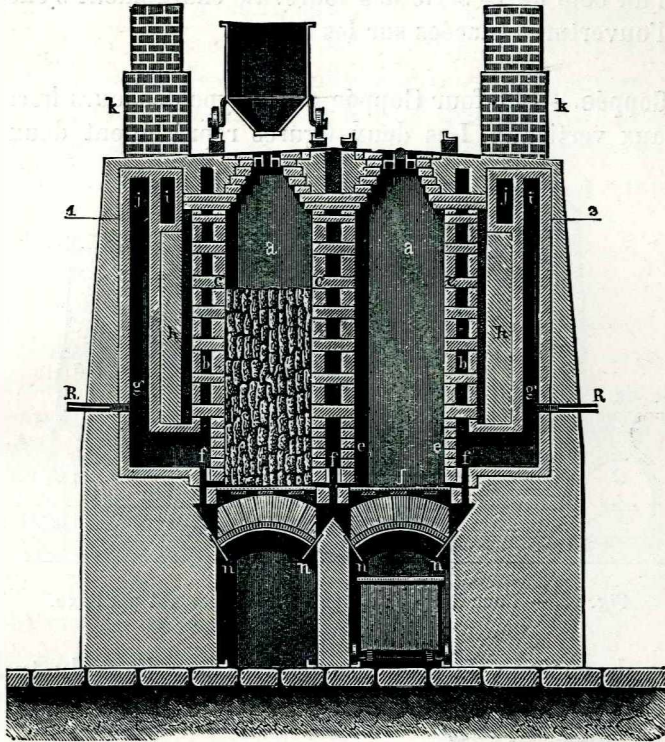


Fig. 68. — Four Appolt, coupe verticale.

se trouve d'arrêter toute la batterie du four quand une réparation est nécessaire.

Fours horizontaux. — Les fours horizontaux sont les plus employés à l'heure actuelle, car leur construction et leur entretien sont moins onéreux. Par contre, ils occupent plus de place que les fours verticaux, et leur manœuvre est moins facile. On en a créé un très grand nombre de modèles dont nous n'étudierons que les principaux. Tous ont la forme de longs tunnels à section rectangulaire, et sont réunis côte à côte en nombre assez considérable, les carneaux servant au chauffage étant ménagés dans l'épaisseur des cloisons mitoyennes, et souvent aussi sous la sole et sur une partie des voûtes. Les deux



extrémités de chaque four sont fermées par des portes en fer garnies de briques réfractaires, le défournement se faisant en refoulant le bloc entier de coke, au moyen d'un bouclier, sur une aire inclinée, placée d'un côté de la série des fours. Le chargement s'effectue au moyen d'ouvertures placées sur les fours.

Four Coppée. — Le four Coppée est le type des fours horizontaux à carneaux verticaux. Les deux figures représentent deux coupes

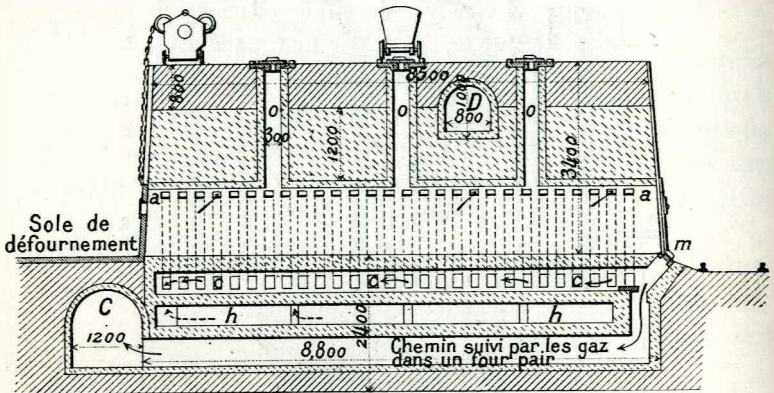


Fig. 69. — Four Coppée : coupe verticale passant par l'axe.

verticales de ce four, la première passant par l'axe du tunnel, la seconde montrant les carneaux placés dans la cloison mitoyenne de

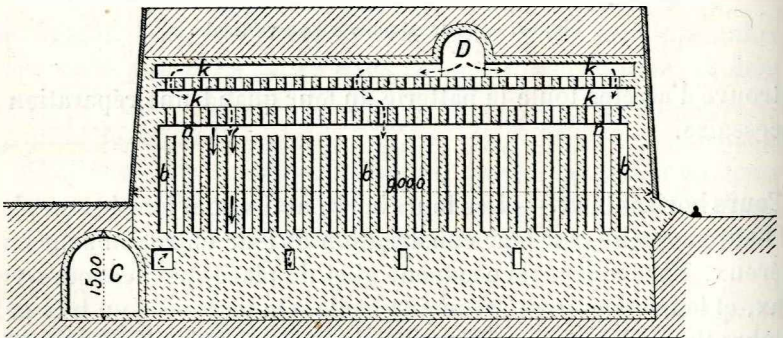


Fig. 70. — Four Coppée : coupe verticale montrant les carneaux

deux fours consécutifs. Le four se charge au moyen de trois ouvertures O. Les gaz combustibles s'échappent par vingt-huit ouver-



tures *a*, percées à la naissance des voûtes, et arrivent dans le carneau horizontal *n* où ils se mélangent avec l'air comburant venant du carneau de distribution D à travers les carneaux horizontaux *k*. Le mélange enflammé circule de haut en bas dans les carneaux verticaux *b*, puis passe sous la sole du four par les ouvertures *c*, puis circule en sens inverse sous la sole du four voisin, et finalement les gaz s'échappent par le canal collecteur C qui les conduit aux chaudières et à la cheminée. Quant à l'air destiné à la combustion, il circule d'abord au-dessous des fours dans les carneaux *h*, où il s'échauffe, puis monte à la partie supérieure de la voûte dans le carneau transversal D qui le distribue aux carneaux *k*.

Chaque four a 9 mètres de longueur, 40 centimètres de largeur et 1,25 m. de hauteur. En réalité la largeur croît légèrement d'une extrémité à l'autre vers l'aire de défournement, de manière à faciliter le refoulement du prisme de coke, dont on diminue ainsi le frottement contre les parois du four. Les fours sont groupés par série de 20 côte à côte. On fait aussi des fours de 10 mètres de long. Les ouvertures *a* sont alors au nombre de 31.

Four Smet. — Le four Smet, le premier en date des modèles de fours à carneaux horizontaux, est représenté ci-contre : les gaz s'échappent vers le milieu du four par une ouverture *a* placée au sommet de la voûte ; puis ils pénètrent dans le carneau horizontal *b* ménagé dans la cloison mitoyenne, où ils circulent jusqu'en avant du four, pour se mélanger à l'air nécessaire à leur combustion et descendre dans le carneau inférieur *c* qui les ramène en arrière ; ils pénètrent alors sous la sole, où ils circulent de façon analogue, d'arrière en avant par le carneau *d* pour revenir par le carneau *e* et s'échapper dans une cheminée. En réalité, le four est symétrique par rapport à un plan perpendiculaire au milieu de sa longueur, de sorte qu'il y a deux ouvertures *a* de chaque côté de ce plan et deux séries de carneaux *b c d e*.

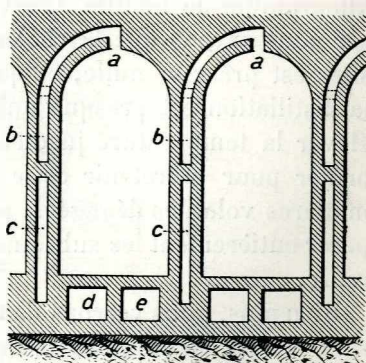


Fig. 71. — Four Smet, coupe transversale.

Ce four, sous sa forme primitive, n'est plus employé aujourd'hui ;



mais il a été le prototype de nombreux modèles, très en faveur actuellement et dont la plupart d'ailleurs sont construits pour réaliser la récupération des sous-produits.

Les fours installés à Cette par les usines du Creusot, sans récupération, ressemblent beaucoup au type primitif; mais les carneaux horizontaux tels que *b* et *c* sont au nombre de quatre superposés, séparés par trois cloisons en chicane, et l'air nécessaire à la combustion arrive par quatre trous percés près des portes, et dont chacun communique avec un des quatre carneaux. Cette disposition permet de régler la température dans chaque carneau, et de la rendre uniforme du haut en bas du four, ce qui est un perfectionnement très sérieux.

Fours à récupération.

Les fours à coke sans admission d'air que nous venons d'étudier réalisent en somme de véritables cornues à gaz d'éclairage. Les produits de la distillation sont, il est vrai, utilisés pour entretenir la température des fours, mais c'est là un véritable gaspillage. En effet la chaleur totale que peut donner la combustion des matières volatiles pour une houille à 80 p. 100 dépasse 2000 calories par kilogramme de houille. C'est beaucoup plus qu'il n'est nécessaire, car nous savons que la chaleur de décomposition des charbons fossiles est presque nulle, et que par suite la chaleur à fournir pour la distillation est presque uniquement celle qui est nécessaire pour élever la température jusqu'au point convenable. On peut donc ne brûler pour entretenir cette température qu'une faible partie des matières volatiles dégagées, par exemple la partie gazeuse, et récupérer entièrement les substances condensables à la température ordinaire.

Bien plus, nous verrons dans la suite que les gaz non condensables sont encore en proportion trop considérable, et que dans des fours bien construits on n'en utilise pour le chauffage qu'une faible partie, le reste demeurant libre et pouvant être employé pour l'éclairage ou pour la force motrice.

D'ailleurs ce terme de récupération prête un peu à ambiguïté car on peut concevoir deux récupérations possibles : la récupération des sous-produits, dont nous venons de parler, et la récupération des chaleurs emportées par les produits volatils ou par les gaz brûlés, suivant les principes développés dans la première partie de ce volume. Quand on parle des fours à coke à récupération, on a



spécialement en vue la première définition, mais beaucoup de fours à récupération de sous-produits sont également construits pour récupérer les chaleurs perdues, c'est-à-dire qu'ils réalisent au moins théoriquement la plus grande économie possible. En pratique, il est plus simple et aussi avantageux comme on l'a vu dans la première partie d'utiliser la chaleur des gaz au chauffage des chaudières.

Les fours à récupération de sous-produits s'inspirent en général des différents modèles de fours sans récupération que nous venons d'étudier. La différence essentielle consiste dans l'orifice de départ des gaz de la distillation, qui, au lieu de communiquer directement avec les carnaux de chauffage, se prolonge par un tuyau de fonte, muni de clapets, et aboutissant dans un collecteur desservant toute la batterie. De là les gaz, aspirés par un exhausteur, parcourent les appareils de condensation et de purification, puis retournent au four où ils pénètrent pour y être brûlés dans les carnaux.

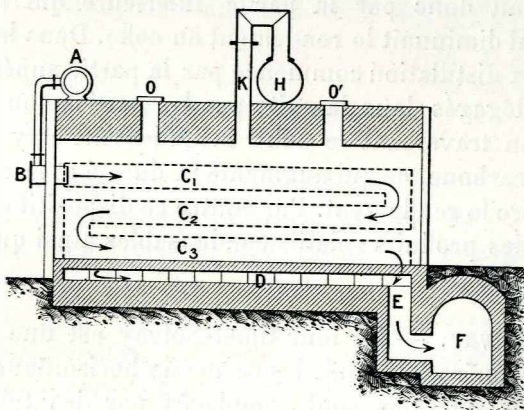


Fig. 72. — Four Seibel, coupe longitudinale.

La plupart des fours à récupération sont horizontaux. On emploie cependant en Allemagne quelques modifications du four Appolt, entre autres le four *Brunck*, réalisant la récupération.

Parmi les fours horizontaux nous retrouvons les fours à carnaux horizontaux et les fours à carnaux verticaux, qui se rapprochent comme construction des fours Smet ou des fours Coppée.

Four Seibel. — Ce four (fig. 72) rappelle beaucoup par sa disposition le four Smet. Les gaz après purification arrivent au four par la conduite A et la tuyère B où ils se mélangent à de l'air en quantité convenable. Puis ils pénètrent dans le carneau supérieur horizontal C,



parcourent successivement les carneaux C_2 et C_3 , passent ensuite sous la sole à travers une série de carneaux D, et enfin par la conduite verticale E arrivent dans la galerie horizontale F et de là dans la cheminée. Le chargement de charbon se fait par les deux ouvertures O et O'. Les produits distillés s'échappent par le tuyau K et le collecteur H.

Dans le *four Carvès*, dont le four Seibel n'est du reste qu'un perfectionnement, l'introduction des gaz se faisait sous la sole, en face d'une grille par où pénétrait l'air comburant, et qui était chargée de coke incandescent pour assurer l'allumage — précaution reconnue depuis inutile car la température des carneaux est bien suffisante par elle-même. Après avoir brûlé sous la sole, le mélange gazeux remontait à travers les parois du four par un carneau vertical et redescendait par les carneaux horizontaux C_1 , C_2 , C_3 pour s'échapper finalement par une galerie analogue à F. La distillation du charbon commençait donc par la partie inférieure qui était la plus chauffée, ce qui diminuait le rendement en coke. Dans le four Seibel au contraire, la distillation commence par la partie supérieure, et les gaz carburés dégagés dans la suite par les parties sous-jacentes se décomposent en traversant le coke incandescent et y laissent une partie de leur carbone, ce qui augmente la duresse et la compacité du coke et améliore le rendement. Par contre ce dispositif doit diminuer la proportion des produits volatils condensables ainsi que le pouvoir éclairant des gaz,

Four Smet-Solvay. — Le four Smet-Solvay est une variante du four Smet à récupération, mais les carneaux horizontaux qui courent dans les parois latérales sont remplacés par des tubes en terre réfractaire. Il y a trois tubes semblables superposés et communiquant deux à deux par leurs extrémités de manière à rappeler la circulation des gaz dans les fours Seibel. Seulement l'air nécessaire à la combustion est introduit en deux fois, une première fois en A à l'entrée des gaz dans le carneau supérieur C_1 , une deuxième fois en A', de l'autre côté du four à l'entrée du deuxième carneau C_2 . Après avoir circulé dans le troisième carneau C_3 les gaz pénètrent sous la sole qu'ils parcourent dans toute sa longueur dans un carneau unique D, d'où ils passent par le carneau oblique E dans le conduit F communiquant avec la cheminée. L'air nécessaire à la combustion circule d'abord dans le carneau H, où il s'échauffe jusque vers 300° , avant d'être conduit aux orifices d'admission



dans les carneaux, aux points A et A' où sont introduits les gaz combustibles. On peut régler l'admission de l'air au moyen de registres en tôle. Quant aux gaz produits par la distillation, ils se dégagent par le tuyau K qui les conduit dans un barillet et de là aux appareils de purification.

Dans les modèles précédemment étudiés de fours à carneaux horizontaux, on était obligé de donner à ces carneaux une épaisseur

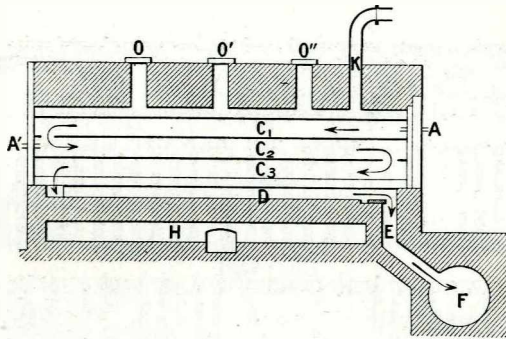


Fig. 73. — Four Smet-Solvay.

suffisante pour soutenir la maçonnerie des fours ; il en résultait des échanges de chaleur assez difficiles et c'est là un des principaux inconvénients de ce type de four. Ce défaut se trouve évité dans le four Smet-Solvay : les parois des tuyaux réfractaires peuvent être assez minces pour donner lieu à des échanges rapides de chaleur. D'autre part les voûtes des fours sont supportées non par ces tuyaux, mais par des piliers assez épais situés entre les deux rangées moyennes de tuyaux de chauffage. La maçonnerie est par suite très solide ; en outre ces piliers réalisent une sorte de régulateur de température, ils emmagasinent de la chaleur qu'ils restituent immédiatement après l'introduction dans les fours d'une nouvelle charge, au moment où les carneaux se trouvent refroidis, et l'on évite ainsi le *point mort* ou arrêt momentané de la distillation qui se produit à ce moment avec les autres fours.

Les fours actuels ont 10 mètres de longueur sur 2 mètres de haut. La cuisson s'opère en dix-huit ou vingt-quatre heures, suivant la nature de la houille, et le rendement en coke est très satisfaisant.

Le *four Collin* réalise la transition entre les fours à carneaux horizontaux et les fours à carneaux verticaux ; il est construit de manière à pouvoir fonctionner à volonté avec ou sans récupération des sous-



produits, et le passage d'une marche à l'autre peut s'effectuer pendant la marche du four.

Fours Otto. — Les fours Otto sont du type à carneaux verticaux analogue au four Coppée dont ils sont en somme de simples perfectionnements. Le four *Otto-Hoffmann* réalise à la fois la récupération des sous-produits et celle des chaleurs perdues par les gaz de la

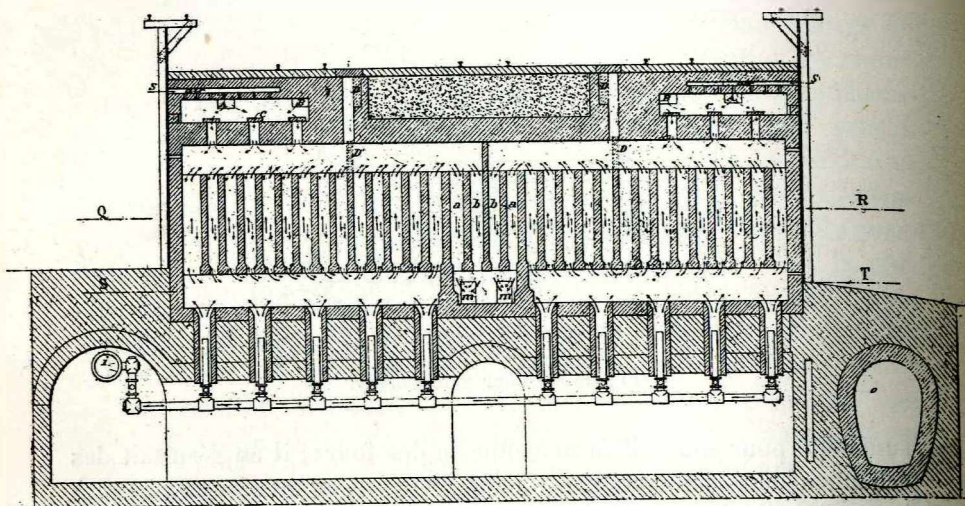


Fig. 74. — Four Otto. Coupe par les carneaux de chauffage.

combustion : ceux-ci traversent avant de se rendre à la cheminée des chambres garnies de briques qu'ils portent à une haute température, et qui servent à leur tour à échauffer l'air nécessaire à la combustion quand on a réalisé à la manière habituelle le changement de marche des gaz et de l'air.

Dans les nouveaux fours Otto (fig. 74) on a d'ailleurs supprimé les chambres de récupération de chaleur. Les gaz purifiés arrivent au four par le conduit I, et arrivent dans des sortes de brûleurs Bunsen au nombre de 10, situés à la base des piédroits, et qui aspirent eux-mêmes l'air nécessaire à la combustion. En sortant des brûleurs les gaz enflammés traversent d'abord un carneau horizontal, puis montent dans une série de carneaux verticaux et arrivent enfin à la partie supérieure dans un carneau horizontal d'où ils redescendent par deux couples de carneaux verticaux *a, b, b, a*, pour passer par les ouvertures *m m*, sous la sole du four, et de là dans la galerie *o* communiquant avec la cheminée.



Ces fours peuvent aussi marcher sans récupération des sous-produits. Dans ce cas on place deux briques en D' D' de manière à diviser par le milieu les deux parties du carneau horizontal supérieur, et l'on déplace les briques obturant les ouvertures C qui communiquent, par les ouvertures A et B, avec le sommet du four. Les gaz de la distillation arrivent directement par ABC, parcourent de haut en bas la moitié des carneaux verticaux suivant les flèches pointillées, remontent à travers l'autre moitié des carneaux verticaux de l'autre côté des briques D', et enfin redescendent par les carneaux verticaux *ab* en suivant dès lors la même marche que précédemment.

Les fours ont 10 mètres de long et 2 mètres de haut. Leur largeur varie comme d'habitude suivant la nature du charbon à traiter.

Fours Koppers. — Ces fours, très employés depuis quelques années en Allemagne, sont de deux types différents, avec ou sans régénération des chaleurs perdues.

1° *Four à régénérateurs de chaleur.* — Dans les fours Otto-Hoffmann et Collin, les régénérateurs sont placés de chaque côté de la batterie, latéralement à l'avant et à l'arrière. Dans les fours Koppers il y a deux régénérateurs sous chaque four, occupant chacun la demi-longueur du four, chacun de ces couples de régénérateurs récupérant les chaleurs perdues par le four correspondant; il résulte de cette indépendance des fours que si un accident arrive à l'un d'eux, on peut l'arrêter sans préjudice pour la série entière; d'autre part la chaleur emmagasinée par la maçonnerie et les fondations n'est pas inutilement perdue.

La capacité des régénérateurs est pour chaque four de 5,68 m³ avec une surface de 76,27 m²; les gaz sortent des carneaux à 1 000-1 100°, et des régénérateurs à 250°.

Le chauffage des fours se fait par 30 carneaux verticaux indépendants de même section, sauf les deux extrêmes un peu plus larges pour compenser le rayonnement par les façades; la section est rétrécie à l'extrémité supérieure, de manière à ralentir la circulation des gaz et à rendre la température uniforme; les gaz pénètrent dans les carneaux par le bas, l'air est introduit au niveau de la sole, les gaz enflammés montent dans les carneaux sur une moitié du four, et redescendent par l'autre moitié des carneaux, pour s'échapper par le régénérateur correspondant; toutes les demi-heures on change la marche, les gaz parcourent les mêmes carneaux en sens inverse et



s'échappent dans le 2^e régénérateur, le premier servant à échauffer l'air.

Le chargement se fait à l'aide de trois ouvertures percées dans la voûte. Une autre ouverture sert au départ des gaz qui vont aux appareils purificateurs, enfin une cinquième ouverture, fermée en régime normal, sert pendant l'allumage à introduire directement les gaz du four dans les carneaux, et de là dans les régénérateurs.

Suivant le constructeur, le four Koppers serait avantageux pour les charbons maigres. La récupération de chaleur permet de retrouver un notable excédent de gaz, que l'on emploie par exemple dans les moteurs : 40 p. 100 avec des charbons moyens à 15 p. 100 de matières volatiles, 50 p. 100 avec les charbons gras.

2^o Les fours sans régénérateurs se rapprochent comme construction des précédents, mais les carneaux ne sont pas indépendants : ils communiquent par le bas. Les gaz circulent de bas en haut dans les carneaux et redescendent par le carneau central.

Fours de la Rheinische-Chamotte und Dinas-Werke. — Ces fours⁴ réalisent également la récupération des chaleurs des fumées. Le chauffage est disposé de manière à avoir partout la même intensité aux différents points du four ; on obtient une température élevée dépassant de 300° environ au sortir des brûleurs celle de la plupart des fours similaires ; les brûleurs sont disposés de manière à éviter complètement la formation de jets de chalumeau, qui détériorent et fondent rapidement les parois.

Les figures 75 et 76 montrent la disposition du four qui comporte deux récupérateurs de chaleur, à deux empilages de briques distincts, à chaque extrémité du four. Chacun d'eux est chauffé pendant une heure par les chaleurs perdues du four à coke, et sert pendant l'heure suivante à réchauffer l'air.

Le gaz dégagé par la distillation dans les chambres C sort à leur partie supérieure par des conduits D de fort diamètre traversant leur plafond, d'où il est refoulé par un ventilateur dans les appareils où se fait la récupération des substances produites. Une partie de ces gaz sert au chauffage du four et revient dans les compartiments *c*, mélangé à l'air chauffé.

Les plafonds ne sont pas chauffés, ce qui évite la décomposition pyrogénée du gaz avec encrassement du four par dépôt de graphite

⁴ *Gén. civ.*, 53, 314 ; 1911.



et formation de naphthaline aux dépens des carbures légers; de

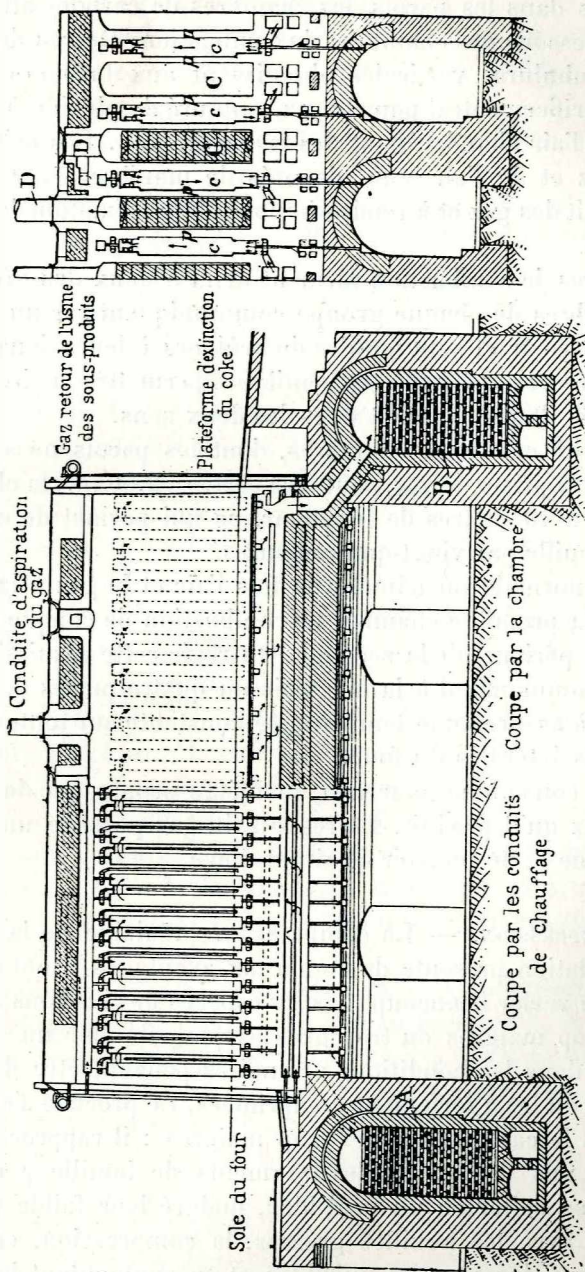


Fig. 76.
Coupe transversale.

Fig. 75.
Four de la Reinische-Chamotte. Coupes longitudinales.

même on évite la transformation de l'ammoniaque en cyanogène.



Le gaz, débarrassé des sous-produits, aboutit finalement à des conduits ménagés dans les parois des chambres de carbonisation, au-dessus et au-dessous des chambres de combustion. De ces dernières partent des tubulures verticales aboutissant aux brûleurs formés chacun d'un orifice central pour le gaz, entouré de plusieurs orifices par où arrive l'air chaud venant des récupérateurs. Les orifices de sortie des gaz et de l'air sont disposés de manière à amener un mélange parfait des gaz et à rendre impossible la formation des dards de chalumeau.

Les chambres de combustion forment deux à deux des groupes : les deux chambres de chaque groupe communiquent par un conduit horizontal supérieur et sont munies de brûleurs à leurs deux extrémités inférieure et supérieure de manière à permettre la circulation des gaz chauds alternativement dans les deux sens.

La hauteur de ces deux chambres, dont les parois ne sont pas affaiblies par des prises de gaz, peut être portée à 2,50 m. ; la chambre de distillation a 10 mètres de longueur, ce qui permet de calciner 6 tonnes de houille par vingt-quatre heures.

En marche normale on admet à la fois l'air et le gaz à la partie inférieure de la première chambre de combustion de chaque groupe et à la partie supérieure de la seconde. On règle cette admission par un dispositif commandant à la fois trois ou quatre paires de chambres, de façon à assurer une température constante sur toute la hauteur des parois latérales du four.

Ce four ne consomme pour son chauffage propre que la moitié environ du gaz qu'il produit. Le restant du gaz possède une puissance calorifique et un pouvoir éclairant élevé.

FOURS A COMPRESSION. — La compression préalable de la houille avant la distillation présente de nombreux avantages : tout d'abord elle permet de varier beaucoup plus les espèces de charbons traités : les houilles trop maigres ou trop grasses pour donner un coke de bonne qualité dans les conditions ordinaires peuvent être distillées avec succès si on les a fortement comprimées. Le procédé s'explique très bien dans le cas des houilles trop maigres : il rapproche suffisamment les uns des autres les fragments de houille pour leur permettre de se coller en un seul bloc, malgré leur faible pouvoir agglomérant ; avec les houilles grasses, la compression, en diminuant le volume des espaces nuisibles et en augmentant la masse de charbon introduite dans le four, diminue la porosité du bloc de



coke. L'emploi de la compression augmente en effet de 15 à 20 p. 100 la charge traitée dans le four.

Cette compression peut être réalisée de trois manières différentes :

a) Compression préalable de la houille en un bloc que l'on introduit dans le four ;

b) Compression de la houille dans le four même pendant le chargement ;

c) Compression progressive de la houille pendant la distillation.

Compression préalable. — Elle s'effectue sur toute la charge à introduire dans le four, que l'on place dans une caisse prismatique en tôle dont les dimensions sont légèrement inférieures aux dimensions inférieures du four et dont les parois latérales sont mobiles. On remplit cette caisse à l'aide de couches successives de charbon pulvérisé que l'on comprime à mesure. Puis on enlève les parois latérales, il reste un gâteau de houille reposant sur une plaque de tôle que l'on pousse dans le four en la faisant glisser sur des rouleaux. Une fois qu'elle est introduite, on ferme les portes du four et l'on retire le fond de tôle, tandis que le gâteau comprimé est retenu dans le four par la porte d'avant.

Dans les essais primitifs la compression se faisait à bras d'hommes. Actuellement elle est effectuée mécaniquement, ainsi que l'enfournement du bloc comprimé.

Compression dans le four pendant le chargement. — Ce système a été préconisé par M. Grand, directeur des usines d'Albi. La compression est effectuée par des pilons de 275 kilogrammes que l'on amène au-dessus du four, en face des orifices de chargement. Ces pilons sont portés par un pont roulant, et disposés de manière à pouvoir être inclinés obliquement, de manière à élargir beaucoup leur effet utile, et à pilonner à peu près uniformément la surface entière du charbon.

Compression durant la distillation. — Ce dispositif nécessite des fours spéciaux. Il conduit à un travail continu de la distillation.

Dans le *procédé Schwarz*, on pilonne le coke avant enfournement, mais de plus on introduit sur le dessus des plateaux en fonte moulée protégée par de la terre réfractaire, que l'on soulève à l'aide de chaînes et de treuils pendant l'enfournement et qu'on laisse ensuite reposer sur le charbon pendant la cuisson.

Ce procédé a été appliqué en août 1904 aux charbonnages de Wittcowitz, à Dombrau. La cohésion est augmentée par le poids des plateaux, de plus ceux-ci étant chauds cokéfient la partie supérieure de



haut en bas et donnent avec des charbons de mauvaise qualité un pourcentage de 70 p. 100 en coke utilisable au lieu de 45 p. 100. C'est ce qu'indiquent aussi les résistances par cm^2 :

	CHARBON PILONNÉ	PROCÉDÉ SCHWARZ
	kilogrammes.	kilogrammes.
Coke de la sole du four	130	180
— du milieu —	100	150
— du dessus —	65	100

La durée de la cuisson n'est pas modifiée¹.

Le *four Lürmann* est construit d'une manière entièrement différente de celle des fours précédents. Il comprend (fig. 77) deux chambres distinctes, une *chambre de carbonisation* où s'effectue la distillation de la houille, et une *chambre de refroidissement* destinée, comme son nom l'indique, à refroidir le coke avant son expulsion à l'air libre.

La chambre de carbonisation K va en s'évasant progressivement : elle mesure 1 mètre sur 0,50 m. à l'orifice d'enfournement *o*, et 1,50 m. sur 0,70 m. à l'autre extrémité. Elle est chauffée sur ses quatre côtés par des carnaux où circulent les gaz enflammés. La chambre de refroidissement est refroidie sous la sole par l'air circulant dans les carnaux *q*, air qui après s'être échauffé à ce contact servira à la combustion des gaz dans les carnaux de chauffage *g*, *s*. En face de l'ouverture *o* est un piston en fonte qui s'enfonce peu à peu dans le four en comprimant la masse. Toutes les demi-heures, on ramène le piston en arrière et l'on introduit par la trémie *f* une nouvelle charge de 25 kilogrammes de houille. Le coke est retiré par la porte T par fraction de 500 kilogrammes.

Ce four n'est pas jusqu'à maintenant entré dans la pratique.

Le *four Sheldon*, dont la description a été donnée récemment dans *The Iron Age*², diffère beaucoup moins des modèles connus : c'est un four horizontal à carnaux verticaux et à récupérateur de chaleur rappelant assez comme aspect extérieur le four primitif Otto. La partie originale consiste (fig. 78) en une chambre (*precoking chamber*) en fonte remplaçant la porte de chargement et où se produit

¹ *St. und. Eis.*, 25, 1058 ; 1905. — *Rev. Métal.*, 3 bis, 459 ; 1906.

² *Iron Age*, 81, 107 ; 1908. — *Rev. Métal.*, 5 bis, 484 ; 1908.



un échauffement préalable du charbon jusque vers 200°. Cet échauffement est obtenu au moyen des gaz qui pénètrent au-dessous de la chambre, remontent par les carneaux *a a* et s'échappent par le carneau D en échauffant la trémie d'introduction de la houille. Le piston E pousse la masse devant lui. Au bout d'une heure il a avancé du tiers de la largeur de la chambre ; on le ramène en arrière, on introduit une nouvelle quantité de charbon et ainsi de suite. Les fours sont groupés par dix à côté les uns des autres, et les dix pis-

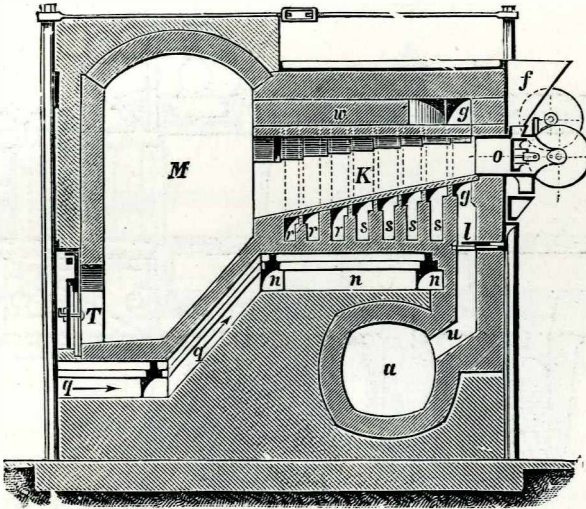


Fig. 77. — Four Lürmann.

tons avancent simultanément. A l'autre extrémité du four se trouve une chambre de déchargement en fonte munie d'une trappe à sa partie inférieure, pour recueillir le coke. On a pu ainsi préparer avec de la houille à 35 p. 100 de matières volatiles un coke dont la résistance à l'écrasement était de 77 kilogrammes par cm^2 . De plus, grâce à l'échauffement préalable du charbon dans la *precoking chamber*, l'utilisation des fours est bien meilleure et sensiblement le double de celle obtenue par les procédés ordinaires. Enfin la main-d'œuvre est très réduite. Le coke est éteint dans la chambre de déchargement et versé directement dans les wagons ; il donne ainsi moins de déchets.

Manœuvre des fours à coke. — Chargement. — Le chargement des fours s'effectue le plus souvent par le haut de la voûte, au moyen



d'orifices dans lesquels on verse la houille amenée par les wagonnets. Cependant quand on réalise la compression préalable en dehors du four, nous avons vu que le chargement s'effectuait latéralement. Indépendamment des avantages de la compression elle-même, ce mode de chargement évite la construction d'une voie au-dessus de la voûte des fours, qui doivent être dès lors construits très solidement, et procure un chargement beaucoup plus régulier. Aussi a-t-on pu

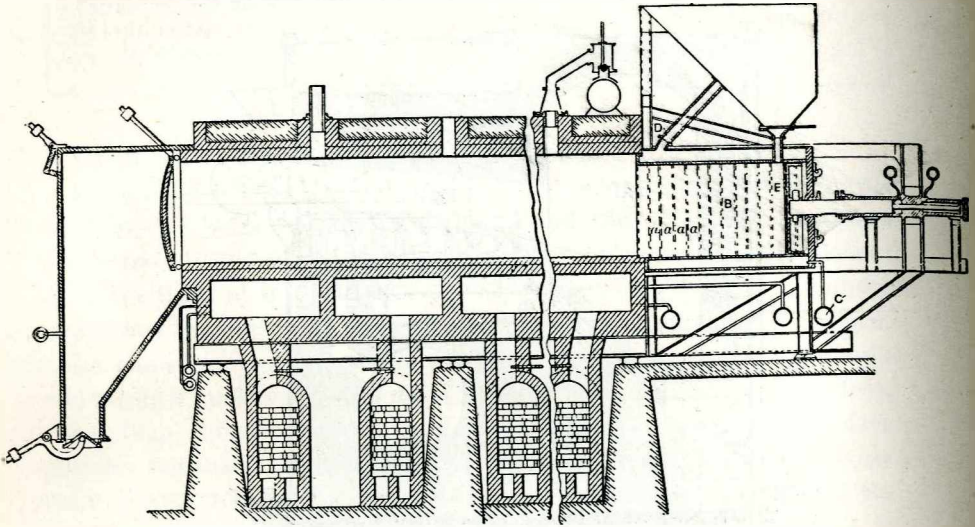


Fig. 78. — Four Sheldon.

le recommander même quand on n'effectue pas la compression. On emploie dans ce cas une boîte de chargement en tôle que l'on introduit tout entière dans le four en la faisant glisser sur des rouleaux, et l'on retire ensuite successivement, d'abord le dessus de la boîte, puis le fond mobile après avoir fermé la porte du four. L'appareil, inventé par Alfred Ernst, de Pittsburg, fonctionne en Allemagne et en France¹.

Le défournement et le chargement consécutifs d'un four refroidissent beaucoup sa température. Aussi a-t-on l'habitude, les fours étant toujours disposés en nombreuses séries parallèles, de ne charger qu'un four sur deux. Les deux fours mitoyens en pleine marche cèdent alors un peu de leur chaleur au four nouvellement garni,

¹ *Iron Age*. 80. 1682: 1907.



et l'on évite ainsi une trop longue interruption dans la distillation. Rappelons que le four Smet-Solvay est construit de manière à éviter cet inconvénient.

Déchargement. — Les fours verticaux genre Appolt se déchargent très facilement, la charge de coke tombant sous son propre poids dans le wagonnet qu'on a amené sous la porte du four.

L'opération est un peu moins facile pour les fours horizontaux. On emploie dans ce cas une *défourneuse* (fig. 79), bouclier en fonte, poussé horizontalement par une crémaillère portée par un chariot

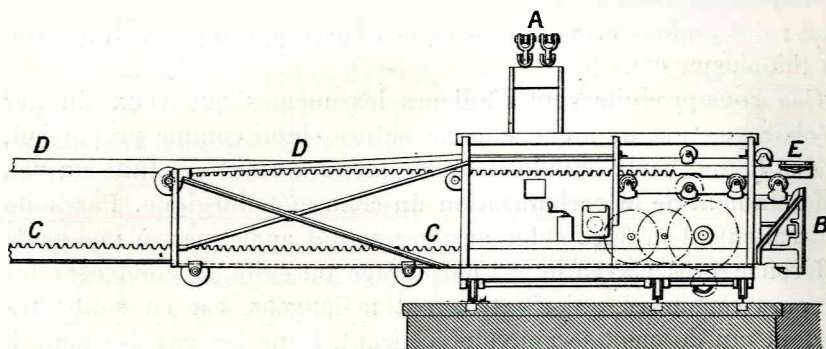


Fig. 79. — Défourneuse à moteur électrique des forges de Cette.

à vapeur ou électrique. Les deux portes du four étant ouvertes, on introduit le bouclier B qui pousse la masse de coke incandescente de manière à la faire sortir tout entière par le côté opposé, où elle vient tomber sur une aire de déchargement inclinée, pavée de briques réfractaires sur champ ou garnie de plaques de fonte. Le coke incandescent est éteint immédiatement en y projetant de l'eau froide.

RÉCUPÉRATION DES SOUS-PRODUITS

Les produits volatils dégagés dans la distillation de la houille sont extrêmement nombreux. Après refroidissement à la température ordinaire, ils se divisent en trois parties : une partie gazeuse, formée de gaz et de vapeurs légères, et deux couches liquides, l'une aqueuse constituant les eaux ammoniacales, l'autre huileuse qui est le goudron.

Les gaz contiennent surtout de l'hydrogène, du méthane et de l'oxyde de carbone, avec des quantités plus faibles d'acide carbonique, d'azote, d'ammoniaque, de produits cyanés et d'hydrogène sulfuré, et aussi de petites quantités de carbures éthyliques et



acétyléniques. En outre ces gaz contiennent à l'état de vapeurs saturées tous les constituants sensiblement volatils des goudrons, c'est-à-dire principalement des carbures aromatiques : benzène et homologues, naphthalène, styrolène, etc., et leurs dérivés.

Les eaux ammoniacales contiennent principalement du carbonate et du sulfure d'ammonium, ainsi que des composés cyanés.

Quant aux goudrons, leur composition est très complexe : ils renferment des carbures gras supérieurs, mais surtout des carbures aromatiques, carbures benzéniques, naphthaléniques, anthracéniques, acénaphène, fluorène, rétène, chrysène, etc. ; des composés phénoliques ; des amines aromatiques et des bases pyridiques ; du pyrrol, du thiophène, etc.

Ces sous-produits sont d'ailleurs les mêmes que ceux du gaz d'éclairage, tout au moins comme nature sinon comme proportion, la distillation de la houille dans les cornues étant conduite un peu différemment de la carbonisation du coke métallurgique. Par suite les traitements à faire subir aux gaz seront analogues, à une seule différence près : avec le gaz d'éclairage on évite de condenser les vapeurs carburées qui s'y trouvent mélangées, car ce sont elles surtout qui donnent le pouvoir éclairant. Dans les gaz des fours à coke au contraire, on ne cherche pas, du moins en général, à conserver le pouvoir éclairant, on tâchera au contraire d'épuiser le mieux possible et de condenser les matières volatiles qui constitueront, sous le nom de *benzol*, un des bénéfices principaux de la récupération.

La composition des produits volatils varie d'ailleurs à la fois avec la période de la distillation et avec la manière dont s'effectue la distillation, c'est-à-dire avec le modèle du four.

Tout d'abord la composition des gaz varie avec la période de la distillation. On peut dire que la proportion relative de l'hydrogène augmente constamment du début à la fin de l'opération, tandis que celle des autres gaz, formène et hydrocarbures divers, diminue, sauf l'oxyde de carbone et l'acide carbonique qui conservent à peu près toujours les mêmes volumes relatifs.

Quant aux modèles de fours, ils ont la plus grande influence sur les sous-produits récupérés. Ainsi que nous l'avons expliqué plus haut, les fours qui réaliseront une température très élevée et provoqueront une distillation très rapide produiront une plus grande quantité de produits gazeux au préjudice des produits condensables, tandis que les fours opérant la distillation lentement et à basse tempéra-



ture, au moins au début, donneront un rendement élevé en sous-produits.

Enfin la qualité des charbons entraîne également, comme de juste, des différences considérables.

Marche de la récupération. — Les gaz qui se dégagent des fours à coke sont très chauds (600-700°). Ils sortent par un tuyau de tôle coudé, muni de clapets, et se rendent dans un condenseur ou *barillet*, tuyau de gros diamètre commun à toute une série de fours, où leur température descend jusque vers 200°. Dans ce barillet se dépose déjà une partie des goudrons qui est expulsée par un siphon de trop-plein. Mais une autre partie reste en suspension dans le gaz à l'état de fines gouttelettes ou vésicules dont la séparation est très difficile, et c'est à cette séparation, ainsi qu'au refroidissement complet du gaz, que seront consacrés les premiers appareils. On emploie d'abord des réfrigérants à air ou à eau. Quelquefois on fait circuler autour de ces réfrigérants l'air qui servira ultérieurement à alimenter les fours, de manière à utiliser la chaleur cédée par les gaz. D'autres fois on emploie une pluie d'eau, ou un barbotage. Une nouvelle quantité de goudrons se dépose dans ces appareils pendant le refroidissement complet. Pour terminer, on emploie le plus souvent le séparateur Pelouze et Audoin, dans lequel les gaz doivent passer à travers un certain nombre de tôles perforées parallèles et dont les trous sont disposés en chicanes, de manière à réaliser une route sinueuse. Enfin le gaz traverse les tours d'absorption dont une première série doit retenir l'ammoniaque : on réalise une circulation méthodique des gaz de l'eau, en cherchant à multiplier les surfaces de contact ; le plus souvent on emploie dans ce but de simples claies en bois superposées. Dans une deuxième série d'absorbants doit se faire la récupération du benzol. Le liquide de lavage est alors de l'huile lourde ou huile d'antracène, dans laquelle le benzol est très soluble¹. Enfin le gaz, débarrassé de ses sous-produits, revient au four pour y être brûlé. Cette utilisation n'en absorbe d'ailleurs qu'une partie, de sorte qu'il en reste une assez forte proportion de disponible qui peut être brûlée par exemple sous des chaudières ou employée dans des moteurs à explosion.

Pour réaliser la circulation des gaz à travers cette longue série d'appareils, on emploie des aspirateurs ou exhausteurs de différents

¹ L'extraction et la purification du benzol seront étudiées avec plus de détails dans la suite (p. 386).



systèmes : soit des pompes rotatives (extracteur Beale), soit des ventilateurs, soit des pompes à piston à mouvement alternatif. L'extracteur se place en général entre les appareils réfrigérants et les appareils d'absorption, son fonctionnement doit être extrêmement régulier de manière à ne pas gêner la marche des fours.

On obtient en définitive, comme sous-produits récupérés, des eaux ammoniacales, des benzols et des goudrons. Les eaux ammoniacales sont traitées sur place, on les distille avec un lait de chaux dans une colonne à plateaux, de manière à séparer l'acide carbonique et à concentrer les vapeurs ammoniacales, qui sont reçues dans de l'acide sulfurique afin de les transformer en sulfate. Les benzols bruts sont également fractionnés dans des appareils à rectification. Quant aux goudrons ils sont en général vendus à des usines spéciales.

Absorption directe de l'ammoniaque. — La distillation des eaux ammoniacales, qui sont très étendues, nécessite une grande quantité de chaux et une dépense assez considérable de chaleur. On a cherché à éviter ce traitement en absorbant directement les vapeurs basiques contenues dans le gaz au moyen d'acide sulfurique concentré. Le problème, abordé à plusieurs reprises, n'a été résolu que dans ces dernières années : la difficulté à surmonter était la séparation préalable des goudrons sans lavage ; on y est arrivé de différentes manières, soit au moyen de ventilateurs spéciaux que nous retrouverons plus loin (p. 438), soit, comme dans le procédé Otto (brev. fr. 418.018, septembre 1910) au moyen d'une injection de goudron chaud pulvérisé, dont les gouttes agissent mécaniquement et par dissolution sur le brouillard.

La saturation directe doit d'ailleurs être faite à une température suffisante pour empêcher la condensation de la vapeur d'eau (80° environ) ; comme elle dégage une quantité considérable de chaleur (20 calories par molécule-gramme de AzH^3), la température se maintient en général d'elle-même à la valeur nécessaire. Le contact du gaz avec l'acide sulfurique doit être aussi intime que possible ; dans les appareils Otto, cette condition est réalisée par une pulvérisation de l'acide dans le gaz au moyen d'un injecteur analogue à celui qui sert au dégoudronnage. On obtient ainsi, non seulement une réduction considérable des frais de premier établissement et de main-d'œuvre, mais aussi un excellent rendement en ammoniaque, dont 90 p. 100 au moins sont effectivement récupérés¹.

¹ A. GREBEL, *Le Gaz*, 53, 48; 1911. — *St. u. Eis.*, 29, 1644; 1909.



Un perfectionnement d'un autre genre consiste à éviter l'emploi de l'acide sulfurique, dont la consommation est presque égale au poids de sulfate d'ammoniaque produit (théoriquement il faut pour 100 kilogrammes de sulfate 75 kilogrammes d'acide pur SO_3H_2 , soit 94 kilogrammes d'acide à 80 p. 100). Le procédé Burkheiser¹ combine directement à l'ammoniaque le soufre existant dans le gaz de houille à l'état d'hydrogène sulfuré. On transforme celui-ci en acide sulfureux, puis en sulfite d'ammoniaque qui possède comme engrais un pouvoir fertilisant supérieur de 10 p. 100 à celui du sulfate. Il suffit pour que la transformation soit possible que le charbon traité contienne plus de 1,5 p. 100 de soufre.

Le gaz sortant des fours subit d'abord les purifications habituelles : séparation du goudron, distillation des eaux ammoniacales avec un lait de chaux. Le gaz brut contenant H_2S et Az H_3 (et CAz) passe dans des épurateurs chimiques à oxyde de fer où se forment des sulfures et cyanures de fer ; quand ces appareils ont fonctionné assez longtemps, on y fait passer un courant d'air rapide en les maintenant à 250°. Il se produit de l'acide sulfureux que l'on dissout dans l'eau et l'oxyde de fer est régénéré. Pratiquement on a deux caisses d'épuration *a* et *b* conjuguées. Dans l'une on fait passer les gaz venant des fours à coke, qui y abandonnent leur soufre et leur cyanogène. Les gaz ammoniacaux sortant sont alors conduits dans des scrubbers où coulent des solutions acides de SO_2 , provenant du lavage des gaz issus de l'épurateur *b* où l'on est à la période d'oxydation. On procède à des inversions périodiques de *a* et *b*.

Étant donnée l'énorme quantité de coke préparée pour l'industrie métallurgique, on se rend compte de l'importance de la production des divers sous-produits de récupération, importance qui s'accroît chaque année à la fois parce que la production du fer augmente sans cesse et parce que l'on remplace de plus en plus par des fours à récupération les anciennes installations existantes. L'Allemagne en particulier, où l'industrie sidérurgique s'est développée d'une façon remarquable dans ces dernières années et où presque toutes les usines réalisent la récupération, produisait en 1909 285 000 tonnes d'ammoniaque, 625 000 tonnes de goudrons et 90 000 tonnes d'huiles légères². En 1910 le seul district de Dortmund produisait 200 000 tonnes de sulfate d'ammoniaque. Les gaz même des fours à coke ne sont

¹ Glück., 47, 194; 1911; — Rev. Métal., 8 bis, 749; 1911.

² St. u. Eis., 29, 1644; 1909; *ibid.*, 31, 921; 1911; Rev. Métal., 8 bis, 670; 1911.



pas utilisés entièrement pour le chauffage des fours. Il en reste une assez forte proportion disponible qui, étant donnée l'importance de la production totale, constitue une source d'énergie inattendue.

Dans le bassin de la Ruhr, les fabriques de coke produisent journellement 3 100 000 mètres cubes de gaz de houille, soit près de deux milliards de mètres cubes par an, ce qui correspond à une puissance motrice de deux milliards de kilowatts-heures, en admettant comme on le fait en général qu'un mètre cube de gaz représente un kilowatt-heure. Or, à l'heure actuelle cette énergie est à peu près inutilisée. Comme d'autre part le gaz des fours à coke est identique au gaz de houille fabriqué dans les usines d'éclairage, il en est résulté que beaucoup de celles-ci, situées à proximité des centres métallurgiques, viennent d'arrêter leur exploitation, et que les villes s'éclairent au gaz des fours à coke. On a créé ainsi de vastes réseaux de canalisations qui remplacent le transport à distance des charbons par un transport de gaz. La ville de Barmen a été la première à prendre cette décision, au printemps de 1910. Les villes d'Essen et de Mülheim ont suivi cet exemple. Barmen fait ainsi venir de Hamborn, non loin de Duisburg, à une distance de près de 30 kilomètres, les 17 millions de mètres cubes de gaz de houille qui lui sont nécessaires annuellement.

Il en est de même en Westphalie où plusieurs communes s'éclairent déjà exclusivement au gaz des cokeries, et où le mouvement s'annonce comme devant s'étendre rapidement, et les bassins houillers de Waldenberg et de la Saar se disposent à imiter cet exemple. On doit donc prévoir le moment où toutes les villes situées dans un certain rayon autour des usines métallurgiques s'éclaireront au gaz de fours à coke¹.

La coalite. — L'inventeur américain Thomas Parker a proposé d'opérer la distillation de la houille à basse température, de manière à obtenir, avec un rendement bien supérieur à celui du coke, un combustible brûlant facilement sur une grille, mais sans donner de flammes fuligineuses. La coalite — c'est le nom du nouveau combustible — se prépare, d'après les brevets américains, en conduisant la distillation à 425° jusqu'à cessation de tout dégagement gazeux : l'opération se fait dans des cornues de 2 mètres \times 1,50 \times 0,40, l'épaisseur du charbon ne dépassant pas 0,15. A la fin de l'opération

¹ *Rev. Univ.*, 1914, 423.



on fait passer un courant de vapeur d'eau dans la cornue, ce qui a pour effet d'éliminer la majeure partie du soufre et d'enlever les dernières traces de gaz. On laisse enfin tomber le combustible distillé dans des cylindres métalliques où il se refroidit¹.

L'*Engineering and Mining Journal* a publié les résultats d'expériences faites à ce sujet sur des charbons de la vallée du Mississipi : on constate vers la température de 260° une transformation se traduisant par une élévation subite de température qui se maintient pendant quelques minutes. L'auteur l'attribue à une oxydation. Il y a en même temps, comme de juste, diminution du pouvoir calorifique par rapport à un même poids de combustible initial; mais le pouvoir calorifique spécifique augmente et passe par exemple de 5 800 à 6 500 calories. Voici les résultats de quelques expériences montrant les modifications éprouvées; on a rapporté les poids de combustibles à une même teneur en cendres :

	COMPOSITION initiale.	APRÈS CHAUFFAGE de 1 heure à 260° environ.		CHAUFFAGE CONTINUÉ 10 minutes jusqu'à 550° environ.	
		1 ^{re} expérience.	2 ^e expérience.		
	p. 100				
Eau	6,49	»	»	»	»
Cendres	6,69	6,69	6,69	6,69	6,69
Matières volatiles	33,27	5,43	12,69	»	»
Carbone	53,55	72,23	66,45	72,60	69,10
Augmentation en carbone.	»	34,90	24,00	35,50	29,10

Il est à noter que l'état de division du charbon exerce la plus grande influence sur la transformation. Les essais ci-dessus ont été effectués avec du charbon finement pulvérisé (passé au tamis de 100 mailles par pouce carré). Lorsque les fragments de charbon atteignent la grosseur d'un grain de blé, la transformation ne se produit plus; elle paraît de plus être très sensible aux influences catalytiques².

La coalite n'a cependant pas donné les résultats escomptés par son inventeur : la société qui s'était fondée en Angleterre pour l'exploitation des brevets Parker a dû démolir ses fours. La cause principale de cet échec paraît être la trop grande friabilité du nouveau combustible, dont 30 p. 100 devenaient inutilisables³.

¹ *Ir. Coal Tr. Rev.*, 75, 1384; 1907. — *Rev. Métal.*, 4 bis, 771; 1907.

² *Rev. Métal.*, 5 bis, 159; 1908.

³ *Le Gaz*, 55, 6; 1911.



CHAPITRE II

LES COMBUSTIBLES LIQUIDES

A. — LES COMBUSTIBLES NATURELS

§ 1. — LES PÉTROLES

On désigne sous le nom générique de pétroles des produits très divers, que l'on peut définir comme étant des mélanges liquides complexes de carbures d'hydrogène, renfermant en outre de petites quantités de produits sulfurés, azotés ou oxydés. Leurs principaux gisements se trouvent au Caucase, dans la région de Bakou, en Roumanie et dans l'Amérique du Nord.

Bien que connus depuis l'antiquité, les pétroles bruts ne commencèrent à être distillés et employés pour l'éclairage et le chauffage que dans la seconde moitié du XIX^e siècle. Quelques essais de distillation avaient été entrepris au Caucase vers 1825, mais ils n'eurent pas de suite, et ils ne furent repris qu'en 1863, où une usine fut établie à Bakou ; encore cette industrie ne devint-elle florissante qu'à partir de 1873. L'industrie américaine prit naissance à peu près parallèlement : les premières raffineries furent installées en 1859.

En Roumanie, la première distillerie de pétrole brut fut installée en 1856, pour l'éclairage de la ville de Bucarest. Mais l'industrie pétrolière resta stagnante jusqu'en 1895. A partir de 1900, elle prit un essor considérable et depuis 1907 la production roumaine s'est placée au troisième rang, derrière les États-Unis et la Russie.

Composition. — Les pétroles, nous l'avons dit, sont des produits extrêmement complexes. Ils renferment des carbures appartenant à plusieurs séries, et dans chaque série de nombreux homologues depuis les termes gazeux à la température ordinaire jusqu'aux termes



solides. Suivant leur origine, telle ou telle série de carbure domine dans leur composition. Les pétroles américains contiennent surtout des carbures saturés C^nH^{2n+2} dits paraffines, c'est-à-dire des homologues du méthane; les pétroles russes, au contraire, sont formés en majeure partie de carbures cycliques ou naphènes de formules C^nH^{2n} , représentant des chaînes polyméthyléniques fermées $(CH^2)^n$, ou des homologues à chaînes latérales. En particulier les carbures hexaméthyléniques ne sont autre chose que les dérivés hexahydrogénés des carbures benzéniques. D'ailleurs les pétroles américains ou russes contiennent à la fois les deux séries; on rencontre également dans beaucoup de pétroles, principalement ceux de la Californie, des carbures aromatiques C^nH^{2n-6} , et dans ceux de l'Ohio et du Texas, des carbures C^nH^{2n-2} . On trouve enfin dans les pétroles des oléfines C^nH^{2n} homologues de l'éthylène, mais ces carbures se rencontrent surtout dans les huiles de schistes d'Écosse, ou dans les produits distillés au contact de parois surchauffées.

Les divers pétroles renferment toujours des combinaisons azotées: les huiles du Texas en particulier contiennent une forte proportion de bases pyridiques. Celles de l'Ohio sont particulièrement riches en combinaisons sulfurées du type des mercaptans.

Voici d'après R. Ehram¹ la liste des principaux carbures rencontrés dans les pétroles.

NOMS	FORMULES	POINTS d'ébullition.	DENSITÉS
Hydrocarbures saturés (Paraffines) C^nH^{2n+2}			
		degrés centigr.	
Méthane	CH^4		
Ethane	C^2H^6		
Propane	C^3H^8		
Butane	C^4H^{10}	4	0,600
Pentane	C^5H^{12}	38	0,628
Méthylbutane	»	30	—
Hexane	C^6H^{14}	70	0,668
Isohexane	»	61	—
Heptane	C^7H^{16}	98	0,699
Isoheptane	»	91	—
Octane	C^8H^{18}	125	0,703
Isooctane	»	118	—
Nonane	C^9H^{20}	148	0,741

¹ Fabrication des huiles minérales et pyrogénées, Paris 1907.



NOMS	FORMULES	POINTS d'ébullition.	DENSITÉS
Hydrocarbures saturés (Paraffines) C^nH^{2n+2} (Suite).			
		degrés centigr.	
Décane	$C^{10}H^{22}$	158	0,750
Undécane	$C^{11}H^{24}$	182	0,765
Duodécane	$C^{12}H^{26}$	202	0,776
Tridécane	$C^{13}H^{28}$	216	0,792
Tétradécane	$C^{14}H^{30}$	238	—
Pentadécane	$C^{15}H^{32}$	258	—
Hexadécane	$C^{16}H^{34}$	278	—
Heptadécane	$C^{17}H^{36}$	303	—
Octodécane	$C^{18}H^{38}$	317	—
Eicosane	$C^{20}H^{42}$	—	—
Tricosane	$C^{23}H^{48}$	—	—
Pentacosane	$C^{25}H^{52}$	—	—
Heptacosane	$C^{27}H^{56}$	—	—
(Paraffine)	$C^{30}H^{62}$	370	—
Hydrocarbures éthyléniques (Oléfines) C^nH^{2n}			
Ethène (Ethylène)	C^2H^4	— 18	—
Propène	C^3H^6	+ 5	—
Butène	C^4H^8	—	0,663
Pentène	C^5H^{10}	37	0,669
Hexène	C^6H^{12}	69	0,703
Heptène	C^7H^{14}	98	0,722
Octène	C^8H^{16}	124	—
Nonène	C^9H^{18}	140	0,771
Décène	$C^{10}H^{20}$	160	0,782
Undécène	$C^{11}H^{22}$	195	—
Duodécène	$C^{12}H^{24}$	216	0,791
Tridécène	$C^{13}H^{26}$	235	0,813
Pentadécène	$C^{15}H^{30}$	245	0,789
Cétène	$C^{16}H^{32}$	274	—
Tétradécène	$C^{14}H^{28}$	—	—
Cérotène	$C^{27}H^{54}$	—	—
Mélissène	$C^{30}H^{60}$	375	—
Hydrocarbures benzéniques C^nH^{2n-6}			
Benzène	C^6H^6	81	0,877
Toluène	C^7H^8	111	0,872
Paraxylène	C^8H^{10}	137	—
Mésitylène	C^9H^{12}	163	0,869
Cumène	»	151	0,837
Pseudocumène	»	166	0,864
Durène	$C^{10}H^{14}$	191	—
Isodurène	»	197	—
Amylbenzène	$C^{11}H^{16}$	193	0,860

NOMS	FORMULES	POINTS d'ébullition.	DENSITÉS
Hydrocarbures naphthéniques (Hexaméthylènes) C^nH^{2n}.			
		degrés centigr.	
Hexanaphtène.	C^6H^{12}	69	0,760
Heptanaphtène.	C^7H^{14}	97	0,772
Octonaphtène.	C^8H^{16}	119	—
Isooctonaphtène.	»	122	—
Nonanaphtène.	C^9H^{18}	135	—
Décanaphtène.	$C^{10}H^{20}$	161	0,795
Undécánaphtène.	$C^{11}H^{22}$	182	0,849
Duodécánaphtène.	$C^{12}H^{24}$	197	0,865
Tétradécánaphtène.	$C^{14}H^{28}$	240	0,839
Pentadécánaphtène.	$C^{15}H^{30}$	247	0,830

ORIGINE DES PÉTROLES

La question de l'origine des pétroles est encore plus obscure et plus controversée que celle de la formation de la houille : tandis que pour celle-ci on admet généralement une origine végétale, ou tout au moins organique, on a pu proposer pour les huiles minérales une formation, tantôt organique, tantôt minérale.

Hypothèse de la formation exclusivement minérale. — Mendelejeff supposait que le pétrole s'était formé par l'action de la vapeur d'eau sur le carbure de fer; il se serait produit différents carbures d'hydrogènes qui se seraient condensés et polymérisés sous l'action des hautes températures réalisées pendant les périodes de formation géologique. Berthelot soutenait une opinion analogue.

Lorsqu'Henri Moissan put réaliser, grâce à son four électrique, la préparation des différents carbures métalliques pour la plupart inconnus avant lui, et étudier leurs propriétés, il donna de sérieux arguments en faveur de la formation minérale des pétroles. Il montra que ces carbures étaient attaqués facilement par l'eau (sauf toutefois ceux de fer, de chrome, de tungstène et de molybdène), et que si la plupart donnaient dans ces conditions des gaz très purs, d'autres au contraire donnaient des mélanges gazeux complexes, en particulier les carbures des terres rares et surtout le carbure d'uranium : il put préparer, par action de l'eau sur ce dernier, non seulement des produits gazeux, mais aussi des produits liquides et même des pro-



duits solides condensés. L'hypothèse de Mendelejeff se trouvait ainsi appuyée de données expérimentales sérieuses.

Malheureusement l'uranium est extrêmement rare à la surface de la terre. On peut alors trouver peu vraisemblable la formation à partir de son carbure des énormes gisements de pétrole. Il est vrai qu'on peut répondre à cette objection en remarquant que nous ne connaissons que la composition d'une pellicule extrêmement mince à la surface de la terre, et que, puisque la densité moyenne de notre globe est de beaucoup supérieure à celle de l'écorce terrestre, on est précisément conduit à y admettre la présence d'une forte proportion de produits métalliques de densité élevée, dont ferait partie l'uranium.

HYPOTHÈSE DE MM. SABATIER ET SENDERENS. — Les belles expériences de MM. Sabatier et Senderens sur l'action hydrogénante des métaux divisés les ont conduits à une nouvelle théorie de la formation minérale des pétroles :

Si l'on fait passer sur du nickel réduit maintenu à la température de 300° un mélange d'acétylène et d'hydrogène, les deux gaz se combinent et l'on obtient un mélange extrêmement complexe de carbures, les uns liquides, d'autres solides qui se déposent à l'extrémité du tube sous forme de goudron épais. On a pu obtenir ainsi deux grammes d'un liquide noir, de densité 0,926, dont l'odeur forte rappelait celle des produits de décomposition des pétroles naturels, et dont on a pu séparer par distillation plusieurs portions passant de 150 à 270°, dont la densité variait de 0,825 à 0,865.

MM. Sabatier et Senderens supposent alors qu'il s'est formé de l'acétylène par l'action de l'eau sur le carbure de calcium, de l'hydrogène par l'action de l'eau sur divers métaux, et que ces gaz, au contact des métaux, se sont combinés et condensés pour donner des pétroles¹.

Théorie de la formation organique. — **HYPOTHÈSE D'ENGLER.** — D'après Engler et Höfer² le pétrole se serait formé par la décomposition, sous l'influence de températures élevées et à de très hautes

¹ Plusieurs auteurs, à la suite de Humboldt, ont attribué aux pétroles une origine volcanique sans expliquer d'ailleurs par quel mécanisme exact ces produits avaient pris naissance. Il est en tout cas assez remarquable de constater que les sources salées, les gisements de pétroles et les mines de soufre se trouvent le plus souvent réunies en des points très voisins du globe (voyez l'article : *Gaz d'éclairage* du dictionnaire de Wurtz, 2^e supplément, 4, p. 560).

² *Ber.*, 21, 1816; 1838; 22, 592; 1889; 25, 1440; 1893; 30, 2358; 1897.



pressions, des matières grasses de divers animaux marins (poissons, mollusques et surtout foraminifères). La décomposition, s'effectuant suivant un processus analogue à celui que nous avons décrit au sujet de la distillation pyrogénée du bois, aurait donné de l'eau, de l'acide carbonique et de l'oxyde de carbone d'une part, et de l'autre des carbures d'hydrogène, qui, avec le temps et sous l'influence de la pression et de la température, se seraient peu à peu condensés et polymérisés.

On peut se demander, au premier abord, s'il est possible que les énormes gisements de pétroles connus puissent provenir de la décomposition de produits animaux. Cependant, en réfléchissant à la durée certainement considérable des périodes préhistoriques et à l'intensité de la vie animale à ces époques, on doit reconnaître que cette idée ne présente rien d'inadmissible.

Des expériences récentes (1908) de Kungler et Schwedhelm ont établi que la distillation pyrogénée des oléates et des stéarates des métaux lourds peut donner des produits ayant l'apparence et l'odeur du pétrole brut.

D'autres auteurs préconisent l'origine végétale. Ainsi Krømer et Spilker¹ ont trouvé dans les algues et les diatomées des marais tourbeux de Franzenbad de fortes proportions de matières cireuses qui, distillées sous pression, se décomposent en donnant des carbures liquides. Les pétroles proviendraient alors de la décomposition, sous des pressions considérables, des matières grasses de diatomées qui auraient primitivement couvert de vastes étendues. Cette hypothèse est en somme très analogue à celle d'Engler, en substituant simplement l'origine végétale des matières grasses à l'origine animale.

Importance du pouvoir rotatoire. — Entre ces deux théories de la formation minérale ou de l'origine organique des pétroles, il a été longtemps difficile de se prononcer, et l'on peut dire qu'à l'heure actuelle aucune n'est démontrée d'une manière satisfaisante; mais les observations de Tschugaeff² sur l'existence du pouvoir rotatoire chez ces liquides semblent bien donner un argument sérieux en faveur de la seconde, ou tout au moins renverser à peu près irrévocablement la première. On sait, en effet, que les composés carbonés formés

¹ Ber., 32, 2910; 1899; 35, 1212; 1902.

² Chem. Zeitg., 28, 505.



par voie de synthèse exclusivement minérale ne présentent pas le pouvoir rotatoire : ce qui s'explique en remarquant que celui-ci suppose une dissymétrie de la molécule, et que lorsqu'on parvient par voie de synthèse à former une pareille molécule, on obtient par raison de symétrie les deux formes inverses en quantités équivalentes, c'est-à-dire en définitive des composés racémiques que l'on ne peut dédoubler qu'en faisant intervenir des êtres vivants ou des composés déjà doués du pouvoir rotatoire. Seuls, les organismes vivants, formés de molécules déjà orientées, peuvent réaliser la formation de nouvelles molécules orientées. On a bien essayé de faire intervenir dans les réactions de synthèse des agents physiques dissymétriques, par exemple, la lumière polarisée circulairement. On pouvait espérer dans ces conditions réaliser plus facilement la formation d'un des deux isomères; il n'en a rien été jusqu'ici, et provisoirement tout au moins, l'intervention de la vie semble bien nécessaire à la formation d'un composé optiquement actif.

Il est donc très vraisemblable que les pétroles ont une origine organique. Encore serait-il nécessaire, pour admettre les hypothèses d'Engler ou de Krömer et Spilker, de vérifier avant tout que les pétroles synthétiques formés dans leurs expériences sont doués du pouvoir rotatoire.

TRAITEMENT DES PÉTROLES BRUTS

Certains pétroles peuvent être employés à l'état brut pour le chauffage; par exemple, l'huile du Texas. Mais dans l'immense majorité des cas, ils constituent des produits trop complexes ou trop impurs pour pouvoir être utilisés, et l'on doit au préalable les soumettre à la distillation, de manière à les diviser en fractions plus homogènes, bouillant entre des limites de températures plus restreintes.

Soumis à l'action d'une élévation progressive de température, les pétroles bruts dégagent tout d'abord des gaz combustibles non condensables, que l'on conduit sous les chaudières; puis on condense des parties légères appelées d'abord *éther de pétrole*, puis *benzine brute* ou *naphte*; viennent ensuite les *pétroles lampants*, les *huiles intermédiaires*, les *huiles de graissage* ou *huiles à paraffine*. Ces différentes portions sont enfin généralement rectifiées, les plus légères par fractionnement dans des colonnes à plateaux, les plus lourdes pour en retirer les parties solides à la température ordinaire et dénommées, suivant leur consistance, *vaseline* ou *paraffine*.

La distillation des pétroles bruts s'effectue le plus souvent d'une



manière intermittente dans de grandes chaudières en tôle horizontales à réaction circulaire ou elliptique et contenant de 500 à 1 000 hectolitres. En Amérique, on emploie surtout des chaudières rectangulaires à fond ondulé.

La distillation est terminée en injectant un courant de vapeur d'eau surchauffée pendant quelques heures de manière à chasser toutes les parties volatiles ; on doit ensuite laisser refroidir le résidu avant de le décanter dans les réservoirs, afin d'éviter son inflammation ; il faut enfin laisser la chaudière revenir à la température ordinaire avant d'y introduire une nouvelle charge d'huile brute, qui contient des portions volatiles très inflammables.

Certaines usines réalisent la distillation continue au moyen d'une série de chaudières cylindriques plus petites, contenant par exemple 100 hectolitres, placées les unes à côté des autres à des niveaux progressivement de plus en plus bas. Le pétrole brut est amené à la chaudière supérieure et s'écoule de cornue en cornue en distillant progressivement des parties de moins en moins volatiles. On réalise ainsi une économie importante de temps et de combustible ; mais ce procédé ne convient qu'aux grandes installations et nécessite d'énormes approvisionnements (Ehram).

Plusieurs procédés ont été proposés dans ces dernières années pour remplacer la distillation dans les grandes chaudières. On peut employer par exemple des appareils à distillation continue en forme de colonnes à plateaux (système Schuchow), ou produire la distillation du pétrole, déjà débarrassé dans une première cornue de ses parties les plus volatiles, par un double jet de vapeur d'eau surchauffée qui pulvérise la veine liquide : les vapeurs sont classées dans des déphlegmateurs et le résidu est séparé (système Rossmöessler).

Décomposition pyrogénée des pétroles. — Lorsqu'on soumet les vapeurs de pétrole à l'action d'une température élevée, on observe le même phénomène que nous avons déjà signalé à plusieurs reprises dans la distillation du bois ou de la houille : la décomposition de la molécule carburée en parties plus volatiles et en parties plus condensées. Ce phénomène se produit toutes les fois que l'on essaie de distiller à feu nu les résidus de pétrole après la distillation des pétroles lampants : le point d'ébullition élevé de la portion restante oblige à chauffer fortement les parois de la chaudière, qui peuvent être portées au rouge sombre ; il en résulte une surchauffe des vapeurs et leur dédoublement en fractions beaucoup plus volatiles. Cette décom-



position, observée pour la première fois accidentellement dans une usine américaine, a été désignée sous le nom de *cracking*. Suivant les produits que l'on se propose d'obtenir à la distillation, on cherche à la favoriser ou à l'éviter : on l'utilise quand on veut augmenter le rendement des huiles destinées à l'éclairage (bien que les produits obtenus lors du *cracking*, formées en majeure partie de carbures éthyléniques C^nH^{2n} , soient toujours inférieurs comme qualité aux huiles naturelles). On l'évite au contraire en opérant la distillation dans un courant de vapeur surchauffée toutes les fois que l'on veut conserver dans leur intégrité les produits lourds, pour la préparation des huiles de graissage.

La pression dans le vase distillatoire a naturellement une grande influence sur la décomposition : une augmentation de pression la favorise en élevant la température d'ébullition ; le procédé a été utilisé tout d'abord sur les huiles de schiste. Au contraire, l'emploi de la distillation dans le vide permet de l'éviter à peu près complètement.

La décomposition obtenue par un chauffage brutal à feu nu produit toujours la séparation de carbone libre qui constitue le résidu final du *cracking*-process et que l'on désigne sous le nom de *coke de pétrole*. M. Ragosin a trouvé qu'en produisant la distillation des huiles lourdes à l'aide de vapeur de benzine, au lieu de vapeur d'eau, dans un appareil spécial, on évitait la formation de carbone libre, et l'on obtenait seulement de la paraffine à partir de pétroles russes qui n'en contenaient pas primitivement.

En définitive, voici quels sont les procédés mis en œuvre dans le traitement des pétroles :

Une première distillation accomplie dans les grandes cornues donne des produits que l'on sépare en deux portions : la première, passant au-dessous de 160° , constitue l'essence ou benzine brute ; on la rectifiera ultérieurement dans des colonnes Savalle ; de 160° à 300° on recueille les pétroles lampants que l'on classe généralement en trois catégories successives suivant leurs densités : $0,730 - 0,770$; $0,770 - 0,800$ et $0,800 - 0,810$; enfin le résidu est transvasé après refroidissement pour être traité de deux manières différentes, suivant qu'on veut préparer des produits pour l'éclairage ou des huiles de graissage : dans le premier cas, on distille à feu nu pour obtenir le *cracking* ; il se dégage des gaz combustibles, des produits condensables, et il reste du coke. Dans le second cas, on distille dans un courant de vapeur d'eau surchauffée, ou dans le vide : il reste comme résidu des huiles paraffineuses.



Les essences sont rectifiées une deuxième fois dans des colonnes, en utilisant pour le chauffage la chaleur de condensation des pétroles lampants : les produits rectifiés sont divisés suivant leurs points d'ébullition en :

<i>Ether de pétrole</i> bouillant de	35 à 70°	$d = 0,650$ à $0,660$;
<i>Gazoline</i>	— 70 à 80°	$0,660$ à $0,670$;
<i>Benzine légère</i>	— 80 à 100°	$0,670$ à $0,707$;
<i>Essence de pétrole</i> ou <i>ligroïne</i>	100 à 120°	$0,707$ à $0,722$;
<i>Huile à dégraisser</i>	— 120 à 150°	$0,722$ à $0,750$.

Les rendements en essence légère et en pétrole lampant varient énormément suivant l'origine des pétroles. D'une manière générale, ils sont beaucoup plus élevés avec les huiles américaines qu'avec les huiles russes. Les produits russes¹ sont préférés aux produits américains pour l'emploi dans les moteurs à explosion ; par contre, ils sont inférieurs pour l'éclairage, ce qui tient à leur proportion élevée en carbures cycliques : la flamme d'un pétrole est d'autant plus blanche qu'il est plus riche en carbures gras saturés.

Le résidu des pétroles russes dont on a distillé l'essence et l'huile lampante est désigné sous le nom de *mazout* (en Roumanie, *pacoura*) ; c'est un produit très intéressant pour le chauffage industriel².

Raffinage. — La distillation est, en général, suivie d'un traitement chimique destiné à éliminer des impuretés acides ou basiques, et souvent aussi à faire disparaître la couleur ou l'odeur des produits.

On emploie dans ce but un traitement à l'acide sulfurique concentré (5 p. 100 environ du poids du pétrole) qui se combine aux produits basiques et donne également avec une partie des carbures non saturés des dérivés sulfonés. On lave ensuite à l'eau, puis à la soude étendue à 5 p. 100, qui dissout les produits sulfonés. On fait ensuite un dernier lavage à l'eau, et l'on sèche finalement les produits décantés sur du carbonate de potasse ou simplement par filtration sur de la sciure de bois. L'acide sulfurique ayant servi au raffinage est utilisé pour la préparation du sulfate d'ammoniaque.

Le traitement à l'acide sulfurique agit aussi comme décolorant ; dans les raffineries américaines on complète la décoloration par une exposition à la lumière dans des vases plats ; on peut aussi employer

¹ Les pétroles russes produisent d'ailleurs très peu d'essence légère telle qu'en demande l'industrie automobile. On s'adresse pour cet usage aux pétroles d'Amérique ou de Roumanie.

² Voyez plus loin page 382.



le permanganate de potasse en solution aqueuse sulfurique ; ce réactif agit de plus comme désodorisant. Enfin on utilise encore la filtration sur terre argileuse ou sur noir animal.

Propriétés des pétroles. — **DENSITÉ.** — La densité des produits rectifiés augmente régulièrement en même temps que leur température d'ébullition moyenne. Elle varie de 0,650 pour l'éther de pétrole à 0,900 pour les huiles de graissage. Les mazouts atteignent 0,935.

COEFFICIENT DE DILATATION. — Le coefficient de dilatation des pétroles est très élevé. C'est un caractère dont il est extrêmement important de tenir compte, car les fûts ou les bidons trop complètement remplis risquent de se briser par une élévation ultérieure de température. Voici les coefficients de dilatation de quelques huiles brutes d'après Holde¹.

PROVENANCE	DENSITÉ	K
Canada	0,828	0,000843
Schwabweiler	0,829	0,000843
—	0,861	0,000858
Galicie Occidentale.	0,885	0,000775
Valachie	0,901	0,000748
Wietze	0,955	0,000647

On remarque que la dilatation diminue quand la densité augmente. En prenant comme valeur par excès 0,000.900, on voit que si l'on prévoit une augmentation de température possible de 50° il faut laisser un espace libre égal à 5 p. 100 du volume du liquide.

VOLATILITÉ. — La volatilité des différents produits retirés du pétrole est extrêmement variable. On cherche autant que possible à avoir des produits rectifiés passant à la distillation entre des limites restreintes de température. Cette homogénéité est surtout importante pour les essences destinées à alimenter d'air carburé les moteurs à explosion, la proportion de vapeur inflammable dans le mélange explosif diminuant progressivement à mesure que diminue la volatilité du liquide.

INFLAMMABILITÉ. — Suivant leurs compositions, les pétroles possèdent à une température donnée une tension de vapeur plus ou moins

¹ Holde, *Traité d'analyse des huiles minérales*, traduit par L. Gautier, Paris, 1909.



grande. Quand cette tension est suffisante pour que l'air saturé forme un mélange détonnant, le pétrole devient inflammable à distance à l'aide d'une flamme. Si la température s'élève, la tension de vapeur augmente et le danger d'inflammation s'accroît. On appelle degré d'inflammabilité d'un pétrole la température à partir de laquelle sa vapeur forme avec l'air un mélange détonnant.

Les pétroles dont le degré d'inflammabilité est inférieur à la température ordinaire ne doivent pas être maniés au voisinage d'une flamme. Voici les degrés d'inflammabilité des essences de pétrole :

Points d'ébullition.	50-60°	60-78°	70-88°	80-100°	80-115°	100-115°
Degré d'inflammabilité.	— 58°	— 39°	— 45°	— 22°	— 21°	— 10°

Le point d'inflammabilité varie naturellement pour un même pétrole, avec la pression atmosphérique ; il dépend aussi dans une certaine mesure du modèle d'appareil qui a servi à faire la détermination.

Le point d'inflammabilité minimum admis en France pour les pétroles lampants est de 35°. Pour obtenir ce degré on doit éliminer complètement les carbures légers volatils. On y parvient en faisant circuler le pétrole de haut en bas dans des colonnes à plateaux traversées par un courant de vapeur sèche qui entraîne les essences. C'est ce que l'on appelle « donner de l'inflammabilité ».

Les résidus de distillation des pétroles ou mazouts ont un point d'inflammabilité très élevé, variant de 110 à 150°.

POUVOIR CALORIFIQUE. — Le pouvoir calorifique des pétroles est en moyenne de 11000 calories. Il varie peu suivant la provenance et suivant la volatilité, ce qui doit être puisque le rapport du nombre des atomes de carbone aux atomes d'hydrogène est toujours sensiblement de 1/2. Cependant on peut dire qu'en général les pétroles américains sont un peu supérieurs sous ce rapport aux pétroles russes.

Le pouvoir calorifique déterminé expérimentalement avec la bombe Mahler est toujours inférieur au chiffre théorique que l'on pourrait calculer d'après l'analyse quantitative en faisant la somme des pouvoirs calorifiques du carbone et de l'hydrogène, la différence correspondante à la chaleur de formation des carbures.

M. P. Lemoult a donné une méthode de calcul des chaleurs de combustions des composés organiques qui pourrait s'appliquer immédiatement au pétrole : il a trouvé¹ que la chaleur de combus-

¹ P. Lemoult, *Bull. Soc. Chim.*, (3), **31**, 221 ; 1904.



tion (moléculaire) d'un carbure quelconque, saturé, benzénique ou naphtéinique, de formule C^xH^y , était représentée très exactement par la formule :

$$C = 102 x + \frac{55}{2} y.$$

On en déduit immédiatement la chaleur de combustion d'un pétrole dont on représenterait par C^xH^y la composition globale. On trouve ainsi pour un carbure exclusivement naphtéinique ($\frac{y}{x} = 2$) : $C = 11.214$ par kilogramme. Si le pétrole contient des carbures saturés, $\frac{y}{x}$ est supérieur à 2, et la valeur de C devient plus forte.

Utilisation du pétrole. — En laissant de côté les applications à l'éclairage et aux huiles de graissage, les emplois du pétrole comme combustible industriel sont intéressants à deux points de vue :

Les pétroles légers servent à préparer l'air carburé pour l'alimentation des moteurs à explosion. Cet emploi correspond à une consommation considérable : elle était déjà en 1908 de plus de 500 mètres cubes d'essence par jour pour l'industrie automobile.

Les pétroles lourds peuvent être brûlés directement sous les chaudières et remplacer la houille. On utilise à cet effet principalement les résidus de pétrole, les mazouts dont le prix est peu élevé comparativement, et dont le point d'inflammabilité très élevé rend le maniement très sûr. Cette application prend de jour en jour plus d'importance car elle entraîne de nombreux avantages.

A cause de son pouvoir calorifique élevé et de la bonne utilisation qu'on peut en faire, le pétrole dégage dans un foyer, à poids égal, sensiblement plus de chaleur que la houille : le rapport est d'après M. H. Le Chatelier de $\frac{3}{2}$. On peut compter qu'un kilogramme de mazout fournit 12,5 kg. de vapeur.

L'allumage des foyers à pétrole, que nous étudierons plus loin en détail (p. 485) est très rapide, et leur réglage très facile. On peut donc mettre une chaudière très rapidement en pression, augmenter ou modérer à volonté la production de chaleur, et quand cela est nécessaire, éteindre le feu immédiatement.

La conduite et la surveillance des brûleurs à pétrole est très simple, un homme suffit pour une batterie de 8 à 10 chaudières. Comme on n'est pas obligé d'ouvrir les portes des foyers pour introduire le combustible, la température des chaufferies est beaucoup



moins élevée ; en même temps on évite la déperdition de chaleur correspondante.

La combustion se produit sans fumée, sans suie, sans poussières, sans escarbilles ou étincelles.

Enfin il n'y a pas de place perdue pour le magasinage, et le remplissage des réservoirs se fait avec une extrême rapidité.

Ces avantages rendent le pétrole encore plus précieux pour le chauffage des locomotives et des bateaux à vapeur que pour celui des chaudières fixes. En Russie et en Amérique, la traction sur de nombreuses voies ferrées se fait avec chauffage au pétrole. Cependant les progrès de la traction électrique ne permettent pas de penser que cette application soit appelée à un grand développement, tout au moins dans les pays éloignés des gisements comme la France ¹.

Il n'en est pas de même à bord des navires : la facilité et la rapidité de l'approvisionnement, la puissance sous un volume donnée, l'élasticité du chauffage permettant des coups de feu rapides, l'absence de fumée rendent le pétrole particulièrement précieux à bord des bâtiments de guerre, sinon pour remplacer totalement la houille, au moins pour s'y substituer à certains moments ou y superposer son action. On peut craindre cependant que la température extrêmement élevée obtenue dans ces conditions ne détermine une altération rapide des chaudières, tout au moins de celles qui ne sont pas spécialement disposées pour l'usage exclusif du pétrole, et où l'on veut utiliser le chauffage mixte.

En revanche, le pétrole conserve tous ses avantages pour l'alimentation des fours métallurgiques ; il est déjà très apprécié à ce point de vue en Amérique et en Russie, et il est vraisemblable que cette application se développera et se généralisera de plus en plus.

Il est du reste permis de se demander si l'utilisation du pétrole au chauffage des chaudières se développera beaucoup : déjà apparaît une solution beaucoup plus élégante et théoriquement au moins bien plus économique avec le moteur Diesel : il semble bien que le perfectionnement et le développement des moteurs à explosion à huile lourde soit la solution de l'avenir ; mais quel que soit son mode d'emploi le pétrole n'en deviendrait d'ailleurs que plus nécessaire ².

¹ Le prix du mazout à Bakou est de 3 francs la tonne ; pour le produit rendu en France, il s'élève à 185 francs, dont près de la moitié d'ailleurs (90 francs) représente le droit de douane.

² Il faut remarquer cependant que le goudron de houille, dont les usines à gaz et les cokeries produisent d'énormes quantités, paraît devoir remplacer avantageusement le mazout, soit pour le chauffage des chaudières ou des fours, soit avec les moteurs Diesel. Voir p. 492.



B. — LES COMBUSTIBLES ARTIFICIELS

§ 1. — LES HUILES DE SCHISTES

La première usine de distillation des schistes bitumineux fut installée en France, à Autun, en 1837, par le physicien suisse Selligues; quelques années plus tard, James Young installa en Écosse des distilleries analogues, mais le boghead qu'il exploitait augmentant rapidement de valeur en raison du développement de l'industrie du gaz, on s'aperçut qu'on pouvait le remplacer par des schistes maigres qui abondaient dans le pays; dès lors, l'industrie se développa rapidement et devint florissante, bien qu'elle ait eu à lutter dans ces dernières années contre la concurrence des pétroles.

Les huiles de schistes, soumises au raffinage, donnent des parties légères utilisées comme huiles d'éclairage ou comme combustibles, surtout dans les moteurs à explosion. Cependant l'intérêt principal des exploitations de schistes étant la production de la paraffine, nous ne ferons qu'indiquer très brièvement les caractéristiques de cette industrie¹.

Le carbone et l'hydrogène qui existent dans les schistes maigres n'y sont pas combinés sous forme de carbures, car les dissolvants habituels de ces corps ne peuvent rien leur enlever; les carbures ne se forment donc que dans la distillation pyrogénée. D'autre part, celle-ci ne doit pas être conduite trop brutalement, de manière à éviter l'influence décomposante d'une température trop élevée sur les vapeurs que l'on se propose de recueillir.

Les schistes maigres, renfermant de l'azote, donnent à la distillation de l'ammoniaque, mais il ne s'en dégage qu'une très faible proportion avec les vapeurs carburées: la plus grande partie de l'azote reste dans le résidu, qu'il suffit de chauffer au rouge pour obtenir un rendement à peu près intégral en ammoniaque. On s'arrange donc pour conduire la distillation assez doucement au début, afin

¹ Voir G. Chesneau, *Ann. Min.*, (9), 3, 617; 1893. — Ehram, *Fabrication des huiles minérales et pyrogénées*, Paris, 1907.



d'éviter la décomposition des vapeurs hydrocarbonées, et l'on termine au rouge blanc pour récupérer la totalité de l'ammoniaque.

On emploie à cet effet, actuellement, les cornues W. Young et Beilby. Elles sont placées verticalement au nombre de huit dans un four alimenté par des gazogènes à récupération d'ammoniaque. Chaque cornue se compose de trois parties : la partie inférieure est un cylindre vertical en terre réfractaire chauffé au rouge blanc dans le foyer ; sur ce cylindre s'emboîte une deuxième pièce en fonte, chauffée au rouge sombre. Enfin un caisson de même métal termine à la fois 4 cornues voisines. Le chargement s'effectue par la partie supérieure du caisson ; les fragments de schistes pénètrent dans la partie moyenne, où ils dégagent les produits volatils carbonés ; le résidu tombe dans la partie inférieure où, sous l'influence de la température élevée à laquelle il se trouve portée, il abandonne le restant de son azote à l'état d'ammoniaque. Les vapeurs qui sortent de l'appareil sont conduites dans des condenseurs horizontaux refroidis par une circulation d'air ; elles s'y condensent en partie en donnant des goudrons ou huile brute et des eaux ammoniacales, tandis qu'il se dégage des gaz non condensables entraînant des vapeurs de carbures volatils. Ces gaz sont conduits dans deux tours remplies de coke où l'on fait couler de l'huile lourde qui dissout les produits volatils, que l'on récupérera par distillation.

Le goudron de schistes doit être fractionné et purifié. Cette purification est assez pénible, elle exige des lavages acides et alcalins alternés avec des distillations. On commence par fractionner le goudron par distillation sur de la soude caustique, dans un courant de vapeur d'eau surchauffée, et l'on termine en faisant progressivement le vide. On obtient successivement de la *benzine*, des *huiles légères* et des *huiles lourdes*. A la fin de la distillation, qui s'opère généralement dans une cornue plus petite, il passe des *huiles rouges* contenant du chrysène.

Les produits fractionnés sont traités par l'acide sulfurique concentré, qui se combine aux produits basiques et aux oléfines en donnant des produits goudronneux qui se déposent peu à peu. On attend quelques heures pour que la précipitation soit complète, puis on fait un traitement à la lessive de soude à 36° B. et l'on attend de nouveau plusieurs heures, il se produit une seconde séparation de goudron. Les huiles ainsi traitées sont redistillées dans un courant de vapeur d'eau, puis on recommence sur elles les traitements successifs à l'acide sulfurique et à la soude, enfin on les distille une



dernière fois. On obtient ainsi des *huiles légères* et des *huiles lampantes* employées pour l'éclairage ou les moteurs, des *huiles intermédiaires*, et dans les résidus des *huiles de paraffine* d'où ce carbure cristallise par repos.

Les schistes bitumineux, tels qu'il en existe aux environs d'Autun, sont traités d'une manière à peu près identique. Cependant on doit remarquer qu'ici les carbures liquides proviennent de la décomposition du bitume qui existe tout formé dans le minéral, et peut en être extrait au moyen de dissolvants convenables. Il n'est donc pas nécessaire d'élever beaucoup la température (400-450°) pour obtenir une abondante distillation. Néanmoins quand le bitume est totalement décomposé, il reste un résidu d'où une nouvelle élévation de température fait encore distiller des huiles légères.

On obtient ainsi, comme avec les schistes d'Écosse, un goudron semi-liquide, noir brun, composé principalement de carbures saturés et de carbures éthyléniques, mais renfermant d'autres carbures et surtout des produits phénoliques dont la proportion peut atteindre 20 p. 100; il contient également des combinaisons sulfurées.

On distille ce goudron dans des chaudières en fonte, dans un courant de vapeur d'eau surchauffée, et en s'aidant du vide pour terminer l'opération. Les différentes fractions sont traitées à l'acide sulfurique concentré et à la soude, en recommençant alternativement plusieurs fois les distillations et les traitements chimiques.

Les produits obtenus sont désignés suivant leurs densités sous les noms de *benzine*, *huile solaire*, *huiles rouges*, *huiles de créosote*, *huiles de paraffine*. Les deux premiers seuls sont employés comme combustibles.

§ 2. — LE BENZOL

On désigne sous le nom de *benzol* la portion légère des liquides neutres qui se forment par distillation de la houille. Ce liquide est composé de benzène et de ses premiers homologues : toluène et xylènes, ainsi que de produits basiques et phénoliques dont on le débarrasse par des lavages successifs à l'acide sulfurique et à la soude.

On caractérise la pureté d'un benzol par la proportion du produit qui passe à la distillation avant 100°. Le benzol est dit à 90 p. 100 par exemple si les 9/10 passent avant 100°.

Quand les gaz de la houille, au sortir des appareils distillatoires, se refroidissent jusqu'à la température ordinaire, la partie la moins



volatile des vapeurs qu'ils contenaient se condense à l'état de goudron. Mais une autre partie reste mélangée au gaz de telle manière que celui-ci soit en équilibre avec le goudron condensé, c'est-à-dire saturé de ses vapeurs. Comme le benzol représente la portion la plus volatile des produits formés, ce sera lui qui formera la majorité des vapeurs entraînées ; et comme d'ailleurs le volume du gaz de houille est considérable par rapport à celui du goudron, on conçoit que la proportion du benzol en vapeurs, par rapport à celle qui s'est condensée, soit très forte, de 15 à 20 fois plus considérable en pratique.

Pendant longtemps le benzol commercial provenait exclusivement des usines à gaz, qui l'obtenaient en distillant les goudrons ; sa production était donc limitée, et son prix trop élevé pour qu'on puisse l'utiliser comme combustible ; on ne pouvait songer d'autre part à le retirer du gaz d'éclairage, puisque c'est précisément au benzol que celui-ci doit la plus grande partie de son pouvoir éclairant.

La question a changé complètement quand on a imaginé les fours à coke à récupération de sous-produits ; non seulement ces fours produisaient des quantités énormes de goudrons, mais comme le gaz n'était pas employé à l'éclairage, on pouvait sans inconvénient lui retirer son benzol. Ce gaz en renferme environ 7 p. 100 de son poids ; on peut en extraire la presque totalité, et arriver à un rendement de 4 à 5 kilogrammes par tonne de houille distillée.

Pour réaliser cette extraction, on met à profit la grande solubilité de benzol dans les huiles lourdes de goudron de houille passant entre 200 et 300°. Ces huiles sont formées elles-mêmes de carbures aromatiques homologues du benzène ou de séries voisines, mais leur tension de vapeur est sensiblement nulle à la température ordinaire.

Voici sommairement (fig. 80, p. 389) quelle est l'installation des cokeries allemandes, d'après une étude de M. Simmersbach¹ analysée par M. A. Grebel dans le *Génie Civil*².

Le gaz est lavé méthodiquement dans trois colonnes dans lesquelles circule en sens inverse l'huile lourde, qui ruisselle sur des claies en bois du système Zschöke, composées de lames rangées parallèlement en forme de claires-voies, et superposées alternativement suivant deux directions rectangulaires. Ce dispositif multiplie la surface du liquide et assure un contact intime avec le gaz à laver, sans causer de perte de charge. L'huile fraîche est versée à la partie supérieure de la troisième colonne, d'où sort le gaz épuré, au moyen d'un dispositif spé-

¹ *Z. Deut. Ing.*, 6 janvier 1910.

² *Gén. civ.*, 56, 381 ; 1910.



cial assurant une distribution régulière et facilement réglable ; une pompe la recueille au bas de cette colonne et la remonte sur la deuxième d'où elle passe sur la première pour se trouver en contact avec le gaz frais. Elle pénètre ensuite dans des échangeurs de température, qui la portent à 75-80° aux dépens de la chaleur abandonnée par l'huile débenzolée sortant de la colonne distillatoire ; puis elle passe dans un réchauffeur à vapeur d'où elle sort à la température de 125° pour pénétrer dans une colonne à distillation continue, où elle se dépouille du benzol et de la vapeur d'eau dont elle s'était chargée ; elle passe enfin en sens inverse dans l'échangeur de température, où elle se refroidit à 60° environ, et dans un réfrigérant à eau qui la ramène à la température ordinaire ; elle est alors renvoyée aux laveurs à claires pour recommencer le même cycle.

Les vapeurs sortant de la colonne à distiller se divisent après condensation en deux couches, l'une aqueuse, l'autre qui est du benzol à 50 p. 100. Celui-ci est fractionné dans une deuxième colonne, qui le transforme en benzol à 90 p. 100. Il ne reste plus qu'à le soumettre à l'épuration chimique par lavage à l'acide sulfurique concentré, puis à la lessive de soude, et à le rectifier une dernière fois pour la livrer à la consommation.

En France, la société Lorraine de carbonisation a installé à Aubry (Nord), sous la direction de M. Mallet, une usine comportant à peu près la même suite d'opérations : le gaz est lavé dans des colonnes à plateaux du système Mallet, qui donnent d'excellents résultats mais provoquent une perte de charge sensible ; on emploie d'ailleurs aussi les laveurs Zschöke. On a trouvé que pour obtenir un bon épuisement il ne fallait pas que l'huile se charge de plus de 2 p. 100 de benzol.

La distillation de l'huile benzolée et la rectification du benzol se font méthodiquement sans condensation intermédiaire, de la manière suivante : l'huile sortant des laveurs pénètre, après s'être réchauffée dans un échangeur, à la partie supérieure d'une colonne à 10 plateaux, de 1,60 m. de diamètre ; les vapeurs produites sont conduites dans l'échangeur où elles se refroidissent en partie aux dépens de l'huile benzolée, et sont ramenées à 98°. Elles passent ensuite à tour de rôle dans 3 colonnes d'analyses, où elles se dépouillent progressivement de la vapeur d'eau et des hydrocarbures lourds, et d'où elles sortent aux températures respectives de 92°, 85° et 79°. Au sommet de la troisième colonne on recueille du benzol léger à 98 p. 100, tandis que les produits de tête plus volatils, formés principalement de sulfure de carbone, sont aspirés par une cheminée. Les benzols



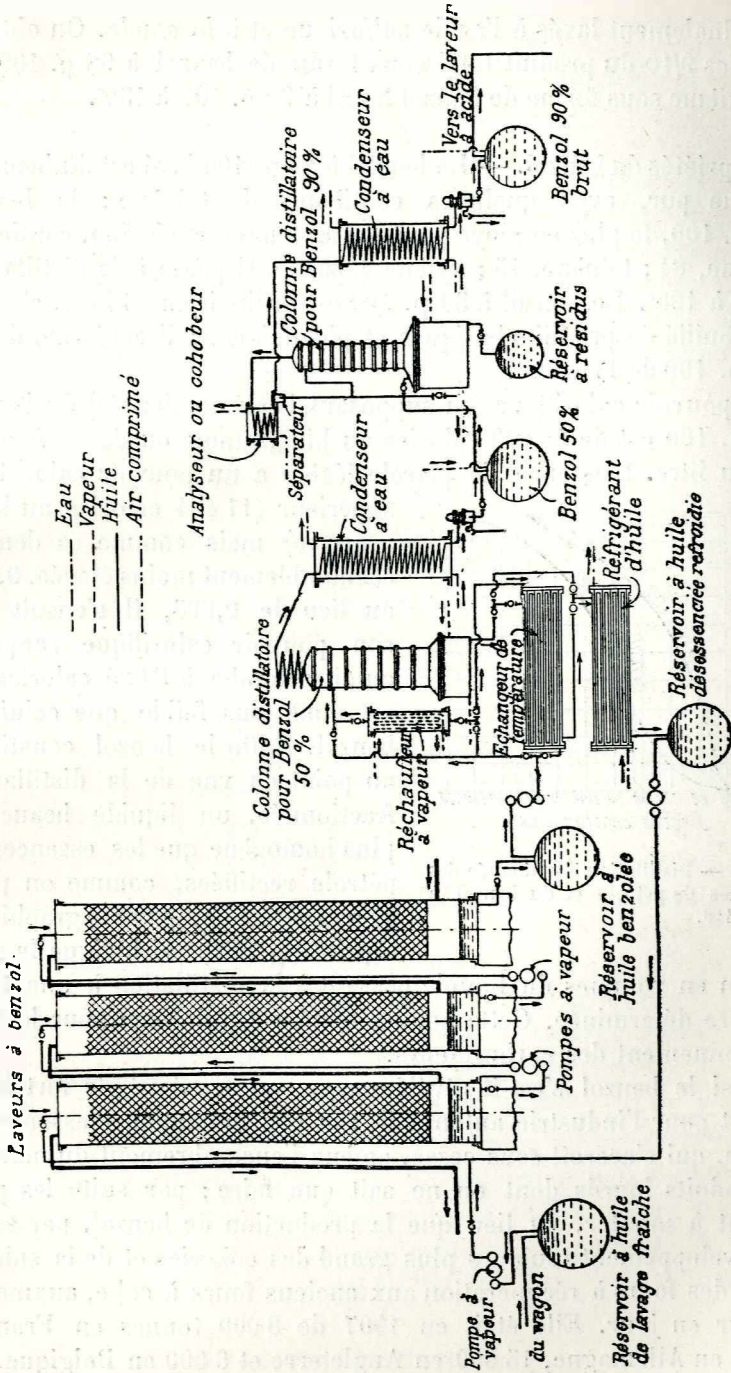


Fig. 80. — Dispositif d'extraction et de rectification du benzol.



sont finalement lavés à l'acide sulfurique et à la soude. On obtient ainsi les 9/10 du produit total sous forme de benzol à 98 p. 100, et un dixième sous forme de benzol lourd à 90 p. 100 à 150°.

Propriétés du benzol. — Le benzol à 98 p. 100 lavé est du benzène presque pur, avec quelques centièmes de toluène ; le benzol à 90 p. 100, le plus employé pour les moteurs à explosion, contient : benzène, 84 ; toluène, 15 ; xylène 1 partie. Il passe à la distillation de 81° à 120°. Le benzol à 50 p. 100 est ordinairement brut, c'est-à-dire souillé de produits basiques et phénoliques ; il renferme de 60 à 65 p. 100 de benzène.

Le pouvoir calorifique (en supposant l'eau condensée) du benzol à 90 p. 100 est de 10 033 calories au kilogramme ou de 8 879 calories au litre. L'essence de pétrole légère a un pouvoir calorifique

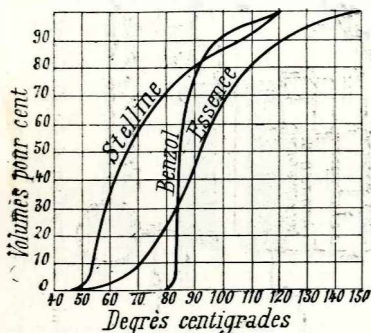


Fig. 81. — Distillation fractionnée des essences de pétrole et du benzol à 90 p. 100.

supérieur (11 464 calories au kilogramme) mais comme sa densité est notablement moins élevée, 0,700 au lieu de 0,883, il s'ensuit que son pouvoir calorifique rapporté au litre tombe à 8 025 calories, il est donc plus faible que celui du benzol. Enfin le benzol constitue, au point de vue de la distillation fractionnée, un liquide beaucoup plus homogène que les essences de pétrole rectifiées, comme on peut s'en rendre compte par le graphique ci-joint (fig. 81) qui indique la proportion en volumes du liquide passant à la distillation à une température déterminée. Cette homogénéité est précieuse pour le bon fonctionnement des carburateurs.

Aussi le benzol s'est-il révélé comme un combustible fort intéressant pour l'industrie automobile ; la consommation d'essence de pétrole, qui s'accroît sans cesse, amène l'encombrement du marché en produits lourds dont on ne sait que faire ; par suite les prix tendent à monter, au lieu que la production de benzol, par suite du développement toujours plus grand des cokeries et de la substitution des fours à récupération aux anciens fours à coke, augmente de jour en jour. Elle était en 1907 de 8 000 tonnes en France, 60 000 en Allemagne, 15 000 en Angleterre et 6 000 en Belgique. Si



l'on pratiquait partout la récupération, ces chiffres deviendraient respectivement 18 000, 200 000, 180 000 et 25 000 tonnes. On voit quel pourrait être l'intérêt de ce combustible. Son seul défaut, en ce qui concerne la carburation de l'air pour l'usage des moteurs à explosion, est la température de solidification élevée (-6 à -8°). On en triomphe facilement, soit en réchauffant le carburateur par les gaz brûlés, soit en additionnant le benzol d'une faible proportion d'essence de pétrole : il suffit de 10 à 15 p. 100 pour abaisser la solidification à -10° ou -15 ; une proportion de 15 à 20 p. 100 de toluène produit le même effet¹. Il faut également, quand on remplace l'essence par le benzol dans un carburateur, diminuer l'orifice de giclage d'environ 10 p. 100.

§ 3. — L'ALCOOL

Nous ne parlerons pas ici de la préparation de l'alcool, qui sera traitée avec tous les développements désirables dans un autre volume de cette encyclopédie, et nous ne dirons que quelques mots de l'emploi de l'alcool comme combustible, surtout pour comparer aux autres produits que nous venons d'étudier.

ALCOOLS	DENSITÉ A 15°	PROPORTION DE DÉNATURANT AJOUTÉ PAR HECTOLITRE D'ALCOOL A 90°				
		Méthylène brut.	Pyridine et bases pyridiques.	Acétone.	Benzol.	Benzine impure.
Français	0,832	7,5	»	2,5	»	0,5
Dénaturé allemand.	0,819	1,5	0,5	0,5	»	»
Moteur —	0,825	0,75	0,25	0,25	2	»
Dénaturé autrichien.	0,835	3,75	0,5	1,25	»	»
Moteur —	0,826	0,5	traces.	traces.	2,5	»
Russe.	0,836	10	0,5	5	»	»
Moteur italien.	0,835	6,5	0,65	2	1	»
Suisse.	0,837	5	0,32	2,2	»	»

L'alcool ne peut être utilisé économiquement qu'après avoir subi la dénaturation, c'est-à-dire après avoir été additionné de matières qui le rendent impropre à la consommation. Les procédés de dénaturation varient suivant les pays : ils ont pour but, non seule-

¹ Gén. civ., 53, 415 : 1908. — Le Gaz, 53, 195 ; 1910.



ment d'en empêcher l'utilisation immédiate comme boisson, mais aussi de rendre impossible ou tout au moins trop coûteuse la régénération d'un alcool comestible par distillation ou traitement chimique.

Les propriétés de l'alcool dénaturé varient évidemment suivant le mode de dénaturation ; voici à ce sujet les procédés adoptés par les différentes nations ¹.

La puissance calorifique de l'alcool dénaturé français est de 5 954 calories au kilogramme, ou de 4 971 calories au litre, c'est-à-dire seulement environ la moitié du pétrole ; l'alcool est donc un mauvais combustible.

On a cependant pu l'employer dans les moteurs à explosion, mais de tous les alcools dénaturés, c'est l'alcool français qui donne les moins bons résultats ainsi qu'il ressort des essais de M. Périssé ² sur un moteur Gobron Brillé qui a développé, à consommation égale, les puissances suivantes :

Alcool moteur allemand	11,7 chevaux.
— — autrichien	10,9 —
— russe	10,5 —
— moteur italien	10 —
— — suisse	9,8 —
— — français	9,75 —

Ces différences proviennent de la forte proportion de méthylène introduite dans les alcools français, qui en diminue le pouvoir calorifique, tandis que les alcools moteurs allemand et autrichien contiennent du benzol qui en élève notablement la puissance.

Aussi préfère-t-on mélanger à l'alcool dénaturé une forte proportion de benzol ; c'est ce que l'on appelle l'*alcool carburé*. On emploie ordinairement le mélange à parties égales, qui possède un pouvoir calorifique de 7 878 au kilogramme, soit 6 728 au litre. On retrouve ainsi une puissance du même ordre que celle obtenue avec l'essence ou le benzol.

¹ Périssé, *Bul. Soc. Ing. Civ.*, 1905, I, 300.

² *Ibid.*



CHAPITRE III

LES COMBUSTIBLES GAZEUX

Les gaz combustibles que l'on peut utiliser dans l'industrie proviennent de sources très diverses. En outre des gaz naturels qui se dégagent spontanément du sol dans certaines régions, on peut en produire artificiellement soit par distillation pyrogénée des combustibles solides ou liquides, soit par réaction de l'air ou de la vapeur d'eau sur le charbon dans les générateurs, soit par carburation de l'air au moyen de vapeurs combustibles, soit enfin par diverses réactions chimiques. C'est dans cet ordre que nous les passerons successivement en revue, en ne consacrant qu'un court exposé au gaz d'éclairage, en raison de ses applications limitées, et en insistant surtout sur les gaz de générateurs qui constituent la solution vraiment industrielle du chauffage au gaz.



A. — LE GAZ NATUREL

Des dégagements importants des gaz combustibles, riches en méthane, se produisent en plusieurs points du globe, le plus souvent au voisinage des terrains pétrolifères, ou aussi comme en Chine dans les sources d'eaux salées. Enfin un gaz analogue se dégage des mines de houille, où il est désigné sous le nom de *grisou*.

Dans ce dernier cas il est naturel d'admettre que le grisou s'est formé en même temps que la houille par la lente décomposition des végétaux préhistoriques, qu'il s'est accumulé et comprimé dans les fissures du charbon, et qu'il se dégage quand on broie le combustible. Mais les sources les plus importantes de gaz naturels se trouvent dans les bassins pétrolifères, principalement en Pensylvanie, et l'explication de leur origine revient à celle de la formation des pétroles, que nous avons précédemment étudiée (p. 373).

Ces dégagements de gaz naturels sont fréquemment utilisés soit pour l'éclairage (avec le manchon incandescent ou après carburation préalable) soit pour le chauffage. C'est ainsi qu'en Chine les gaz sortant des puits d'eau salée sont employés depuis fort longtemps pour la concentration des eaux et l'éclairage des ateliers ; de même dans la région de Bakou les fours à chaux sont chauffés au gaz naturel.

Mais c'est surtout dans les régions pétrolifères des États-Unis que ce combustible a donné lieu à des applications importantes : le gaz est capté et distribué au moyen de canalisations gigantesques jusqu'à des distances considérables. Un grand nombre de villes de Pensylvanie sont ainsi depuis de nombreuses années éclairées et chauffées au gaz naturel, qui sert également au chauffage des fours métallurgiques : c'est ainsi que s'est créée l'industrie de Pittsburg. Tout récemment des entreprises analogues se sont fondées en Louisiane : l'une d'elles devait, en moins de deux ans et demi à partir de 1909, relier les sources gazeuses de Caddo à la Nouvelle-Orléans, dont elle assurait l'éclairage au moyen d'une canalisation de plus de 650 kilomètres de longueur. Le prix du gaz dans cette ville devait



varier de 35 à 45 centimes les 1 000 pieds cubes ; on a même envisagé l'éclairage possible de Saint-Louis dans les mêmes conditions¹.

Certains dégagements de grisou dans nos régions se sont montrés assez réguliers pour pouvoir être utilisés au chauffage. C'est ainsi que le Bulletin de la société industrielle de l'Est² signalait récemment que dans le bassin de Sarrebrück, aux mines de Frankenholz, un sondage a donné lieu à un violent dégagement de grisou, que l'on s'est décidé, au bout de cinq à six mois, à utiliser au chauffage des chaudières. Le débit ayant diminué peu après par suite d'obstructions, on a creusé avec plein succès un second trou à 10 mètres du premier. Le dégagement s'est maintenu alors très constant pendant cinq mois, à raison de 12 mètres cubes par minute, permettant de volatiliser 100 mètres cubes d'eau en vingt-quatre heures.

¹ Voyez G. D. Harris, *Oil and Gas in Louisiana*, Washington, 1910.

² *Bul. Soc. Ind. Est*, 22 : 1909.



B. — LES GAZ DE DISTILLATION

Les édifices compliqués qui représentent les molécules des composés organiques ne possèdent jamais une bien grande stabilité. Sous l'action d'une élévation de température, ils ne tardent pas à éprouver des modifications profondes aboutissant à un autre état d'équilibre, à un autre arrangement des atomes en présence. Ces modifications sont de natures diverses : Tantôt les molécules primitives se soudent les unes aux autres en donnant naissance à des polymères : c'est ce qui se passe — au moins pour une partie — dans l'action de la chaleur sur l'acétylène qui se transforme en benzène; tantôt au contraire la molécule se brise en donnant naissance à des combinaisons plus simples. Mais il semble bien que dans la plupart des cas, sinon dans tous, les deux processus se complètent et que l'on obtient simultanément des combinaisons gazeuses très simples : vapeur d'eau, acide carbonique, oxyde de carbone, méthane, acide acétique, etc., ou des éléments, hydrogène et azote, à côté de molécules très condensées et très riches en carbone, que l'on désigne sous le nom de charbons. Plus la température s'élève, plus les molécules gazeuses se simplifient, et plus la partie solide se rapproche du carbone pur. En somme, la distillation pyrogénée des matières organiques est une opération à deux fins. Nous nous en sommes déjà servis pour l'obtention du charbon de bois et du coke, c'est-à-dire en vue d'utiliser le résidu carbonisé solide; mais la partie gazeuse n'est pas moins intéressante, et parfois même c'est elle qui représente le but principal de l'opération.

On obtiendra donc en principe des gaz combustibles dans la distillation pyrogénée de toutes les matières carbonées, quelle que soit leur origine; le plus souvent ces gaz ne sont que les résidus d'une opération industrielle; nous en avons vu un exemple dans la carbonisation du bois en vase clos et dans la préparation du coke; on devra tâcher d'utiliser leur pouvoir calorifique soit en les brûlant dans un foyer approprié, soit en les employant dans un moteur à explosion. Nous n'envisagerons ici que les gaz préparés industriellement



pour eux-mêmes. Ce sont : le gaz d'éclairage, le gaz d'huile, et le gaz Riché.

La distillation pyrogénée ne s'effectue jamais au point de vue économique qu'avec de très mauvais rendements. Il est nécessaire en effet que le produit à distiller soit enfermé dans un récipient clos ou cornue, chauffé de l'extérieur, ce qui procure déjà des pertes à cause de la conductibilité imparfaite de la paroi; ce qui est plus grave, c'est que le résidu de la distillation, charbon ou coke, doit être expulsé de la cornue pour permettre une nouvelle introduction de combustible neuf. Il en résulte un refroidissement rapide de la cornue et une perte de calories importante par le coke incandescent dont il est pratiquement impossible de récupérer la chaleur¹. Aussi la fabrication d'un gaz combustible par distillation n'a-t-elle sa raison d'être que quand on recherche par-dessus tout sa qualité et son pouvoir éclairant, ce qui est le cas pour le gaz d'éclairage ou le gaz d'huile, ou quand on veut gazéifier des combustibles spéciaux, par exemple les déchets de bois dans les appareils Riché. Dans tous les autres cas il sera plus économique, quand on n'aura en vue que la production définitive de chaleur dans les meilleures conditions, d'employer la gazéification par l'air ou la vapeur d'eau, c'est-à-dire d'utiliser les gazogènes proprement dits dont nous parlerons un peu plus loin.

§ 1. — LE GAZ D'ÉCLAIRAGE

Les houilles employées pour la fabrication du gaz de l'éclairage sont les houilles grasses à longue flamme.

Distillation. — Jusqu'à ces dernières années la distillation s'est faite exclusivement dans des cornues horizontales en terre réfractaire. Ces cornues ont la forme de cylindres à section elliptique, groupées au nombre de 8 ou 9 dans un four chauffé directement ou mieux au gaz de générateur (voir fig. 26 et 26 bis, p. 170-171).

Pour les petites installations on emploie des cornues foncées de 3 mètres de longueur. L'extrémité ouverte est munie d'une tête de

¹ Du moins n'a-t-on pas réussi à le faire jusqu'à présent. Cependant il n'est pas inadmissible qu'on y parvienne un jour et dans ce cas la distillation serait très économique puisque nous avons vu que la décomposition pyrogénée des houilles n'absorbe qu'une quantité de chaleur insignifiante.



cornue en fonte portant une porte ou une plaque de fermeture, et latéralement une tubulure par où s'échappera le gaz produit. Dans les usines un peu plus importantes on préfère l'emploi de cornues de 6 mètres de longueur, ouvertes à leurs deux extrémités qui sortent de chaque côté du four. Cette disposition rend le chargement et le déchargement plus faciles. Le chargement s'effectue soit à la pelle, soit à la cuiller, c'est-à-dire au moyen d'un demi-cylindre de tôle de même longueur que la cornue que l'on introduit dans celle-ci après l'avoir rempli de charbon, que l'on retourne sens dessus dessous et que l'on retire alors laissant la cornue remplie. Le déchargement s'effectue au moyen de rateaux en tôle, ou pour les cornues de 6 mètres, au moyen d'un bouclier que l'on enfonce dans la cornue de manière à chasser et à faire sortir par l'autre extrémité le coke incandescent. Dans les grandes usines le chargement et le déchargement sont effectués mécaniquement.

Nous avons indiqué à propos de la carbonisation de la houille que la manière dont on conduit la distillation influe profondément sur la proportion et sur la qualité des gaz produits. Dans la préparation du gaz d'éclairage, afin d'avoir un bon rendement et un pouvoir éclairant suffisant, on doit introduire la houille dans la cornue fortement chauffée, de manière à produire ce qu'on appelle la *distillation par explosion*. D'ailleurs la température ne doit pas non plus être trop élevée ; on doit la maintenir au voisinage de 1400° . En chauffant trop fort, on décomposerait une partie notable des carbures d'hydrogène condensables qui contribuent principalement au pouvoir éclairant du gaz.

La durée de la distillation dans les cornues est d'environ 4 à 5 heures.

MODIFICATIONS APPORTÉES AUX APPAREILS DE DISTILLATION. — Nouveaux fours à cornues. — Le type classique des cornues horizontales que nous venons de décrire sommairement a été modifié de différentes façons. On a d'abord essayé de faire des *cornues inclinées*, disposition qui devait faciliter le chargement et le déchargement, ceux-ci s'effectuant d'eux-mêmes sous le simple poids du com-

* Cette décomposition des gaz carburés sous l'action d'une température trop élevée ne peut être complètement évitée dans la fabrication courante : elle se produit toujours au contact des parois de la cornue qui sont portées à l'incandescence, et a pour résultat de former sur ces parois un dépôt très dense et compact de *charbon de cornue*.



bustible. Ces fours ont été surtout employés en Allemagne. Il en existe cependant en France plusieurs installations.

On a essayé également des *cornues verticales*, soit continues, soit discontinues. Dans les premières (systèmes Woodall et Duckham, Verdier et Teulon, Young et Glover) les deux extrémités sont munies de robinets, l'un pour l'entrée du charbon, l'autre pour la sortie du coke, qu'il suffit théoriquement de manœuvrer à intervalles réguliers pour que l'opération puisse se continuer indéfiniment sans interruption. L'écueil provient des accrochages qui se produisent presque inévitablement par suite du gonflement du charbon gras. Cependant avec certains charbons anglais on peut les éviter, ce qui explique le succès de ces cornues en Angleterre. Les cornues verticales discontinues ont donné de bons résultats dans les fours Bueb, installés à Dessau. Ces fours se composent de 10 cornues verticales, à section rectangulaire, ayant une forme légèrement conique, évasée vers le bas, ce qui permet le défournement facile du coke ; leur hauteur est de 4 mètres. Le chargement s'effectue très facilement en versant la houille au moyen d'une trémie ; le déchargement s'opère au moyen d'une plaque basculante. La durée de la distillation est de dix à douze heures, soit sensiblement le double de la durée de distillation des cornues horizontales.

Fours à chambres. — Mais la solution qui paraît devoir être celle de l'avenir consiste à remplacer les cornues par des *fours à chambres* analogues aux fours servant à la préparation du coke métallurgique. On a imaginé des fours à chambres verticales, analogues aux fours Appolt, à chambres inclinées ou à chambres horizontales. Les fours des deux premiers types présentent l'avantage d'un déchargement rapide et automatique, quand toutefois il ne se produit pas d'accrochages ; les fours à chambres inclinées ont donné lieu à un assez grand nombre d'applications (systèmes Ries, Klönne, Koppers) ; on leur reproche leur prix d'établissement notablement plus élevé que celui des fours à chambres horizontales, qui semblent bien représenter la solution de l'avenir. Ils sont depuis trois ou quatre ans employés en Allemagne, et l'on vient d'en faire deux installations en France, l'une à Versailles, l'autre à Elbeuf.

Ces fours sont du système Koppers à récupérateurs. Comme on le voit, d'après les figures ci-jointes, ils sont tout à fait analogues aux fours à coke, avec cette seule différence évidente que puisqu'on ne peut pas les chauffer avec les gaz qu'ils produisent, on



cornue en fonte portant une porte ou une plaque de fermeture, et latéralement une tubulure par où s'échappera le gaz produit. Dans les usines un peu plus importantes on préfère l'emploi de cornues de 6 mètres de longueur, ouvertes à leurs deux extrémités qui sortent de chaque côté du four. Cette disposition rend le chargement et le déchargement plus faciles. Le chargement s'effectue soit à la pelle, soit à la cuiller, c'est-à-dire au moyen d'un demi-cylindre de tôle de même longueur que la cornue que l'on introduit dans celle-ci après l'avoir rempli de charbon, que l'on retourne sens dessus dessous et que l'on retire alors laissant la cornue remplie. Le déchargement s'effectue au moyen de rateaux en tôle, ou pour les cornues de 6 mètres, au moyen d'un bouclier que l'on enfonce dans la cornue de manière à chasser et à faire sortir par l'autre extrémité le coke incandescent. Dans les grandes usines le chargement et le déchargement sont effectués mécaniquement.

Nous avons indiqué à propos de la carbonisation de la houille que la manière dont on conduit la distillation influe profondément sur la proportion et sur la qualité des gaz produits. Dans la préparation du gaz d'éclairage, afin d'avoir un bon rendement et un pouvoir éclairant suffisant, on doit introduire la houille dans la cornue fortement chauffée, de manière à produire ce qu'on appelle la *distillation par explosion*. D'ailleurs la température ne doit pas non plus être trop élevée ; on doit la maintenir au voisinage de 1 400°. En chauffant trop fort, on décomposerait une partie notable des carbures d'hydrogène condensables qui contribuent principalement au pouvoir éclairant du gaz.

La durée de la distillation dans les cornues est d'environ 4 à 5 heures.

MODIFICATIONS APPORTÉES AUX APPAREILS DE DISTILLATION. — Nouveaux fours à cornues. — Le type classique des cornues horizontales que nous venons de décrire sommairement a été modifié de différentes façons. On a d'abord essayé de faire des *cornues inclinées*, disposition qui devait faciliter le chargement et le déchargement, ceux-ci s'effectuant d'eux-mêmes sous le simple poids du com-

¹ Cette décomposition des gaz carburés sous l'action d'une température trop élevée ne peut être complètement évitée dans la fabrication courante : elle se produit toujours au contact des parois de la cornue qui sont portées à l'incandescence, et a pour résultat de former sur ces parois un dépôt très dense et compact de *charbon de cornue*.



bustible. Ces fours ont été surtout employés en Allemagne. Il en existe cependant en France plusieurs installations.

On a essayé également des *cornues verticales*, soit continues, soit discontinues. Dans les premières (systèmes Woodall et Duckham, Verdier et Teulon, Young et Glover) les deux extrémités sont munies de robinets, l'un pour l'entrée du charbon, l'autre pour la sortie du coke, qu'il suffit théoriquement de manœuvrer à intervalles réguliers pour que l'opération puisse se continuer indéfiniment sans interruption. L'écueil provient des accrochages qui se produisent presque inévitablement par suite du gonflement du charbon gras. Cependant avec certains charbons anglais on peut les éviter, ce qui explique le succès de ces cornues en Angleterre. Les cornues verticales discontinues ont donné de bons résultats dans les fours Bueb, installés à Dessau. Ces fours se composent de 10 cornues verticales, à section rectangulaire, ayant une forme légèrement conique, évasée vers le bas, ce qui permet le défournement facile du coke ; leur hauteur est de 4 mètres. Le chargement s'effectue très facilement en versant la houille au moyen d'une trémie ; le déchargement s'opère au moyen d'une plaque basculante. La durée de la distillation est de dix à douze heures, soit sensiblement le double de la durée de distillation des cornues horizontales.

Fours à chambres. — Mais la solution qui paraît devoir être celle de l'avenir consiste à remplacer les cornues par des *fours à chambres* analogues aux fours servant à la préparation du coke métallurgique. On a imaginé des fours à chambres verticales, analogues aux fours Appolt, à chambres inclinées ou à chambres horizontales. Les fours des deux premiers types présentent l'avantage d'un déchargement rapide et automatique, quand toutefois il ne se produit pas d'accrochages ; les fours à chambres inclinées ont donné lieu à un assez grand nombre d'applications (systèmes Ries, Klönne, Koppers) ; on leur reproche leur prix d'établissement notablement plus élevé que celui des fours à chambres horizontales, qui semblent bien représenter la solution de l'avenir. Ils sont depuis trois ou quatre ans employés en Allemagne, et l'on vient d'en faire deux installations en France, l'une à Versailles, l'autre à Elbeuf.

Ces fours sont du système Koppers à récupérateurs. Comme on le voit, d'après les figures ci-jointes, ils sont tout à fait analogues aux fours à coke, avec cette seule différence évidente que puisqu'on ne peut pas les chauffer avec les gaz qu'ils produisent, on



leur a adjoint des gazogènes du type Siemens placés en avant, au-dessous de l'aire de défournement.

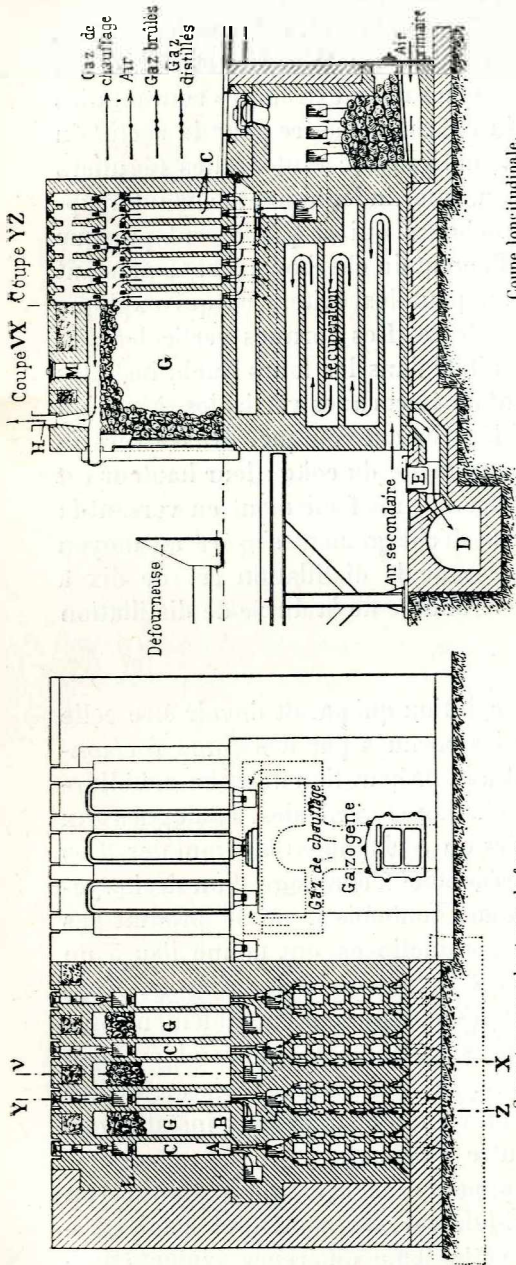


Fig. 82. — Fours Koppers à chambres horizontales pour la fabrication du gaz d'éclairage.

Au-dessous des fours eux-mêmes sont placés les récupérateurs destinés au chauffage de l'air secondaire, et constitués par des conduits horizontaux à l'intérieur desquels circulent en descendant les gaz brûlés, tandis que l'air à chauffer remonte le long des parois. La combustion se fait dans un brûleur à la base des carneaux verticaux C. A la partie supérieure de ces carneaux, les gaz se rendent dans un canal collecteur horizontal en traversant un petit registre que l'on peut manœuvrer de la plateforme du four. On peut ainsi régler individuellement le tirage dans chaque carneau, ce qui permet d'obtenir un chauffage d'une régularité parfaite. Les gaz brûlés redescendent ensuite dans les récupérateurs qu'ils parcourent de haut en bas et s'échappent finalement dans le carneau D qui les conduit à la cheminée, après être passés sous une petite chaudière E

servant à alimenter de vapeur d'eau le gazogène.