ENCYCLOPÉDIE INDUSTRIELLE
Fondee par M.-C. Lechalas, Inspecteur genéral des Ponts et Chaussées en retraite

Les

Combustions Industrielles

LE CONTRÔLE CHIMIQUE DE LA COMBUSTION

PAR

Henri ROUSSET et A. CHAPLET

PARIS
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DE L ECOLE POLY ECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES, ETC.
Quai des Grands-Augustins, 55

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

ENCYCLOPÉDIE DES TRAVAUX PUBLICS

Directeur : G. LECHALAS, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, quai de la Bourse 13, Rouen.

Volumes grand in-8°, avec de nombreuses figures.

Médaille d'or à l'Exposition universelle de 1889
Exposition de 1900 (Voir pages 3 et 4 de la couverture)

OUVRAGES DE PROFESSEURS A L'ÉCOLE DES PONTS ET CHAUSSÉES

M. BECHMANN. *Distributions d'eau* et *Assainissement*. 2e édit., 2 vol. à 20 fr., 40 fr. — *Cours d'hydraulique agricole et urbaine*, 1 vol. . . . . 20 fr.

M. BRICKA. *Cours de chemins de fer de l'Ecole des ponts et chaussées*. 2 vol., 1343 pages et 464 figures . . . . . 40 fr.

M. COLSON. *Cours d'économie politique* : Six livres, chacun. . . . . 6 fr.

M. L. DURAND-CLAYE. *Chimie appliquée à l'art de l'ingénieur*, en collaboration avec *MM. Derôme* et *Feret*, 2e édit. considérablement augmentée, 15 fr. — *Cours de routes de l'Ecole des ponts et chaussées*, 606 pages et 234 figures, 2e édit., 20 fr. — *Lever des plans et nivellement*, en collaboration avec *MM. Pelletan* et *Lallemand*. 1 vol., 703 pages et 280 figures (cours des Ecoles des ponts et chaussées et des mines, etc.) . . . . . 25 fr.

M. FLAMANT. *Mécanique générale* (*Cours de l'Ecole centrale*), 1 vol. de 544 pages, avec 203 figures, 20 fr. — *Stabilité des constructions et résistance des matériaux*. 2e édit., 670 pages, avec 270 figures, 25 fr. — *Hydraulique* (*Cours de l'Ecole des ponts et chaussées*), 1 vol., 2e éd. considérablement augmentée (Prix Montyon de mécanique) ; XXX, — 685 pages avec 130 figures . . . . . 25 fr.

M. GARIEL. *Traité de physique*. 2 vol., 448 figures. . . . . 20 fr.

M. HIRSCH. *Cours de machines à vapeur et locomotives*. 1 vol. 510 pages, 314 fig . 18 fr.

M. F. LAROCHE. *Travaux maritimes*. 1 vol. de 490 pages, avec 116 figures et un atlas de 46 grandes planches, 40 fr. — *Ports maritimes*. 2 vol. de 1006 pages, avec 524 figures et 2 atlas de 37 planches, double in-4° (*Cours de l'Ecole des ponts et chaussées*) . . 50 fr.

M. F. B. DE MAS, Inspecteur général des ponts et chaussées. *Rivières à courant libre*, 1 vol. avec 97 figures ou planches, 17 fr. 50. — *Rivières canalisées*. 1 vol. avec 176 figures ou planches, 17 fr. 50. — *Canaux*, 1 vol. avec 190 figures ou planches. . . . . 17 fr. 50

M. NIVOIT, Inspecteur général des mines : *Cours de géologie*, 2e édition, 1 vol. avec carte géologique de la France ; 615 pages, 429 fig. et un tableau des formations géologiques de 7 pages . . . . . 20 fr.

M. M. D'OCAGNE. *Géométrie descriptive et Géométrie infinitésimale* (cours de l'Ecole des ponts et chaussées), 1 vol., 340 fig. . . . . 12 fr.

M. DE PRÉAUDEAU, Inspect. général des P.-et-Ch., prof. à l'Ecole nat. *Procédés généraux de construction. Travaux d'art*. Tome I, avec 508 fig. 20 fr. Tome II, avec 389 fig. 20 fr.

M. J. RÉSAL. *Traité des Ponts en maçonnerie*, en collaboration avec *M. Degrand*. 2 vol., avec 600 figures, 40 fr. — *Traité des Ponts métalliques* 2 vol., avec 500 figures. 40 fr. — — Le 1er volume des *Ponts métalliques* est à sa seconde édition (revue, corrigée et très augmentée) *Constructions métalliques, élasticité et résistance des matériaux : fonte, fer et acier*. 1 vol. de 652 pages, avec 203 figures, 20 fr. — *Cours de ponts*, professé à l'Ecole des ponts et chaussées : *Études générales et ponts en maçonnerie*, 1 vol. de 410 pages avec 284 figures, 14 fr. — *Cours de ponts métalliques*, tome I, 1 volume de 660 pages avec 375 figures, 20 fr — *Cours de Résistance des matériaux* (Ecole des ponts et chaussées), 120 figures., 16 fr. — *Cours de stabilité des constructions*, 240 figures, 20 fr. — *Poussée des terres et stabilité des murs de soutenement* . . . . . 10 fr.

OUVRAGES DE PROFESSEURS A L'ÉCOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES

M. DEHARME. *Chemins de fer. Superstructure* ; première partie du cours de chemins de fer de l'Ecole centrale. 1 vol. de 696 pages, avec 310 figures et 1 atlas de 73 grandes planches in-4° doubles (voir *Encyclopédie industrielle* pour la suite de ce cours). 50 fr.
On vend séparément : *Texte*, 15 fr.; *Atlas*. 35 fr.

M. DENFER. *Architecture et constructions civiles*. Cours d'architecture de l'Ecole centrale : *Maçonnerie*. 2 vol., avec 794 figures, 40 fr. — *Charpente en bois et menuiserie*. 1 vol., avec 680 figures, 25 fr. — *Couverture des édifices* 1 vol., avec 423 figures, 20 fr. — *Charpenterie métallique, menuiserie en fer et serrurerie* 2 vol., avec 1.050 figures, 40 fr. — *Fumisterie* (*Chauffage et ventilation*). 1 vol. de 726 pages, avec 731 figures (numérotées de 1 à 375, l'auteur affectant chaque groupe de figures d'un numéro seulement). 25 fr. *Plomberie : Eau ; Assainissement ; Gaz*. 1 vol. de 568 p. avec 391 fig. . . . 20 fr.

M. DORION. *Cours d'Exploitation des mines*. 1 vol. de 692 pages, avec 1.100 figures. 25 fr.

M. MONNIER. *Electricité industrielle*, cours professé à l'Ecole centrale, 2e édition considérablement augmentée, 1 vol. de 826 pages ; 404 très belles figures de l'auteur. . 25 fr.

M. Mel PELLETIER *Droit industriel*, cours professé à l'Ecole centrale 1 vol. . . . 15 fr.

MM. E. ROUCHÉ et BRISSE, anciens professeurs de géométrie descriptive à l'Ecole centrale. *Coupe des pierres*. 1 vol. et un grand atlas (avec de nombreux exemples). . . 25 fr.

OUVRAGES D'UN PROFESSEUR AU CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS

M. E. ROUCHÉ, membre de l'Institut. *Eléments de statique graphique*. 1 vol . . 12 fr. 50

MM. ROUCHÉ et Lucien LÉVY. *Calcul infinitésimal*, 2 vol. de 557 et 829 p. (*Enc. indust.*) 15 fr.

(*Voir la suite ci-après*)

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Les Combustions Industrielles

LE CONTRÔLE CHIMIQUE DE LA COMBUSTION

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Tous les exemplaires de l'ouvrage Les Combustions Industrielles *devront être revêtus de la signature du Directeur de l'*Encyclopédie Industrielle *et de la griffe du Libraire.*

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

ENCYCLOPÉDIE INDUSTRIELLE
Fondée par M.-C. LECHALAS, Inspecteur général des Ponts et Chaussées en retraite

Les

Combustions Industrielles

LE CONTRÔLE CHIMIQUE DE LA COMBUSTION

PAR

HENRI ROUSSET ET A. CHAPLET

PARIS
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES, ETC.
Quai des Grands-Augustins, 55
—
1909
TOUS DROITS RÉSERVÉS

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

PRÉFACE

Quoique sa sœur blanche lui ait enlevé un peu de son absolue suprématie d'autrefois, la houille est encore de beaucoup la souveraine dispensatrice de puissance industrielle. Les mines de charbon furent la cause de l'éclosion et du développement des agglomérations de riches cités manufacturières d'Angleterre, de Flandre et de Westphalie. Elles restent une condition *sine qua non* de succès ; l'usine a remplacé l'atelier uniquement parce qu'elle permettait de disposer d'une grande quantité de force motrice peu coûteuse. Un fabricant ne peut soutenir la lutte contre les concurrents que s'il obtient cette force à bas prix. Et c'est la houille qui la lui fournit ; de la quantité consommée dépendront souvent les résultats économiques de l'affaire.

Il semble, par conséquent, qu'après un demi-siècle d'emploi industriel de la houille, on doive savoir parfaitement l'utiliser. Or il est malheureusement indiscutable que, dans les trois quarts des usines, on brûle inutilement, on perd, on gâche de dix à vingt pour cent du charbon consommé. Beaucoup d'industriels ne s'en doutent guère, beaucoup de techniciens donnent à croire qu'ils n'en savent rien ; tous continuent à suivre les bonnes vieilles habitudes. Dans quelques usines modèles où l'on se pique de méthode et de pro-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

grès, on donne quelquefois des primes aux chauffeurs sur l'économie de combustible. Mais on ne contrôle rien de ce qu'ils font on ne leur montre pas comment ils peuvent réaliser ces économies. Et les panaches de fumée qui partent des hautes cheminées emportent dans l'atmosphère jusqu'au cinquième de la chaleur du charbon employé. — Nous ne parlons que de la perte évitable, *très facilement évitable.* —

*
* *

Mais comment peut-on l'éviter ? C'est justement le but de ce travail que d'exposer la méthode à suivre et les moyens à employer pour cela. Peut-être certains lecteurs penseront-ils que des chimistes étaient moins qualifiés que des praticiens du chauffage industriel pour mener à bien la réalisation d'une telle œuvre. Nous croyons au contraire, et allons essayer de le prouver, qu'eux seuls devaient et pouvaient entreprendre la tâche.

On sait combien sont nombreuses les industries dites « chimiques » ; la quantité en augmente toujours, soit par la création de fabrications nouvelles : les procédés électrochimiques par exemple ; soit par l'industrialisation des anciens arts : transformation que fait actuellement subir l'œnologie à la viticulture. Personne ne nie que le concours du chimiste ne soit nécessaire, indispensable, pour y surveiller la fabrication, essayer en petit au laboratoire ce que l'on fera en grand dans l'usine et prévenir ainsi les insuccès, apprécier les quantités de produits réagissants mis en présence, doser les éléments utiles ou nuisibles dans les matières premières et dans les déchets, découvrir la cause des

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

faits imprévus, chercher à perfectionner sans cesse les procédés de fabrication... C'est le contrôle chimique de la fabrication. A la vérité il est malheureusement quelques usines où l'on se passe de chimiste. Mais en compensation il en est d'autres qui en occupent, comme les célèbres établissements de Ludwigshafen ou de Leverkusen, jusqu'à près de deux cents. Et l'on croira sans peine que ces dernières ne marchent que mieux : dans les deux que nous citons, les actionnaires touchent plus de 20 0/0 de dividendes !

Or, en quoi consiste le phénomène de la combustion ; comment est produite cette chaleur, véritable matière première de presque toutes les industries ? Par la *combinaison* du carbone de la houille avec l'oxygène de l'air ; c'est une « réaction » exothermique fournissant mathématiquement et dans tous les cas, pour l'union de 12 parties de carbone et 32 parties d'oxygène, sous forme d'anhydride carbonique, une quantité fixe de chaleur. Ainsi le phénomène de la combustion est d'ordre purement chimique ; il est dans le rôle du chimiste industriel de déterminer les conditions dans lesquelles il s'effectue. Connaissant la quantité totale de chaleur latente de la houille, on doit analyser la façon dont elle se distribue dans les escarbilles, dans la fumée, dans l'ambiance de la chaufferie et dans la vapeur de la machine.

Comme dans toutes les autres réactions utilisées industriellement, pour les mêmes raisons, au même degré de nécessité, il est indispensable dans chaque installation de chauffage industriel d'exercer un *contrôle chimique* rigoureux.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

*
* *

C'est dans le but de prouver clairement tous les avantages d'un tel contrôle, d'exposer les méthodes propres à l'assurer parfaitement, de décrire les appareils nécessaires, qu'après avoir pratiquement organisé et dirigé la surveillance permanente de la chaufferie, nous entreprîmes de coordonner notes et observations personnelles avec ce qui avait été déjà publié sur cette question. Le travail nous paraissait d'autant plus nécessaire qu'à part quelques mémoires parus dans des revues techniques, il n'existe en français aucune monographie de ce sujet.

Notre ouvrage s'adresse surtout à ceux de nos collègues qui s'occupent de chimie industrielle. A part quelques rares exceptions il n'est pas d'usine qui ne comprenne des générateurs de vapeur ou d'autres foyers industriels; par conséquent, dans chacune, le chimiste *doit* s'occuper de la marche de la combustion, en assurer si possible le contrôle régulier. Ce lui est d'autant plus facile qu'il dispose maintenant pour cela de méthodes d'application très facile et d'appareils absolument automatiques.

Nous souhaitons qu'il soit lu aussi par tous les techniciens. Trop souvent les ingénieurs négligent la chimie de la chaufferie; ils ne lui accordent qu'une attention qui ne correspond pas à son importance : le traité magistral de M. Sauvage sur la machine à vapeur, par exemple, contient dans ses deux in-octavo une description complète des générateurs; deux pages à peine sont réservées à l'étude et au contrôle des phénomènes chimiques. Dans la plupart des usines,

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

même les plus importantes stations centrales où l'on s'enorgueillit de chaufferies merveilleusement installées, il n'y a ni laboratoire ni chimiste pour le contrôle de la combustion. Les Associations de propriétaires d'appareils à vapeur sont prospères, riches, puissantes ; elles ont de nombreux états-majors d'ingénieurs, des techniciens-inspecteurs ; aucune n'a, que nous sachions, le moindre chimiste.

La conséquence est que la combustion de la houille s'effectue généralement dans des conditions déplorables. Il nous a été donné, par exemple, de constater pendant toute la fabrication, dans une des deux ou trois plus puissantes sucreries de France, et qui a la réputation — méritée — d'être des mieux installées et dirigées ; il nous a été donné de constater une teneur moyenne de 4 à 6 0/0 d'anhydride carbonique dans les gaz de la combustion. C'est une perte évitable de 25 à 40 0/0 de la houille consommée.

Nous espérons que l'importance des chiffres persuadera de l'importance et de la nécessité d'un contrôle méthodique et continu. Que l'on y songe : nous consommons en France plus de 45.000.000.000 kgr. de houille dont les trois quarts sont utilisés dans les foyers industriels. Or, nul de ceux qui se sont occupés de la question ne nous démentira, on peut chiffrer, en moyenne, à *dix pour cent* au moins l'économie facilement réalisable, pouvant résulter de l'organisation d'un contrôle rationnel ; ce qui au total donnerait aux seuls industriels français *un gain annuel possible de près de cent millions de francs*.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

CHAPITRE PREMIER

DONNÉES HISTORIQUES ET THÉORIQUES

§ 1. — Les réactions de la combustion

1. Anciennes théories. — Les phénomènes de la combustion, la chaleur et la lumière qui l'accompagnent et qui semblent avoir leur siège dans la flamme elle-même, enfin la liaison étroite qui existe entre ces phénomènes et la vie des êtres organisés ont de tous temps frappé au plus haut degré l'attention des hommes. « L'art de produire le feu est le premier degré de notre science ; la connaissance du feu, « maître de « tous les arts, le plus grand bien qui soit pour les « vivants » (1), fut le premier pas dans cette longue suite d'inventions qui ont maîtrisé la nature et fait passer l'espèce humaine de l'état purement animal jusqu'au degré de civilisation atteint par les peuples modernes » (2).

De la pratique des faits, l'esprit humain, par une pente naturelle qui est sa caractéristique, « toute sa dignité et tout son mérite », dit Pascal, passa aux explications de ces faits. Et, même en négligeant l'intérêt

(1) Eschyle. *Prométhée enchaîné.*

(2) Berthelot. *La Révolution chimique : Lavoisier.* Nous empruntons la substance du chapitre et plusieurs passages de ce qui suit à cet ouvrage.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

philosophique de telles recherches, constatons qu'au seul point de vue pratique, elles sont du plus haut intérêt. L'hypothèse ou la théorie peut n'avoir « en soi » aucune valeur, elle provoque néanmoins presque toujours des recherches, la découverte des faits nouveaux. Que ceux-ci en montrent ou non le bien-fondé, ils sont, eux, toujours vrais, et l'on ne manque pas d'en tirer des applications fécondes.

Les anciens avaient classé le feu dans les quatre éléments, parmi lesquels on le mettait au premier rang : « Il était réputé autrefois l'élément actif de toutes choses et le lien entre les trois autres éléments », dit Berthelot. On sait que ces croyances, rajeunies et appuyées sur des expériences en apparence concluantes, devinrent au début des études chimiques un véritable corps de doctrines. D'après Stahl, le feu était une sorte de fluide, le *phlogistique*, contenu dans tous les combustibles et dans tous les métaux : lorsque l'on chauffe un combustible, le phlogistique se dégage en donnant de la chaleur et de la lumière ; lorsque l'on chauffe un combustible avec une « chaux » (un oxyde), il lui cède son phlogistique et régénère le métal.

2. Les travaux de Lavoisier. — Cette théorie, après avoir été regardée comme certaine pendant près d'un siècle, fut renversée de fond en comble par Lavoisier qui montra que les changements de poids et les fixations ou pertes de matières accompagnant la combustion sont inverses de ce que l'on avait supposé jusque-là. Lorsque le charbon brûle et semble disparaître, en réalité sa matière ne se dissipe point ; elle ne perd pas son poids sous forme de chaleur ou de phlogistique. C'est le *charbon* qui s'unit avec une substance

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

matérielle ignorée jusqu'au temps de Lavoisier: l'*oxygène*. Il se forme ainsi un composé nouveau, l'*anhydride carbonique*, dans lequel tout le carbone élémentaire subsiste, et dont le poids est égal à la somme des quantités de carbone et d'oxygène qui ont servi à sa formation.

De sorte qu'en représentant, comme on le fait aujourd'hui, chaque élément réagissant par un « symbole », on peut schématiser la réaction sous la forme d'une égalité:

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

le carbone et l'oxygène forment de l'anhydride carbonique.

Lavoisier fixa définitivement le rôle joué par l'air dans la combustion; on avait de tous temps constaté la nécessité de l'aération, mais sans en pouvoir donner d'explication satisfaisante. En outre, il établit que, dans les phénomènes de combustion, comme dans toutes les actions chimiques, il y a uniquement transformation, sans que rien se perde, ni que rien soit créé. Dans tous les cas, on retrouve, l'opération terminée, les mêmes poids de matières primitivement mis en œuvre.

Les travaux de Proust devaient un peu plus tard (1806) amener la découverte d'une loi non moins importante : « Deux corps, pour former un même composé, se combinent toujours dans le même rapport, c'est-à-dire dans des proportions invariables ». Ainsi la combustion est une action stable, toujours égale à elle-même, la combinaison définie une fois pour toutes de quantités respectives mathématiquement fixes de combustible et de comburant. Et nous pouvons compléter ainsi, d'après les données de l'expérience, l'égalité que nous écrivions précédemment:

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

12 gr. de carbone et 32 gr. d'oxygène forment 44 gr. d'anhydride carbonique.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

3. Les différentes réactions. — C'est là une réaction type ; en réalité, et quoiqu'elle s'applique pratiquement à la plupart des cas, elle ne représente qu'une combinaison particulière entre toutes celles qui peuvent être rattachées au phénomène de la combustion. Le carbone n'est pas le seul corps combustible; c'est ainsi que le gaz d'éclairage, par exemple, contient de l'hydrogène qui brûle en formant de la vapeur d'eau :

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

2 gr. d'hydrogène et 16 gr. d'oxygène forment 18 gr. de vapeur d'eau.

Ce même hydrogène forme avec le carbone un grand nombre de « carbures » qui existent dans la houille : le grisou, le gaz d'éclairage, etc. Il y a, dans leur combustion, formation simultanée d'anhydride carbonique et de vapeur d'eau :

$$C^2H^2 + 5O = 2CO^2 + H^2O,$$

26 gr. d'acétylène et 80 gr. d'oxygène forment 88 gr. d'anhydride carbonique et 18 gr. de vapeur d'eau.

Non seulement les réactions diffèrent ainsi selon la nature des combustibles employés, mais un même produit peut brûler de plusieurs façons selon les conditions mises en œuvre : le carbone, par exemple, s'oxyde d'ordinaire à l'état d'anhydride carbonique; mais, si la quantité d'air est insuffisante, il y a combinaison avec une quantité moindre d'oxygène et formation d'oxyde de carbone :

$$C + O = CO,$$

12 gr. de carbone et 16 gr. d'oxygène forment 28 gr. d'oxyde de carbone.

On voit que, sous son apparente simplicité, le phénomène de la combustion est assez complexe; encore n'avons-nous examiné jusqu'ici qu'un aspect de la

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

question, et non le plus intéressant peut-être au point de vue spécial qui nous occupe plus particulièrement.

§ 2. — Le dégagement de chaleur

4. La nature de la chaleur. — On peut remarquer en effet qu'il manque à toutes nos égalités les chiffres indispensables indiquant la quantité de chaleur dégagée lors de chaque réaction. Dans la combinaison de 12 gr. de carbone avec 32 gr. d'oxygène, il ne se produit pas seulement 44 gr. d'anhydride carbonique ; il se forme également une certaine quantité de cette chaleur que nous voulons utiliser ; on peut, on doit la déterminer en *calories* (1) comme le sont en grammes les corps réagissants. Quel est le nombre de calories ainsi produites ? d'où vient cette chaleur ? et la quantité en diffère-t-elle selon les différentes réactions?

Au lieu d'envisager la chaleur comme un fluide matériel plus ou moins étroitement uni aux corps pondérables, tous les physiciens s'accordent aujourd'hui pour la regarder comme un mode de mouvement. La notion de phénomène a ainsi remplacé la notion de substance attribuée autrefois à la chaleur sous le nom de « calorique ». Robert Mayer, Joule, vers 1842, et, depuis, beaucoup d'autres savants ont prouvé d'une manière irréfragable l'*équivalence mécanique* de la chaleur, c'est-à-dire la proportionnalité entre le travail et la chaleur, que cette dernière produise le travail ou en résulte.

Ce principe d'équivalence étant démontré par des

(1) Rappelons que la grande calorie (C) est la quantité de chaleur absorbée par 1 kgr. d'eau pour une augmentation de température de 1° C.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

expériences directes lorsqu'il s'agit du travail extérieur et visible des machines, on a été conduit à l'appliquer aux travaux moléculaires qui s'accomplissent dans les phénomènes chimiques, théorie d'autant plus vraisemblable que les dernières conquêtes de la physico-chimie permettent de considérer les atomes comme formés du tourbillonnement incessant d'une multitude d'électrons chargés positivement ou négativement.

On admet qu'au moment de la combinaison chimique il y a précipitation de ces particules les unes sur les autres; de là résulte un dégagement de chaleur comparable à celui qui a lieu au moment du choc de deux masses sensibles, par exemple du marteau sur une enclume. Ces mouvements ne pouvant être ni décrits ni mesurés directement comme ceux d'une machine, l'application aux phénomènes chimiques de l'équivalence mécanique de la chaleur ne pouvait être décidée que par voie indirecte, c'est-à-dire par la conformité constante des expériences avec les résultats prévus par la théorie. Cette conformité ayant été établie par d'innombrables exemples, il en résulte qu'il y a, entre les travaux accomplis dans les réactions chimiques et la chaleur dégagée ou absorbée, la même proportionnalité que dans les machines, de sorte que le principe « rien ne se perd, rien ne se crée » s'applique tout aussi bien aux travaux thermiques accomplis dans les réactions chimiques qu'aux quantités de matières mises en œuvre dans ces réactions.

5. **Mesure de la chaleur.** — Ainsi, dans toute action chimique, il y a lieu de se préoccuper, non seulement de peser les quantités de matière et de les suivre dans leurs transformations diverses, mais aussi de recher-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

cher les travaux effectués pendant ces transformations, travaux qui se traduisent par des dégagements ou des absorptions de chaleur. Et le *calorimètre* prend, dans l'étude des réactions et pour l'évaluation des travaux moléculaires, la même importance que la balance. Nous étudierons plus loin l'appareil et son mode d'emploi pour l'essai des combustibles ; nous donnons de suite les lois de la thermo-chimie qui se dégagent des innombrables essais de Berthelot, de Thomsen et des divers expérimentateurs.

Toutes conditions égales, la quantité de chaleur dégagée dans une réaction est fixe et peut être déterminée une fois pour toutes. Nous pouvons donc compléter ainsi notre première égalité :

$$C + 2O = CO^2 + 8{,}137\ C,$$

12 gr. de carbone et 32 gr. d'oxygène forment 44 gr. d'anhydride carbonique en dégageant 8,137 Calories.

Cette quantité dépend uniquement, pour les mêmes corps réagissant, de l'état initial et de l'état final du système, quelles que soient la nature et la suite des états intermédiaires. Si, par exemple, nous oxydons le moins possible le carbone, nous obtiendrons moins de chaleur qu'en l'oxydant plus complètement :

$$C + O = CO + 2{,}453\ C,$$

12 gr. de carbone et 16 gr. d'oxygène donnent 28 gr. d'oxyde de carbone en dégageant 2,453 Calories.

Mais, si ensuite nous faisons brûler l'oxyde de carbone pour obtenir de l'anhydride carbonique, la quantité de chaleur dégagée sera telle, qu'ajoutée à celle produite lors de la première oxydation, elle forme un total égal à la chaleur qu'eût dégagée en une seule fois l'oxydation complète du carbone.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

On devra donc, dans toutes les mesures thermo-chimiques ainsi que dans l'application pratique des données absolues déterminées par expérience, tenir compte de l'état des corps mis en œuvre et de celui des matières résiduelles, non seulement au point de vue de leur composition chimique, mais encore sous le rapport de leur état physique (solide, liquide, gazeux) et de leur température.

Ainsi les quantités de chaleur dégagées dans la combustion de n'importe quels produits, sont étroitement fonction de la nature des réactions chimiques qui s'y sont produites. Le fait est toujours aussi strictement vrai, que la combinaison ait lieu dans un calorimètre de laboratoire ou dans un foyer de générateur à vapeur. Les détails seuls diffèrent, et il intervient dans le dernier cas de plus nombreux facteurs qui influent sur le résultat final. Or, toutes ces actions thermo-chimiques étant régies par des lois absolues, on s'explique la logique et la nécessité d'un contrôle chimique de la combustion. Sans doute il suffit de mesurer l'arrivée de l'eau d'alimentation, d'une part, et, d'autre part, le charbon brûlé, pour avoir — dans le cas d'un générateur de vapeur — le rendement de la combustion. Mais on n'obtient ainsi qu'une indication globale qui permet de conclure que la combustion est effectuée dans de mauvaises conditions, sans que l'on sache rien de ces conditions. Seul le contrôle chimique permet de les déterminer.

6. Utilisation de la chaleur. — Le chauffage industriel s'applique le plus souvent à la production de vapeur dont on utilise ensuite la tension dans des machines appropriées. Aussi l'application des données

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

du contrôle chimique suppose-t-elle la connaissance des phénomènes physiques : changement d'état des corps, chaleur spécifique, chaleur de vaporisation ; il est utile de rappeler brièvement les quelques principes indispensables.

A la pression atmosphérique et à une température inférieure à zéro, on sait que l'eau est à l'état solide. Si l'on chauffe un morceau de glace dont un thermomètre indique la température, on observera que celle-ci augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne zéro ; à partir de ce moment, et quoique le chauffage continue, la température reste invariable pendant tout le temps de la fusion de la glace. Ensuite elle recommence à augmenter proportionnellement à la chaleur fournie ; mais, quand elle atteint le point 100, il y a de nouveau arrêt persistant pendant toute la durée de la transformation en vapeur, après quoi le mercure du thermomètre recommence une nouvelle ascension.

Les quantités de chaleur ainsi absorbées successivement par unité de poids sont fixes pour chaque corps (1), mais diffèrent selon la nature du produit chauffé ; on a pris pour unité de chaleur la quantité absorbée par 1 gr. d'eau pour élever sa température de 1 degré, sans changement d'état physique : c'est la petite *calorie*, remplacée en pratique par la *grande calorie* (C) correspondant à 1 kgr. d'eau, par conséquent mille fois plus grande.

Le nombre de calories nécessaires pour élever de 1 degré la température de l'unité de poids de chaque corps indique sa *chaleur spécifique*.

(1) Du moins, en pratique, on peut considérer qu'il en est ainsi. En réalité l'accroissement de température de l'eau, par exemple, n'est pas tout-à-fait proportionnel à la quantité de chaleur reçue.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

La chaleur absorbée par un solide pendant son passage à l'état liquide et sans changement de température, ce qui fait que par une expression assez impropre on la qualifie de « cachée », est dit *chaleur latente de fusion* ; elle est pour la glace égale à 79,25 calories. La *chaleur latente de vaporisation* de l'eau est de 537 calories.

Au fur et à mesure qu'elle se forme, la vapeur possède une force d'expansion : cette *tension* croît avec la quantité produite dans un espace clos invariable jusqu'à un maximum à partir duquel il n'y a plus de vaporisation ; c'est la *tension maxima*. La vapeur ayant la tension maxima correspondant à sa température est dite *vapeur saturée*. Une vapeur saturée que l'on soumet à une réduction de volume garde la même tension maxima, une partie repassant à l'état liquide ; si, après compression, on élève la température, il y a formation de vapeur. La tension maxima *varie selon la température*, sa valeur est fixe pour chaque température.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

CHAPITRE II

LES COMBUSTIBLES INDUSTRIELS

7. Combustibles et comburants. — Les dénominations usuelles de corps combustibles et comburants ne sont pas exactes, et cette sorte de classification est toute artificielle. Dans une réaction exothermique, il est impossible de distinguer le corps qui brûle de celui qui le fait brûler ; malgré l'apparence, on est mal fondé à dire que l'un d'eux et non l'autre cède sa chaleur latente : aucun ne recèle de calories cachées. C'est ainsi qu'au laboratoire on peut à volonté faire brûler de l'hydrogène dans l'air ou, à l'aide d'un très simple dispositif, faire brûler l'oxygène dans une atmosphère d'hydrogène. Nous conserverons, néanmoins, pour plus de commodité, les distinctions usitées ; elles correspondent d'ailleurs pratiquement à des réalités : les combustibles sont les corps qui, sous l'influence d'une élévation de température, s'unissent à l'oxygène de l'air avec dégagement de chaleur.

Il en existe une grande variété ; combustibles solides : anthracites, houilles, lignites, tourbes, bois et résidus ligneux ; combustibles liquides : huiles et essences de

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

pétrole, alcool, benzène; combustibles gazeux : gaz d'éclairage, acétylène, gaz à l'eau, gaz pauvre. On remarquera cependant que cette diversité apparente cache une composition élémentaire sinon voisine, du moins réduite à quelques éléments simples, très peu nombreux et que l'on retrouve dans presque tous les combustibles industriels : le carbone, l'hydrogène, leurs combinaisons.

8. Le carbone. — Le carbone constitue à l'état pur ou presque pur le diamant, le graphite, le coke — il est à peine besoin d'indiquer que nous ne mentionnons que pour mémoire le premier de ces corps ; encore que l'on en ait quelquefois brûlé, ce n'est pas un combustible industriel ! — A l'état composé, le carbone forme les séries de combinaisons innombrables qui constituent les matières vivantes et leurs produits de transformation, riche collection que l'on enrichit sans cesse de produits nouveaux. L'étude des composés du carbone constitue la branche la plus importante de la chimie : la chimie dite organique.

Nous donnons d'après Izart les différentes propriétés thermiques du carbone :

Chaleur spécifique		Selon les températures de	0,1468 à 0,285
Calories dégagées par kgr.		*combustion parfaite* (CO^2)	8.137 cal.
		» imparfaite (CO)	2.453 cal.
Température de combustion	à l'état de CO	dans l'air	1.485° C.
		dans l'oxygène	4.292°
	à l'état de CO^2	dans l'air	2.753°
		dans l'oxygène	10.226°

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Température approximative de vaporisation			3.600°
Poids de comburant par kgr. de carbone	Oxygène	à l'état de CO^2	2 kgr. 667
		» CO	1 kgr. 334
	Air	» CO^2	11 kgr. 594
		» CO	5 kgr. 797

Quant aux différentes combinaisons du carbone, leur étude théorique importe moins : dans la plupart des cas, on ne peut connaître que la composition élémentaire des combustibles sans savoir exactement l'état des différentes combinaisons. Nous verrons, en étudiant les divers combustibles, quelles sont leurs propriétés et quel est leur dégagement de chaleur dans la combustion.

9. Pouvoirs calorifiques des différentes réactions. — Il est cependant utile de connaître les quantités de chaleur dégagées dans la combustion de la plupart des éléments que peuvent contenir les combustibles industriels usités ou pouvant théoriquement l'être. La série des réactions thermiques comprend un nombre infini d'actions diverses ; quelques-unes seulement sont employées pour le chauffage, d'autres, plus nombreuses, pour les effets explosifs, d'autres enfin pour la production d'effets thermo-chimiques (aluminothermie, par exemple). On conçoit que nous ne puissions citer que celles dont les applications intéressent l'objet de notre étude :

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Chaleur dégagée dans différentes réactions (D'après Berthelot)

Combustibles			Explosifs			
Nature du combustible	Réaction	Chaleur de combustion	Nature du mélange explosif	Chaleur de combustion	Volume des gaz	Pression théorique 1 gr. dans 1 cc.
					litres	atm.
Carbone cristallisé	$C+2O$	7.859	$O+2H$	3.278	1.240	11.960
» »	$C+O$	2.405	$CO+O$	1.483	480	4.510
Carbone amorphe du charbon de bois	$C+2O$	8.137	CH^4+4O	2.419	840	11.420
Carbone amorphe du charbon de bois	$C+O$	2.489	C^6H^2+5O	2.907	630	8.630
Carbone du graphite	$C+2O$	7.901	Nitroglycérine	1.480	713	10.950
Cellulose		4.200	Fulmi-coton	1.022	859	10.000
Soufre	$S+2O$	2.500				
Hydrogène (1)	$2H+O$	29.100				
Méthane (1)		13.343				
Acétylène (1)		12.142				
Benzène (1)		10.052				
Alcool à 96° (1)		6.056				

10. La houille. — La houille est le combustible industriel de beaucoup le plus important et le plus généralement employé ; il en existe une grande variété pouvant se rattacher à plusieurs groupes, chacun caractérisé par des propriétés communes et une proportion donnée d'hydrocarbures. Nous avons réuni en un tableau la classification de Grüner, la plus rationnelle, et les classifications commerciales correspondantes : on observera que la qualité des charbons est

(1) H^2O liquide.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

en relation directe avec leur composition. L'analyse de la houille est donc de la plus grande importance : pour établir un contrôle, il est essentiel de connaître exactement la composition des combustibles.

Il convient cependant de remarquer que l'analyse chimique ne suffit pas à renseigner exactement sur la valeur de la houille ; en pratique industrielle, on attache justement beaucoup d'importance à certaines propriétés physiques : la dureté, la cohésion, la nature de la flamme. Quoique l'on se soit efforcé de créer des méthodes d'essais pour les déterminer, l'usage seul permet de décider sur ces points.

On est trop souvent porté à considérer la houille comme une marchandise qui ne mérite aucuns soins. Rien n'est moins exact ; le charbon s'altère naturellement à l'air et les *menus* peuvent absorber ainsi sans changement appréciable une grande quantité d'air, avec perte correspondante de pouvoir calorifique. Cette oxydation peut même provoquer une véritable combustion spontanée, avec élévation de température et dégagement de gaz. « La perte de poids qui en résulte atteint jusqu'à 39 0/0 pour certaines houilles ayant séjourné neuf mois sur le carreau de la mine » (Colomer et Lordier).

Il importe donc de ne pas approvisionner à l'avance des stocks importants de combustibles, et de ne pas rapporter au charbon brûlé le résultat des analyses que l'on aurait faites longtemps avant, lors de la réception. Enfin on ne saurait prendre trop de soins pour conserver la réserve indispensable ; il convient de ne pas accumuler de trop gros tas, surtout pour les houilles « fines », et de les conserver sous des hangars. Outre que l'humidité favorise l'oxydation, elle cause, lors de la combustion, d'importantes pertes de chaleur.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Dénominations de Grüner	Principaux constituants			Matières volatiles	Rendement en coke	Nature et aspect du coke	Dénominations correspondantes commerciales			
	C	H	O et Az				France	Belgique	Angleterre	Allemagne
Houilles sèches à longues flammes	77,5	5,5	17	40-45	55-60	fritté	Houilles flambantes	Flénus secs	Splint-coal (houille sèche)	Sandkohle Magerkohle (Flammkohle)
Houilles grasses à longues flammes	82	5,5	12,5	32-40	60-68	aggloméré	Charbon à gaz	Flénus gras	Cherry-coal Gas-coal	Sinterkohle (Flammkohle)
Houilles grasses (charbon de forge)	86,5	5	8,5	26-32	68-74	fondu boursouflé	Charbon de forge houilles maréchales	Mons	Cocking-coal	Backkohle Fettkohle
Houilles grasses à courtes flammes	89,5	4,5	6	18-26	74-82	fondu compact	Charbon à coke Charbon demi-gras	Gras		
Houilles maigres à courtes flammes	92	3	5	10-18	82-90	fritté, souvent pulvérulent	Charbon quart-gras Charbon de foyer	Charleroi, Charbons durs	Steam-coal	
Anthracites	94	2	4	8-10		pas de coke	Anthracite		Swansea	Anthracit Magerkohle

11. Les lignites. — Intermédiaires entre la houille et la tourbe, les lignites sont de formation beaucoup plus récente que les diverses variétés de charbons. Ils sont formés d'une matière brun jaunâtre ou noirâtre, tantôt terreuse, tantôt à cassure conchoïdale ; leur densité est faible (de 0,5 à 1,50).

Le lignite donne une longue flamme fuligineuse apparaissant avant que le combustible atteigne le rouge ; il dégage une odeur spéciale ; quand la flamme est éteinte, le lignite recouvert de cendres continue à brûler. La teneur en cendres est plus forte que dans la houille (jusqu'à 50 0/0), ainsi que la teneur en eau (jusqu'à 40 0/0). Si ce n'est peut-être en Autriche-Hongrie, l'emploi industriel des lignites ne s'est pas très développé ; on les utilise aux lieu et place de la houille et de la même façon. Voici quelques analyses des principaux types de lignites.

Origine et nature du combustible	Composition centésimale					Pouvoir calorifique
	H^2O	C	H	O et Az	Cendres	
Lignite parfait de Dax . .		70,49	5,59	18,93	4,99	
» hongrois (Csibor) .	31,42	43,56	5,59	4,38	15,05	4 888
» » (Theodora)	27,96	52,44	6,50	3,90	9,20	5 895
» » (St-Pierre)	29,00	52,37	6,15	2,98	9,50	5 793
» de Vaugirard . . .		59,79	4,51	25,80	6,75	5 536
» » Styrie (Trifail) . .		65,47	4,78	23,30	4,75	6 284
» de la Terre de feu. .		46,16	3,86	14,97	18,50	4 885

12. Tourbes. — La tourbe est employée comme combustible en briquettes séchées à l'air, noirâtres ou

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

grisâtres, légères, spongieuses et brûlant en dégageant une odeur désagréable et caractéristique. Il existe un grand nombre de variétés de tourbe : les genres de végétaux la composant, les conditions de formation, l'ancienneté sont autant de facteurs qui influent sur la composition de la matière.

L'humidité de la tourbe, son faible pouvoir calorifique et son transport coûteux se sont opposés à son utilisation industrielle, au moins en dehors des pays de production. On a proposé de lui faire subir un étuvage-goudronnage pour en préparer des agglomérés. On a proposé aussi, et avec, il semble, plus de succès, de la transformer en coke par distillation sèche ou en présence de vapeur d'eau ; les sous-produits, tels que acide pyroligneux et ammoniaque, permettant et au delà de payer les frais de transformation.

Voici, d'après Larbalétrier, quelques analyses types de tourbes combustibles.

Nature et origine	Composition centésimale (abstraction faite des cendres et de l'humidité)				Pouvoir calorifique
	C	H	Az	O	
Tourbe de Vulcain (Somme). . .	60,10	5,96	2,21	31,30	4 050
» de Lang » . . .	60,89	6,21		32,90	4 100
» mousseuse (Bresle) . . .	57,47	5,28		37,25	3 947
» de Bourdon (1re qualité). .	58,71	5,79		35,50	4 232
» de Camon (id.). .	60,14	5,79		34,07	4 132
» anglaise	59,84	5,77	5,24	31,85	
» allemande (Steinwenden) .	58,70	7,04	1,70	32,56	
» de Bohême	53,18	5,54		34,23	5 489

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

13. Le bois. — La cherté relative du bois fait qu'à moins de circonstances spéciales, on ne l'emploie guère comme combustible industriel. Il n'en est pas de même des déchets ligneux tels que copeaux et sciures, que l'on s'est attaché à utiliser, soit en les brûlant dans des foyers spéciaux (Godillot, etc.), soit en les transformant en gaz pauvres ; procédés d'autant plus intéressants qu'ils permettent d'utiliser un résidu non seulement sans valeur, mais encore très encombrant. On peut rattacher à cette catégorie de combustibles les feuilles tombant des arbres à l'automne, les brindilles d'arbre, les pailles et balles de céréales, la bagasse, partie ligneuse de la canne à sucre restant après l'extraction du jus sucré.

Le bois fraîchement abattu contient jusqu'à 40-45 0/0 d'eau ; aussi est-il indispensable de le faire sécher. Le séchage à l'air permet d'abaisser la teneur en eau à 12-20 0/0. Quant aux résidus ligneux industriels, souvent encore plus aqueux, il existe un grand nombre de procédés de dessiccation parmi lesquels nous citerons les fours genre Huillard, qui ont le grand avantage d'utiliser les calories perdues des gaz de la combustion.

Voici, d'après Fischer, quelques analyses types de bois ; il y a lieu de remarquer que les opérations ont été faites sur des échantillons préalablement desséchés ; en réalité le bois séché à l'air ne donne guère qu'une moyenne de 3.600 calories (Sidersky).

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Désignation	Composition centésimale				Pouvoir calorifique
	C	H	O et Az	Cendres	
Sapin rouge	50,1	6,0	43,2	0,7	4 566
Bouleau	48,5	5,9	45,3	0,3	4 484
Acacia	49,2	5,9	43,1	0,8	4 478
Hêtre	48,6	5,8	45,0	0,6	4 486
Chêne	49,8	5,8	44,0	0,4	4 421
Sapin de Norvège . . .	47,4	5,6	42,7	0,3	4 477
Cellulose ($C^{18}H^{20}O^{10}$) . .	44,44	6,17	49,39		4 200

14. Pétroles et hydrocarbures. — Les hydrocarbures liquides sont très souvent, aux pays d'origine, utilisés comme combustibles industriels ; leur manipulation est facile et leur emploi très commode. Le pouvoir calorifique est beaucoup plus élevé que ceux

Nature des pétroles	Composition centésimale				Pouvoir calorifique
	C	H	O et Az	Cendres	
Huile lourde (Amérique) . .	86,89	13,11			10 913
» (Bakou) . .	86.70	12,94		0,35	10 805
Pétrole brut d'Amérique . .	83,01	13,89	3,10		11 094
» raffiné	85,49	14,21	0,29		11 047
» (essence)	80,58	15,10	4,31		11 086
Pétrole de Novorossisk (Caucase)	84,90	11,63	3,45		10 328
Naphto-schiste (Australie) .	74,57	10,57	3,91	10,94	9 246
Ozokérite de Boryslaw . .	83,51	14,44	0,10	1,95	10 946

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

de n'importe quelle espèce de houille, ainsi que l'on peut s'en rendre compte d'après les analyses ci-dessus faites par M. Mahler.

En Californie et en Russie, un grand nombre de locomotives sont chauffées au pétrole brut, injecté dans le foyer par des brûleurs spéciaux ; il en est de même dans la navigation. On comprendra les avantages de son emploi par ce fait que le *mazout* (pétrole impur résidu de la première distillation), qui revient en France à 185 francs la tonne, coûte à Bakou environ 3 francs ; son pouvoir calorifique atteint deux fois celui de la houille.

Les essences légères de pétrole sont utilisées comme combustibles dans les moteurs à explosion, application très importante depuis le développement de l'automobile. Quoique ce sujet s'écarte un peu de celui que nous traitons ici, il s'agit cependant là encore de véritables combustions qui, dans certains cas spéciaux (concours de moteurs par exemple), peuvent être soumises au contrôle chimique.

15. L'alcool. — Il en est de même de l'alcool que l'on a essayé de substituer aux essences de pétrole dans l'alimentation des moteurs ; ce à quoi d'ailleurs on ne réussit que très incomplètement. On comprend l'intérêt qu'aurait l'emploi de l'alcool produit par l'agriculture et l'industrie indigènes ; mais, outre que son prix est notablement augmenté depuis quelques années, il importe de remarquer que le pouvoir calorifique des alcools — carbures déjà oxydés — est inférieur à celui des essences légères du pétrole ; aussi emploie-t-on toujours l'alcool carburé.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Pouvoir calorifique de l'alcool et de ses carburants (Sorel)

Corps	Symboles	Pouvoir calorifique	
		pression constante	volume constant
Alcool éthylique	C^2H^6O	7.054	7.067
» méthylique	CH^4O	5 312	5.312
Benzine	C^6H^6	9.950	9.985
Acétone	C^3H^6O	7.310	7.330
Alcool à 90°		6.045	6.056
Alcool dénaturé français			5.906
Alcool » carburé à 50 % benzol			7 878

16. Les gaz combustibles. — L'application du principe de Carnot aux machines à vapeur ne laissant pas espoir d'améliorer beaucoup leur très médiocre rendement, on a cherché à utiliser plus directement et plus économiquement le pouvoir calorifique des combustibles. Depuis la substitution du gaz pauvre au gaz d'éclairage, les applications industrielles des moteurs à gaz sont devenues très importantes (1).

Il existe un grand nombre de moyens de production des gaz pauvres et la composition de ces derniers varie selon l'appareil employé ou le principe de leur préparation.

Le *gaz pauvre* proprement dit est produit par des

(1) Des essais de Witz et Mathot, à Deutz, sur un moteur à gaz pauvre de 200 chevaux, il résulte que la consommation peut être réduite à 326 gr. de charbon par cheval-heure effectif.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

gazogènes où la combustion incomplète du carbone a lieu sous l'influence d'un courant d'air produit par compression ou aspiration. Le *gaz des hauts fourneaux* est le résidu naturel de l'extraction de la fonte ; actuellement il actionne des moteurs de très grande puissance et d'autant plus avantageusement qu'il fut longtemps perdu ou incomplètement utilisé. Le *gaz Riché* est obtenu par distillation de déchets de toutes sortes : copeaux, sciures, feuilles, etc. ; le *gaz Mond* par distillation de charbons gras avec séparation ultérieure des goudrons, eaux ammoniacales, etc., à l'aide d'appareils assez compliqués. Le *gaz mixte* est produit dans des gazogènes spéciaux où la température plus élevée permet l'obtention de gaz très riches en hydrogène.

Enfin le *gaz à l'eau* résulte de la décomposition de la vapeur d'eau par le coke incandescent :

$$H^2O + C = CO + 2H.$$

Théoriquement, il devrait donc se composer de parties égales d'oxyde de carbone et d'hydrogène, tous deux très combustibles ; en réalité il contient aussi de l'azote et de l'anhydride carbonique.

Il existe un tel nombre de systèmes différents de gazogènes qu'il est impossible de donner des chiffres fixes pour chaque sorte de gaz pauvre. Voici, d'après divers auteurs, les compositions moyennes des différentes variétés de gaz pauvres.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Gaz	Composition centésimale					Pouvoir calorifique	Auteurs
	Gaz combustibles			Gaz inertes			
	CO	H	$C^x H^y$	CO^2	O et Az		
Gaz pauvre . .	25	9	2	5	59	1.100	Mathot
» » (bois humide) . .	18	18,3	0,1	10,3	53	1.010	Faugé
Gaz pauvre (bois sec) . . .	21,2	15,8	2,4	9,4	51,2	1.252	»
Gaz pauvre (bois sec) . . .	15,4	12,6	7,2	15,2	49,6	1.444	»
Gaz pauvre (bois en vase clos).	29	44	15	11	1	2.960	Riché
Gaz des hauts fourneaux .	24	2	2	12	60	950	Mathot
Gaz des hauts fourneaux (Angleterre) . .	28,4	6,4	2,8	6,6	55,8		Wencélius
Gaz mixte (Fichet) . . .	20	20	3	7	50	1.300	Mathot
Gaz à l'eau (de .	35	46	0,5	2	3	2.555 env.	Deschamps
Gaz à l'eau (à .	43	53	1,5	6	5	2.555 env.	»
» (Strache)	40	50	1	4	5	2.400	Mathot
» (Strong)	36,1	52,7	4,1	2	6	—	Strong
Gaz d'huile . .	2,5	15	79	1	2	11.000	Izart
» de tourbe .	20,33	27,50	52,17			6.400	»

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

CHAPITRE III

ANALYSE DES COMBUSTIBLES

17. L'échantillonnage. — Dans l'analyse des matières aussi peu homogènes que sont en général les charbons, l'échantillonnage est une des opérations les plus importantes. Il n'est pas rare, en effet, de trouver, dans deux morceaux provenant d'un même bloc, des différences de 3, 5, 10 0/0 dans la teneur en carbone, de 10, 15, 20 0/0 dans la teneur en cendres ; on conçoit que, pour minutieusement faits que soient les dosages, leur valeur pratique est nulle, s'ils ne représentent pas exactement la composition moyenne de la matière analysée. La condition est d'autant plus difficile à réaliser que non seulement la houille n'est pas homogène, mais que la prise d'échantillon porte sur des quantités considérables : plus d'un million de fois le poids de la matière analysée. Nous donnons, d'après Colomer et Lordier, les procédés d'échantillonnage habituellement usités.

La prise d'essai se fait soit sur les tas de charbon, soit sur les wagons à leur entrée dans l'usine ; dans le premier cas, on prend une pelletée au sommet, une autre au milieu, une troisième à la base et l'on mélange

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

le tout ; dans le second, s'il s'agit de tout venant, on prend sur chaque wagon du gros, du moyen et du fin ; on pulvérise et on mélange.

La matière est alors soumise à la méthode des partages successifs. On forme avec le combustible un carré à peu près régulier que l'on divise ensuite par des lignes transversales et longitudinales en plusieurs autres carrés, une dizaine par exemple. On prélève un échantillon dans chacun des carrés et forme un nouveau tas que l'on divise... on renouvelle l'opération jusqu'à ce qu'on n'ait plus que le poids convenable. Lors de chaque mélange, il convient, pour mieux homogénéiser la masse, de casser les trop gros morceaux, et de les réduire en fragments de plus en plus fins au fur et à mesure que le tas devient de plus en plus petit.

Ce poids d'ailleurs doit être assez élevé, une centaine de kilogrammes par exemple ; on casse ensuite en menus fragments, mélange et prélève trois échantillons identiques. L'un est analysé par l'acheteur, le second est mis à la disposition du vendeur, et le dernier est conservé en prévision d'une contre-expertise. Cela ne s'applique naturellement que lors d'une réception ; il est bon de faire alors la prise d'échantillon contradictoirement.

Le broyage des derniers échantillons peut être fait mécaniquement ; les établissements Gruson construisent à cet effet un appareil composé de trois trommels superposés dont les dimensions vont en décroissant et dont le nombre de tours diminue aussi progressivement. La matière passe d'un élément à l'autre par une fente inférieure longitudinale, et il n'en passe chaque fois qu'une partie ; on obtient ainsi un échantil-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

lon moyen d'une façon rapide et parfaitement méthodique. Il faut éviter que la houille pulvérisée absorbe l'humidité, l'absorption pouvant être de 5 à 6 0/0 dans une période de 12 heures.

18. Dosage de l'humidité et des matières volatiles. — On opère sur 5 grammes du produit, pesés dans une capsule de porcelaine que l'on met dans une étuve chauffée à 100-110° C. en la recouvrant d'un disque de verre. On évite ainsi l'oxydation par l'air, sans recourir à la dessiccation dans le vide ou dans un courant de gaz inerte, opérations toujours assez compliquées. On chauffe jusqu'à poids constant, ce qui demande environ 2 heures pour les houilles et jusqu'à 4-5 heures pour les lignites et tourbes ; on laisse refroidir dans l'exsiccateur et l'on pèse.

La teneur en eau des charbons se tient dans la grande majorité des cas entre 0,5 et 3 0/0. Pour les *grains lavés*, elle s'élève jusqu'à 5 0/0, 6 0/0 et même plus (Saillard).

Toujours dans le but de de simplifier le plus possible les opérations de l'analyse — autant naturellement que la précision utile n'est pas diminuée —, nous recommandons, pour le dosage des matières volatiles, le procédé Muck généralement usité en Allemagne. Il importe, pour obtenir des résultats comparables, d'observer scrupuleusement les règles adoptées pour le mode opératoire.

On pèse, dans un creuset de platine de forme large et muni d'un couvercle à cheminée, un gramme de substance finement pulvérisée. La hauteur du creuset doit être de 3 centimètres au moins dans le cas de charbons maigres, et plus si la matière se boursoufle. Le

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

creuset, supporté par un triangle en fil de platine, est chauffé dans la flamme d'un brûleur Bunsen, réglé de telle façon que la hauteur totale de cette flamme soit au minimum de 18 centimètres, le bas du creuset étant à 3 centimètres au-dessus de l'orifice du brûleur. On chauffe jusqu'à ce qu'il ne se dégage plus de gaz combustible à la cheminée du couvercle; au bout de quelques minutes, toute flamme est disparue. La différence des poids avant et après carbonisation donne la quantité de matières volatiles.

La teneur en matières volatiles est très variable. D'après Saillard, la quantité de cendres 0/0 restant la même, on peut estimer à 55 calories par kilogramme de houille l'augmentation ou la diminution du pouvoir calorifique produite par une augmentation ou diminution de 1 0/0 dans la teneur en matières volatiles; le pouvoir calorifique réel des houilles employées au chauffage des générateurs atteignant son maximum quand la teneur en matières volatiles est égale à 16-22 0/0.

19. Carbone fixe et cendres. — Après volatilisation, il reste dans le creuset un mélange qui, calciné, donnera le poids des cendres; la teneur en carbone fixe ou cokifiable est donnée par la différence des poids avant et après calcination.

Pour les charbons d'une même mine, le pouvoir calorifique diminue quand augmente la teneur en cendres; elle est plus grande pour les charbons gras. Quand la teneur en cendres augmente ou diminue de 1 0/0, le pouvoir calorifique déterminé directement diminue ou augmente ordinairement de 87 à 89 calories (Saillard).

20. Oxygène absorbé dans la combustion. — On

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

prend 1 gr. de charbon en poudre excessivement fine et 40 gr. d'oxychlorure de plomb ; le tout est mélangé et introduit dans un creuset de terre réfractaire. On recouvre avec 30 gr. d'oxychlorure de plomb puis une couche de verre pilé de 6 millimètres d'épaisseur. Le creuset soigneusement luté est chauffé progressivement dans un four à chalumeau jusqu'à la plus haute température possible.

Après refroidissement, le creuset est cassé, les scories doivent être exemptes de grenaille et tout le plomb réduit par suite de l'oxydation de la houille être réuni en un régule, que l'on pèse. Il est bon d'opérer en double, les culots de plomb obtenus ne devant régulièrement pas différer de plus de 0 gr. 1. Le poids de plomb multiplié par 237 donne directement le pouvoir calorifique approché de 1 kgr. de combustible (§ 26).

21. Dosage de l'hydrogène, du carbone, de l'azote et de l'oxygène. — Les procédés usités dans l'analyse élémentaire des matières organiques conviennent également pour l'essai des combustibles ; la combustion est effectuée en présence d'un courant d'oxygène dans un long tube convenablement garni d'oxyde de cuivre. Les poids de l'eau et de l'anhydride carbonique dégagés et recueillis permettent de déduire la teneur du produit en hydrogène et carbone. Nous décrirons le dispositif employé par Mahler (1), plus spécialement destiné aux analyses de combustibles (fig. 1).

L'oxygène fourni par le gazomètre G passe en P

(1) Et, comme lui, nous ne décrirons sommairement que les caractéristiques de l'appareil appliqué aux analyses de combustibles. Il suffira pour les détails de se référer à l'un des nombreux traités de chimie analytique.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

dans un tube contenant une dissolution de potasse, en E dans des flacons à chlorure de calcium, en K dans un laveur à acide sulfurique, puis dans le tube R placé sur la grille. Le tube à combustion, en verre

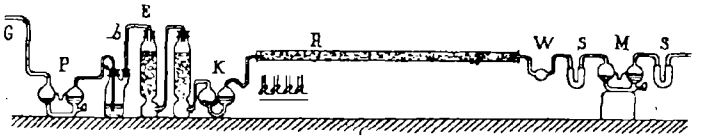

Fig. 1. — Dispositif pour l'analyse élémentaire des combustibles.

de Bohême, est d'une longueur de 1 m. 30 dont 0 m. 85 sont occupés par la colonne d'oxyde de cuivre. Une petite colonne de cuivre métallique non réduit par l'hydrogène empêche la formation de composés oxygénés de l'azote ; à la partie avant, quelques centimètres, remplis de chromate de plomb, arrêtent le soufre. Il est nécessaire d'employer un tube de cette longueur ; en analysant dans des tubes plus courts des houilles riches en matières volatiles, M. Mahler a constaté que, si le courant était accéléré, ces matières pouvaient traverser l'oxyde de cuivre incandescent, sans se décomposer parfaitement. De plus, le tube long se prête parfaitement et sans modification à l'analyse des combustibles liquides volatils.

Les tubes W et S retiennent l'eau. L'anhydride carbonique est ensuite absorbé par une dissolution de potasse à 1,45 de densité, contenue dans le tube Schlœsing modifié M. Le dernier tube S′ contient de la ponce sulfurique destinée à absorber l'eau qui peut s'échapper du tube M.

La dessiccation de l'oxyde de cuivre et l'élimination du carbone qu'il peut contenir avant l'analyse se pratiquent en faisant circuler un courant rapide d'oxygène

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

dans le tube porté au rouge. La dessiccation terminée, on ferme les becs de gaz de la petite grille, on ajoute les tubes W, S, M, S', et on prolonge quelques instants le courant de façon que le système soit amené dans les mêmes circonstances où il sera lors de la pesée finale.

On tare les tubes et on introduit le combustible pesé dans une nacelle de porcelaine ou de platine; à ce moment la partie du tube située sur la grande grille est déjà rouge : on peut commencer la décomposition. La vitesse du courant gazeux doit être soigneusement réglée; pendant toute la distillation des hydrocarbures, on ne doit compter dans le flacon K qu'une bulle toutes les deux secondes (1), vitesse qui peut être doublée lors de la combustion.

En comprenant le montage, l'analyse élémentaire d'une houille demande quatre heures (prise d'essai de 0 gr. 5), pendant lesquelles on doit apporter une attention continuelle.

Dans la plupart des cas, on obtient par différence la teneur en azote et oxygène, les proportions respectives de chaque élément importent peu. On peut doser l'azote et obtenir l'oxygène par différence, soit par la méthode de Dumas, soit plus simplement par l'attaque à l'acide sulfurique. Mahler a fait des essais comparatifs entre les méthodes de Will-Warrentrap et de Kjeldhal-Aubin; il en résulte que les chiffres trouvés dans ce dernier cas seraient un peu supérieurs à ceux donnés par le procédé classique.

22. Consommation de combustible. — Pour appliquer les chiffres de l'analyse au contrôle de la com-

(1) Dans le cas de combustibles liquides, le courant d'oxygène doit être presque nul.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

bustion, il est indispensable de connaître les quantités exactes de combustible utilisées et de défalquer du total les résidus (cendres et mâchefers) contenant du carbone non oxydé. Aussi combustible et résidu doivent-ils être soigneusement pesés.

La pesée du combustible est d'autant plus facile que, le transport à la chaufferie étant presque toujours effectué par des wagonnets roulant sur voie étroite, il suffit d'intercaler sur le parcours un petit pont à bascule. Pour éviter les erreurs, on choisira un système de bascule imprimant automatiquement le poids sur des tickets. « Afin d'éviter les erreurs volontaires qui ne manqueraient pas de se produire au cas où le chauffeur serait intéressé par des primes sur la consommation, on placera sur la voie un petit compteur à pédale ou heurtoir qui enregistrera le nombre des wagonnets entrés à la chaufferie; en comparant les chiffres du compteur et le nombre des tickets, on s'assurera que tout s'est passé régulièrement » (Izard).

Dans les installations modernes de grandes chaufferies avec transport automatique du charbon par des chaînes à godets équilibrés ou par runways culbutant automatiquement dans les trémies des chargeurs, on peut adopter une bascule *automatique* dont la benne s'emplit, se pèse, et après inscription du poids se vide absolument automatiquement, chiffres et opérations étant relevés par des compteurs totaliseurs. Des firmes anglaises et américaines construisent des bascules de ce genre, spécialement applicables aux pesées de charbon (Avery, Clarke, Hunt, Jones, etc.).

23. Carbone restant dans les escarbilles. — Pour établir le bilan de la combustion, il est indispensable

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

de connaître la quantité de charbon non brûlé dans les escarbilles. La méthode la plus exacte consiste à peser les wagonnets d'escarbilles à la sortie de la chaufferie et à faire l'analyse d'un échantillon moyen par la même méthode que pour un combustible quelconque. On peut ainsi, connaissant la teneur du charbon en cendres et la teneur des cendres en charbon et en admettant que la totalité des cendres du combustible passe dans le cendrier, calculer la perte de carbone en résultant. M. Izard a dressé à ce sujet le tableau ci-dessous :

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Pertes dues aux escarbilles non brûlées (en °/₀ de la consommation de houille).

Charbon non brûlé dans les escarbilles	Teneur en cendres du charbon employé (°/₀)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	18	20
50	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	18	20
45	4	4,8	5,7	6,6	7,3	8,1	9	9,8	10,6	11,4	13	14,7	16,3
40	3,3	4	4,6	5,3	6	6,6	7,3	8	8,6	9,3	10,6	12	13,3
35	2,6	3,2	3,7	4,3	4,8	5,3	5,9	6,4	7	7,5	8,6	9,6	10,7
30	2,1	2,5	3	3,4	3,8	4,2	4,7	5,1	5,5	6	6,8	7,7	8,5
25	1,6	2	2,3	2,6	3	3,3	3,6	4	4,3	4,6	5,3	6	6,6
20	1,2	1,5	1,7	2	2,2	2,5	2,7	3	3,2	3,5	4	4,5	5
15	0,8	1	1,2	1,4	1,5	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,8	3,1	3,4
10	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7	2	2,2
8	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,5	1,7
6	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,85	1	1,1	1,2
4	0,2	0,25	0,3	0,3	0,4	0,4	0,45	0,5	0,5	0,6	0,65	0,75	0,8
2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25	0,25	0,3	0,3	0,35	0,4

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

CHAPITRE IV

POUVOIR CALORIFIQUE DES COMBUSTIBLES

§ 1. — Détermination indirecte.

Les résultats de l'analyse chimique des combustibles n'ont de valeur pratique et ne deviennent utilisables que si l'on en peut déduire la chaleur qu'ils dégageront dans la combustion, c'est-à-dire leur pouvoir calorifique. De nombreuses formules permettent de calculer le nombre de calories données par la combustion d'un charbon d'après sa teneur en différents éléments.

24. Loi et formule de Dulong — D'un grand nombre d'essais calorimétriques de combustibles dont on connaissait la composition chimique, Dulong avait conclu que la chaleur totale dégagée dans la combustion était égale à la somme des quantités de chaleur dégagées par l'oxydation des constituants, en négligeant la quantité d'hydrogène qui peut former de l'eau avec l'oxygène du combustible. La loi peut se résumer par la formule :

$$P = 8.080\ C + 34.500\left(H - \frac{O}{8}\right)$$

dans laquelle P est le pouvoir calorifique, C, H et O les teneurs en carbone, hydrogène et oxygène, 8.080 et 34.500 les chaleurs de combustion du carbone et de l'hydrogène.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

La loi de Dulong date d'une époque où les mesures calorimétriques n'avaient pas la précision qu'elles ont aujourd'hui ; elle est en contradiction avec les données de la thermochimie sur la chaleur de combustion des corps : la chaleur de combustion du carbone varie selon que l'on opère sur les différentes sortes de charbons : graphite, charbon de bois, etc..

25. Formules diverses. — Aussi, devant l'imperfection bien constatée de la formule de Dulong, un grand nombre d'auteurs y ont proposé certaines modifications. Scheurer-Kestner et Meunier-Dollfus suppriment la correction relative à la présence de l'oxygène :

$$P = 8.080\ C + 34.500\ H.$$

L'association des Ingénieurs allemands a proposé de prendre en considération la chaleur de combustion du soufre (2.500 C) et la chaleur de vaporisation de l'eau (environ 600 C). On a ainsi, S étant la teneur en soufre et E l'humidité du combustible :

$$P = 8.100\ C + 29.000\left(H - \frac{O}{8}\right) + 2.500\ S - 600\ E,$$

dont se rapproche la formule de Arth :

$$P = 8.080\ C + 34.500\left(H - \frac{O}{8}\right) + 2.162\ S.$$

Schwackhœfer ne fait entrer dans la formule de Dulong que la teneur en eau :

$$P = 8.080\ C + 34.500\left(H - \frac{O}{8}\right) - 637\ E.$$

Balling fait de même, mais, pour se rapprocher des conditions de la pratique, il considère la vapeur formée comme ayant une pression correspondant à la température de 150° :

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

$$P = 8.080\ C + 34.462\left(H - \frac{O}{8}\right) - 652\ (E + 9\ H).$$

A rappeler aussi les formules proposées par Kern :

$$P = 8.100\ C + 34.500\ H - 600\ (E + 9\ H),$$

Ferrini :

$$P = 8.100\ C + 34.500\ H - 540\ (E + 9\ H)$$

et Redtenbacher :

$$P = 7.050\ C + 34.500\left(H - \frac{O}{8}\right) - 650\ H^2O.$$

Mahler déduit de ses essais sur une trentaine d'espèces différentes de houille la formule empirique :

$$P = 111{,}4\ C + 375\ H - 3.000 \qquad (1)$$

qui donnerait un résultat exact à 2 0/0 près en plus ou en moins.

Cornu distingue, dans la quantité de carbone total, le carbone fixe (transformable en coke), du carbone volatil (combiné à l'état d'hydrocarbures), et propose la formule :

$$P = 8.080\ C^f + 11.214\ C^v + 34.500\ H.$$

La formule proposée par Vivien au Congrès de Bruxelles (1894) est plus simple encore :

$$P = 8.080\ C^f + 10.000\ C^v + H.$$

M. Matignon a montré que les résultats obtenus ainsi s'écartaient notablement des chiffres trouvés par détermination directe.

(1) On remarquera que les chiffres s'écartent notablement de ceux des formules précédentes. Les auteurs pouvant partir d'unités différentes (poids du carbone, petites ou grandes calories, etc.) arrivent ainsi à des formules d'apparence dissemblable. Il est facile, après calcul de rendre les résultats comparables. Ici (comme dans la formule de Goutal, p. 44), les teneurs C, H, etc., sont exprimées en nombres d'unités pour 100 ; elles sont donc représentées par des nombres 100 fois plus grands que dans les autres formules.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

26. Formules de Welter-Berthier et de Goutal. — Selon Welter la chaleur de combustion est proportionnelle à la quantité d'oxygène absorbée par le combustible. Il suffirait ainsi d'un essai relativement simple (V. § 20) pour calculer le pouvoir calorifique d'après la formule tirée par Berthier de la loi de Welter, ou celle, en différant d'ailleurs très peu, de Ser :

$$P = 26.880 \left(\frac{C}{3} + H\right).$$

La formule de Goutal est de beaucoup la plus simple, en ce qu'elle permet de calculer approximativement le pouvoir calorifique d'un charbon d'après les seuls résultats de la dessiccation et de la calcination :

$$P = 82\,C' + aV,$$

C' étant le carbone fixe, V les matières volatiles et a un coefficient variant avec la proportion de ces dernières. Il est donné par la table :

V °/o	a (calories)	V °/o	a (calories)	V °/o	a (calories)	V °/o	a (calories)
1 à 5	150	14	120	23	105	32	97
5	145	15	117	24	104	33	96
6	142	16	115	25	103	34	95
7	139	17	113	26	102	35	94
8	136	18	112	27	101	36	91
9	133	19	110	28	100	37	88
10	130	20	109	29	99	38	85
11	127	21	108	30	98	39	82
12	124	22	107	31	97	40	80
13	122						

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Les matières volatiles doivent être calculées sur le combustible supposé pur (abstraction faite de l'humidité et des cendres).

D'après Mahler, « l'écart entre le pouvoir calorifique ainsi calculé et celui déterminé directement n'atteint généralement pas 1 0/0 du pouvoir réel ; une erreur supérieure à 2 0/0 est tout-à-fait exceptionnelle, s'observant presque exclusivement avec les anthracites ou dans la série des houilles ligniteuses et des houilles oxydées ».

La méthode Goutal donne donc des résultats plus exacts que ceux des différentes formules utilisant les chiffres de l'analyse complète ; aussi est-elle à recommander dans tous les cas où l'on ne dispose pas d'appareil calorimétrique.

La formule Gmelin est à rapprocher de celle de Goutal, elle n'utilise également que les résultats d'essais usuels. Les résultats obtenus sont moins exacts, aussi ne la donnons-nous qu'à titre de renseignement :

$$P = 100 - (80 \text{ eau} + \text{cendres}) - c H^2O,$$

c étant un coefficient variable avec la teneur en eau.

27. Table de Saillard. — La table de Saillard fut dressée d'après les résultats donnés par l'analyse comparative de plusieurs centaines d'échantillons de charbons français et belges utilisés dans les sucreries françaises ; elle a le grand avantage de n'exiger, pour le calcul du pouvoir calorifique, que les teneurs en cendres et en matières volatiles :

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Cendres % du charbon sec	Teneur des matières volatiles en % de la partie combustible seule										
	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5 maxima	25	27,5	30	32,5
0	8579	8656	8734	8809	8850	8872	8896	8880	8844	8818	8614
1	8494	8570	8647	8721	8761	8783	8807	8791	8756	8730	8528
2	8409	8484	8560	8633	8673	8694	8718	8702	8667	8642	8442
3	8322	8398	8473	8545	8584	8606	8629	8613	8579	8554	8356
4	8236	8312	8386	8457	8496	8517	8540	8524	8491	8466	8270
5	8150	8224	8298	8369	8407	8429	8451	8435	8402	8378	8183
6	8065	8138	8211	8281	8319	8340	8362	8346	8314	8290	8097
7	7979	8051	8124	8193	8230	8251	8273	8258	8225	8202	8011
8	7893	7964	8036	8105	8142	8162	8184	8169	8137	8114	7925
9	7808	7878	7949	8017	8053	8073	8096	8081	8048	8026	7839
10	7722	7291	7861	7929	7965	7985	8007	7992	7960	7937	7753
11	7635	7705	7774	7841	7877	7896	7918	7903	7872	7839	7667
12	7549	7618	7687	7753	7788	7807	7929	7814	7784	7761	7581
13	7464	7531	7599	7664	7700	7719	7739	7725	7695	7673	7494
14	7378	7444	7511	7576	7611	7630	7650	7636	7606	7584	7408
15	7293	7358	7424	7488	7523	7542	7561	7548	7518	7496	7322
16	7378	7271	7337	7400	7434	7453	7472	7459	7429	7407	7236
17	7121	7185	7250	7312	7345	7363	7383	7370	7340	7318	7150
18	7035	7099	7162	7224	7257	7274	7294	7281	7252	7230	7064
19	6949	7012	7075	7136	7168	7185	7205	7192	7163	7142	6978
20	6864	6925	6988	7048	7080	7097	7116	7104	7075	7054	6892

D'après l'auteur, les plus grands écarts entre le pouvoir calorifique déterminé directement à l'obus et celui donné par la table ne dépasseraient pas 2 à 2,5 0/0.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

28. Exactitude relative. — Quelles qu'elles soient, toutes ces formules sont également empiriques. « Lorsqu'on a affaire à un corps bien défini, remarque très justement M. Scheurer-Kestner, on peut essayer d'établir par le calcul sa chaleur de combustion, en faisant intervenir des considérations thermochimiques basées sur l'expérience... » Mais, dans le cas de combustibles industriels, un tel calcul est absolument impossible, les chiffres de l'analyse n'impliquant aucunement sa composition chimique réelle. « La houille est-elle un hydrocarbure ou un mélange de plusieurs de ces composés ? A quel état s'y trouvent l'oxygène, l'azote et le soufre ? L'oxygène y est-il combiné à l'hydrogène comme l'exige la loi de Dulong ? Ce sont autant de questions auxquelles il est impossible de répondre ».

En fait, on relève, dans les déterminations du pouvoir calorifique par l'application des formules, des excédents de 6 0/0, des déficits de 5 0/0 sur la valeur vraie donnée par détermination directe. A moins de se contenter de cette approximation, il faut donc déterminer directement le pouvoir calorifique des combustibles.

§ 2. — Détermination directe du pouvoir calorifique des combustibles.

La détermination directe du pouvoir calorifique du combustible se fait à l'aide du calorimètre ; depuis l'appareil primitif de Lavoisier, il a été construit un grand nombre de différents systèmes de calorimètres pour la plupart abandonnés aujourd'hui. Tous les

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

modèles usités actuellement se composent essentiellement d'un espace clos (bombe, obus) où peut s'effectuer la combustion dans des conditions rigoureusement déterminées, et d'un calorimètre proprement dit disposé de façon à recueillir toute la chaleur dégagée que l'on apprécie d'après l'élévation de température de l'eau qu'il contient.

On trouvera dans les traités spéciaux la description des appareils divers, de celui de Lavoisier à celui de Berthelot (1). Nous ne décrirons ici que la modification pratique de la bombe calorimétrique Berthelot et Vieille, due à M. Mahler; appareil vraiment industriel et qui est le plus généralement employé : il en existe des centaines d'exemplaires répandus dans le monde entier.

29. Obus calorimétrique Mahler (2). — Le dispositif de M. Mahler se compose essentiellement, outre l'obus B, d'un calorimètre D, d'une enveloppe isolatrice A et d'un agitateur S (fig. 2). L'obus est en acier doux forgé, sa capacité est de 350 cc. environ, ses parois ont 8 mm. d'épaisseur. La contenance, beaucoup plus grande que celle de la bombe Berthelot, permet d'assurer la parfaite combustion en employant de l'oxygène souillé d'azote et d'essayer les gaz pauvres ne contenant quelquefois que 30 0/0 de gaz combustibles.

(1) On trouvera la liste et le fonctionnement de tous ceux pouvant s'appliquer aux essais de combustible, dans l'ouvrage de Scheurer-Kestner et Meunier.

(2) M. Mahler a lui-même donné une description plus complète de ses procédés dans le *Bull. de la Société d'encouragement* (1893). Nous la résumons d'après le travail de C. Talansier, paru dans le *Bull. de la Société des Ingénieurs civils*.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

L'obus est nickelé extérieurement, il est préservé à l'intérieur par une couche d'émail (1); on évite ainsi, tout aussi bien qu'avec un revêtement de platine,

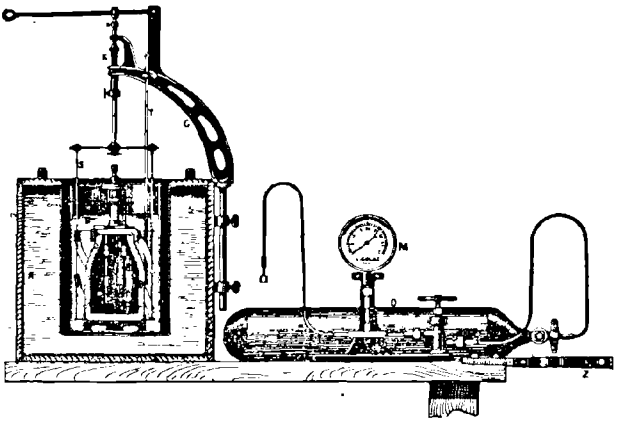

Fig. 2. — Appareil de Mahler.

l'attaque par l'acide azotique qui se forme toujours pendant la combustion. L'obus est fermé par un bouchon à vis serrant une rondelle de plomb ; le bouchon est traversé par un robinet à vis pointeau pour l'arrivée de l'oxygène et par une électrode de platine parfaitement isolée, se prolongeant à l'intérieur (E, fig. 2). Une seconde tige de platine soutient la capsule C où l'on place le combustible ; une spirale en fil de fer portée à l'incandescence par l'électricité sert à amorcer la combustion.

L'agitateur S est commandé d'une façon très simple par le levier L, on peut facilement en régler la course. Le thermomètre T doit indiquer très exactement les cinquantièmes de degré. Sur la gauche est le généra-

(1) D'après les déterminations de M. Matignon, la chaleur spécifique de l'acier est de 0,1150, celle de l'émail 0,2045.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

teur d'électricité (12 volts, 2 ampères). En O est le réservoir d'oxygène comprimé relié par un robinet au manomètre M ; le tube, de modèle courant, permet de faire une soixantaine d'essais (1).

30. Détermination d'un pouvoir calorifique. — On pèse 1 gr. de la matière à essayer dans la capsule C, on ajoute un petit morceau F de fil de fer n° 100 dont on connaît le poids. Le tout est introduit dans l'obus qui est ensuite bouché hermétiquement à l'aide de l'étau Z et d'une clé spéciale.

On met le robinet pointeau de l'obus en communication avec le raccord du tube à oxygène ; après l'avoir fermé, on ouvre doucement celui du réservoir O jusqu'à ce que M indique 25 atmosphères. On ferme le robinet du tube réservoir du manomètre, puis celui de l'obus et on détache le tube de communication. L'oxygène doit être introduit très lentement pour éviter tout entraînement de la prise d'essai par le courant de gaz arrivant.

L'obus est alors placé dans le calorimètre A avec le thermomètre T et l'agitateur S, on verse ensuite l'eau préalablement jaugée et on agite de façon à établir l'équilibre de température.

On note la température de minute en minute pour se rendre compte des variations ; après cinq minutes, on relie à la borne E une des électrodes, l'autre étant en contact avec le robinet : l'inflammation a lieu aussitôt. Après 30 secondes, on prend la température ; on continue à noter les indications lues au thermomè-

(1) On peut préparer au laboratoire l'oxygène par le chlorate, l'oxylithe ou l'oxygénite, mais la manipulation est plus compliquée ; en outre il faut alors disposer d'une pompe spéciale pour comprimer le gaz.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

tre, d'abord après 30 nouvelles secondes, puis de minute en minute, jusqu'à ce que le thermomètre commence à baisser régulièrement ; on cesse après cinq dernières lectures.

Pendant toute la durée de l'observation, on doit mouvoir constamment l'agitateur. Après la fin de l'expérience, on ouvre d'abord le robinet pointeau, puis l'obus ; on lave l'intérieur avec un peu d'eau et recueille le liquide où l'on dose acidimétriquement l'acide azotique formé pendant la combustion.

Pour calculer la correction due à la chaleur perdue par le calorimètre pendant l'opération, on applique les règles suivantes : 1° la loi de décroissance de température observée après le maximum donne la perte de chaleur avant le maximum et pour une minute, à la condition que la température moyenne de cette minute ne diffère pas de plus de 1 degré de la température maximum ; 2° si la température de la période considérée diffère de 1 à 2 degrés de celle du maximum, le chiffre représentant la loi de décroissance au moment du maximum, diminué de 0,005, donne encore la correction cherchée.

Soient :

Δ = Différence de température corrigée,
P = poids de l'eau du calorimètre,
P' = équivalent en eau de l'obus et des accessoires,
p = poids d'acide azotique constaté,
p' = poids de la spirale de fil de fer,
0,23 = chaleur de formation de 1 gr. d'acide azotique,
1,6 = chaleur de combustion de 1 gr. de fer.

Le pouvoir calorifique est :

$$Q = \Delta (P + P') - (0{,}23\, p + 1{,}6\, p') \quad (1).$$

(1) On ne tient pas compte ainsi de la petite quantité d'acide sulfurique

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Pour déterminer l'équivalent P′ en eau du système, il suffit de brûler 1 gramme d'un produit de composition bien définie, de naphtaline par exemple, d'abord avec 2.300 grammes d'eau dans le calorimètre, et dans un second essai avec 2.100 grammes. On possède alors les éléments de deux équations entre lesquelles on élimine la chaleur de combustion de la naphtaline et d'où l'on déduit la valeur de l'équivalent en eau.

L'obus calorimétrique peut s'appliquer aux essais des combustibles solides, liquides et gazeux. Dans le premier cas, il importe de ne pas opérer sur un échantillon réduit en poudre impalpable ; on pourrait craindre que le courant d'oxygène n'entraînât un peu de poussières combustibles.

Pour les liquides émettant des vapeurs à la température ordinaire, il est bon de peser la prise d'essai dans une ampoule de verre mince à pointes effilées par où passera l'amorce. En introduisant l'ampoule dans l'obus, on brise les pointes pour permettre le contact de l'oxygène et du liquide.

Dans le cas d'essai de combustible gazeux, on jauge exactement l'obus, y fait le vide, le remplit de gaz, fait le vide une seconde fois, puis introduit le gaz à la température et à la pression ambiantes ; on ajoute alors l'oxygène et procède comme à l'ordinaire. Toutefois il faut se garder de trop diluer le gaz qui cesserait alors d'être combustible.

31. Exemple d'essai. — Soit un échantillon de 1 gr. de combustible brûlé dans un calorimètre contenant

formée par l'oxydation du soufre de la houille et dosée avec l'acide azotique. L'erreur est négligeable en pratique industrielle. Il serait facile, le cas échéant, de doser l'acide sulfurique dans le résidu final et de tenir compte de la chaleur de formation de SO^4H^2 dilué, soit 0 c. 73 par gramme.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

2.200 grammes d'eau, l'équivalent en eau de l'obus et des accessoires étant 481 grammes.

L'appareil étant préparé, on agite, attend quelques instants, met le compteur à secondes en marche et note les températures ; soient par exemple :

Température au début	10°23
Après 1 minute	10°23
Après 2 minutes	10°24
Après 3 minutes	10°24
Après 4 minutes	10°25
Après 5 minutes	10°25

$$\delta = \frac{10.25 - 10,23}{5} = 0.004$$

On met alors le feu en approchant les électrodes au contact de E et B ; on observe de nouveau les températures :

Après 30 secondes (a)	10°80	
Après 1 minute (b)	12°90	
Après 2 minutes (c)	13°79	
Après 3 minutes (d)	13°84	(maximum)
Après 4 minutes	13°82	
Après 5 minutes	13°81	
Après 6 minutes	13°80	
Après 7 minutes	13°79	
Après 8 minutes	13°78	(arrêt des lectures).

On peut immédiatement déduire pour la correction de la période postérieure au maximum :

$$\delta = \frac{13°84 - 13°78}{5} = 0,012.$$

La variation de température a été :

$$13°84 - 10°25 = 3°59.$$

La perte de chaleur pendant les minutes (b) à (d) :

$$\frac{13°84 - 13°78}{5} \times 2 = 0,012 \times 2 = 0,024,$$

pendant la demi-minute (a) (b) :

$$(0,012 - 0,005)\ 0,5 = 0,0035,$$

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

et, pendant les 30 premières secondes (avant (*a*)), l'appareil gagnait :

$$\frac{10°25 - 10°23}{5} \times 0,5 = 0,004 \times 0,5 = 0,0020,$$

ce qui, pour la perte relative à la première minute, donne :

$$0,0035 - 0,002 = 0,0015.$$

Le système a donc perdu pendant la durée de l'essai une quantité de chaleur correspondant à :

$$0,024 + 0,0015 = 0,0255,$$

qu'il faut ajouter aux 3°59 déjà trouvés; en négligeant les dix millièmes, on obtient :
$(2.200 + 481) \times 3,615 = 9$ cal. 691815, soit 9 cal. 6918, desquelles il faut retrancher : 1° la chaleur de formation de 0 gr. 13 d'acide azotique dosé volumétriquement ($0,13 \times 0,23 = 0$ cal. 0299) ; 2° la chaleur de combustion de 0 gr. 025 de fil de fer ($0,025 \times 1,6 = 0$ cal. 04). Ce qui donne un résultat final de :

$$9,6918 - (0,0299 + 0,04) = 9 \text{ cal. } 6219.$$

Soit, pour un kilogramme de combustible, 9.621 cal. 9.

32. Autres calorimètres. — Un grand nombre d'expérimentateurs ont modifié, sinon perfectionné, le calorimètre dans le but de l'appliquer aux essais industriels de combustibles. C. Krœker fait absorber la vapeur d'eau produite dans un tube à chlorure de calcium, ce qui ne présente aucun avantage, mais, par contre, peut avoir des inconvénients. Darling a décrit dans l'*Engineering* un ingénieux appareil pouvant se

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

construire avec les objets usuels des laboratoires, faible avantage qui ne compense pas l'inexactitude des résultats obtenus.

Depuis longtemps, on avait imaginé des calorimètres différents de celui de Berthelot en ce que le comburant ne consistait pas en oxygène sous pression, mais en poudres oxydantes mélangées au combustible de manière à constituer une sorte de feu de Bengale que l'on peut très facilement enflammer. C'est sur ce principe qu'étaient basés les modèles de L. Thompson, employé en Angleterre, de Stohman, que son auteur abandonna pour adopter celui de Berthelot, enfin de Parr, qui, perfectionné par Lunge, est maintenant employé pour l'analyse des combustibles industriels. Nous le décrirons succinctement à titre d'exemple ; quoique son emploi ait paru se généraliser en Allemagne, nous ne croyons pas qu'il y soit très répandu.

33. Méthode Parr-Lunge. — Pour supprimer la combustion sous pression, Parr mit à profit la propriété du peroxyde de sodium de dégager de l'oxygène en formant de la soude, qui absorbe l'anhydride carbonique.

Le calorimètre Parr (1) se compose (fig. 3) d'un vase isolant à double paroi B, C, en bois durci, muni d'un couvercle de même matière, dans lequel est placé un récipient A que l'on remplit exactement de deux litres d'eau. On essuie et sèche ensuite parfaitement toutes les parties de la chambre de combustion D (fig. 4), et on y place 10 gr. de bioxyde de sodium pulvérisé ; puis on procède à la prise d'essai du combustible :

(1) D'après la *Zeitschrift für angewandte Chemie*, 1901.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

1 gr. pour les lignites, 0 gr. 5 pour le charbon ; on ajoute en outre 0 gr. 500 d'acide tartrique pur dans le cas d'une houille grasse, et, pour les anthracites,

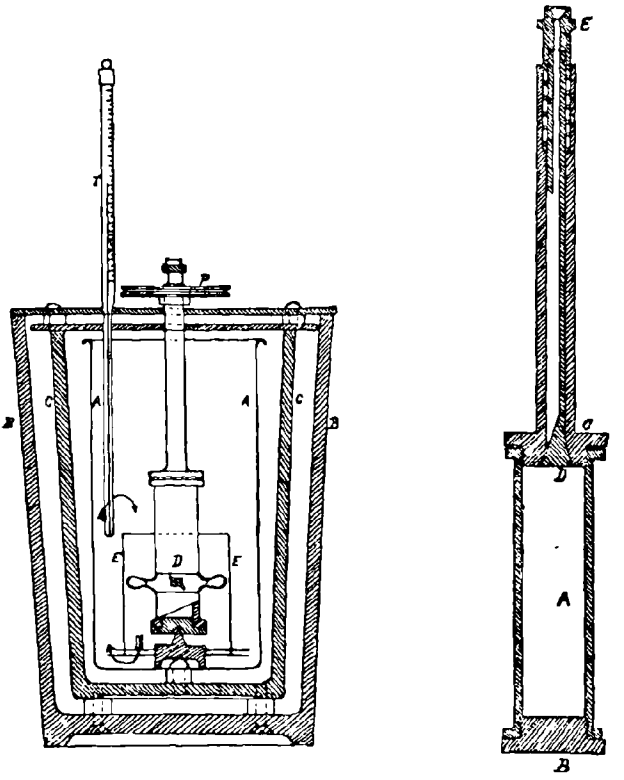

Fig. 3 et 4. — Appareil de Parr.

0 gr. 500 d'acide tartrique et 1 gr. de persulfate de potasse. On visse le couvercle C et agite, on s'assure du bon fonctionnement de la soupape D, on place sur A les ailettes E (fig. 3) et on introduit le tout dans le calorimètre, sur lequel on place le couvercle et le thermomètre T. On fixe la poulie P qui est mue par une turbine hydraulique ou une petite dynamo, de façon à faire 150 tours environ par minute.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Après trois minutes d'agitation, les ailettes E ayant homogénéisé le liquide de A, on note la température indiquée en T. On provoque alors l'inflammation à l'aide d'un fil de fer doux de 10 mm. de long sur 2 mm. de diamètre, chauffé au rouge et introduit par l'entonnoir E (fig. 3) (la masse est négligeable et n'introduit qu'une erreur de la grandeur des approximations de l'essai). En appuyant en E, on ouvre la soupape D, le fil tombe et provoque l'inflammation : après 4 ou 5 minutes le thermomètre qui montait constamment s'arrête, et l'on peut faire la lecture.

Le calcul des résultats se fait en retranchant du nombre de calories calculé selon le poids de combustible, l'équivalent de l'appareil et selon les cas : *a*) 0,015 correspondant à la quantité de chaleur du fil incandescent; *b*) 0,85, correction empirique déterminée expérimentalement pour le fil incandescent et l'acide tartrique; *c*) enfin 0,990, dans le cas d'addition de persulfate.

§ 3. — Pouvoir calorifique des gaz

34. Calorimètre de Junkers. — S'il est possible de déterminer le pouvoir calorifique des gaz combustibles à l'aide des appareils usuels, il est beaucoup plus pratique d'employer des calorimètres spéciaux tels que celui de Junkers.

La détermination de la puissance calorifique y est basée sur ce fait que la quantité de chaleur émise par un courant continu de gaz entièrement brûlé est transmise sans perte à un courant d'eau également continu dont la variation de température est ainsi fonction de

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

la valeur calorifique du combustible (L. Fabre) (1). L'appareil se compose d'un calorimètre A (fig. 5), d'un

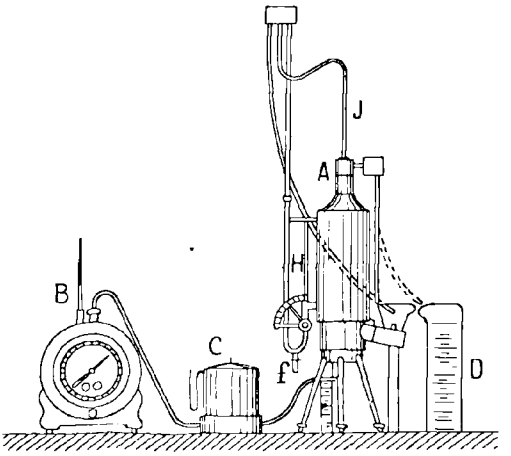

Fig. 5. — Calorimètre de Junkers.

compteur à gaz B, d'un régulateur de pression C et d'une éprouvette graduée D. Le calorimètre est une chaudière à contre-courant au bas de laquelle le gaz est brûlé dans un Bunsen : la quantité de chaleur ainsi produite est transmise au courant d'eau avec un effet utile de 100 0/0. Pour déterminer le pouvoir calorifique, on lit, après avoir obtenu un certain état d'équilibre, la différence de température entre les thermomètres H et J, puis on mesure la quantité d'eau passée en D pendant la durée de l'observation.

C étant le pouvoir calorifique, T l'augmentation de température, G le volume de gaz brûlé pendant

(1) *Revue générale de Chimie*, 1908, p. 369. On pourra également conférer les travaux de Immenkœtter (*J. für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung*, 48, p. 736) et de Bain et Batten (*J. of the Soc. of Ch. Industry*, 1906, juin). Nous empruntons à Fabre une grande partie de ce qui suit.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

l'opération, V le volume d'eau mesurée : on a la relation suivante :

$$C = \frac{V \times T}{G}.$$

35. Calorimètres enregistreurs. — Si simples que soient les manipulations de l'essai à l'appareil Junkers, elles deviennent absorbantes quand l'on fait par jour un grand nombre d'opérations. Dans le cas de combustibles solides, il suffit d'un essai sur l'échantillon moyen d'un stock important pour déterminer la valeur calorique moyenne. Mais pour le gaz produit de façon continue par un gazogène, et dont la composition variable dépend à chaque instant de la marche du générateur, il devient nécessaire de faire un grand nombre d'analyses. Aussi a-t-on été conduit à imaginer des calorimètres continus, automatiques et enregistreurs.

L'appareil de Beasley se compose d'un tube en U plein d'huile ; une des branches est soumise à l'action de l'air, l'autre à celle des gaz brûlés. Le niveau de l'huile du tube chauffé s'élève d'une hauteur proportionnelle à l'élévation de température et la dénivellation est enregistrée. Le calorimètre de Beasley est d'ailleurs plus ingénieux que pratique. Il n'en est pas de même de celui de Junkers, perfectionnement de l'appareil précédemment décrit du même auteur.

Au haut de l'appareil (fig. 6) sont disposés deux compteurs solidaires (*b* et *c*) de façon à ce que les courants de gaz d'une part, et d'eau de l'autre, soient en étroite relation. Après passage dans un régulateur (*f*), le gaz vient brûler à la partie inférieure (*h*) d'une chaudière (*i*) parcourue par le courant d'eau. A la partie supérieure de cette chaudière, où se trouvent l'arrivée

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

et la sortie de l'eau, est placée une pile thermo-électrique soumise d'un côté à l'action de l'eau froide, et de l'autre à celle de l'eau chauffée ; il suffit de relier les bornes de

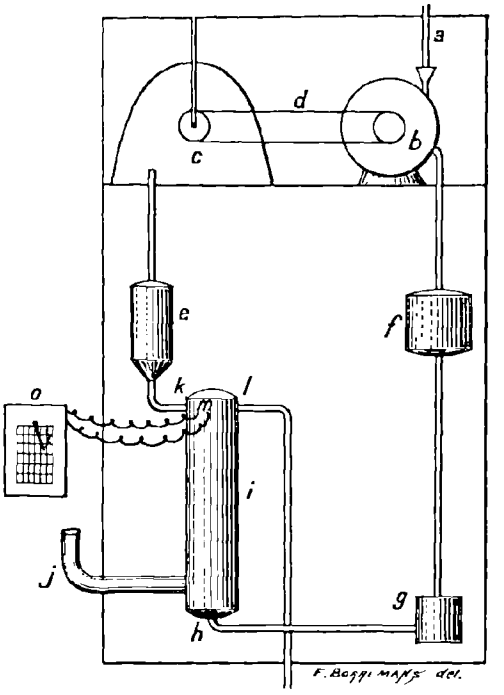

Fig. 6. — Calorimètre enregistreur de Junkers.

la pile à celles d'un galvanomètre enregistreur convenablement gradué (*o*) pour obtenir une courbe indiquant le pouvoir calorifique des gaz combustibles.

§ 4. — Pouvoir calorifique pratique

36. Pouvoir calorifique théorique et pouvoir calorifique réel. — Le pouvoir calorifique déterminé par calorimétrie dépasse toujours le pouvoir calorifique

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

réel. Le charbon jeté sur la grille contient toujours une certaine quantité d'eau qui se vaporise pendant la combustion. Il contient aussi des produits hydrogénés qui, en brûlant, donnent de la vapeur d'eau, d'où nouvelle perte de chaleur de vaporisation. Or ces pertes ne se produisent pas dans l'obus, puisque la vapeur d'eau formée pendant la combustion se condense ensuite en restituant la totalité de la chaleur qu'elle avait absorbée.

C'est ainsi qu'avec du carbone pur, la quantité de chaleur produite par la combustion serait de 8.140 calories; mais, si le carbone contient 3 0/0 d'eau, il y a d'abord diminution proportionnelle du dégagement de chaleur: $8.140 \times 0{,}97 = 7.896$ et perte de $8.140 - 7.896 = 244$ calories. En outre, une partie de la chaleur produite est employée à vaporiser les trois centièmes d'eau, puis à chauffer la vapeur jusqu'à la température de sortie des gaz de la combustion.

Ceux-ci ayant 300° C. et la température du charbon au moment où on le jette dans le feu étant de 25° C. ; on a, en appliquant la formule de Regnault et faisant entrer en ligne de compte la chaleur spécifique de la vapeur d'eau, la chaleur perdue par kilogramme de charbon :

$$\frac{3}{100}[606{,}5 + 0{,}305\,(100 - 25) + 0{,}48\,(300 - 100)] = 21{,}8.$$

Le total des pertes est donc:

$$244 + 21{,}8 = 265{,}8 \text{ calories.}$$

37. Pouvoir calorifique vrai. — Mais le pouvoir calorifique ainsi corrigé ne donne pas la puissance réellement utilisable. En choisissant un charbon d'après les seules données de l'analyse, et d'après l'influence

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

de la teneur en cendres et matières volatiles, on conclurait que le meilleur combustible est celui qui contiendra le moins de cendres et le plus de matières volatiles, et dont le pouvoir calorifique est par conséquent le plus élevé.

« Ce serait faire là une très mauvaise spéculation, remarque M. Izart, car, à partir de 15 à 20 0/0 (16 à 22 selon Saillard) en matières volatiles, la chaleur de la combustion est très mal utilisée dans les foyers de chaudières usuels; le charbon gras brûlant avec une longue flamme occasionne une fumée abondante par suite du refroidissement du foyer et de la dissociation des carbures lourds en carbone (suie) et hydrogène; en outre, au moment où le charbon frais est jeté dans le foyer, il y a dégagement abondant et en quelque sorte instantané de gaz combustibles produits par la distillation; la quantité d'air normale n'est plus alors suffisante et une grande partie de ces gaz s'échappent incomplètement brûlés. »

38. Le générateur calorimètre. — En fait, nous pouvons conclure que la détermination indirecte du pouvoir calorifique donne un résultat inexact; que la détermination directe, exigeant un matériel coûteux, n'est pas toujours possible; qu'au reste, le pouvoir calorifique absolu, déterminé par combustion dans le calorimètre, ne correspond pas le plus souvent à la puissance calorifique pratique résultant de la combustion dans les foyers industriels.

Il paraît, dès lors, que le meilleur moyen d'appréciation pratique de la valeur des combustibles est de déterminer directement la puissance calorifique obtenue lors de leur utilisation. A bien songer, le généra-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

teur de vapeur diffère peu, en principe, de l'appareil Mahler; dans les deux cas le combustible brûle en chauffant une certaine quantité d'eau. Et, de même que les déterminations rigoureuses des poids de carbone et d'eau et de l'élévation de température permettent de calculer au laboratoire la puissance calorifique absolue ; de même, connaissant la température et le poids de la houille brûlée, de l'eau vaporisée, des divers gaz résiduels, on pourra chiffrer la valeur pratique du combustible. Ainsi le contrôle chimique de la combustion permettra de comparer les variétés de houille employées par des essais au *générateur calorimètre*. Non seulement on pourra ainsi juger sûrement, mais il sera possible de faire varier les conditions pratiques d'utilisation pour connaître, outre la valeur de chaque combustible, la façon dont il convient de le brûler en vue d'obtenir le rendement maximum.

Nous donnons ci-dessous, d'après les résultats du concours de Liège, les différences obtenues par les mêmes chauffeurs, dans les mêmes conditions, selon les variétés de charbon ; on verra que l'influence est considérable, et qu'elle n'est pas toujours fonction des résultats de l'analyse des combustibles (1).

(1) Les chiffres de MM. Smal et Timmermans ne sont pas exempts de toute critique ; mais il importe de remarquer que, les erreurs imputables au mode de calcul étant les mêmes pour tous les cas, les résultats gardent toute leur valeur comparative.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Concours de chauffeurs de Liège.

Influence de la *qualité* des combustibles (Essai de huit heures, les mêmes chauffeurs se servant des différents combustibles).

Combustible						Conduite du chauffage				Résultats			Contrôle de la température		
Type commercial		Teneur °/₀ en matières volatiles	Teneur °/₀ en cendres	Poids consommé	Poids °/₀ de carbone non brûlé	Nombre de charges	Intervalle moyen entre deux charges	Poids de chaque charge	Nombre de crochetages	Poids d'eau vaporisée	Vaporisation par heure et m²	Vaporisation par kg. de charbon sec	eau d'alimentation	Gaz avant réchauf.	Gaz après réchauf.
Fines lavées 0/10 demi-grasses	1	14,10	9,23	1392	5,12	40	12′	19,20	13	13,135	9,90	9,128	20	203	119
	2	13,93	8,53	2093	3,90	80	6′	13,02	18	19.243	15,00	9,192	21	261	164
	3	14,10	9,65	1881	3,52	123	3′54″	8,40	22	17,227	13,40	9,157	16,5	239	155
	4	14	8,95	1954	5,20	115	4′9″	9,60	33	17,301	13,50	8,850	15,1	231	146
Braisettes 4/18 demi-grasses	1	13,10	10,20	4272	3,6	79	6′45″	13,95	8	34,891	18,17	8,166	19,5	348	
	2	14	7,25	3021	0,94	55	7′5″	14,28	16	25,330	16,24	8,385	22,2	295	
	3	13,40	8,80	3913	1,59	96	5′	10,85	11	31,349	16,30	8,010	15,5	358	
	4	13,40	7,75	3986	0,89	92	5′13″	11,40	16	31,139	16,20	7,811	16,8	354	
Menu Type III État belge	1	13	10,9	2665	2,47	92	3′12″	10,4	1	21.505	10,70	8,069	16,4	245	
	2	13	10,3	2933	5,30	86	5′36″	11,8	—	22.344	11,10	7,616	20	261	
	3	12,80	15,9	3072	2,95	70	6′48″	15,5	—	22.443	11,20	7,304	14	252	
	4	13,50	10,5	2896	3,77	80	6′	12,3	6	20,863	10,40	7,203	21,5	218	
Braisettes 4/20 demi-grasses	1	14,50	7,15	3875	0,80	76	6′18″	13,6	17	32,034	16,60	8,266	16	350	
	2	14,10	8,60	4223	1,09	80	6′	13,2	22	33,445	17,40	7,919	14	362	
	3	14,50	8,90	3925	1,90	106	4′30″	9,7	26	31,728	16,50	8,082	14,4	356	
	4	14,20	7,40	3998	2,15	103	4′36″	10,3	18	31,279	16,20	7,823	16	365	

CHAPITRE V

LE COMBURANT

39. L'air comburant. — Le comburant universellement utilisé est l'air, qui a les précieux avantages de ne rien coûter, de se trouver partout en quantité illimitée et d'avoir une composition rigoureusement constante. L'air contient en volume et pour cent parties:

Oxygène.	20,77
Azote et gaz inertes . . .	78,35
Anhydride carbonique. . .	0,04
Vapeur d'eau	0,84

soit, en faisant abstraction de la vapeur d'eau et de l'anhydride carbonique:

Azote	0/0 en volume	79,04	et en poids	76,83
Oxygène	»	20,96	»	23,17

et, en rapportant l'azote ou l'air à l'oxygène:

Az/O en volume	3,77 ;	en poids	3,32
Air/O »	4,77	»	4,31

Les rapports Az/O et Air/O étant invariables, l'étude du comburant au point de vue de la combustion serait idéalement simple si d'autres facteurs n'influaient sur le bilan calorique de la combustion. Selon la température de l'air utilisé, il y a, en effet, apport différent de calories. D'autre part, l'état hygrométrique de l'air est essentiellement variable et nous savons que la présence de vapeur d'eau produit une perte de calories.

Nous donnons ci-joint, d'après Baillet, le tableau des

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

propriétés physiques de l'air à ses différents états ; nous étudierons ensuite l'influence de ces deux facteurs sur les phénomènes de combustion.

Air sec, air saturé, air humide à diverses températures

Températures	Air sec		Dans 1 m. cube air saturé				Air saturé	Températures	Air sec	
	Volumes Le volume à 0° et 760 m/m étant 1	Poids du mètre cube	Poids		Chaleur		Poids de vapeur pour 1 kgr. air sec		Volumes Le volume à 0° et 760 m/m étant 1	Poids du mètre cube
			Air sec	Vapeur	Air	Vapeur				
centigr.	m. cubes	kilogr.	kilogr.	kilogr.	calories	calories	kilogr.	centigr.	m. cubes	kilogr.
— 11	0.960	1.347						121	1.444	0.894
— 5	0.980	1.318						149	1.546	0.834
0	1	1.293	1.2854	0.0049	0.0000	2.9528	0.00380	163	1.597	0.809
+ 5	1.020	1.266	1.2589	0.0068	1.4963	4.1290	0.00540	191	1.689	0.763
11	1.041	1.241	1.2270	0.0100	3.2082	6.0750	0.00815	204	1.750	0.737
17	1.061	1.218	1.1941	0.0144	4.8254	8.7898	0.01210	232	1.852	0.698
22	1.082	1.205	1.1656	0.0193	6.0955	11.806	0.01656	260	1.954	0.660
28	1.102	1.173	1.1293	0.0270	7.5163	16.587	0.02388	286	2.056	0.616
33	1.122	1.152	1 0967	0.0353	8.6027	21.775	0.03226	312	2.150	0.601
39	1.143	1.134	1.0538	0.0482	9.7691	29.795	0.04572	340	2.260	0.571
44	1.163	1.110	1.0141	0.0618	10.606	38.294	0.06090	367	2.362	0.540
50	1.184	1.092	0 9604	0.0823	11.415	51.143	0.08565	395	2.465	0.524
55	1.204	1.073	0.9997	0.1034	11.893	64.480	0.11377	422	2.566	0.504
61	1.224	1.056	0.8400	0.1348	12.179	84.243	0.16043	450	2.668	0.484
67	1.245	1.038	0.7588	0.1736	12.085	108.84	0.22883	477	2.770	0.467
72	1.265	1.027	0.6809	0.2127	11.654	133.67	0.31237	505	2.871	0.450
78	1.285	1.004	0.5731	0.2689	10.624	169.49	0.46926	532	2.974	0.429
83	1.306	0.989	0.4694	0.3246	8.2609	205.08	0.69160			
89	1.326	0.974	0.3261	0.4035	6.8986	255.67	1.23740	*Le poids de la vapeur saturée à pression et température égales = 5/8 de l'air sec.*		
94	1.347	0.961	0.1888	0.4806	4.2195	305.26	2.54515			
100	1.367	0.946	0.0000	0.5884	0.0000	374.82	∞			

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

40. Quantité d'air comburant. — D'après la composition des combustibles, il est facile de calculer la quantité théorique de comburant, c'est-à-dire le volume d'air nécessaire pour oxyder le carbone et les carbures. Soit, par exemple (Baillet), un charbon contenant 81 0/0 de carbone, 7 0/0 de cendres et 12 0/0 de matières volatiles, dont 3,5 0/0 d'hydrogène libre. L'anhydride carbonique contient en poids 27,27 0/0 de carbone et 72,72 0/0 d'oxygène. Pour transformer en CO^2 les 810 gr. de carbone contenus dans un kilogramme de houille, on emploiera :

$$(810 : 27{,}27) \times 72{,}72 = 2.160 \text{ gr. d'oxygène,}$$

soit, le poids de l'oxygène étant de 1 gr. 43 par litre :

$$2.160 : 1{,}43 = 1.510 \text{ litres d'O de l'air.}$$

Or, nous savons que le volume de CO^2 formé est égal au volume de l'O qui l'a formé ; on a donc produit 1.510 litres d'anhydride carbonique. Et, l'air contenant 21 0/0 d'O et 79 0/0 d'Az, on devra employer $(1.510 : 21) \times 79 = 5.688$ litres d'azote avec les 1.510 litres d'oxygène, soit au total 7.198 litres d'air dont le volume reste invariable.

Les 35 gr. d'hydrogène pèsent 0 gr. 089 par litre, il y en a donc $35 : 0{,}089 = 393$ litres. Or, l'hydrogène brûlant avec la moitié de son volume d'oxygène, il faudra $393 : 2 = 196$ litres d'O pour former de l'eau. Cet oxygène entraîne un volume de $(196 : 21)\ 79 = 757$ litres d'azote. Le total de l'air employé à la combustion de l'hydrogène est donc :

$$196 + 757 = 953 \text{ litres.}$$

On a ainsi employé, pour oxyder le carbone et l'hydrogène de la houille, $7.198 + 953 = 8.151$ litres, ce

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

qui, comparé à la quantité d'anhydride carbonique (1.510), donne une teneur en CO^2 de (1.510 × 100) : 8.151 = 18,5 0/0, en admettant les gaz ramenés aux conditions de température et de pression existant avant la combinaison (1). Selon la composition des houilles, le rapport varie généralement de 16 à 20 0/0.

Ce calcul donne en pratique une approximation très suffisante, mais, en réalité, les choses ne se passent pas aussi simplement. Outre le carbone et l'hydrogène, il y a dans certains combustibles de l'oxyde de carbone, du soufre, etc., dont il faut tenir compte. Dans le cas de combustibles gazeux, on peut utiliser les données du tableau ci-contre, dû à M. Ser et donnant les quantités d'oxygène et d'air nécessaires à l'oxydation complète de chaque gaz.

Il importe enfin de tenir compte de l'oxygène préexistant dans les combustibles: il suffit pour cela de retrancher du total de l'O calculé, 0 m^3, 699 par kgr. d'oxygène renfermé dans le combustible.

Quant à la quantité d'air comburant minimum à laquelle il soit possible de parvenir en pratique industrielle — on verra (§ 59) qu'il n'est pas de combustion possible sans un fort excès de comburant — on l'estime ordinairement à 11-12 mètres cubes par kgr. de charbon ; ce qui correspond à une teneur de 12 à 13 d'anhydride carbonique % de gaz brûlés.

(1) Si la température, comme c'est le cas, est beaucoup plus élevée, le volume change, mais le rapport reste égal, puisque tous les gaz se dilatent également.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Données numériques sur la combustion (Ser)

		Carbone complètement oxydé	Carbone incomplètement oxydé	Oxyde de carbone	Hydrogène	Formène	Ethylène
Poids relatifs	du combustible	12	12	28	2	16	28
	de l'oxygène. .	32	16	16	16	64	96
	des produits de la combustion.	44	28	44	18	44+36	88+36
Poids par kgr. de combustible	d'oxygène . .	2,667	1,333	0,571	8,000	4,000	3,428
	des produits de la combustion.	3,667	2,333	1,571	9,000	5,000	4,428
	d'air. .	11,594	5,797	2,484	34,784	17,392	14,903
Quantités	de combustible	1C	1C	1CO	2H	1C+4H	2C+4H
	de comburant .	2O	1O	1O	1O	4O	6O
	de produit . .	$1CO^2$	1CO	$1CO^2$	$1H^2O$	$1CO^2+2H^2O$	$2CO^2+2H^2O$
Volumes en m³ à 0°C. par kgr. de combustible	de combustible			0,7986	11,1700	1,399	0,7986
	d'oxygène . .	1,865	0,9325	0,3993	5,5850	2,7980	2,3958
	de produit . .	1,865	1,865	0,7986	11,17	4,197	3,194
	d'air. .	8,9669	4,4834	1,9188	26,8500	13,4520	11,5190
	de gaz résiduels, (combustion avec l'air)	8,9669	5,4159	2,3181	32,435	14,851	12,3176

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

41. Calcul du volume d'air ayant servi à l'alimentation. — Nous avons vu que la combustion n'est possible qu'avec un excès minimum d'air ; aussi y a-t-il toujours en réalité, dans le gaz de la combustion, présence d'air non oxydé ; les résultats de l'analyse permettent de calculer la quantité totale d'air ayant servi à l'alimentation.

Pendant la combustion, l'oxygène, en se transformant en CO^2, produit un volume d'anhydride carbonique égal au sien ; il n'y a donc pas de changement de volume, et le calcul de la quantité de gaz résiduels pourrait donner également le volume de l'air ayant passé dans le foyer ; il en est de même de la combinaison du soufre avec l'oxygène. Mais la formation de CO donne un volume d'oxyde de carbone égal au double du volume d'air, et les hydrocarbures contribuent aussi, dans une très petite mesure, il est vrai, à l'augmentation de volume. En outre, l'hydrogène contenu dans toutes les houilles exige pour sa transformation en eau — éliminée par condensation — huit fois son poids d'oxygène.

En ne tenant compte que de la seule correction réellement utile, relative à la disparition d'oxygène, et sachant que chaque centième d'hydrogène contenu dans 1 kgr. de houille transforme en eau 55 litres 9 d'oxygène, on peut modifier ainsi la formule donnant le volume total des gaz résiduels à 0° et 0 m. 760 (1) :

$$V' = \frac{C - c}{(v + v')\,0\text{ gr. }563 + 1\text{ gr. }071\,v''} + 55{,}9\,H.$$

(1) Scheurer-Kestner. *Pouvoir calorifique des combustibles.*

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Soit, pour l'air normal, saturé d'humidité à 0°, sous la pression de 0 m. 760 et contenant 0,04 0/0 d'anhydride carbonique :

$$V'' = \frac{C - c}{(v + v')\,0{,}567 + 1{,}0806\,v''} + 55{,}9\ H.$$

42. Mesure directe de l'air (1). — On peut déterminer plus directement le volume de l'air en mesurant la vitesse d'afflux de l'air et déduisant le volume par une formule fixée empiriquement par l'expérience.

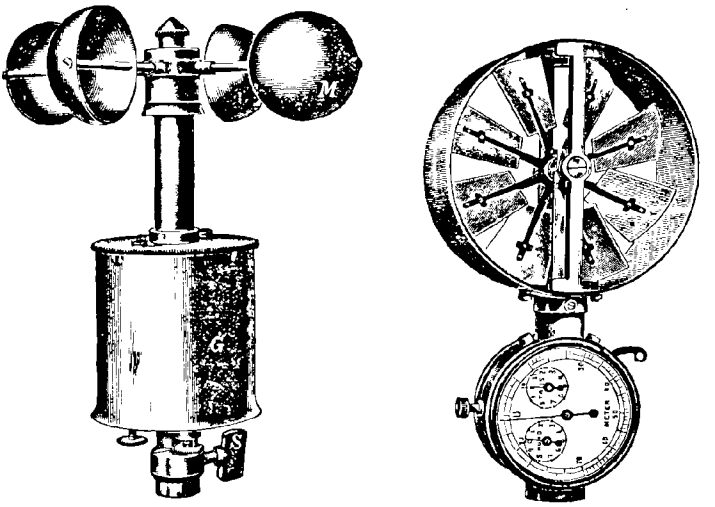

Fig. 7 et 8 — Anémomètres (Fuess.)

On emploie dans ce but, soit un anémomètre (fig. 7 et 8) placé dans des conditions toujours rigoureusement identiques (dans l'axe d'un ajutage cylindrique et à la profondeur de 1 mètre), soit un indicateur de tirage suffisamment sensible (§ 50). Outre qu'un tel dispositif est compliqué, la méthode est beaucoup moins

(1) Burnat. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1858.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

précise que le calcul d'après les résultats de l'analyse; quoique l'emploi comparatif des deux méthodes n'ait pas donné à M. Burnat de différences supérieures à 5 0/0, l'erreur relative devait être bien supérieure; il y a, en effet, toujours des rentrées d'air, soit au moment des charges, soit par les jours de la porte, ce qui fausse les indications de l'appareil.

Dans le cas de l'emploi d'un anémomètre, le coefficient varie selon le modèle de l'appareil; si l'on utilise un manomètre, on applique la formule de Hirn (1):

$$V = 0{,}9\ S \sqrt{2g\ \frac{0{,}76\ h(1 + 0{,}0037\ t)}{0{,}0013\ B}}$$

dans laquelle :

V est le volume d'air introduit sous la grille (m^3) ;
S la section de l'orifice d'arrivée d'air au cendrier ;
0,9 le coefficient de réduction ;
h la différence de pression entre le cendrier et le local (exprimée en colonne d'eau) ;
B la pression barométrique de la chaufferie ;
t la température ;
g l'accélération de vitesse dans la chute des corps.

La quantité d'air comburant nécessaire à la combustion est empruntée à l'atmosphère, soit en provoquant sur le carneau central une aspiration par une cheminée ou un ventilateur, soit en refoulant sous la grille l'air à l'aide d'une machine spéciale.

43. **Cheminées et carneaux.** — Le tirage naturel se fait par une cheminée de hauteur telle que le cylindre d'air chaud contenu à l'intérieur ait une force

(1) Dont on trouvera les détails d'application dans le mémoire de Burnat (*loc. cit.*) et dans l'ouvrage de Scheurer-Kestner : *Pouvoir calorifique des combustibles.*

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

ascensionnelle (résultant de sa densité inférieure à celle de l'air) suffisante pour assurer à la base un tirage de 15 mm. d'eau. Cette hauteur est souvent déterminée aussi par des considérations particulières : les fumées doivent se disperser facilement sans incommoder le voisinage et la cheminée doit dépasser les édifices voisins capables d'influencer la force et la direction du vent à son sommet.

Une cheminée de 30 mètres suffit d'ordinaire pour produire à la base, avec des gaz à 200-300° C. une dépression de 16-18 mm. Une augmentation de hauteur n'accroît que peu ce tirage, la vitesse étant d'autant plus diminuée par suite du frottement que la course est plus longue ; c'est ainsi qu'une hauteur de 45 m. ne produit, avec des gaz à 200-230° C., qu'un tirage de 25 mm. Par contre, l'augmentation de diamètre influe beaucoup plus sur le débit ; à vitesse égale, le débit est proportionnel au carré du diamètre ; en pratique, l'ouverture supérieure de la cheminée doit avoir une surface minimum égale au quart de la surface de grille (Baillet).

Les carneaux doivent avoir des sections suffisantes pour permettre le nettoyage et le passage facile des gaz, même quand les parois sont souillées de suie. On estime d'ordinaire cette section égale soit à 35 décimètres carrés par 100 kgr. de houille consommée à l'heure, soit au quart de la surface de grille.

Dans une même cheminée, et toutes conditions étant égales, l'intensité du tirage croit avec l'augmentation de température des gaz, ceux-ci devenant de plus en plus légers. D'après M. Izart, les tirages de cheminées de hauteurs différentes varient ainsi, la température ambiante étant de 15° C. (chiffres arrondis).

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Hauteur de la cheminée (mètres)	Intensité du tirage (en mm. d'eau) pour des températures de										
	50°	100°	150°	200°	250°	300°	350°	400°	450°	500°	600°
15	2	4,5	6	7,5	8,5	9,5	10,5	11	11,5	12	13
20	3	6	8	10	11,5	13	14	14,5	15,5	16	17
25	3,5	7,5	10,5	12,5	14,5	16	17,5	18,5	19,5	20	21,5
30	4	9	12,5	15	17,5	19	21	22	23	24	26
35	5	10,5	14,5	17,5	20	22,5	24,5	26	27	28	30
40	6	12	16,5	20	23	26	28	29,5	31	32	34,5
45	6,5	12,5	18,5	22,5	26	29	31,5	33	35	36	39
50	7	14	20,5	25	29	32	35	37	39	40	43
55	8	15	22,5	27,5	32	35,5	38,5	40,5	42,5	44	47,5
60	8,5	17	25	30	35	38,5	42	44	46,5	48	52

44. Tirage mécanique et foyer soufflé. — Le tirage naturel par la cheminée n'est pas économique, puisqu'il résulte de la quantité de chaleur enlevée par les gaz (pratiquement, on n'en peut chiffrer le coût que s'il est possible d'éviter la perte) ; de plus, il est instable, et dépend de la température et de la pression ambiantes, de la direction du vent. Dans certains cas, pour des poussiers de charbons maigres par exemple (qu'avant l'utilisation dans les gazogènes, on pouvait avoir intérêt à brûler ainsi), il est insuffisant. Aussi a-t-on beaucoup préconisé l'emploi de ventilateurs pour régler la quantité d'air comburant, ces appareils pouvant agir par pression au-dessous de la grille, ou dépression dans les carneaux.

Les ventilateurs permettent évidemment un réglage beaucoup plus flexible selon les conditions ; par contre

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

la dépense de vapeur consommée par leur fonctionnement et leurs frais plus grands d'installation ne semblent pas compensés par cet avantage. La question est controversée : c'est ainsi que M. Izard prétend que « le tirage par cheminée, par son manque de flexibilité et surtout par la perte de calories qu'il entraîne, est incompatible avec les conditions économiques d'une bonne combustion », tandis que M. Schmidt conclut des essais faits à la Station centrale de Nuremberg : « Avec le ventilateur le coût des 1.000 kgr. de vapeur est supérieur de 4,7 0/0 à celui obtenu avec une cheminée ordinaire. Il est vrai qu'on a pu brûler des sortes de charbon inférieures sans réduction de la puissance de production des générateurs. Mais malgré cette commodité le ventilateur reste sans avantage pécuniaire ».

45. **Température de l'air.** — Le chauffage de l'air passant au foyer de la température ambiante à la température de la combustion nécessite une dépense considérable de calories. Dans les foyers métallurgiques, les hauts fourneaux, on utilise depuis longtemps le chauffage préalable de l'air comburant, effectué par la chaleur des gaz résiduels (récupérateurs). Il résulte de ce fait une économie considérable.

L'économiseur *anathermique* Sturtevant se compose de faisceaux de tôle ondulée plongés dans les carneaux (les gaz circulent d'un côté de la tôle et l'air de l'autre). L'enveloppe Chedepeau et Viaud (B. F. 1903) consiste en une enveloppe métallique qui entoure la chaudière ; cette double paroi permet de chauffer l'air comburant avant son entrée dans le foyer. Mais la température ainsi obtenue (100-150° C.)

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

est loin d'atteindre celle produite par les récupérateurs usités en métallurgie; il en résulte que l'économie est faible; aussi l'application du chauffage de l'air ne s'est-elle pas généralisée.

De très intéressants essais ont été faits à plusieurs reprises pour chiffrer l'économie réalisable par chauffage de l'air comburant : en 1853 par Schlumberger, en 1857 par Schwartz (20 à 30 0/0 de bénéfice), enfin en 1889 par Poupardin, dont les chiffres paraissent plus vraisemblables (1). Il résulte de ces derniers essais que l'on peut économiser environ 400 calories par kilogramme de houille brûlée en chauffant l'air avec les gaz résiduels dans des appareils genre Green.

On calculera facilement l'économie réalisable du fait de l'échauffement de l'air comburant, en faisant la différence des pertes avec ou sans chauffage.

46. Suroxygénation de l'air. — Si le comburant était non de l'air, mais de l'oxygène, la température de la combustion serait infiniment plus élevée. Aussi les inventeurs se sont-ils attachés au problème de l'enrichissement de l'air en oxygène, et ce problème n'est pas loin d'être résolu.

L'extraction de l'oxygène de l'air atmosphérique peut se faire physiquement en utilisant les différences des points d'ébullition des deux gaz préalablement liquéfiés (O à — 182°C., Az à — 195,5), ou celles de leurs propriétés magnétiques ainsi que de leurs densités.

Ce dernier procédé a été l'objet d'expériences très intéressantes exécutées à Turin par P. Guédon sur une

(1) On trouvera le détail de tous ces essais dans le *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1853, 1857, 1889.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

chaudière d'essai. Le principe de l'appareil employé était celui d'une turbine à très grande vitesse ; l'oxygène, plus lourd, est projeté à la périphérie où on le recueille pour le conduire au foyer. A la suite de ce traitement l'air était enrichi à 26 0/0 d'oxygène au lieu de la teneur normale de 14 0/0. L'économie résultant d'une telle manipulation n'atteint pas les frais du traitement préalable.

Linde a proposé d'enrichir l'air comburant par la distillation fractionnée de l'air liquide. Les points d'ébullition étant pour l'azote — 195° et pour l'oxygène — 182° ; on conçoit qu'en traitant l'air dans une colonne rectificatrice à plateaux du genre de celles utilisées en distillerie, on obtienne un air très riche en oxygène. De plus, la liquéfaction s'opérant par la détente, on réduit beaucoup le coût de l'opération en employant cette détente pour la compression préalable (Procédés G. Claude). Malgré cela, le mètre cube d'air à 50 0/0 d'oxygène reviendrait à deux centimes, ce qui est encore beaucoup trop cher (1).

On tenta également sans succès la séparation des éléments de l'air par leurs propriétés magnétiques différentes.

Pour obtenir l'économie théorique résultant des comburants suroxygénés, il suffit de calculer le nombre de calories épargnées par suite de la quantité moindre d'azote à échauffer.

47. Comburants additionnels. — Il a été mis dans

(1) Peut-être l'abaissera-t-on suffisamment. Après Linde qui chiffrait à 2 centimes le mètre cube d'air à 50 0/0, Claude prétend qu'il est actuellement possible de fabriquer industriellement de l'oxygène à 3 centimes le mètre cube.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

le commerce un certain nombre de produits capables, au dire des prospectus, de produire une économie notable de combustible, de permettre l'emploi de poussiers de charbon, d'améliorer la combustion lors d'un tirage médiocre, etc. De fait, lorsqu'on projette une de ces poudres sur des charbons incandescents, elle paraît provoquer une combustion plus vive causée par le dégagement d'oxygène contenu dans le produit. Ce n'est là d'ailleurs qu'une illusion, la quantité de comburant ainsi ajoutée étant infime.

Gill (1) analysa un de ces mélanges vendus pour activer la combustion ; il se composait de :

Sel marin	2.000	dissoudre dans l'eau, puis arroser le combustible à raison de 1.300 grammes par tonne de houille.
Sulfate de fer	100	
Charbon de bois	25	
Azotate de potasse . . .	15	
Carbonate de soude anhydre.	15	

On peut juger de la valeur du produit par ce fait que la quantité d'oxygène ainsi ajoutée aux 11.340 mètres cubes d'air nécessaires à la combustion est de 1 litre et demi ! Des essais de Saillard faits dans plusieurs sucreries françaises avec une autre poudre ont donné, comme c'était évidemment à prévoir, des résultats absolument négatifs.

La plupart de ces compositions sont constituées par des azotates donnant de l'oxygène, du sel marin dont les crépitements ajoutent à l'effet produit, et des matières colorantes qui ont la même utilité. L'emploi d'ailleurs en semble maintenant tout-à-fait abandonné.

(1) Augustus G. Gill, *Power*. 1905.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

CHAPITRE VI

LE TIRAGE

On appelle communément « tirage » l'appel d'air produit dans les carneaux et le foyer par la colonne des gaz chauds de la cheminée ; on mesure son intensité par la différence de pression des fluides dans le carneau et à l'extérieur (mesurée en millimètres d'eau). Cette définition s'applique d'ailleurs d'une façon générale, non seulement quand le tirage est produit par aspiration naturelle ou artificielle, mais quand il s'agit d'un refoulement d'air (foyers soufflés).

On sait l'importance considérable qu'a la vitesse d'afflux de l'air sur la bonne marche de la combustion (§ 64). Non seulement l'intensité du tirage doit varier selon les phases successives de l'état du combustible, mais elle dépend dans une large mesure de la nature de ce dernier, ainsi que du point où s'effectue la détermination.

48. Intensité du tirage. — Il faut distinguer le tirage sous grille, du tirage aux carneaux et du tirage à la cheminée; on trouve dans les différents cas des chiffres fort différents, variant du simple au décuple selon l'installation et l'état des carneaux. Les rentrées d'air, les coudes, des dépôts de suie, les effondrements

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

de cloisons maçonnées sont en effet autant de causes qui viennent affaiblir l'intensité de l'appel d'air à la base de la cheminée. Pratiquement, il est nécessaire d'avoir sous grille un maximum possible d'au moins 7 millimètres, le tirage aux carneaux latéraux devant pouvoir atteindre le double. Des chiffres trop faibles coïncidant avec des chiffres normaux du tirage pris en même temps à un endroit différent indiquent l'obstruction des conduites.

Le tirage doit d'ailleurs varier avec la nature du combustible ; voici, selon la Compagnie Sturtevant, les valeurs du tirage total dans le cas des différents combustibles (exprimé en millimètres d'eau) :

Nature du combustible	Tirage	Nature du combustible	Tirage
Paille	5	Poussiers de houille . .	20-30
Bois	7,5	Charbon maigre	22-30
Sciure	8,5	Mélange moyen et menu .	25-32
Tourbe	11,5	Anthracite, coke. . . .	30-35
Mélange sciure de bois et menus de houille. . .	15	Mélange menu-poussier .	30-38
Charbon tout venant . .	10-18	Menus et poussiers d'anthracite	32-45
» (gailleteries) . .	15-20		
» (menus). . . .	18-28		

49. Manomètres métalliques. — On peut utiliser, pour les mesures des très faibles dépressions produites par l'appel d'air de la cheminée ou le soufflage sous grille (quelques millimètres d'eau), des appareils à tube cintré du genre des manomètres de Bourdon ; le tube étant construit en métal mince et élastique

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

permet d'obtenir une sensibilité maximum. La forme de boîte métallique à paroi ondulée mince du modèle des baromètres permet également d'obtenir une grande sensibilité. Les appareils *Richard* (fig. 9) sont composés d'une telle boîte; les déformations du couvercle métallique flexible, proportionnelles à la dépression exercée à l'intérieur, sont transmises à une aiguille extérieure. On conçoit d'ailleurs que l'élasticité de la membrane puisse varier selon le temps, l'oxydation, etc. ; aussi ces genres d'appareils sont-ils peu employés.

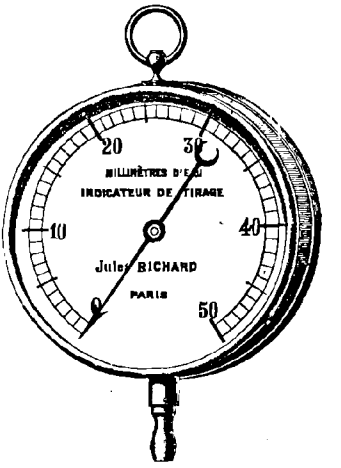

Fig. 9. — Indicateur de tirage Richard.

Au contraire, l'indicateur de tirage métallique de

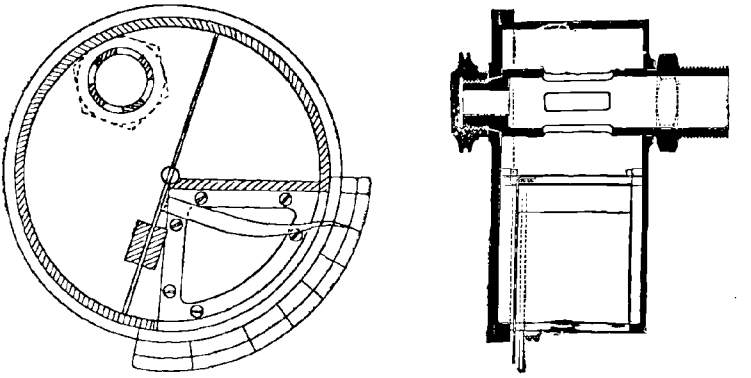

Fig. 10 et 11. — Coupe de l'indicateur Hudder.

Hudder est rustique et très répandu. Il se compose d'un cylindre de 12 cm. de diamètre, 6 cm. de haut,

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

portant un clapet qui tourne librement autour de l'axe longitudinal central (fig. 10, 11 et 12); ce clapet est lesté par un poids correspondant à la dépression maximum à

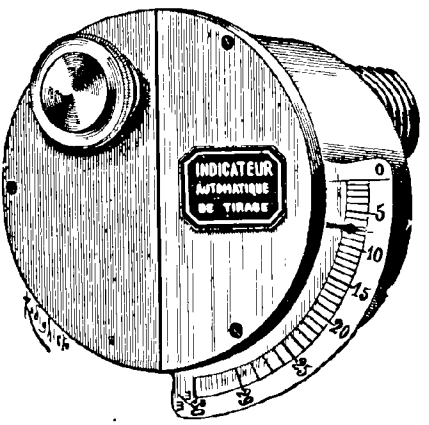

Fig. 12. — Indicateur de tirage Hudder (Vue extérieure).

mesurer. Le cylindre est relié au carneau par un tube métallique de façon que le clapet mobile soit sollicité d'un côté par la dépression à mesurer, de l'autre par la pression ambiante ; une aiguille indique ses oscillations sur un cadran extérieur.

Il faut remarquer que le clapet, qui doit pouvoir osciller très librement, ne touche pas les parois du cylindre ; aussi se produit-il continuellement des fuites d'air qui, de la partie soumise à la pression atmosphérique, se précipite de l'autre côté du clapet où il y a dépression. Par suite, les indications de l'indicateur Hudder ne sont exactes que si la graduation a été faite sur l'appareil muni d'un tube de prise de gaz absolument identique à celui qu'il porte. Si l'on relie le cylindre au carneau par un tube plus long ou de diamètre différent, les indications sont faussées par l'afflux d'air, l'équilibre ne se produisant plus instantanément

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

entre la dépression du carneau et celle de la partie correspondante de l'appareil. L'indicateur de Hudder ne convient que pour les installations à poste fixe.

50. **Manomètres à eau munis d'amplificateurs mécaniques.** — Les dénivellations des indicateurs de tirage à tubes communiquants étant très faibles, on imagina de les amplifier par des dispositifs de flotteurs commandant des aiguilles indicatrices. Le *piézomètre de Leurson* se compose d'une caisse close A (fig. 13) dont le couvercle porte un cylindre B, de telle sorte que, le tout étant rempli de liquide, les deux récipients forment vases communiquants.

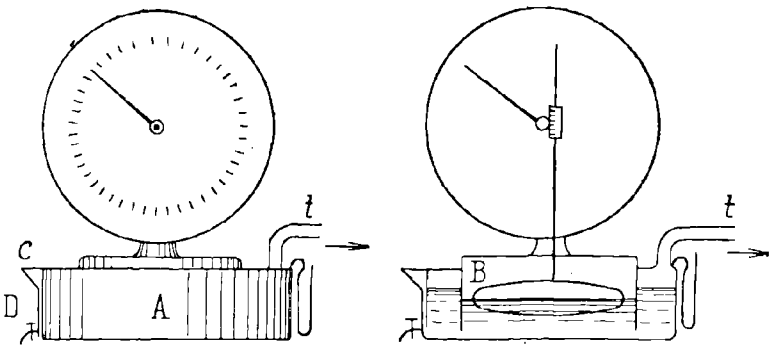

Fig. 13 et 14. — Piézomètre Leurson. Vue extérieure et schéma du fonctionnement.

Dans ces conditions, le tube *t* étant relié au carneau dont on veut mesurer la dépression et B communiquant avec l'air, il se produit une dénivellation des liquides (fig. 14) que le flotteur transmet par l'intermédiaire de sa tige-guide centrale au pignon sur lequel est montée l'aiguille mobile du cadran supérieur ; le cadran est gradué en millimètres d'eau. L'enton-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

noir C sert à l'introduction de l'eau, le robinet D à la vidange de l'appareil. La multiplication du mouvement du flotteur F peut être évidemment quelconque, elle est de 20 dans le modèle courant.

L'indicateur de tirage *Parrot* consiste essentiellement en un réservoir à liquide divisé à la partie supérieure en deux compartiments dont l'un communique avec l'atmosphère et l'autre avec les carneaux des générateurs. Sous l'influence de la dépression, il se produit une dénivellation dans le niveau des liquides. Pour montrer et amplifier cette dénivellation, on a placé, dans le compartiment communiquant avec l'air, un flotteur hémicylindrique plongeant en partie dans le liquide et portant une aiguille mobile devant un cadran. Le flotteur est mobile autour d'un axe se confondant avec celui du cylindre générateur ; le centre de gravité du système tend donc à faire déplacer l'aiguille dans le sens de gauche à droite, quand le niveau du liquide s'abaisse dans le compartiment communiquant avec l'air. Ajoutons que le mode de suspension du demi-cylindre flotteur, au moyen de deux pointes, lui donne une extrême sensibilité, et, comme il n'y a aucun organe de transmission, les moindres variations de niveau du liquide sont immédiatement accusées par l'aiguille

L'indicateur de *Schultze* est basé sur un principe analogue ; une cloche mobile autour de son axe baigne dans un liquide dont les dénivellations la font tourner plus ou moins ; le mouvement amplifié est transmis mécaniquement à une aiguille mobile sur un cadran extérieur.

L'appareil de *Hirn* se compose d'une balance dont l'un des plateaux est remplacé par une cloche C plongeant

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

librement dans une cuve à eau E (fig. 15) ; l'intérieur de la cloche étant relié par le tube T au milieu dont on veut déterminer la dépression, et la balance étant tarée, les variations de pression dans la cloche C se traduisent par des déplacements de l'aiguille sur le cadran A, gradué par comparaison. L'appareil de Hirn, destiné à des recherches scientifiques sur la

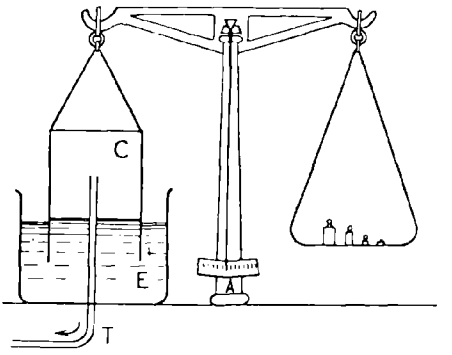

Fig. 15. — Appareil de Hirn.

combustion dans les foyers industriels, n'a pas reçu d'autres applications pratiques.

51. Manomètres à eau. — Le plus simple de tous les indicateurs de tirage est évidemment un simple tube en U rempli à moitié d'eau colorée et dont une des branches est reliée au carneau, les dénivellations indiquant la dépression. On peut construire soi-même un tel manomètre en fixant, sur une planchette graduée en millimètres, un tube de verre de faible diamètre, courbé en U ; en pratique il est préférable d'employer le manomètre dit « des gaziers », comprenant des tubes de verre épais réunis dans une monture de bronze (fig. 16) ; le tout est ainsi plus robuste et plus facilement maniable.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Mais tous ces appareils ont le défaut commun de ne donner que de très légères dénivellations, d'une amplitude inférieure à 2 centimètres ; si l'on songe que les niveaux du liquide oscillent constamment et qu'il faut faire deux lectures (une dans chaque branche), on conçoit que l'on ne puisse atteindre ainsi qu'une précision de 1/5 ou 1/10 au maximum de la valeur à mesurer.

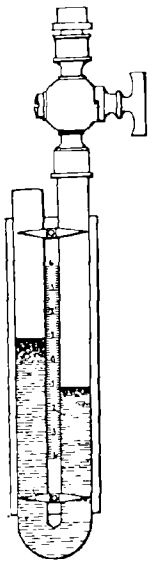

Fig. 16. — Manomètre des gaziers.

Aussi a-t-on cherché à augmenter la longueur de déplacement du niveau des liquides ; la façon la plus simple est d'employer un tube à branches inégalement inclinées ; les dénivellations dans la branche oblique, où se font les lectures, sont ainsi multipliées.

En donnant au tube droit une grande largeur, rien ne limite l'obliquité du tube incliné, partant la longueur de l'échelle. En réalité, il faut se borner de façon que le niveau dans le tube puisse être nettement indiqué. Des

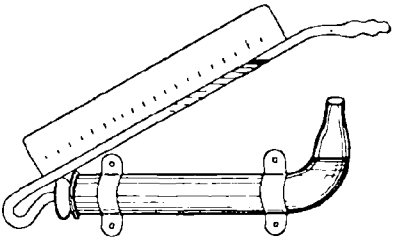

Fig. 17. — Manomètre de Muller à branche inclinée.

manomètres de ce genre sont usités dans de nombreuses installations ; citons parmi les plus répandus celui de *Muller*, très rustique (fig. 17), celui de *Démichel*, plus précis (fig. 18).

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Les manomètres à tube incliné ont l'inconvénient de se prêter malaisément au transport et aux mesures des divers générateurs. En effet, outre l'encombrement

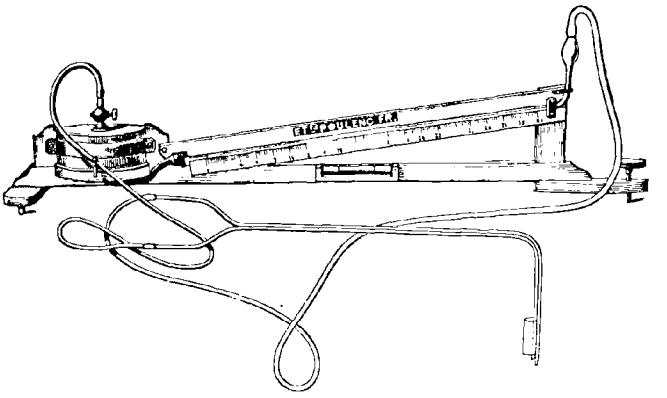

Fig. 18. — Manomètre de Démichel.

résultant de la branche oblique, il faut remarquer que l'appareil doit être parfaitement horizontal, la moindre inclinaison faussant le résultat de la lecture.

Aussi a-t-on cherché à augmenter par un dispositif différent les déplacements apparents de la surface des liquides dans les manomètres destinés aux mesures des faibles dépressions.

Le *manomètre différentiel de Kretz* (1) a pour but de mesurer les différences de pression quand un simple tube en U ne donnerait pas une approximation suffisante. Il se compose de deux ballons en verre munis de deux tubulures fermées par des bouchons en caoutchouc que traversent des tubes de verre reliés entre eux par un tube de caoutchouc.

L'appareil est rempli jusqu'à une certaine hauteur

(1) Ch. Meunier, *Les générateurs à vapeur à l'Exposition de 1867*, Bull. de la Soc. industrielle de Mulhouse, 1868.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

d'eau alcoolisée colorée en rouge et d'essence de térébenthine préalablement mises en présence pendant 24 heures, de manière à se saturer convenablement et à donner un plan de séparation nettement défini dans l'instrument. La partie supérieure du ballon S (fig. 19)

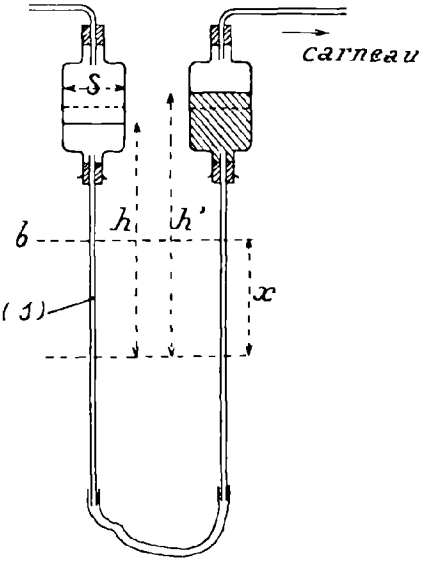

Fig. 19. — Manomètre de Kretz.

communique avec l'atmosphère ; le tube qui traverse la tubulure supérieure du second ballon établit la communication avec le milieu dont on veut déterminer la pression.

Si S et s sont les sections des cuvettes et du tube, h et h' les hauteurs des ménisques au-dessus de la surface de séparation au repos, d et d' les densités des deux liquides : soient P la pression atmosphérique et p la pression exercée en S. On a, au repos :

$$P + hd = P + h'd' ;$$

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

mais, si on exerce en S la pression p, l'équilibre est rompu et la surface de séparation des liquides vient en b; soit x la différence de niveau. Dans les deux cuvettes dont les sections sont supposées égales, le liquide descend d'un côté de $\frac{s}{S}x$ et remonte de l'autre de la même quantité. Les pressions égales peuvent se représenter ainsi (1) :

$$P + p + hd - dx - \frac{s}{S}xd = P + h'd' - xd' + \frac{s}{S}xd'$$

d'où l'on tire :

$$x = \frac{p}{d - d' + \frac{s}{S}(d + d')},$$

formule permettant de graduer l'instrument. On remarquera que x est proportionnel à p.

52. Manomètre différentiel Rousset. — La forme originale de Kretz est très incommode ; aussi fut-elle modifiée successivement par Salleron, par F. Dupont (2) qui employait un tube en U terminé en cuvettes, le tout d'une seule pièce. On emploie beaucoup en Allemagne une forme particulièrement pratique, consistant en deux tubes concentriques : l'appareil est ainsi rendu plus robuste et moins encombrant (3).

L'un de nous avait déjà utilisé ce dispositf avant de connaître l'antériorité allemande dans la construction d'un manomètre différentiel très rustique et commode; les détails différant notablement des autres modèles,

(1) Horsin-Déon. *Traité de la fabrication du sucre.*

(2) *Bulletin de l'Association des Chimistes, loc. cit.*

(3) On peut trouver la description d'un type construit par plusieurs firmes allemandes dans l'ouvrage de Parnicke, *Die maschinellen Hilfsmittel der chemischen Technik.*

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

nous en donnons ci-joint la description inédite. Le *manomètre différentiel Kretz-Rousset* se compose de deux pièces de verre réunies par parties rodées à l'émeri. Le tube-cuvette extérieur (fig. 20) est en verre fort, d'une hauteur de 25 cm. et de 3 à 5 cm. de diamètre ; il porte à la partie supérieure deux tubulures 1 et 2. Le tube-bouchon intérieur se compose d'un ballon rodé sur la partie supérieure de la cuvette, surmonté d'un bouton et terminé inférieurement d'abord par un cylindre de diamètre moyen, puis par un tube de petit diamètre.

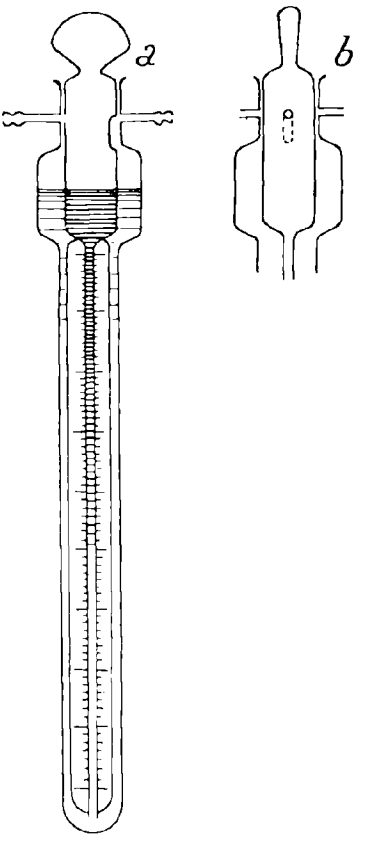

Fig. 20. — Manomètre différentiel Rousset.

Le tout est disposé de telle sorte que, dans la position normale (*a*), les tubes 1 et 2 puissent communiquer l'un avec le tube central, l'autre avec l'espace annulaire ou inversement. L'appareil étant rempli de deux liquides comme le manomètre Kretz, si l'on fait agir en 1 et 2 des pressions différentes, il se produit dans le tube central des dénivellations d'autant plus amplifiées que la différence entre les surfaces des niveaux supérieurs des liquides, d'une part, et celle de leur séparation, d'autre part, est plus forte. Et il suffit de tourner

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

le bouton *b* pour immobiliser le tout et transporter commodément l'appareil. La largeur du tube-cuvette permet de souder au tube central une plaquette d'opaline portant des divisions très apparentes. Dans le cas d'une installation à demeure, on protège le manomètre, fixé au massif du générateur, par une plaque métallique estampée, portant une rainure longitudinale ne découvrant que la graduation et le tube central. Ajoutons que la réunion des tubes par des parties rodées rend très faciles démontage, nettoyage et réglage.

53. Enregistreurs de tirage. — Tous les anémomètres à ailettes peuvent être munis d'enregistreurs

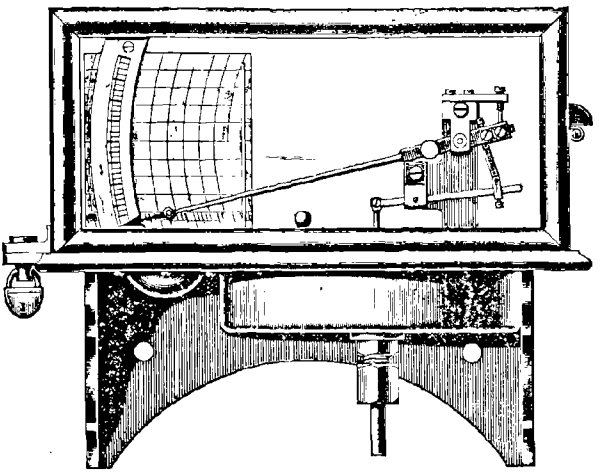

Fig. 21. — Indicateur-enregistreur de tirage Schæffer et Budenberg.

(anémomètres Richard par exemple), mais de tels modèles conviennent peu aux applications industrielles. Les dénivellations des manomètres à eau peuvent aussi être enregistrées de même que l'on enregistre

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

également les indications de manomètres métalliques très sensibles. Il existe aussi des indicateurs de tirage à volets mobiles (système Hudder) dont les indications sont portées à la fois sur un cadran comme à l'ordinaire et sur un cylindre enregistreur. Nous préférons les appareils basés sur le tube de Pitot, qui ont été conçus par MM. Murgne, Ellinghaus et Bruyn. Nous décrirons le plus usuel, avec les modifications apportées à sa construction par la firme R. Fuess, de Berlin.

Le « volumomètre » Ellinghaus-Fuess se compose de deux cloches flottantes égales sous lesquelles débouchent deux tubes qui s'ouvrent dans le courant de la

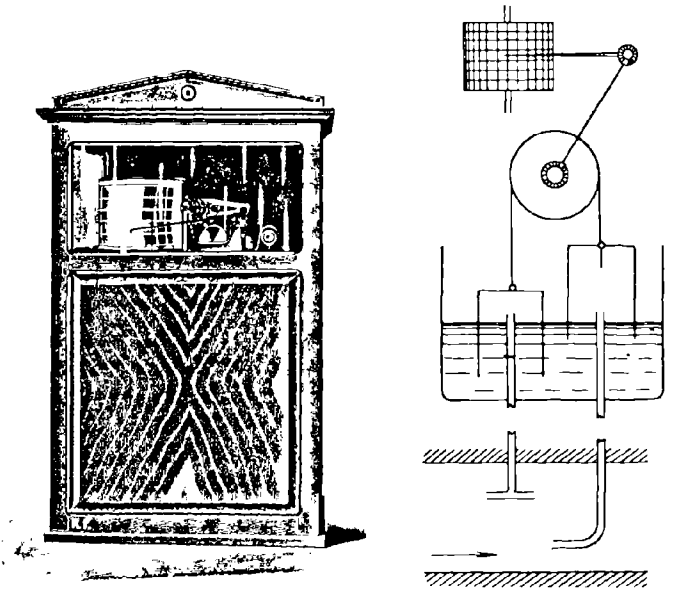

Fig. 22 et 23. — Volumomètre Ellinghaus-Fuess. Vue extérieure et schéma du fonctionnement.

veine gazeuse dont on veut mesurer la vitesse, l'un par une section droite parallèle au courant, l'autre par une

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

partie recourbée en tube de Pitot tournée contre le courant (fig. 22). Les deux cloches étant suspendues aux deux extrémités d'un fil relié à une poulie (ou aux bras d'un fléau de balance), leur différence de niveau peut être facilement enregistrée (fig. 23) ; elle est proportionnelle à la vitesse du gaz. La graduation est calculée en millimètres d'eau par comparaison avec un manomètre.

54. Tirage différentiel. — Il existe toujours une différence notable entre la dépression à l'extrémité du carneau allant à la cheminée et le tirage sous grille ; il est facile de l'apprécier en employant un manomètre à eau dont les deux branches sont respectivement en communication avec ces deux points. On peut ainsi utiliser tous les manomètres à vases communiquants où l'action de l'air se produit par une ouverture pouvant être reliée à une tuyauterie.

Les indications combinées du manomètre normal (dépression totale) et de l'appareil différentiel placés sur un même foyer, donnent de très utiles renseignements pour la conduite des feux. Voici comment, d'après Schultze, on doit interpréter les chiffres lus :

Si l'indicateur de dépression est au minimum et l'indicateur différentiel au maximum, c'est que l'épaisseur de combustible est réduite au point de ne plus ralentir le passage de l'air sous grille : le charbon est consumé, il est temps de recharger.

Si, après chargement, les deux manomètres donnent des chiffres normaux, le registre est dans une bonne position ; mais, si l'indicateur de dépression est normal et l'indicateur différentiel trop bas, la grille est encrassée ou la couche de charbon trop épaisse : on doit ouvrir davantage le registre jusqu'à ce que le mano-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

mètre différentiel indique une pression normale. Si le moment est venu, décrasser, ou diminuer l'épaisseur de charbon lors de la prochaine charge.

Si, après chargement, l'indicateur de pression est normal, et l'indicateur différentiel trop haut, la couche de combustible est trop mince ; on doit fermer le registre jusqu'à ce que le manomètre différentiel soit à sa position normale ; et, à la prochaine charge, augmenter l'épaisseur de charbon.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

CHAPITRE VII

ÉTUDE THÉORIQUE DE LA COMBUSTION

55. Transformations du combustible. — Nous savons que la combustion consiste essentiellement en une combinaison chimique exothermique, c'est-à-dire dégageant de la chaleur. Dans les foyers industriels alimentés à la houille, on peut représenter ainsi le mécanisme théorique de la combustion (Baillet) :

Le charbon que l'on vient d'introduire dans le foyer ne s'allume pas immédiatement ; il s'échauffe d'abord jusqu'à une température de 300 à 400° C. (pour le bois 300° C., le coke 500 à 600, le gaz 900°) ; cette chaleur est empruntée aux masses voisines en incandescence. L'air avec lequel il est en contact s'est échauffé aussi en passant contre les barreaux de la grille et dans la couche inférieure des feux ; c'est seulement sous la double influence de la chaleur et de l'air chaud que la houille entre en décomposition, c'est-à-dire s'oxyde en dégageant chaleur et lumière.

Ensuite le charbon se fendille, se boursoufle et produit des jets de gaz s'enflammant aussitôt ou un peu plus loin, ou disparaissant sans inflammation. Il ne peut en effet y avoir oxydation que si ces gaz sont suffisamment chauds, et il se peut qu'ils ne le deviennent

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

que par contact avec d'autres jets à plus haute température.

Enfin, après dégagement de tous les gaz combustibles, il reste des morceaux de coke incandescent brûlant sans flamme ni fumée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus que des cendres pulvérulentes, passant à travers la grille, ou vitrifiées en forme de mâchefers que l'on enlève périodiquement.

Pendant la durée de la combustion, la chaleur rayonne en tous sens ; une partie se perd dans le cendrier, une autre échauffe par conductibilité les parois du foyer et le massif de maçonnerie ; il en reste dans les cendres et escarbilles. La plus grande partie est emportée par les flammes et la fumée qui vont chauffer les parois de la chaudière ou des bouilleurs ; ce qui reste à leur sortie du carneau est entraîné dans la cheminée et ne joue d'autre rôle utile que d'entretenir le tirage.

56. L'air. — Le comburant subit aussi, dans son passage à travers la couche de houille, des transformations successives que pour plus de clarté on peut scinder en supposant le combustible divisé en trois couches superposées (Baillet).

Dès sa pénétration dans la couche inférieure, l'air apporte quelque peu de chaleur prise dans son passage entre les barreaux ; l'échauffement est complété au premier contact avec le combustible. Une partie de l'oxygène se combine au carbone avec production d'une forte quantité de chaleur, de sorte qu'au sortir de la première tranche, les gaz se composent d'un mélange très chaud d'anhydride carbonique, d'oxygène et d'azote.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Dans la deuxième tranche, au contact du carbone incandescent, il y a de nouveau formation d'anhydride carbonique aux dépens de l'oxygène et formation d'oxyde de carbone aux dépens du gaz carbonique arrivant (1). Enfin, dans la couche de houille au premier stade de décomposition, outre les réactions précédentes, il se forme de nouvelles combinaisons dues à la combustion des gaz distillés.

Tous ces phénomènes ne se produisent évidemment pas aussi méthodiquement, mais selon l'état de chaque point de la couche du foyer. Si à leur sortie du feu les gaz sont fortement mélangés et la quantité d'oxygène suffisante, on aura combustion complète et production maximum de chaleur ; sinon il y a combustion incomplète, c'est-à-dire perte de calories. C'est ce qui se produit toujours plus ou moins en pratique.

57. Chaleur de la combustion. — Il est facile de déterminer par le calcul la température à laquelle sont portés les gaz résultant de la combustion par suite de l'oxydation du combustible. Connaissant le poids de combustible et de comburant, le nombre de calories dégagées dans la réaction, d'une part ; et, d'autre part, le poids des produits résiduels et leur chaleur spécifique, c'est-à-dire le nombre de calories absorbées par l'unité de poids pour l'élévation à une température donnée ; par un calcul très simple on peut déterminer la température maximum de la combustion.

(1) « Pour que la réduction de CO^2 en CO ait lieu, il faut qu'elle se fasse au sein d'une masse de charbon très incandescente (au dessus de 900° C.), car elle absorbe une énorme quantité de chaleur, ce qui refroidit la masse et les gaz qui la traversent. Mais quand, ensuite, il y a combustion de CO, il y a restitution de cette chaleur. » (Baillet).

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Dans la réaction : $C + 2O = CO^2$ par exemple, on sait que, pour brûler 12 gr. de carbone, il faut 32 gr. d'oxygène, soit par kilogramme de carbone 2 kgr. 66 d'oxygène produisant $1 + 2{,}66 = 3$ kgr. 66 d'anhydride carbonique. La chaleur spécifique de ce dernier gaz étant 0,216 calories par kgr., le nombre de calories indispensable pour élever de un degré C. la masse de gaz résiduel est : $0{,}216 \times 3{,}66$. Comme la quantité totale de chaleur produite par l'oxydation complète de carbone est de 8.137 calories, la température maximum de la flamme sera de :

$$\frac{8.137}{0{,}216 \times 3{,}66} = 10.293.$$

58. **L'excès d'azote et l'humidité.** — Mais nous avons supposé qu'il n'y avait pas à chauffer les corps froids mis en présence et l'excès d'azote inutile apporté par l'air avec l'oxygène. Du seul fait de l'emploi de l'air comme comburant, on introduit 3,32 fois plus d'azote que d'oxygène, d'où une quantité de $2{,}66 \times 3{,}32 = 8{,}83$ d'azote à chauffer. Ce qui exige pour chaque degré, la chaleur spécifique de l'azote étant 0,244, un surplus d'absorption de chaleur égal à $8{,}83 \times 0{,}244 = 2{,}154$. La température est ramenée ainsi à :

$$\frac{8.137}{(0{,}216 \times 3{,}66) + 2{,}154} = 2.767.$$

On voit la différence considérable amenée du seul fait de la présence d'azote, et toute l'importance qu'aura l'introduction d'un minimum d'air. On a d'ailleurs fait de très intéressantes tentatives dans le but d'employer un comburant plus riche en oxygène que l'air (§ 46).

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Les charbons contiennent naturellement une certaine quantité d'eau ; quelquefois même, on en ajoute à dessein. D'autre part, l'air contient toujours de la vapeur d'eau. Enfin les charbons contiennent des hydrocarbures, combinaisons de carbone et d'hydrogène qui brûlent avec formation de vapeur d'eau. Tous ces facteurs influent encore sur la marche de la combustion et nuisent à la parfaite utilisation de la chaleur.

En supposant dans le charbon un minimum de 5 0/0 d'eau (les charbons lavés en contiennent en général un peu plus), il y a perte de chaleur, d'abord pour porter cette eau de la température ambiante jusqu'à 100°, ensuite pour la transformer en vapeur, puis pour élever la température (1) (jusqu'à la dissociation qui a lieu à 1.000° C.), enfin pour décomposer la vapeur. La réaction $C + H^2O = H^2 + CO$ est en effet endothermique (calories absorbées 27.724).

Aussi, loin de mouiller le charbon, on doit s'appliquer à employer combustible et comburant à l'état le plus sec possible, dût-on pour cela sécher le charbon avant l'emploi. De fait, on abrite souvent maintenant le charbon sous des hangars, et, dans le cas de l'emploi de combustibles végétaux (sciures, copeaux, bagasse des sucreries de cannes), le séchage est nécessaire.

59. **Autres pertes de chaleur.** — Outre l'excès d'azote et d'humidité, un grand nombre de facteurs dont l'influence est plus difficile à chiffrer contribuent également à l'abaissement de la température du foyer. Les massifs de maçonnerie, malgré l'emploi de briques réfractaires, absorbent une grande quantité de

(1) La perte est d'autant plus élevée que la chaleur spécifique de la vapeur d'eau est considérable (0,479 calories).

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

calories. Les arrêts pour l'introduction de combustible ou le décrassage en font perdre aussi.

« Une autre cause de refroidissement le plus souvent inconsidérée est due au contact trop rapide des gaz distillés par le charbon avec les tôles ou tubes de la chaudière, lesquels sont à une température basse par rapport à celle du foyer. Ce refroidissement empêche les gaz de brûler et donne naissance à la fumée ; on évite ceci en observant une distance de la grille aux tôles rationnellement établie, c'est-à-dire grande pour les charbons gras et faible pour les combustibles à courte flamme » (Izart).

Enfin, non seulement, comme nous l'avons vu, l'emploi de l'air comme comburant amène nécessairement une perte de calories pour le chauffage de l'azote ; mais il est indispensable, pour assurer la parfaite combustion, d'amener un excès d'air. Pelet et Jomini (1), qui ont étudié la limite de combustibilité d'un grand nombre de corps divers, montrèrent qu'il s'agit là d'un phénomène général et non, comme on le pourrait croire, de la non-homogénéité, par exemple, qu'a en pratique le mélange combustible-comburant.

(1) *Moniteur scientifique* du Docteur Quesneville, 1903.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

CHAPITRE VIII

ÉTUDE PRATIQUE DE LA COMBUSTION

60. Conduite des feux. — En marche normale, le feu doit présenter sur toute l'étendue de la grille une flamme claire et brillante, indiquant une combustion complète; une flamme bleuâtre indique la formation d'oxyde de carbone. On peut y remédier en augmentant le tirage, et décrassant s'il y a lieu.

« L'inspection du cendrier peut aussi renseigner le chauffeur sur l'allure de son foyer, car, si celle-ci est bonne, la cuvette est claire sur toute sa longueur et le reflet de la grille dans l'eau qu'elle contient ne doit donner aucune tache. Quand il n'en est pas ainsi, il faut ouvrir la porte du foyer pour se rendre compte de l'aspect de la grille et faire le nécessaire. » (Mathieu). Le registre étant baissé, on procède très vivement à un crochetage en choisissant de préférence un moment où le manomètre indique une pression élevée.

« L'important est d'entretenir de petits jets de flammes nombreux réguliers, surtout rouge clair et non blancs, avec paillettes brillantes, sautillantes et enfin un *tirage minimum*. Eviter les vides d'où partent de longs jets. Les flammes bleues par place dénotent qu'il se forme de l'oxyde de carbone par manque d'air. Des

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

taches noires d'où se dégagent des gaz ne brûlant pas, indiquent également l'insuffisance d'air. Ces deux sortes de places défectueuses sont vite mises en bon état d'un coup de crochet double frappé du dessus. Si ce mal s'étend par trop, c'est que le moment du décrassage approche. On le retarde en passant un fort ringard pointu entre la grille et la crasse, puis soulevant celle-ci légèrement pour la casser sans la mélanger dans le feu ; elle doit rester entre les barreaux. » (Baillet).

La conduite rationnelle des feux est d'autant plus difficile à réaliser que, dans la plupart des cas, on introduit le charbon par charges discontinues, ce qui, ainsi que M. Haton de la Goupillière l'explique très bien, nuit à la régularité de la marche : « Quand on vient à charger du combustible, la grille est encombrée, le charbon s'agglomère, et, s'il est d'une matière collante, l'air passe difficilement ; cependant c'est le moment où il en faudrait beaucoup pour griller le flot de gaz combustibles qui commence à distiller avec production de fumée noire. Vers la fin de la combustion, au contraire, le coke se raréfie, les intervalles sont redevenus libres, et l'air passe en grande abondance au moment où le carbone seul reste en ignition et où toute la partie volatile a disparu, ce qui devrait inversement correspondre à une diminution dans l'accès de l'air. Il est donc nécessaire que le savoir-faire du chauffeur remédie à ces tendances par l'habile disposition de son feu. »

61. Epaisseur des feux. — Si la couche de charbon déposée sur la grille est *trop épaisse*, elle offre une résistance considérable au passage de l'air ; le tirage, la combustion, la vaporisation s'en ressentent, entraî-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

nant fatalement une baisse de pression. De plus, l'arrivée d'air étant insuffisante, il y a formation d'oxyde de carbone (rappelons que la perte par kgr. de charbon ainsi incomplètement brûlé atteint 5.807 calories).

Au cas où, le registre étant ouvert au maximum, le tirage de la cheminée permettrait une arrivée d'air suffisante, il ne s'en suivrait pas que la combustion fût meilleure. « L'oxygène de l'air, rencontrant la couche inférieure de charbon en ignition, réagit avec ce dernier et forme de l'acide carbonique. Cet acide carbonique continuant sa traversée rencontre de nouvelles couches de coke incandescent et à leur contact il se passe la réaction : $CO^2 + C = 2CO$. L'oxyde de carbone ne rencontrant plus d'oxygène pour réagir de nouveau passe en cet état dans les carneaux, pour s'échapper dans la cheminée. »

Dans le cas d'une couche insuffisamment épaisse, l'arrivée d'air en excès produit une fumée très pauvre en acide carbonique et emportant dans l'air un grand nombre de calories. De plus « cette quantité d'air qui passe au contact du coke incandescent et absorbe une grande quantité de chaleur, refroidit le feu ; il peut se produire de l'oxyde de carbone, par suite de l'abaissement général de la température du foyer ».

Smal et Timmermans ont fréquemment constaté des feux où la couche de combustible était d'épaisseur inégale ; on conçoit qu'ainsi, les inconvénients signalés dans les deux cas coexistent. Et, si le chauffeur n'y remédie, les inégalités s'accentuent : le fluide comburant passe en plus grande affluence aux endroits où la résistance est moindre ; il se forme des trous livrant passage à l'air qui ne produit aucun effet utile, mais au contraire augmente la perte de calories.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Il convient surtout de ne pas charger de façon désordonnée la partie avant de la grille, ce qui empêche de surveiller l'état des feux et trompe sur le moment opportun de charger. Il ne faut pas non plus négliger de garnir de charbon les côtés des grilles Quant à l'épaisseur normale de la couche, elle varie selon les charbons employés et le régime de marche ; des analyses de gaz permettent de déterminer dans les différents cas quelle épaisseur donne la meilleure combustion.

62. Le régime des charges. — Il est à remarquer que le chargement à la pelle, le plus usité, amène forcément une irrégularité périodique dans l'épaisseur des feux. Pour si parfaitement qu'elle soit répartie, une charge moyenne produit dans des conditions normales une augmentation brusque d'épaisseur variant de 1,5 à 2 centimètres.

Les charges discontinues ont bien d'autres inconvénients ; l'arrivée d'une masse humide, quelquefois mouillée (beaucoup de chauffeurs ayant la mauvaise habitude d'ajouter de l'eau à leur charbon pour le pouvoir manipuler plus commodément), abaisse brusquement la température, ce qui nuit à la combustion et nécessite une dépense de calories pour le réchauffage.

En outre, il y a le plus souvent, quoique le registre soit fermé — s'il est fermé, et ce n'est pas toujours le cas — des rentrées d'air par la porte, ce qui augmente les pertes. Ainsi on aurait avantage, d'une part, à charger très fréquemment, et, d'autre part, à charger le moins souvent possible. Pour échapper à l'arbitraire des ouvriers et à leur plus ou moins de bonne volonté, il y a intérêt à fixer une fois pour toutes un roulement,

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

de sorte que l'on charge successivement, régulièrement et sans arrêt les foyers les uns après les autres. Un bon chauffeur doit charger très rapidement, et voir immédiatement, en ouvrant la porte, quel est l'aspect du feu, et ce qu'il convient de faire, puis opérer le plus vivement possible (1).

Voici d'après M. Baillet les meilleures pratiques à suivre pour la charge des feux. Le chauffeur doit commencer par fermer *complètement* le registre avant d'ouvrir la porte. Il procédera par petites charges pour éviter un trop brusque refroidissement, et par petites pelletées clairsemées pour éviter les collages, combler les creux et les vides de la surface du combustible. Il doit éviter de trop charger près de l'autel, où le feu sera toujours rouge clair, mais au contraire, il faut charger plutôt en avant, de façon que les gaz distillés puissent s'échauffer et brûler avant de quitter le foyer. Certains bons chauffeurs terminent la charge en formant un petit talus sur la plaque d'avant-foyer, le charbon commence là à s'échauffer et distiller dès le début ; à la charge suivante, on le rejette près de l'autel où il s'enflamme aussitôt.

Les charges doivent être assez fortes pour éviter la trop grande fréquence d'ouverture des portes : il convient, pour brûler 75 à 80 kgr. de charbon par heure et mètre carré de surface de grille, de jeter à 8 minutes d'intervalle des charges de 10 kgr. l'une par mètre carré de grille.

Dans les concours de chauffeurs, les concurrents ayant le plus de succès pratiquent des charges beau-

(1) On estime que le refroidissement ainsi causé agit assez sur la vaporisation pour constituer à la fin du travail une perte d'environ 3 0/0 de la consommation de la houille (Mathieu).

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

coup plus faibles : 5 kgr. par mètre carré à quatre minutes d'intervalle, le tout très rapidement exécuté en quatre à cinq pelletées. Mais ce travail serait impossible en marche industrielle où l'on ne pourrait exiger du personnel un tel surmenage. Par contre, il est inadmissible, comme le font certains ouvriers en prenant trop à l'aise, de charger toutes les quinze ou vingt minutes sur de gros feux épais.

Mais naturellement le meilleur des chauffeurs est loin de valoir un système automatique de distribution continue du combustible, tel qu'en comprennent maintenant toutes les nouvelles installations importantes de chaufferie (1). C'est, à vrai dire, le seul moyen de conduire rationnellement la marche des feux : toutes les opérations étant continues et pouvant se régler à volonté, on conçoit qu'en suivant régulièrement un générateur, analysant très fréquemment les gaz, il soit possible, après une courte période de réglage, d'arriver à la perfection.

63. Le décrassage. — Les mâchefers et scories adhérents aux barreaux des grilles sont formés par la fusion des cendres ; la proportion varie de 3 à 20 0/0 du poids de houille brûlée. Ils sont composés principalement de silice, d'alumine, de chaux et d'oxyde de fer. A haute température, ils *collent* contre les barreaux, ce qui empêche le passage de l'air, d'où nécessité de les enlever.

On doit, avant le décrassage, augmenter un peu le tirage pour blanchir le feu, faire monter le mano-

(1) A la condition d'adopter parmi les nombreux systèmes de chargeurs automatiques, un de ceux conçus rationnellement, c'est-à-dire permettant d'obtenir des charges répondant aux desirata précédemment indiqués.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

mètre au maximum et ramollir la crasse qui peut ainsi mieux se détacher.

Comme en ce qui concerne les charges et pour les mêmes raisons, on doit opérer les décrassages le moins souvent, le plus rapidement et le plus régulièrement possible. Il est à recommander dans ce but, et pour échapper à l'arbitraire des chauffeurs, de fixer une fois pour toutes un roulement, de façon que chaque foyer soit décrassé à heures fixes dans l'intervalle de deux décrassages de foyers voisins; on facilite la surveillance en affichant près de chaque générateur les heures ainsi fixées. Naturellement, tout en s'efforçant de les établir le plus régulièrement possible, on doit tenir compte des nécessités de l'usine : si, pendant un certain moment de la journée, le travail nécessite une production maximum de vapeur (ce qui est le cas dans les sucreries, par exemple, au moment du chauffage simultané de plusieurs cuites), on s'arrangera de façon à éviter pendant ce temps tout décrassage.

64. Le registre. Réglage et manœuvre. — Pendant la durée de la combustion, l'ouverture du registre ne doit pas être invariable. En effet, la couche de combustible se tassant, les escarbilles et les cendres font obstacle à la pénétration de l'air, et, si l'on veut obtenir une arrivée de comburant toujours égale, le tirage doit augmenter peu à peu. MM. Scheurer-Kestner et Menier ont noté, d'un décrassage à l'autre, et l'ouverture du registre restant constante pendant toute la durée de l'essai, les variations ci-après dans l'analyse des gaz de la combustion :

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Heure de la prise des gaz	Teneur en oxygène (1)	Air en excès	Observations
2 h 10	10,3 %	49 %	(1) Correction faite de la solubilité de l'oxygène dans l'eau sur laquelle ont été recueillis les gaz.
2 20	10,1	48	
2 30	8,3	39,5	
2 40	7,1	33,7	
2 50	6,8	32,4	
3 15 (2)	7,9	37,5	(2) Le feu a été piqué.
3 30	6,7	31,9	
3 45 (3)	4,8	22,7	(3) Décrassage après la prise d'essai.

« Nous ne saurions trop insister, concluent-ils, sur ce côté de la question ; on voit par ces nombres combien est importante la manœuvre rationnelle du registre ; les chauffeurs expérimentés n'usent que du tirage nécessaire à une bonne combustion, et ils ont toujours soin d'augmenter l'ouverture du registre à mesure que les scories s'accumulent dans le foyer. »

En réalité, c'est presque toujours d'après les indications du manomètre que le chauffeur manœuvre le registre ; et, comme on ne peut agir ainsi qu'après un très notable changement de pression, il arrive toujours que, pour revenir à la moyenne, l'ouvrier se croit obligé d'ouvrir complètement ou de fermer tout-à-fait le registre. Aussi assure-t-on une marche beaucoup plus régulière en installant un régulateur automatique de tirage en fonction de la pression ; les moindres changements agissent sans exagération sur le registre, et le chauffeur n'a plus qu'à le régler suivant l'encrassage des feux. L'installation de deux indica-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

teurs de tirage permet également, quoique dans une moindre mesure, de régler le tirage pour le mieux de la marche des feux (§ 54).

63. La grille. — La grille étant une partie amovible que l'on doit remplacer de temps à autre, il importe de choisir un modèle capable d'assurer une combustion économique. C'est d'autant plus difficile qu'il existe dans le commerce une variété considérable de systèmes différents se recommandant tous des plus brillantes qualités. Nous empruntons à M. Ed. Deny (1) la description des propriétés que doit avoir une bonne grille, et de la façon dont elles influent sur la marche de la combustion.

La grille doit assurer la *distribution naturelle de l'air*, en jets minces, uniformes, nombreux et non en lames plates et parallèles ; on ne peut utiliser parfaitement l'oxygène de l'air que s'il se forme des remous qui atteignent aisément toute la masse de combustible. Les barreaux doivent être *nombreux, minces et hauts* sur toute leur longueur ; en présentant ainsi une grande surface latérale, ils cèdent facilement leur chaleur à l'air affluent, d'où deux avantages : barreaux froids et air chaud. Les interstices doivent être *minces*, ce qui évite la chûte du charbon menu et les profondes incrustations de mâchefers. Le dessus des barreaux doit être *sectionné* pour que la dilatation inégale de part et d'autre n'entraîne ni torsion ni déformation. La proportion des vides aux pleins doit être *aussi réduite que possible* pour diminuer les pertes par rayonne-

(1) *Bulletin de la Société des anciens élèves des Ecoles d'arts et métiers*, avril 1900.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

ment dans le cendrier ou par afflux d'air aux endroits mal garnis.

Surface de grille. — La surface de la grille (S) est fonction du poids de la houille à brûler par mètre carré (P), de la puissance calorifique du combustible (C) du rendement de cette puissance (50 à 75 0/0) et de la quantité de chaleur à produire (X). Il est facile de la calculer ; soit, par exemple, à produire 1.000 kgr. de vapeur à l'heure avec une houille à 8.000 C et un rendement de 60 0/0. On peut écrire :

$$X = PSCR = PS \times 8.000 \times 0,60.$$

Le nombre des calories N nécessaires pour vaporiser 1 kgr. d'eau à $t°$ alimentée à $t'°$ est donné par la formule :

$$N = 606,5 + 0,305\ (t - t').$$

Soit la vapeur comprimée à 5 atmosphères (152° C.), l'eau d'alimentation étant à la température de 12° ; on aura :

$N = 606,5 + 0,305 \times (152 - 12) = 649,2$ calories et pour 1.000 kgr. :

$$649.200 \text{ calories} = PS \times 8.000 \times 0,60.$$

D'où l'on tire : $PS = 135$. Or : $P = 75$ kgr.; donc : $S = 135 : 75 = 1$ m² 8.

Si la grille a 1 m. 70 de long, elle aura pour largeur : 1,8 : 1,70 = 1 m. 06.

Consommation de combustible par mètre carré de surface de grille et par heure. — Connaissant la quantité de charbon brûlé d'une part et la surface de grille d'autre part, il est facile de calculer la consommation à l'heure par mètre carré de surface de grille. Ce coefficient est très utile pour la comparaison des

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

pertes de calories dans les gaz, en fonction de l'installation. On peut dans certains cas, par suite de manque de puissance, être obligé de pousser les feux, et c'est au détriment de la bonne marche de la combustion; on comprend que, si la consommation par mètre carré de grille est trop forte, on ne puisse malgré tout améliorer parfaitement la teneur en CO^2 de gaz brûlés. C'est ainsi, par exemple, qu'en sucrerie, écrit M. Saillard, « avec nos chaudières actuelles et les charbons que nous employons, on obtient un bon rendement industriel en brûlant 70 à 80 kgr. de charbon par mètre carré de surface de grille et par heure (soit environ 1,5 à 1,7 kgr. par mètre carré de surface de chauffe des générateurs). Nous savons que, dans beaucoup de fabriques, on va jusqu'à 110 et même 115 kgr. Un excès dans ce sens se traduit par une moins bonne utilisation du combustible » (1).

(1) *Circulaire hebdomadaire* du Syndicat des Fabricants de sucre. (Octobre 1903).

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

CHAPITRE IX

LE CHAUFFEUR

66. Influence du travail du chauffeur sur le prix de revient de la vapeur. — MM. Smal et Timmermans ont calculé, d'après les résultats obtenus au concours de chauffeurs de Liège, les différences de prix de revient de la vapeur produite par les bons et les mauvais chauffeurs. Il est à remarquer qu'outre les garanties d'exactitude ainsi obtenues, le résultat est d'autant plus probant qu'il ne se trouvait, dans ce concours, que des chauffeurs déjà expérimentés qui, s'ils n'étaient pas tous capables, croyaient l'être et ont donné le maximum d'effort et de bonne volonté. Les chiffres ci-après sont donc, par conséquent, des minima.

Soit le cas d'une usine où la chaufferie est composée d'un groupe de deux chaudières à deux foyers intérieurs de 120 m² de surface de chauffe chacune et de 3 m² 20 de surface de grille. Ces deux générateurs sont conduits par un seul chauffeur et alimentent de vapeur une machine motrice de 400 chevaux, consommant 8 kgr. par cheval-vapeur-heure.

Selon que la vaporisation de base est de 8 kgr. 502 ou 5 kgr. 545 (maximum et minimum obtenus lors des éliminatoires du concours), la consommation de la machine (3.200 kgr.) correspond à un poids de char-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

bon de $\frac{3.200}{8,502} = 376$ kgr. dans le premier cas et de $\frac{3.200}{5,545} = 577$ kgr. dans le second.

En estimant à 15 francs le coût de la tonne de charbon sec rendue à pied-d'œuvre — ce qui est en France une exception — on aura une dépense de combustible égale à $\frac{376 \times 15}{1.000} = 5$ fr. 64 dans le premier cas et à $\frac{577 \times 15}{1.000} = 8$ fr. 655 dans le second ; cela correspond à des dépenses journalières (10 heures) égales respectivement à 56 fr. 40 et 86 fr. 55, soit une différence de plus de 30 francs.

De plus, il faut considérer que, dans le premier cas, l'allure de la combustion par heure et mètre carré de surface de grille est de 38 kgr. 7 ; ce qui est normal et permet à l'ouvrier de maintenir sa chaufferie en ordre de marche parfait, tant au point de vue de l'économie de combustible que des conditions de sécurité.

Au contraire, dans le second cas, l'allure de la combustion s'élève considérablement et atteint 90 kgr. Ce chiffre sera même très probablement dépassé, le rendement du charbon en eau vaporisée diminuant à allure aussi vive. Ainsi le chauffeur devra enfourner par jour dans ses quatre foyers :

$$90,1 \times 3,2 \times 2 \times 10 = 5.760 \text{ kgr. de charbon,}$$

travail exagéré qui nuira au bon entretien de la chaudière, le chauffeur, surmené, ne pouvant faire autre chose que multiplier les charges. Les conditions de marche se rapportant à la sécurité ne seront évidemment pas rigoureusement observées, et, à la première négligence, l'allure n'étant pas maintenue, la pression

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

baissera et l'on se verra forcé d'arrêter de temps à autre le moteur ou de diminuer sa charge.

67. Les primes au chauffage. — Comme nous l'avons déjà fait remarquer, les conditions réalisées lors du concours de Liège sont tout-à-fait exceptionnelles; les industriels n'envoyèrent que l'élite de leur personnel, et l'on dut refuser de nombreux candidats, en procédant naturellement par sélection. Nous pouvons conclure de là qu'en pratique industrielle la moyenne de vaporisation obtenue *est inférieure à la moyenne des résultats les plus médiocres* de Liège; et qu'aussi le zèle et la bonne volonté, s'ils contribuent à faire un bon chauffeur, ne suffisent pas. Par conséquent, le moyen le plus fréquemment usité pour encourager à la bonne marche de la combustion (primes calculées d'après les économies de houille) ce moyen est insuffisant. Non seulement il faut intéresser le chauffeur aux résultats économiques de la chaufferie, mais *il faut lui apprendre* à faire ces économies.

La tâche est d'autant plus ingrate et difficile que tous les chauffeurs, comme la plupart des ouvriers professionnels, ont la prétention de connaître leur métier mieux que personne. Aussi ne faut-il pas se faire d'illusion sur la portée des bons conseils qu'on leur donne : il existe dans toutes les villes industrielles des cours de chauffe industrielle, et les ouvriers formés là ne valent pas mieux que les autres... quand on en forme, car dans certains de ces cours il y a bien un professeur, mais pas d'élèves...

La routine du chauffeur est d'autant plus solidement ancrée, qu'elle résulte, non seulement des traditions léguées par les aînés, mais aussi d'observations justes

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

et faussement interprétées. C'est ainsi qu'en remarquant l'agglomération des poussières de charbon par le mouillage, le chauffeur conclut de l'absence de parcelles non brûlées dans les escarbilles, qu'il a fait une économie de combustible. Il comprendra mal que la quantité de charbon ainsi dépensée à chauffer et à dissocier l'humidité ajoutée dépasse presque toujours la houille épargnée ; nous avons plusieurs fois essayé d'exposer très simplement cela, sans jamais plus de succès une fois qu'une autre.

Aussi est-il indispensable de calculer la prime, non sur l'économie de houille, mais sur la teneur en anhydride carbonique des gaz de la combustion (1). Ce n'est, en aucune façon, plus difficile : il suffit à la rigueur d'une seule analyse faite sur l'échantillon moyen de la journée ou du poste pour chiffrer très exactement le montant de la prime. Si l'on contrôle régulièrement, on prend la moyenne journalière des essais; si, mieux encore, on possède un analyseur enregistreur, on peut facilement traduire le graphique en chiffres au moyen du planimètre.

La prime ainsi calculée est d'autant plus juste que l'échantillon moyen ou la moyenne des échantillons sont en relation constante avec la teneur des gaz en anhydride carbonique. En effet, que l'on admette trop

(1) Pour excellente que puisse paraître la méthode proposée par M. Izart (*Méthodes économiques de combustion*, p. 60) pour le calcul des primes, elle a en principe les mêmes inconvénients que la méthode usuelle de calcul d'après l'économie brute de charbon. Elle consiste en effet en un calcul de la quantité moyenne d'eau évaporée par kilogramme de charbon pour fixer un chiffre voisin du maximum atteint; les chauffeurs sont intéressés aux bénéfices résultant de la différence du chiffre obtenu avec le chiffre de base. Il s'agit, on le voit, d'une prime que le chauffeur ne peut connaître constamment et qui varie nécessairement avec la température de l'eau, la qualité des charbons...

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

ou pas assez d'air, il y a dans les deux cas diminution de CO^2, et l'excès d'une part ne peut nullement balancer l'excès contraire.

68. L'éducation du chauffeur. — On pourra modifier ainsi beaucoup plus aisément les habitudes et les traditions du chauffeur ; car, tandis que la prime à l'économie de houille est une chose tangible, dont il comprend parfaitement le mécanisme, qu'il croit savoir lui-même apprécier, la prime calculée d'après la composition des gaz le déconcerte un peu ; il n'a là-dessus que des notions assez confuses, et, comme c'est le chimiste qui fixe cette composition — partant la prime — il écoutera beaucoup plus docilement les conseils.

Il est bon, d'ailleurs, d'en donner le moins possible: il est de beaucoup préférable de permettre au chauffeur d'étudier lui-même l'influence de la combustion sur la composition des gaz. A l'arrivée de chaque nouvel ouvrier, ou dans le cas du changement de la qualité des combustibles, d'une installation nouvelle, on doit suivre la marche du chauffage de façon continue, et, si l'on ne dispose pas d'analyseur automatique, faire tous les quarts d'heure, par exemple, un dosage d'anhydride carbonique, de façon à renseigner aussitôt le chauffeur. On lui montre alors la prime correspondante, on lui fait chercher d'où viennent les variations, lui explique l'influence des diverses façons de conduire ses feux ; on offre de constater avec lui le résultat que peut donner une modification quelconque, l'incite à faire des essais. L'idéal serait que le chauffeur pût lui-même faire un dosage d'anhydride carbonique, quand il n'a pas d'enregistreur automatique pour le renseigner. Ce n'est d'ailleurs pas si difficile qu'on serait

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

tenté de le croire ; des industriels l'ont déjà fait (1) ; mais, dans la plupart des cas, ce n'est pas nécessaire.

Il suffit de renseigner ainsi le chauffeur, et surtout de le persuader en lui faisant constater *de visu* l'influence sur la composition des gaz, pour que, s'il est directement intéressé à ce que cette composition soit normale, il obtienne — toutes choses égales d'ailleurs : nature du combustible, système de générateur, etc. — de bien meilleurs résultats qu'avant le contrôle.

C'est ainsi qu'en Allemagne — car c'est surtout en Allemagne, en Belgique, en Hollande (2), où le charbon est meilleur marché qu'en France, que l'on a sérieusement organisé le contrôle chimique de la combustion — c'est ainsi que M. Volquartz, ayant organisé dans son usine le contrôle chimique de la marche des foyers de générateurs et donné à ses ouvriers une prime correspondant aux résultats analytiques, a vu la teneur moyenne des gaz en anhydride carbonique progresser ainsi (3) :

Janvier. . .	13,6	de CO^2 dans les gaz
Février. . .	14,2	—
Mars . . .	15,4	—
Avril . . .	15,4	—

(1) Nous pouvons citer l'exemple de la sucrerie de Nassandres, où les ouvriers savent faire eux-mêmes un dosage à l'aide du rustique appareil de Raffy, et ce, avec une approximation suffisante pour qu'ils puissent utiliser pratiquement les indications.

(2) D'après MM. Pellet et Dupont *(Bulletin de l'Association des chimistes*, 1898) il y avait en 1897 : 40 échantillonneurs de Ridder en service à la sucrerie de Wanze, 11 à celle de Tirlemont (Belgique), 26 à la raffinerie Tate (Londres), 11 à la sucrerie d'Elsdorf, 11 à celle de Enskirchen (Allemagne), et plusieurs dans chacune des sucreries hollandaises, contre 3 ou 4 en France.

(3) Volquartz, *Zeitschrift des Vereins der deustchen Zuckerindustrie*, 1898.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Mais l'idéal est évidemment de mettre sous les yeux du chauffeur l'indication continue de la teneur en CO^2 — avec la traduction exprimée en prime correspondante —. C'est ce que permettent de faire les analyseurs automatiques en général et peut-être mieux encore l'indicateur enregistreur densimétrique Krell-Schultze (§ 91).

On jugera de l'influence exercée sur le chauffeur par de tels appareils à l'examen des diagrammes ci-contre

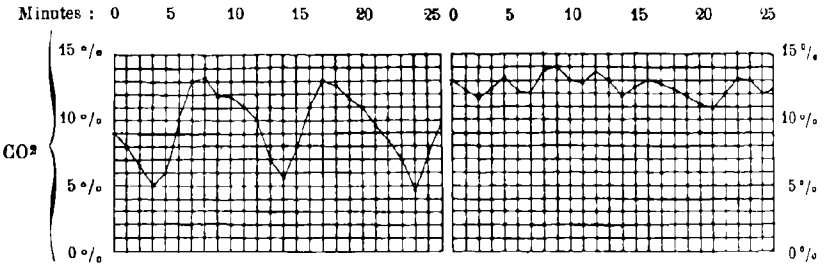

Fig. 24. — Teneur des gaz en CO^2 dans un foyer non contrôlé — remarquer les irrégularités périodiques —

Fig. 25. — Teneur des gaz en CO^2 après installation d'un indicateur — la courbe est régulière, la teneur en CO^2 est constamment près du maximum —

(Fig. 24 et 25) représentant les quantités d'anhydride carbonique pour cent de fumée, avant et après le contrôle permanent automatique dans une installation faite sous la surveillance des Ingénieurs de l'Association de propriétaires d'appareils à vapeur de Magdebourg.

69. L'économie de combustible. — Que n'obtiendrait-on pas dans les usines où le chiffre moyen est de 5 ou 7 $^0/_0$? et, quoique beaucoup d'industriels ne s'en doutent guère, c'est le cas dans la plupart des installations de chaudières à vapeur. Il n'en faut même

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

pas excepter les stations centrales où la production de vapeur, étant presque l'unique objet de l'exploitation, devrait, ce semble, être parfaitement étudiée. C'est ainsi que, dans les stations des principales villes anglaises, la consommation de houille par cheval-vapeur varie de 2 kgr. 6 à 9 kgr. 8 !

Villes	Mode de chargement du foyer	Surchauffe	Kilogrammes de charbon dépensés	
			Par cheval-vapeur	Par kilowatt
Salford . . .	mécanique	moyenne	1,95	2,61
Saint-Helens .	à la main	forte	2,25	3,01
Manchester . .	mécanique	moyenne	2,37	3,17
Glascow . . .	»	forte	2,74	3,67
Edimbourg . .	»	faible	2,88	3,86
Nottingham. .	mixte	nulle	2,95	3,95
Hull	à la main	»	3,2	4,28
Scheffield . .	mécanique	»	3,52	4,72
Bristol . . .	»	forte	3 9	5,23
Halifax . . .	»	»	4,35	5,83
Sunderland. .	»	nulle	4,53	6,07
Huddersfield .	mixte	»	5	6,70
Derby. . . .	»	faible	6	8,04
Blackpool . .	à la main	très faible	7	9,38

Ces différences s'expliquent très bien par le seul fait de l'installation des appareils et de la conduite du travail : nous avons vu l'influence de la seule façon de conduire la combustion ; voici comment MM. Izart et Schmidt chiffrent les économies réalisables du fait de

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

l'adjonction de divers dispositifs : sur 100 calories produites, le rendement de la chaudière avec une bonne conduite peut être évalué à 62, les 38 restant se répartissant ainsi :

Pertes par les gaz	chaleur sensible.	20	38
	combustion incomplète	5	
Radiation des maçonneries et des tôles		6	
Charbon non brûlé (escarbilles et cendres)		3	
Vapeur d'eau		2,5	
Suie.		1,5	

Le chiffre de ces pertes peut être réduit à 15-20 0/0. On remarquera que la perte de calories contenues dans les gaz est de beaucoup la plus importante, ce qui s'accorde parfaitement avec les données du tableau précédent, où l'on peut voir en effet que la perfection de la chauffe dans les stations anglaises n'est aucunement en rapport avec la perfection de l'installation ; les différences sont donc pour la plus grande partie attribuables à la conduite des feux. Presque partout, la combustion s'effectue dans les conditions les plus déplorables : c'est que, presque partout aussi, nul ne se soucie du contrôle chimique de la combustion.

Nous terminons par un dernier exemple : les résultats obtenus dans des conditions rigoureusement les mêmes sous tous les rapports (combustible, installation, temps de l'essai, vérification, etc.) au récent concours de Liège. On verra que la quantité d'eau vaporisée par chaque chauffeur varie de 8 kg. 1/2 à moins de 6 kg. ; remarquons encore une fois qu'il s'agissait d'une élite professionnelle et que chaque concurrent travaillait constamment avec un courage et une émulation qu'il est impossible de trouver dans la pratique.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Influence des qualités professionnelles du chauffeur

(Concours de chauffeurs de Liège)

N^os de classement des concurrents	Poids de charbon consommé	Poids des résidus recueillis aux décrassages	% de carbone non brûlé	Consommation de charbon par heure et par m² de surface de grille	Vaporisation par heure et par m² de surface de chauffe	Vaporisation par kgr. de charbon sec (eau à 0° C., vapeur à 10 atm.)	La durée des essais variait de 6 h. 50 à 7 heures.
1er	3074	384	3,5	55,3	15,1	8,50	La teneur du charbon en matières volatiles variait de : 14,10 à 15.90 et en cendres de : 8 à 16 %
5e	2755	321	2,9	51,7	13,1	8,33	
10e	2953	283	2,5	55	14,8	8,30	
20e	2503	370	5 8	46,9	12,4	7,77	
30e	2489	359	3,9	46,2	14,2	7,61	
40e	2376	279	2,8	43,7	10,6	7,55	
50e	2586	339	6,2	48	11,3	7,34	
60e	2049	236	4,6	38,2	9,1	7,48	
70e	2719	350	2,7	50,1	10,4	6,46	
75e	2556	345	3,8	41,7	9,8	6,48	
80e	2357	353	5,5	43,4	8,4	6,03	
82e	2506	345	5,5	58,5	8,3	5,54	
83e	2178	354	7	39,9	7,6	5,92	

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

CHAPITRE X

ÉCHANTILLONNAGE DES GAZ DE LA COMBUSTION

70. La prise d'essai des gaz de la combustion se fait à l'aide d'une sonde, tube métallique de petit diamètre dont l'extrémité doit se trouver au centre de la veine gazeuse ; nous croyons avec Winkler que l'aspiration par fente latérale, dans le but d'avoir une prise moyenne plus exacte, est inutile. Le tube-sonde sera fixé au centre d'un bouchon de caoutchouc, de telle sorte qu'il puisse complètement obturer le regard pratiqué dans la maçonnerie ou la tôle.

On ne doit pas oublier que les fluides en mouvement ne se mélangent pas (Horsin-Déon) ou se mélangent du moins difficilement ; aussi la prise d'essai devra être pratiquée au point où les gaz ont accompli un long parcours et se sont ainsi suffisamment brassés.

N'importe quel modèle d'aspirateur peut convenir pour recueillir les gaz de la combustion, mais il importe que l'eau de la cuve puisse servir un grand nombre de fois (1) ; en effet, les gaz de la combustion

(1) Nous négligeons à dessein la manipulation des gaz sur la cuve à mercure : ce n'est pas un procédé suffisamment commode pour être industriel ; au demeurant, il n'est en rien nécessaire.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

sont tous solubles dans l'eau et ils sont différemment solubles ; ainsi, d'après Bunsen, les coefficients d'absorption sont à la température de 15° C. :

Pour l'azote, de . . .	0,0148
Pour CO^2, de. . . .	1,0020
Pour CO, de	0,0243
Pour O, de	0,0299
Pour H, de	0,0193.

C'est un inconvénient auquel l'emploi d'eau salée, d'eau acidulée par l'acide chlorhydrique, ou d'eau recouverte d'une couche d'huile (Ebelmen) ne remédie en rien, quoi que plusieurs auteurs en aient dit : « L'eau salée, au moins au degré de dilution pratique de cette liqueur, n'exerce pas une action dissolvante moins énergique que l'eau ordinaire... L'action dissolvante de l'huile est plus lente, mais en réalité plus notable que celle de l'eau » (1).

Pratiquement, on devra donc employer une eau saturée ; la composition des gaz récoltés en vue du contrôle de la combustion ne variant dans une même installation que dans des limites étroites, les différences de solubilité et de tension des gaz ne peuvent apporter que des causes d'erreur pratiquement négligeables, ainsi que l'ont prouvé les essais de Baillet.

Dans le cas le plus général de contrôle de la combustion dans les foyers de chaudières à vapeur, il importe de faire la prise d'essai dans le carneau central avant le registre, de façon à éviter les causes d'erreurs produites par les rentrées d'air. Il peut malheureusement se produire quelquefois aussi des rentrées

(1) Berthelot, *Traité d'analyse des gaz.*

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

d'air dans la maçonnerie du générateur ; on devra soigneusement la vérifier si l'on trouve au gaz une composition continuellement anormale. De même, si l'on veut prendre sur le carneau collecteur ou à la base de la cheminée la température du gaz ou sa teneur en CO^2, il est indispensable de prendre les précautions nécessaires pour empêcher toutes rentrées d'air. D'après M. Vivien (1), il peut arriver que des gaz contenant 10 0/0 d'anhydride carbonique à leur sortie du générateur ne contiennent plus que 5 0/0 à leur entrée dans la cheminée ; nous avons pu constater que ces chiffres étaient quelquefois même dépassés.

71. Prélèvement de l'échantillon. — Les modèles classiques d'*aspirateurs métalliques* à renversement (fig. 26) conviennent très bien ; ils ont l'inconvénient de coûter assez cher. Aussi pourra-t-on, dans la plupart des cas, les remplacer, comme nous l'avons fait, par deux flacons à tubulures inférieures reliées par un caoutchouc de fort diamètre. On remplit d'eau de façon que l'un des flacons puisse être plein, l'autre étant aux 5/6 ; le flacon destiné à recueillir le gaz est surmonté d'un bouchon de caoutchouc portant un robinet à trois voies, l'une d'elles étant reliée au tube-sonde. En élevant et baissant le second flacon, on commande l'aspiration du gaz ; il est commode d'employer pour cela soit un escabeau à deux planchettes, soit mieux un appareil à bascule.

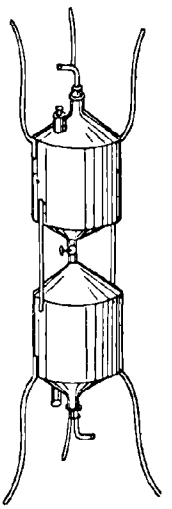

Fig. 26.
Aspirateur métallique à renversement.

(1) A. Vivien, *Bulletin de l'Association des Chimistes*, 1895.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

De toutes façons, il est indispensable, pour purger l'appareil et la conduite, de le remplir une ou deux fois de gaz qui sont rejetés ensuite, avant de faire la prise d'essai définitive

Dans le cas d'un contrôle régulièrement organisé, par exemple pour le calcul de la prime attribuée aux chauffeurs, il est indispensable de recueillir d'une façon continue les gaz de la combustion, de façon à constituer un échantillon moyen que l'on analysera périodiquement, une fois par jour, par exemple, ou, dans le cas des usines à feux continus, une fois par chaque poste de chauffeurs. Il existe pour cela plusieurs appareils automatiques.

L'appareil *Schmidt et Démichel* est une modification de l'aspirateur à flacons ci-dessus décrit, mais le liquide employé est visqueux (eau glycérinée) et l'écoulement se fait par un tuyau capillaire ; l'écoulement dure ainsi beaucoup plus longtemps et détermine une lente aspiration de gaz. Trois vases semblables peuvent être successivement placés sur le même support ; pendant que l'un est transporté au laboratoire pour l'analyse, on peut lui en substituer un second.

L'échantillonneur Schmidt et Démichel a le défaut de ne fonctionner automatiquement que pendant une période de courte durée : une demi-heure à une heure environ.

72. Appareil de Ridder. — Il permet de contrôler d'une façon simple, pratique et constante, le jour comme la nuit, la composition des gaz et par conséquent la conduite et la marche des générateurs et tous foyers industriels. L'appareil consiste essentielle-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

ment en un gazomètre (fig. 27) qui, par une disposition spéciale, aspire, filtre et emmagasine automatiquement et d'une façon continue le gaz de la combustion de chaque foyer auquel on l'adapte. Il fonctionne pendant 12 heures consécutives, emmagasinant d'une façon continue une partie du gaz au fur et à mesure de sa production. L'échantillon moyen prélevé ainsi en 12 heures est d'environ 12 litres.

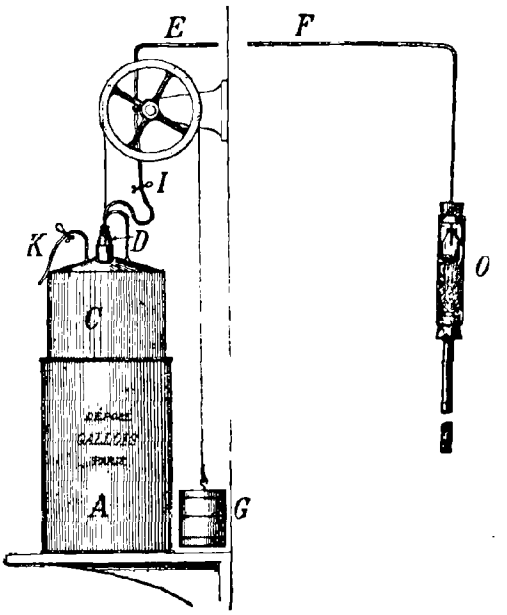

Fig. 27. — Appareil de Ridder.

A la fin de la journée, ou mieux encore au moment de la relève de chaque poste d'ouvriers, on fait l'analyse de l'échantillon moyen. On conçoit qu'il soit possible d'obtenir ainsi un contrôle rigoureux de la perte moyenne, et d'intéresser les ouvriers à la bonne marche des foyers, par des primes correspondantes.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

L'échantillonneur se compose d'un récipient A rempli d'eau et d'une cloche C plongeant dans l'eau, le tout formant gazomètre. Le contre-poids G soulève la cloche au-dessous de laquelle il se forme un vide relatif : le gaz est aspiré. Un flotteur en cuivre a pour but de séparer le gaz de l'eau pour qu'il n'y ait pas dissolution d'acide carbonique. En D est un petit flacon rempli à moitié d'eau, dans lequel débouche la conduite E d'arrivée du gaz, laquelle est reliée avec la cloche C. Il s'établit le même vide dans la cloche C que dans le flacon D ; les gaz aspirés barbottent dans l'eau de D, ce qui permet de contrôler facilement le fonctionnement de l'appareil.

On règle à volonté l'arrivée du gaz au moyen du tuyau E et de la pince I qui ferme l'extrémité de la conduite venant des générateurs ; on peut également pour cela charger plus ou moins le contrepoids G. Le gaz est amené à l'appareil par un tuyau de cuivre mince relié, d'une part, au gazomètre, et dont l'autre extrémité se termine par un tube de fer par l'intermédiaire d'un filtre O (fig. 27).

Le filtre sert à épurer et sécher le gaz : il consiste en un manchon de verre rempli d'ouate de verre destinée à arrêter la suie et toutes les matières solides en suspension. Un petit flacon est placé au-dessus, et contient du chlorure de calcium anhydre, pour absorber l'humidité. Le tube-sonde servant à la prise des gaz est en fer (10 millimètres de diamètre), percé de trous à son extrémité, et de longueur suffisante pour aspirer le fluide au milieu et en plein courant de la veine gazeuse.

Pour procéder à l'analyse du gaz, on enlève les plateaux du contrepoids, la cloche du gazomètre descend

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

naturellement et comprime le gaz emmagasiné. On le recueille dans les appareils d'analyse à l'aide de la tubulure K qui les relie à ceux-ci au moyen d'un tube en caoutchouc. L'opération terminée, on ferme la pince K, on recharge le contrepoids G, et l'appareil est de nouveau prêt à fonctionner. Pour s'assurer que tout le gaz est complètement disparu, il est bon d'enfoncer la cloche sous l'eau. On règle à volonté la période d'échantillonnage : une heure, deux heures, six heures ou douze heures.

73. Aspirateur Baillet. — Pour supprimer l'action dissolvante du liquide, M. Baillet use d'un ingénieux dispositif, consistant à relier le tube d'arrivée du gaz dans le flacon aspirateur à la poche de caoutchouc K (fig. 28) qui transmet au gaz la pression exercée par le liquide. La tubulure *m* est reliée à la sonde de prise de gaz par un tube long de un ou deux mètres, suffisant pour amener à la température ambiante les gaz aspirés. On interpose sur ce tube un filtre composé d'une allonge de verre remplie d'ouate.

L'aspirateur est formé d'un baril de verre T d'une contenance de 10 litres environ, relié en E à un flacon métallique pouvant s'élever ou s'abaisser. Après remplissage par différence de niveaux des liquides, la poche K communiquant avec O, on ferme E, abaisse le récipient de métal, ferme O et ouvre *m*. Il suffit alors d'ouvrir le robinet E pour provoquer l'aspiration de gaz.

Ce robinet se compose d'une clef ordinaire pour l'échantillonnage rapide, et d'un pointeau qui permet de régler l'écoulement au minimum désiré. Pour cela il suffit d'observer le nombre de gouttes débitées à la

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

minute dans l'allonge de verre N. On peut ainsi faire varier le temps d'aspiration dans les mêmes limites qu'avec l'appareil de Ridder, et de façon plus com-

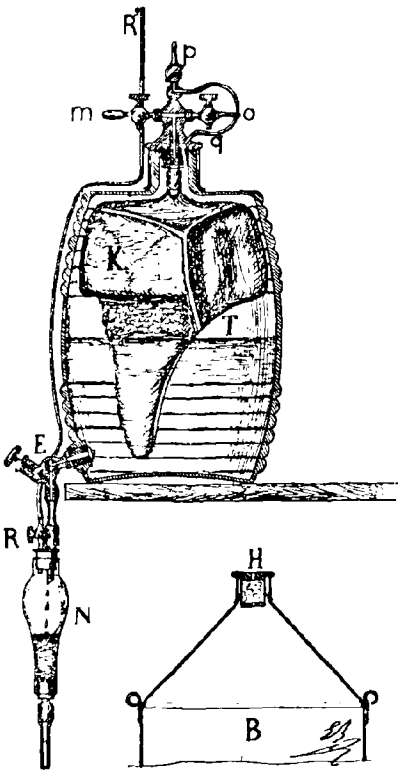

Fig. 28. — Aspirateur-échantillonneur Baillet.

mode. En outre, la disposition des robinets en *m* et *o* permet de prélever à volonté un échantillon à n'importe quel moment de la journée sans pour cela interrompre l'aspiration continue de l'échantillon moyen (1).

(1) Pour les détails de manipulation, consulter la description très complète de l'appareil et du *modus operandi* : Baillet, *Contrôle permanent de la chauffe*.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

74. Filtration des gaz. — Les gaz de la combustion tenant toujours en suspension des matières solides (suie, matières goudronneuses, etc.), il est indispensable, pour éviter de souiller les appareils analyseurs, de filtrer le fluide avant son entrée dans l'échantillonneur. Nous avons vu que chaque dispositif d'aspirateur comporte un filtre additionnel simplement composé d'une allonge remplie de coton ou d'ouate de verre.

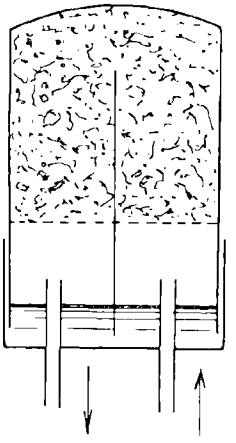

Fig. 29.
Filtre à gaz de Ados.

La filtration doit être d'autant plus parfaite que les appareils d'analyse sont de nettoyage plus difficile, ce qui est le cas pour les analyseurs automatiques ; Ados recommande dans ce cas l'emploi d'un épurateur spécial (fig. 29), où les gaz passent sur des couches successives de laine et de sciure de bois. Il est facile de les renouveler en retirant la cloche, simplement posée sur les tubes dans une cuvette remplie de glycérine qui assure un joint hydraulique.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

CHAPITRE XI

ANALYSE DES GAZ

75. Dans la plupart des cas d'analyse industrielle des gaz, il suffit d'employer les méthodes de dosage par absorption. Elles consistent à traiter un volume de gaz par un réactif propre à absorber l'élément qu'il s'agit de doser ; la différence des volumes après et avant l'opération donne la quantité de ce dernier. En faisant agir ainsi successivement différents réactifs capables d'absorber un ou plusieurs gaz, on peut analyser complètement des mélanges relativement complexes. On utilise un grand nombre de ces réactifs dont nous donnons ci-joint, d'après Voldere et de Smet (1), les propriétés utilisées en analyse :

(1) *Revue Générale de Chimie,* 1907.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Nature des gaz	Potasse caustique	Pyrogallate alcalin	Chlorure cuivreux		Eau bromée	Acide sulfurique		Alcool	Acide nitrique fumant
			acide	ammoniacal		fumant	concentré		
H								p.s.(B)	
CO^2	t.s.(B)	t.s (B)		s.(W)				s.(C)	
CO			t.s.(B)	t.s.(B)					p.s.(TS)
O		t.s (B)	s.(B)(C)	s.(B)(C)					
C^2H^2			s.(B)(C)(W)	s.(B)(C)(W)	s.(B)(C)(W)	s.(B)(W)	s. après une 1/2 heure (B)		
C^nH^{2n-2} (1)			t.s.(B)	s.(B)(W)	s.(B)	t.s.(W)	t.s.(B)	p.s.(B)	
C^2H^4			s.(B)(W)	s.(B)(W)	s.(B)	t.s.(B)	s. après une 1/2 heure (B)	s.(B)(C)	
C^nH^{2n} (1)			s.(B)	s.(B)	s.(B)(C)(W)	t.s.(B)	t.s.(B)	s.(B)	
C^nH^{2n+2}								s.(B)	
C^nH^{2n-6}	p.s.(W)				s. peu à peu (B)(C)	t.s.(B)	s.(B)(W)	t.s.(B)	t.s.(B)

(1) à partir de n = 3. Abréviations : t.s. = très soluble, s. = soluble, p.s. = peu soluble, i. = insoluble, (B) = Berthelot, (C) = Carnot, (TS) = Treadwell et Stockes, (W) = Winckler.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Pratiquement, on n'emploie pour l'analyse des gaz de la combustion que la potasse ou la soude caustique, pour absorber l'anhydride carbonique, l'acide pyrogallique en solution alcaline pour absorber ensuite l'oxygène et enfin le chlorure cuivreux pour le dosage de l'oxyde de carbone.

76. Composition des réactifs absorbants (1). — On emploie une solution de *soude* caustique à 33 0/0 ; 250 cc. de cette solution peuvent absorber environ 10.000 cc. d'anhydride carbonique. On peut ainsi, connaissant le volume de réactif enfermé dans l'appareil, calculer au bout de combien de temps il faudra renouveler la liqueur ; il est bon d'ailleurs de ne pas s'en servir jusqu'à saturation, la vitesse d'absorption diminuant d'autant plus qu'il reste moins d'alcali libre.

La solution de *pyrogallate* se prépare en mélangeant une solution de 5 gr. d'acide pyrogallique dans 15 cc. d'eau avec une solution de 120 gr. de potasse ou de soude caustique dans 80 cc. d'eau. Il importe d'employer de l'alcali caustique ordinaire du commerce, la soude ou la potasse à l'alcool pouvant amener des causes d'erreur. Le réactif peut absorber 20-23 cc. d'oxygène par 10 cc., mais on ne doit pas l'employer jusqu'à épuisement : Berthelot a en effet montré (1) que, avec un réactif ne pouvant absorber plus de quatre à cinq fois son poids d'oxygène, il pouvait y avoir lors de l'absorption formation de minimes quantités d'oxyde de carbone (0,4-0,6 0/0 d'O absorbé), ce qui fausse d'autant le résultat obtenu ensuite ; en pratique industrielle, l'erreur est d'ailleurs négligeable.

(1) D'après J. Seyffart, *Kesselhaus und Kalkofen Kontrole auf Grund gasometrischer... Untersuchungen.*

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Le *réactif cuprique* se prépare à l'aide d'une solution de 250 gr. chlorure cuivreux et 250 gr. chlorhydrate d'ammoniaque dans 750 cc. d'eau. Il convient d'ajouter un peu de cuivre métallique pour maintenir la combinaison cuprique à l'état de protochlorure. Au moment de l'emploi, on mélange à 150 cc. de cette liqueur 50 cc. d'ammoniaque de densité 0,905. Le liquide peut absorber quatre fois son volume d'oxyde de carbone, le gaz absorbé se transforme en carbonate d'ammoniaque et il y a dépôt de cuivre métallique ce qui protège la liqueur contre l'oxydation (on peut d'ailleurs, comme dans l'appareil Orsat, ajouter à dessein du cuivre).

77. Dosage de l'anhydride carbonique et de l'oxyde de carbone. — La teneur en anhydride carbonique est de beaucoup la donnée la plus importante de l'analyse des gaz de la combustion. Comme il y a en réalité presque toujours excès d'air — hormis les cas où l'on baisse ou couvre les feux, ce qui est anormal — on ne devrait trouver qu'exceptionnellement de l'oxyde de carbone. En réalité on en trouve presque toujours un peu.

Dans le contrôle réduit au strict indispensable, il suffit de doser l'anhydride carbonique; mais, si l'on veut déterminer exactement la quantité de chaleur emportée par les gaz, il faut y doser l'oxyde de carbone. Quant au dosage de l'oxygène, il n'a qu'une valeur de contrôle ; en effet, l'air contenant un rapport fixe O/Az et la formation de CO^2 et de CO ayant lieu aux dépens de l'oxygène de l'air, on doit trouver dans les gaz de la combustion le rapport (CO^2 + O), Az (en volumes) égal à celui de l'air (puisque 1 vol. d'O = 1 vol. de CO^2 formé

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

à ses dépens). On a sur ce principe basé des tables qui permettent, d'après la teneur en CO^2, de calculer le volume théoriquement correspondant d'oxygène et d'azote 0/0 de gaz (1).

Teneur en CO^2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Teneur correspondante en O	17,6	16,5	15,4	14,7	13,4	11,7	11	9,9	8,7	8,1	6,5	5,4
Teneur correspondante en Az	79,4	79,5	79,6	79,3	79,6	80,3	80	80,1	80,3	79,9	80,5	80,6

L'anhydride carbonique, l'oxygène et l'oxyde de carbone se dosent successivement sur un même volume de gaz : c'est plus simple, puisque l'on opère ainsi sur un volume mesuré une seule fois, ce qui diminue les causes d'erreur. C'est d'ailleurs indispensable, car le réactif qui absorbe CO pouvant s'oxyder, on ne peut le faire agir que sur des gaz privés d'oxygène (2). Quant à l'hydrogène, on le dose non par absorption, mais par essai eudiométrique, à l'aide le plus souvent d'un appareil genre Orsat, muni d'un dispositif *ad hoc* (§ 84).

78. Hydrogène et carbures. — Il est très rare que l'on dose l'hydrogène dans les gaz de la combus-

(2) Le tableau reproduit d'après Baillet n'est pas absolument conforme au raisonnement précédent ; la somme $O + CO^2$ qui devrait toujours égaler 21 est variable ; c'est la conséquence d'une correction pratique calculée d'après la quantité moyenne d'hydrogène contenue dans les houilles et qui est oxydée sans formation de gaz (la vapeur d'eau se condense dans l'échantillonneur). En réalité on trouve toujours un peu moins d'oxygène que le tableau n'en indique, ce qui résulte de la formation d'oxyde de carbone.

(1) Nous donnerons plus loin (§ 86) le calcul de la teneur en CO d'après le dosage de O et de CO^2 ; on peut utiliser la méthode pour vérifier les résultats des différentes absorptions. En pratique, comme nous l'avons fait remarquer précédemment, on trouve presque toujours ainsi des différences quelquefois notables.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

tion ; on croit le plus souvent *a priori* que tout l'hydrogène doit être parfaitement brûlé. En réalité, il n'en est rien, et peut-être même faut-il chercher là une cause des anomalies que produit presque toujours la vérification par le calcul des quantités d'oxyde de carbone, dosées par absorption.

Voici, résumées en un tableau, un certain nombre d'analyses citées par Scheurer-Kestner, où l'on constatera des teneurs en hydrogène assez considérables. Il convient cependant de remarquer, surtout pour les chiffres de M. Debette, qu'il doit y avoir exagération. Scheurer-Kestner et Meunier ont en effet effectué l'analyse de l'air et y ont trouvé de l'hydrogène, en proportions, il est vrai, infiniment plus faibles que celles relevées dans l'analyse des gaz de la combustion.

Auteurs	CO^2 %	CO	O	H	Az
Debette	12,97	0,75	6,30	0,58	79,4
»	8,61	0,47	13,80	1,14	75,98
»	7,73	0,01	14,27	1,63	76,36
Scheurer-Kestner et Meunier	10,99		7,43	0,26	80,72
»	11,91	0,65	6,67	0,15	80,44
»	13,28	1,19	4,26	0,67	80,30

79. Les carbonimètres. — Il existe un nombre considérable d'appareils servant au dosage de l'anhydride carbonique dans les gaz ; nous ne décrirons que quelques modèles des plus usités, les autres n'en différant que par des détails. Le plus simple consiste en

(1) Berthelot, *Comptes rendus*, avril 1898.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

une cloche graduée de 100 cc. (fig. 31) dont les divisions sont inversées, le 0 partant du trait qui porte le chiffre 100 sur les éprouvettes ordinaires. Le tube rempli d'eau est renversé sur la cuve à eau, on recueille 100 cc. de gaz à la pression atmosphérique (les surfaces de liquide dans la cuve et dans l'éprouvette étant sur le même plan). Il suffit alors d'introduire

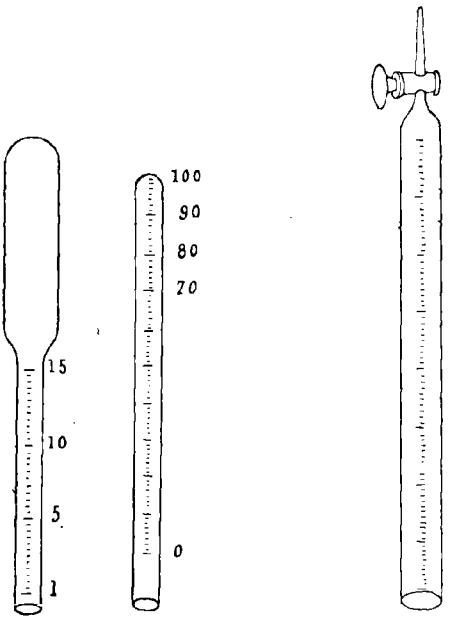

Fig. 30, 31 et 32. — Carbonimètres.

De précision. Modèle ordinaire. De Stammer.

sous l'eau un fragment de soude ou de potasse caustique, de fermer l'orifice de la cloche avec le doigt protégé par une feuille de caoutchouc et d'agiter. L'anhydride carbonique est absorbé. On renverse la cloche sur la cuve à eau et fait coïncider de nouveau les surfaces des liquides ; la division de l'éprouvette affleurant

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

au niveau de l'eau indique la quantité d'anhydride carbonique 0/0 de gaz. On recommence la manipulation jusqu'à ce que deux lectures donnent le même résultat.

Pour plus de précision, et comme la graduation utile de la cloche ne comprend que les traits de 0 à 15, on peut employer une éprouvette en forme de matras (fig. 30); le fond forme réservoir ce qui a permis de porter les graduations sur une tige de plus faible diamètre. Toutes les manipulations sont d'ailleurs les mêmes.

L'éprouvette Stammer, plus particulièrement employée pour le dosage de CO^2 dans le gaz des fours à chaux, est une cloche graduée simplement surmontée d'un robinet et d'une tubulure pour l'arrivée du gaz (fig. 32); les manipulations sont les mêmes, à cela près que le fluide, au lieu d'arriver sous l'eau, entre directement par le haut de l'éprouvette.

Le carbonimètre Raffy est solide et rustique. Il se compose d'une éprouvette (fig. 33) que l'on remplit d'eau par la tubulure à entonnoir; on fait ensuite arriver le gaz par la même tubulure, l'entonnoir étant dévissé. On replace l'entonnoir et y verse de la soude caustique (le robinet étant fermé) qu'on laisse ensuite doucement descendre jusqu'au 0 de la graduation. On ferme le robinet, agite, renverse sur la cuve à eau, ouvre et établit l'égalité de niveau des liquides. On ferme, renverse et lit sur la graduation la teneur 0/0 en CO^2. Comme précédemment, on doit recommencer l'agitation et la mise à la pression atmosphérique, retrouver le même résultat, ce qui prouve que l'anhydride carbonique est complètement absorbé.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

80. Burette à gaz de Bunte. — Les burettes de Winkler, de Honigman, de Villot, le nitromètre de Lunge peuvent servir au dosage des différents éléments des gaz par l'absorption avec les réactifs appropriés ; nous ne décrirons que l'appareil de Bunte d'usage

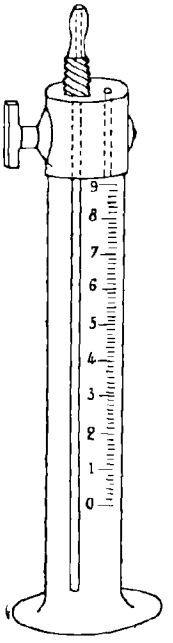

Fig. 33.
Carbonimètre de Raffy.

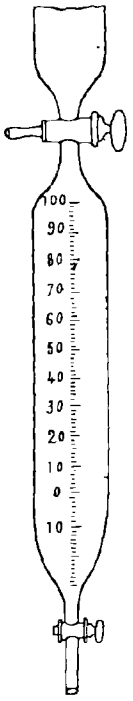

Fig. 34.
Burette à gaz de Bunte.

plus commode (1). Il est composé d'une burette graduée, fermée à ses deux extrémités par des robinets et surmontée d'un entonnoir (fig. 34).

La burette est d'abord remplie d'eau par son extré-

(1) Il est d'ailleurs très simple, au cas où l'on possède un de ces appareils, d'appliquer, en les modifiant quelque peu, les manipulations décrites à propos des burettes de Bunte et de Hempel.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

mité inférieure que l'on relie par un tube de caoutchouc à un entonnoir placé plus haut. On met ensuite, par le moyen de la clef à trois voies du robinet, l'intérieur de l'éprouvette en communication avec le récipient contenant le gaz à analyser que l'on aspire en laissant couler l'eau par le robinet inférieur. On laisse ainsi rentrer un peu plus de 100 cc., puis, en ouvrant le robinet et faisant agir la pression de l'eau, on fait affleurer le niveau du liquide au trait 0. Pour établir la pression atmosphérique, on verse de l'eau dans l'entonnoir jusqu'au trait, l'excès de gaz s'échappe, et, comme le tube réunissant l'entonnoir à la burette est capillaire, il reste dans l'appareil 100 cc. de gaz à la pression atmosphérique, augmentée de la hauteur de la colonne d'eau dans l'entonnoir ; toutes les mesures étant ainsi faites, il n'y a de ce chef aucune correction à établir.

Pour faire agir le réactif absorbant, on ouvre le robinet inférieur et, en abaissant le récipient mobile, on établit dans la burette une dépression ; on ferme alors le robinet, puis on l'ouvre après avoir introduit la pointe du tube inférieur dans le liquide absorbant, qui pénètre dans la burette. On referme le robinet et on agite. Après absorption, on ouvre doucement le robinet supérieur, le liquide descend jusqu'à ce qu'il s'établisse équilibre de pression à l'intérieur et à l'extérieur, on verse de l'eau jusqu'à l'index de l'entonnoir et on fait la lecture.

On peut ainsi successivement faire agir plusieurs réactifs ; il suffit, après chaque absorption, de chasser par dépression le liquide renfermé dans la burette et d'en introduire un nouveau.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

81. Burettes de Hempel (1). — L'appareil de

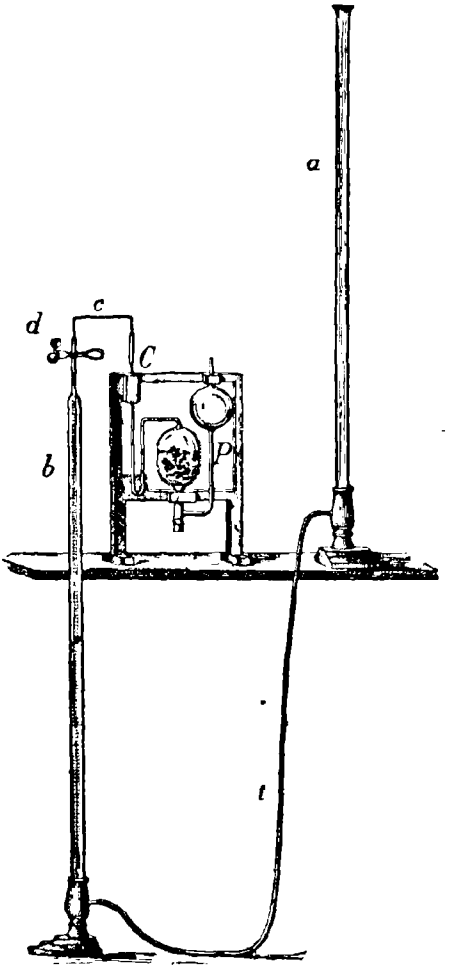

Fig. 35. — Burettes de Hempel.

Hempel est beaucoup moins connu et usité en France que celui d'Orsat, ce qui s'explique d'autant mal que

(1) D'après F. Dupont. *Bull. de l'Association des Chimistes, loc. cit.*

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

son prix est moindre et qu'il donne des résultats plus rigoureux. Ajoutons que les manipulations en sont très faciles.

Les burettes *a* et *b* (fig. 35), d'une contenance de 100 cc. chacune, sont remplies à moitié d'eau. La pipette P contient des rouleaux de toile métallique augmentant la surface d'absorption ; elle est remplie, pour le dosage de l'*anhydride carbonique*, de lessive de potasse caustique à 36° Bé.

Pour faire l'analyse du gaz, on élève pendant quelques secondes la burette *a* au-dessus de *b*, de manière à faire couler l'eau goutte à goutte par le tube capillaire *c*. On établit alors la communication de *c* avec la prise de gaz et on remplit la burette en abaissant pendant quelques secondes *a* au-dessous de *b*, la pince *d* étant desserrée. Quand *b* est remplie, on ferme *d*, puis on supprime la communication entre cette burette et le réservoir du gaz à analyser. Les deux burettes étant placées côte à côte, on amène le niveau de l'eau dans *b* au zéro de la graduation, puis on pince fortement avec les doigts le tuyau de caoutchouc *t* qui relie les deux burettes et on ouvre la pince *d* pendant une seconde ; l'excès de gaz qui était comprimé s'échappe et l'on a exactement 100 cc. à la pression atmosphérique.

La pipette P est alors placée sur le petit banc et l'on établit la communication entre elle et la burette *b*. Si l'on soulève pour un instant la burette *a* au-dessus de *b*, en ouvrant *d*, on fait passer le gaz dans la pipette P ; on ferme *d* quand le niveau de l'eau arrive dans le tube capillaire. Au bout de deux à trois minutes, on aspire le gaz de P dans *b* en abaissant *a* et ouvrant *d*, jusqu'à ce que la potasse ait repassé dans le tuyau de

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

la pipette P. On ferme *d*, puis on supprime la communication de *b* avec P.

Il suffit alors d'amener les deux colonnes d'eau sur le même niveau en soulevant les deux burettes, pour lire directement sur la graduation de *b* la quantité d'anhydride carbonique contenue préalablement dans le gaz et absorbée par la potasse.

Pour doser ensuite l'*oxygène*, on emploie une autre pipette, à peu près semblable à P et contenant du pyrogallate de potasse. Après absorption de l'anhydride carbonique, on met en communication la pipette P′ avec la burette *b*. Si l'on soulève pour un instant *a* au-dessus de *b* en ouvrant *d*, on fait passer le gaz en P′ ; on ferme *d*, quand le niveau de l'eau arrive dans le tube capillaire au bout de 2 à 3 minutes. Le gaz de P′ est ensuite aspiré dans *b* par l'abaissement de *a* et l'ouverture de *d*, jusqu'à ce que la solution de pyrogallate soit repassée dans le tuyau de P′.

On ferme *d*, supprime la communication de *b* avec P′, et amène les deux colonnes d'eau sur le même niveau. Le chiffre lu sur la burette *b*, duquel on retranche la quantité d'anhydride carbonique déjà trouvée, donne le pourcentage d'oxygène.

L'*oxyde de carbone* se dose de façon analogue en faisant usage d'une troisième pipette contenant du protochlorure de cuivre ammoniacal, conservé comme d'ordinaire en présence d'une toile métallique de cuivre. Il reste finalement l'*azote*.

82. Appareil Orsat. — Tandis que les analyseurs précédemment décrits ne se composaient que d'un seul récipient où l'on faisait successivement agir les différents réactifs, d'autres au contraire comprennent

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

un mesureur distinct des flacons laboratoires et autant de dispositifs d'absorption qu'il y a de réactifs absorbants. Et sans doute ils sont ainsi plus compliqués, mais on comprend que les manipulations soient plus

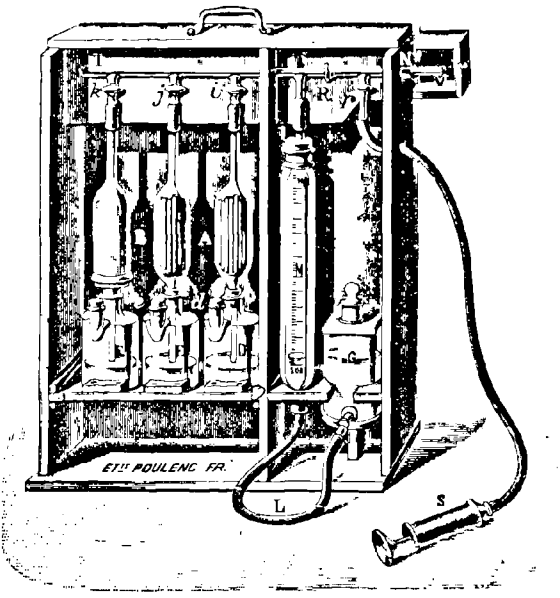

Fig. 36. — Appareil Orsat. Modèle de Salleron.

commodes. L'appareil d'Orsat est une modification de celui de Schlœsing et Rolland, basé lui-même sur un principe appliqué auparavant par Regnault et Reiset ; la plupart des constructeurs lui ont fait subir des modifications de détails : aussi existe-t-il dans le commerce un grand nombre de ces appareils, se valant tous à peu près. Nous décrirons celui d'Orsat-Salleron, l'un des plus employés en France (fig. 36).

Il se compose d'un volumètre M recouvert d'une couche d'eau, pour que les mesures aient lieu à la même température, et communiquant avec le flacon G

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

par le tube L ; le flacon G peut, en s'élevant et s'abaissant, transformer M en aspirateur. M est relié à la rampe T pouvant communiquer par l'ouverture des robinets *i*, *j* et *k* avec l'un des trois flacons-laboratoires D, E, F. Ceux-ci sont composés de flacons à deux tubulures surmontés d'allonges remplies les unes de tubes de verre pour le cas de l'emploi de solutions alcalines caustiques et l'autre de toile métallique pour le chlorure de cuivre (1). Enfin, à l'arrivée du tube communiquant avec le récipient ou la conduite à gaz, se trouve soit un soufflet (Salleron), soit une pompe pneumatique (Démichel), pour « purger » le tube.

Pour procéder à l'analyse, on ouvre le robinet R et on élève le flacon G jusqu'à ce que le liquide arrive au zéro ; le tube N est alors relié à la conduite de gaz que l'on balaye en aspirant avec la pompe S ; *r* étant fermé, on aspire ensuite dans le mesureur M un peu plus de 100 div. de gaz, puis, N communiquant avec l'air, on expulse doucement l'excès d'air ; le liquide arrivant au trait 100 et étant dans le mesureur sur le même plan que dans le flacon G, on ferme R. On ouvre *i* et en même temps on élève le flacon G jusqu'à ce que le liquide du mesureur atteigne l'index supérieur, on ferme alors *i*. Tout le gaz passe en A au contact du réactif; la présence des tubes de verre remplissant l'allonge multiplie la surface de contact et facilite l'absorption. Après quelques instants, on ouvre *i* après avoir abaissé G et on laisse le réactif remonter jusqu'à l'index gravé sur le tube supérieur de l'allonge ; on

(1) Les flacons sont remplis des réactifs appropriés (§ 78), mais il importe, ces réactifs restant toujours dans l'appareil, d'éviter leur oxydation par l'air ; pour cela, les flacons E et F contiennent une petite quantité d'huile de naphte qui, surnageant au-dessus du liquide, le préserve du contact de l'air.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

ferme *i*, on établit l'égalité des niveaux des liquides en M et G et on fait la lecture. On recommence l'absorption jusqu'à ce que l'on trouve deux fois le même résultat. D contenant de la soude caustique, la différence des lectures donne le pour cent d'anhydride carbonique ; on absorbe ensuite en E l'oxygène, puis enfin on dose l'oxyde de carbone en F.

La manœuvre de l'appareil Orsat étant minutieuse sinon difficile, il est bon de s'habituer aux manipulations en faisant quelques essais à blanc avant l'analyse définitive. Il doit être très bien entretenu, les robinets seront toujours légèrement vaselinés, les caoutchoucs ligaturés ; on vérifiera de temps à autre l'étanchéité de chaque récipient en y établissant pendant quelques instants un vide partiel ou une surpression et constatant ensuite qu'il n'y a pas eu de fuites. On doit éviter soigneusement de laisser monter les liquides jusqu'aux robinets, ce qui amène le coincement des clefs ; pour cela, les tubes étant tous du plus petit diamètre possible (réduction au minimum de l'espace nuisible), il convient d'employer des réactifs colorés ; le chlorure de cuivre et l'acide pyrogallique l'étant naturellement, il suffit d'ajouter au liquide du tube mesureur un peu de cochenille ou de tournesol et à la soude caustique un peu d'une couleur solide aux alcalis : rouge ou bleu d'alizarine, chrysophénine, etc. On peut ainsi voir très facilement les niveaux des liquides dans les tubes capillaires.

83. Analyseur Baillet. — C'est une sorte d'appareil Orsat très rustique et rendu ainsi plus propre aux essais industriels. Il se compose : d'un mesureur E (fig. 37 et 38), relié en *a* au récipient de gaz à analyser

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

et pouvant communiquer en *b* avec l'air; d'un laboratoire T formé d'un tube de cuivre rempli de billes de verre imprégnées du réactif absorbant; d'une cuve à

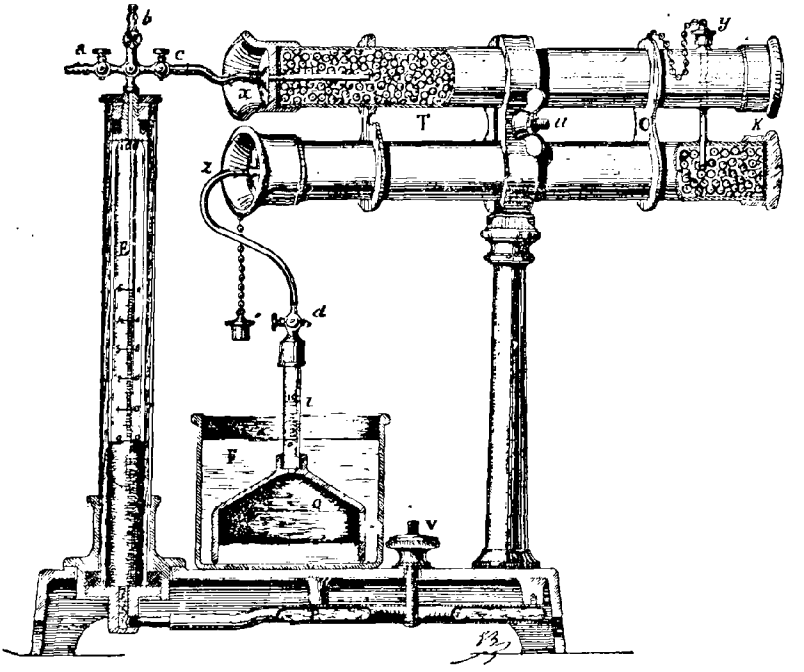

Fig. 37. — Analyseur Baillet (coupe).

eau F où plonge librement une cloche reliée à sa partie supérieure avec une extrémité du laboratoire T. Le tout est monté sur un socle de fonte émaillée.

A l'aide du bouton molleté V, agissant sur une poche de caoutchouc pleine d'eau et communiquant avec la partie inférieure de E, on aspire dans le mesureur 100 divisions de gaz (mesurées à la pression atmosphérique). On refoule ensuite le fluide dans le laboratoire T, puis, après quelques secondes (dans le cas du dosage de l'anhydride carbonique, et T étant imprégné de soude caustique), on ramène le tout dans l'éprou-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

vette que l'on règle encore à la pression atmosphérique. La différence des lectures avant et après absorption donne le volume 0/0 de CO^2.

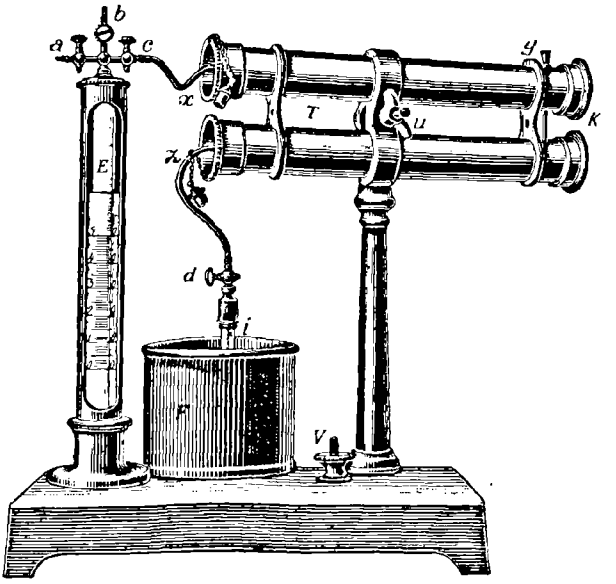

Fig. 38. — Analyseur Baillet (vue extérieure).

Comme dans l'appareil Orsat, on ne doit considérer l'absorption comme terminée qu'après deux obtentions successives du même chiffre. La lecture des unités se fait sur la graduation du tube mesureur E ; celle des dixièmes a lieu, le niveau en E coïncidant exactement avec l'une des divisions (ce que permet de faire le bouton V), en faisant une seconde lecture sur le tube *i*, surmontant la cloche (le faible diamètre permet une approximation supérieure).

On peut ensuite, s'il y a lieu, remplacer les tubes T par d'autres éléments placés sur le même support, chacun servant au dosage d'un même gaz. C'est ainsi que l'appareil complet se compose de : *a*) un laboratoire

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

pour l'absorption de CO^2 que l'on prépare en emplissant d'une solution saturée de potasse caustique, puis laissant égoutter; *b*) un tube pour le dosage de l'oxygène, avec lequel on emploie une solution de 3 gr. acide pyrogallique dans 7 gr. d'eau + 11 cc. de lessive concentrée de potasse; *c*) un élément pour l'absorption de l'oxyde de carbone, la liqueur étant alors composée de 2 gr. 5 chlorure de cuivre, 4 gr. rognures de cuivre rouge, 15 cc. acide chlorhydrique : le tout est mis à digérer 2 à 3 jours en flacon fermé et est agité de temps à autre; *d*) enfin un eudiomètre affectant toujours la même forme extérieure.

84. Appareil Orsat-Vignon. — Il diffère de l'analyseur Orsat précédemment décrit par l'adjonction d'un eudiomètre permettant de doser l'hydrogène et les hydrocarbures (D, fig. 39). Il comprend deux ou trois éléments absorbants selon que l'on veut doser CO^2 et O ou CO^2, O et CO. Nous empruntons à M. Démichel la description du fonctionnement de l'appareil (1).

Mise en état. — Par la manœuvre des robinets de F et G, on amène les niveaux de liquide en A, B, C et D aux points de repère, en évitant, comme dans l'appareil Orsat, de mouiller les robinets. On détermine ensuite l'espace nuisible constitué par la rampe et les tubulures. Il suffit pour cela d'analyser de l'air : si l'on trouve par exemple : O = 21,3 et Az = 78,7 au lieu de O = 20,8 et Az = 79,2, on tirera 21,3/20,8 = 1,024. Les 100 divisions du mesureur plus l'espace nuisible (x) renferment : 1,024 × 100, d'où

$$x = 2 \text{ cc. } 4 = 0{,}5\ O\ (\alpha) + 1{,}9\ Az\ (\beta).$$

(1) Etablissements Poulenc frères, *Notice sur les appareils destinés à l'analyse des gaz*.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Prélèvement de l'échantillon. — Le récipient ou la conduite contenant le gaz sont réunis à O, on ouvre r, on fait fonctionner la pompe S. On ferme r, ouvre r_1 et introduit dans M environ 100 divisions de gaz (si celui-ci est sec, l'introduire lentement pour le saturer, en 2 minutes). Les lectures se font, l'œil étant à hauteur du ménisque et l'eau en F et A étant dans un même plan.

Absorption des gaz. — On fait passer le gaz en B en ouvrant r_1 et soulevant F ; après quelques secondes, on ramène en A et on mesure ; on répète jusqu'à volume constant et obtient ainsi le volume d'anhydride carbonique. Il convient, avant la dernière absorption, de faire passer le gaz de A en D pour balayer l'anhydride carbonique des espaces nuisibles. Pour doser l'oxygène, puis l'oxyde de carbone, on répète les mêmes manipulations dans le second, puis le troisième élément.

Combustion de l'hydrogène et des hydrocarbures. — Le gaz privé de CO^2 et d'O (en supposant l'appareil sans élément pour l'absorption de CO que l'on dose également par combustion) est mélangé d'oxygène, selon la teneur en éléments combustibles ; on ajoute deux fois son volume (gaz d'éclairage), une fois son volume (gaz pauvre) ou pour les gaz de la combustion 25 0/0 d'oxygène et 30 0/0 de gaz tonnant. On introduit les gaz par aspiration au moyen du flacon F, et on détermine par l'analyse, pour les corrections ultérieures, la teneur de l'oxygène en Az et les teneurs en H et O du gaz tonnant.

Le mélange de gaz est homogénéisé par passages de l'eudiomètre au mesureur et vice versa (deux fois). Puis on le fait détoner par fractions *successives* et *détendues* de un à quatre volumes par l'abaissement du

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

flacon F ; les dernières fractions devront être plus grandes (par exemple pour 35 de gaz d'éclairage et 75 d'oxygène on prendra successivement 20, 25, 30 et enfin 35). Les détonations s'effectuent ainsi avec un bruit

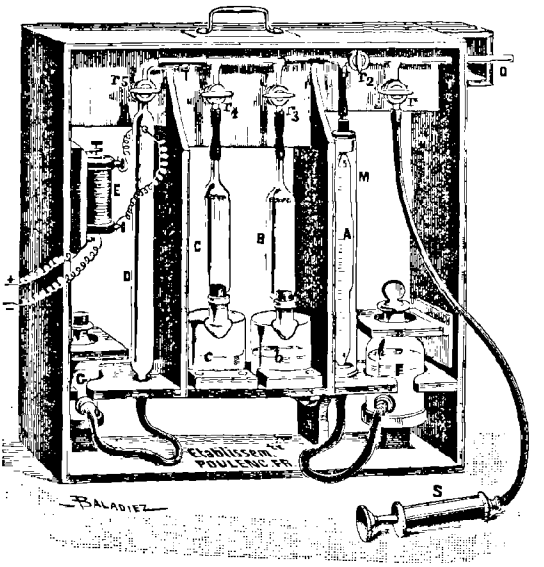

Fig. 39. — Appareil Orsat modifié par Vignon.

sourd très faible, après chacune on mélange les gaz des espaces nuisibles aux gaz restants et on soumet de nouveau à l'action de l'étincelle.

Contraction et absorption. — On mesure alors la contraction, puis on dose CO^2 par absorption et on fait passer de nouveau le résidu dans l'eudiomètre. S'il y a nouvelle détonation sous l'influence de l'étincelle, on mesure à nouveau la contraction additionnelle et la quantité de CO^2 formé après avoir balayé tous les espaces nuisibles. On absorbe finalement l'oxygène et on mesure le résidu d'azote.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

85. Calculs. — Soit A le volume de gaz dans le mesureur; l'appareil contient en réalité, A gaz $+ x$ air $= A + \alpha + \beta$. Les solutions de soude et d'acide pyrogallique produisent les diminutions v_1 (CO^2) et v_2 (O). Mais les espaces nuisibles contiennent α d'oxygène, le gaz analysé contient donc $v_2 - \alpha$ oxygène. Et le volume du gaz dans l'appareil, après ces absorptions, est :

$$A + x - v_1 - v_2 \text{ ou } A + \alpha + \beta - v_1 - v_2$$
$$\text{ou } A - (v_1 + v_2 - \alpha) + \beta.$$

Par expulsion ce volume est diminué; il nous reste B (mesureur) $+ x$, volume contenant une certaine proportion d'azote des espaces nuisibles, qui sera :

$$\beta \times \frac{B + x}{A - (v_1 + v_2 - \alpha) + \beta} = \gamma,$$

et nous aurons réellement pour le volume du gaz à faire détoner : $V_1 = B + x - \gamma$. On l'additionne d'un volume O d'oxygène, lequel, s'il a laissé un résidu N donné par le mesureur, contient réellement $(N + \alpha)$ d'azote; l'oxygène de l'espace nuisible étant remplacé ici par de l'azote. Nous aurons donc dans le mélange $B + x + O$ un résidu d'azote étranger au gaz égal à $N + \alpha + \gamma$.

Pour le gaz détoné, appelons la contraction K, l'anhydride carbonique n et R le résidu d'azote dans le mesureur (le résidu réel étant égal à $R + x - \gamma$). Si $R + x - \gamma = N + \alpha$, le gaz ne contenait pas d'azote. Si $R + x - \gamma$ est plus grand que $N + \alpha$, la différence représente l'azote dans ce gaz : il faudra donc dans ce cas retrancher cet azote du volume V_1, soit V_1 — vol. azote $= V$.

On a les équations :

1° $CO + O = CO^2$ (2 vol. + 1 vol. soit 3 vol. = 2 vol.), soit pour un volume de CO une contraction de 0,5 ;

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

2° $CH^4 + 4O = CO^2 + 2H^2O$ (2 vol. + 4 vol. soit 6 vol. = 2 vol. gaz), soit, pour 1 vol. CH^4 une contraction de 2 ;

3° $H^2 + O = H^2O$ (2 vol. + 1 vol. = 0 vol. gazeux), soit pour un volume d'hydrogène une contraction de 1,5.

En désignant dans un mélange V d'oxyde de carbone, de méthane et d'hydrogène CO par C, CH^4 par m et H par h, nous pouvons écrire après détonation, la contraction étant K, l'anhydride carbonique formé n :

$$V = C + m + h ; \; n = C + m \text{ et } K = \frac{C}{2} + 2m + \frac{3h}{2} ,$$

d'où l'on tire :

$$h = V - n ; \; C = \frac{n}{3} + V - \frac{2K}{3} \text{ et } m = \frac{2n}{3} - V + \frac{2K}{3} .$$

Du volume V, il est facile de passer à $A - (v_1 + v_2 - \alpha)$ et finalement au volume initial A.

Exemple d'analyse. — On a trouvé dans la détermination de l'espace nuisible $x = 2,4$, $\alpha = 0,5$ et $\beta = 1,9$; le volume initial étant 100. Par absorption, on a CO^2 (v_1) = 2, oxygène (v_2) = 1,5, résidu = 96,5. On conserve 35 divisions auxquelles on ajoute 70 d'oxygène. Après détonation, le volume est de 47,8. D'où l'on peut tirer :

$$\text{contraction } K_1 = 105 - 47,8 = 57,2.$$

Après absorption de $CO^2 = 17,8$, le volume restant = 30. Après deuxième détonation : 28,3,

$K_2 = 1,7$, $CO^2 = 0,3$, oxygène = 20,3, résidu R = 7,7.

Analyse de l'oxygène employé sur 70 divisions : oxygène = 61,1, azote = 8,9 ; d'où :

$$N + \alpha = 8,9 + 0,5 = 9,4.$$

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Appliquons maintenant la méthode de calcul :

$$A + x = 102,4$$

et

$$A - (v_1 + v_2 - \alpha) + \beta = 100 - (2 + 1,5 - 0,5) + 1,9 = 98,9,$$

dont nous prenons pour détoner :

$$B + x = 35 + 2,4 = 37,4,$$

d'où :

$$\gamma = \frac{1,9 \times 37,4}{98,9} = 0,71.$$

L'oxygène laisse en résidu :

$$N + \alpha = 9,4;$$

le gaz

$$R + x - \gamma = 7,7 + 2,4 - 0,71 = 9,39 :$$

il ne renferme donc pas d'azote. En résumé, nous avons :

$$CO^2 = 2 \qquad O = 1,5 - \alpha = 1,5 - 0,5 = 1,$$
$$V = B + x - \gamma = 35 + 2,4 - 0,71 = 36,69,$$
$$n = 17,8 + 0,3 = 18,1$$
$$\text{et } K = K_1 + K_2 = 57,2 + 1,7 = 58,9.$$

D'où l'on tire :

$$C = \frac{n - 2K + 3V}{3} = 3,45 \text{ (oxyde de carbone)};$$

$$m = \frac{2n - 3V + 2K}{3} = 14,65 \text{ (méthane)};$$

et $h = V - n = 18,59$ (hydrogène).

On calcule $A - (v_1 + v_2 - \alpha) = 97$ et l'on obtient finalement :

Anhydre carbonique	(CO^2)	2	pour 100 de gaz
Oxygène	(O)	1	
Oxyde de carbone.	(CO)	9,12	
Méthane	(CH^4)	38,73	
Hydrogène	(H)	49,15	
Azote	(Az)	0	

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

86. Calcul de la teneur en azote et oxyde de carbone. — Nous empruntons à Smal et Timmermans leur description, tout en faisant nos réserves sur la valeur de cette façon indirecte de déterminer la teneur en oxyde de carbone. Il est, croyons-nous, préférable de le doser par absorption. Dans tous les cas, la méthode sert à calculer la teneur en Az; et, si l'on dose CO, elle peut servir de moyen de contrôle.

« Soit m le volume d'anhydride carbonique contenu dans cent volumes de gaz, et n le volume d'oxygène libre; le volume d'O combiné contenu dans CO^2 est également m, et le volume d'O contenu dans ces deux éléments (CO^2 et O) est donc $(m + n)$.

Après absorption de CO^2 et O, les 100 volumes de gaz sont devenus $100 - (m + n)$. Or l'air atmosphérique se compose en volume de quatre parties d'azote et d'une d'oxygène (79 et 21) : il a donc fallu, pour fournir $(m + n)$ d'O, une quantité d'air contenant $4(m + n)$ d'Az. La différence de ces deux volumes : $100 - (m + n) - 4(m + n)$ constitue un volume de gaz p que nous supposerons être uniquement de l'oxyde de carbone et de l'azote.

Etant donné que, dans une masse de CO, le volume total correspond à deux fois le volume d'O combiné, nous avons : volume O = 0,5 volume CO. Cet oxygène a été fourni par une quantité d'air qui contenait une proportion d'Az correspondant, d'après ce qui précède, à 2CO.

Le volume p est donc composé de trois parties dont une partie CO et deux parties Az, d'où $CO = \frac{p}{3}$ (volume) et $Az = \frac{2p}{3}$ (volume). La teneur des gaz brûlés est ainsi :

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

$$CO^2 = m\ 0/0 \qquad O = n\ 0/0$$

$$CO\ 0/0 = \frac{p}{3} = \frac{100 - 5(m+n)}{3}$$

et :

$$Az\ 0/0 = \frac{2p}{3} + 4(m+n) = \frac{2}{3}(100 + m + n) \text{ ».}$$

87. Correction relative à la vapeur d'eau. — Les gaz de la combustion étant souvent recueillis sur l'eau et mis en présence de réactifs liquides, il en résulte que le résidu de l'analyse après absorptions successives n'est pas en réalité de l'azote, mais un mélange d'azote et de vapeur d'eau. Et les proportions en sont variables avec la température et la pression atmosphérique ; on peut négliger en pratique cette dernière influence, mais non celle de la température : 100 vol. de gaz humide à 21° C par exemple ne représentent en réalité que 97 vol. 56 de gaz sec.

Dans un mélange gazeux, chaque gaz exerce la même pression que s'il était seul (Dalton). Il faut donc, pour obtenir la pression subie par le gaz dans le mélange, retrancher de la pression barométrique la tension de la vapeur d'eau à la température de l'essai. Les volumes de gaz étant inversement proportionnels aux pressions qu'on leur fait subir (Mariotte), on peut écrire :

$$V = v\frac{h - f}{h},$$

V étant le volume de gaz sec, v le volume de gaz humide, h la hauteur barométrique et f la tension de la vapeur d'eau. En appliquant cette formule d'après la table de Regnault et pour $h = 760$, Kasalowsky a dressé une

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

table donnant la quantité réelle de gaz pour 100 vol. apparents :

Température (degrés centigrade)	Tension (mm. de mercure)	Volume corrigé	Température (degrés centigrade)	Tension (mm. de mercure)	Volume corrigé
0	4,600	99,39	16	13,536	98,22
1	4,940	99,35	17	14,421	98,10
2	5,302	99,30	18	15,357	97,98
3	5,687	99,25	19	16,346	97,85
4	6,097	99,20	20	17,391	97,71
5	6,534	99,14	21	18,495	97,56
6	6,998	99,08	22	19,659	97,40
7	7,492	99,01	23	20,888	97,25
8	8,017	98,95	24	22,184	97,08
9	8,574	98,87	25	23,550	86,80
10	9,165	98,79	26	24,988	96,71
11	9,792	98,71	27	26,505	96,51
12	10,457	98,62	28	28,101	96,30
13	11,162	98,53	29	29,782	96,08
14	11,908	98,43	30	31,548	95,85
15	12,699	98,33			

88. Volume des gaz de la combustion. — D'après les chiffres de l'analyse et le poids du combustible d'une part, la teneur des gaz en anhydride carbonique d'autre part, il est facile de déterminer le volume total des gaz : connaissant le poids du carbone contenu dans le combustible brûlé et le poids du car-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

bone contenu dans l'unité de volume des gaz, on déduit aisément le volume de ceux-ci.

Pour déterminer le poids du carbone contenu dans les différents gaz de la combustion, on réduit leur volume en kgr. et on calcule à l'aide des poids moléculaires le carbone qu'ils renferment. Le poids d'un volume v (en litres) d'anhydride carbonique est de $v \times 1$ gr. 966 ; comme 44 gr. de CO^2 renferment 12 gr. de C, le poids de carbone correspondant au volume v est de :

$$\text{C de } CO^2 = \frac{v \times 1{,}966 \times 12}{44} = 0 \text{ gr. } 536\, v.$$

On peut calculer de même les poids de carbone contenus dans des volumes v' d'oxyde de carbone et v'' de vapeur de carbone :

$$\text{C de CO} = \frac{v' \times 1{,}251 \times 3}{7} = 0 \text{ gr. } 536\, v'$$

$$\text{et C vapeur} = 1 \text{ gr. } 072\, v''.$$

On obtient ainsi :

$$\text{C total} = 0 \text{ gr. } 536\,(v + v') + 1{,}072\, v''.$$

D'autre part, pour calculer le poids de houille brûlée contenant la quantité de carbone retrouvée dans les gaz, on déduit du carbone C renfermé dans la houille (exprimé en grammes) le carbone c perdu dans les cendres.

Le volume total des gaz résiduels de la combustion sera donné par la formule :

$$V = \frac{C - c}{(v + v')\ 0 \text{ gr. } 536 + 1 \text{ gr. } 072\, v''}, \qquad (1)$$

dans laquelle :

(1) Scheurer-Kestner, *loc. cit.*

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

V est le volume en m^3 des produits gazeux de la combustion, à 0^0 et 0 m. 76, de 1 kg. de combustible ;

v est le volume de CO^2 en litres par m^3 de gaz ;

v' est le volume de CO en litres par m^3 de gaz ;

v'' est le volume de vapeur de C en litres par m^3 de gaz ;

C est le poids en gr. du carbone contenu dans 1 kgr. de combustible ;

c est le poids en gr. du carbone contenu dans les cendres de 1 kgr. de combustible.

89. L'intensité de coloration de la fumée. — On désigne plus particulièrement sous le nom de « fumée » les gaz de la combustion souillés de matières en suspension qui la colorent et la rendent opaque (1). Il y a production de fumée lors de l'emploi des charbons gras, ou lors des charges du foyer ; en effet, si on emploie une houille riche en matières volatiles, ou si on refroidit le milieu, ces matières ne brûlent pas complètement et une certaine quantité est enlevée par les gaz de la combustion. La coloration des fumées est due à des particules de matières goudronneuses et de suie résultant de la décomposition des hydrocarbures non brûlés et à des gouttelettes d'eau en suspension.

Non seulement la couleur de la fumée est un symptôme de pertes à la combustion, mais c'est un inconvénient pour les usines situées dans des villes, comme pour celles utilisant les gaz de la combustion à la dessiccation de certains produits ; aussi importe-t-il quelquefois d'apprécier le plus ou moins de coloration des fumées.

On détermine l'intensité de la coloration de la fumée à l'aide des diagrammes de Ringelmann composés de carrés portant des traits équidistants, rapprochés et se coupant à angles droits ; vus de loin, ils donnent l'im-

(1) Nous avons d'ailleurs employé indistinctement les mots « gaz » ou « fumées » au cours de l'ouvrage.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

pression d'une teinte grise, d'autant plus foncée que les traits sont plus larges.

On peut comparer directement aux teintes numérotées la fumée à observer et chiffrer l'intensité par l'indice du diagramme de même aspect, ou pour plus de précision employer le colorimètre de M. Izart (fig. 40)

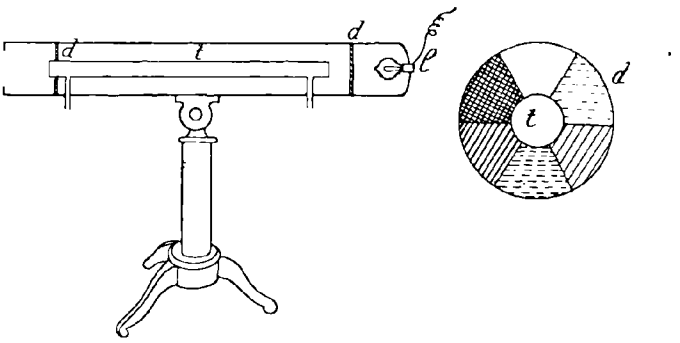

Fig. 40. — Colorimètre de M. Izart. Schéma de l'ensemble et détail du disque à secteurs-types.

composé d'un tube *t* parcouru par la fumée et d'un disque *d* composé de secteurs analogues aux tests Ringelmann. En regardant par transparence l'épaisseur de fumée, il est facile de voir à quelle teinte de référence elle correspond. Une lampe électrique *l* éclaire également les teintes à comparer par l'intermédiaire d'un verre dépoli *d*.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

CHAPITRE XII

ANALYSE AUTOMATIQUE DES GAZ DE LA COMBUSTION

I. — Enregistreurs densimétriques

La densité de l'anhydride carbonique (poids du litre 1.967 mgr.) diffère assez de celle de l'air (poids du litre 1.294 mgr.) pour que l'on ait pu mettre à profit la mesure de la densité des gaz de la combustion pour déterminer leur teneur en anhydride carbonique.

Plusieurs appareils ont été construits dans le but d'indiquer de façon continue la densité du gaz amené par une dérivation du carneau. La plupart se composent essentiellement d'une balance très sensible supportant à chaque extrémité des bras du fléau des récipients assez volumineux. Dans certains appareils, ces deux récipients plongent dans des atmosphères de gaz à comparer ; dans d'autres, le fluide arrive à l'intérieur d'un des récipients. Nous décrirons les modèles les plus usités.

90. Appareils à fléaux de balances. — La *balance à gaz de Custodis* (1) se compose d'une enveloppe de fonte fermée à la partie antérieure par des glaces et

(1) D'après Parnicke, *loc. cit.*

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

divisée en trois chambres séparées les unes des autres (fig. 41). Dans le compartiment *d* se trouve un fléau de balance très sensible, portant à chacune de ses extrémités deux ballons en verre de volumes égaux exactement équilibrés. Lorsque les trois chambres sont remplies d'air atmosphérique, le fléau est horizon-

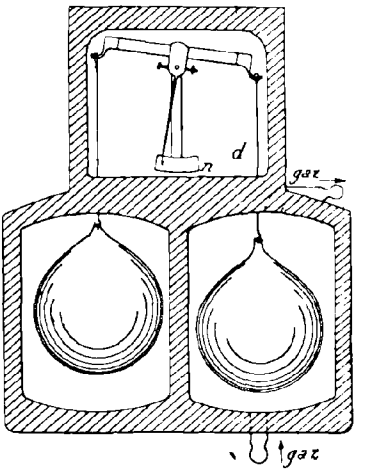

Fig. 41. — Appareil Custodis.

tal et l'aiguille se trouve au zéro de la graduation *n*. Mais, si l'on remplace l'air contenu dans l'une des chambres par un gaz plus dense, le ballon correspondant reçoit une poussée plus considérable ; l'équilibre est rompu et l'aiguille, après quelques oscillations, prend une nouvelle position fixe.

La poussée étant proportionnelle à la densité, et par suite à la teneur en anhydride carbonique, il suffit de graduer convenablement l'échelle pour que ses divisions indiquent immédiatement la teneur d'anhydride pour cent de gaz. L'une des chambres est en communication permanente avec l'atmosphère, de façon à

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

subir toutes les variations de température et de pression ; l'autre chambre reçoit un courant de gaz produit naturellement en la réunissant d'une part à la cheminée, de l'autre à l'un des carneaux, les gaz aspirés étant filtrés et refroidis avant d'entrer dans l'appareil.

L'économètre Schumacher se compose d'une cage en verre renfermant une balance très sensible (fig. 42).

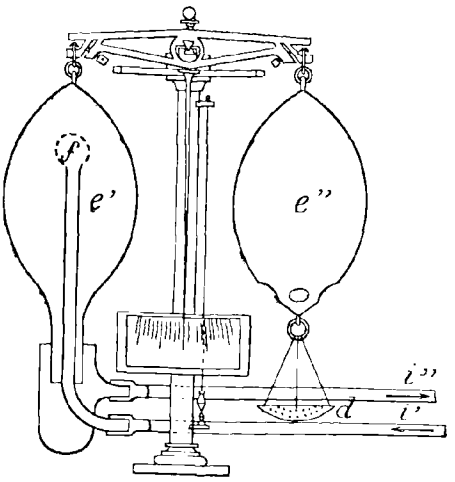

Fig. 42. — Economètre Schumacher.

De chaque côté du fléau sont suspendues des cloches e', e'', d'une contenance d'un demi-litre environ, dont l'une (e'') communique avec l'air et porte un plateau inférieur d' servant à établir l'équilibre par des poids. La cloche e' est constamment parcourue par un faible courant du gaz dont on veut déterminer la densité ; l'arrivée a lieu à la partie centrale par un tube f terminé en pomme d'arrosoir. Le tube terminant la partie inférieure de la cloche glisse librement entre les tubes concentriques d'arrivée et de sortie du gaz.

Les tubes i', i'', de 10 mm. de diamètre, communi-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

quent, le premier avec l'intérieur du carneau qui conduit les gaz à la cheminée, entre la chaudière et le registre, le second avec l'intérieur du même carneau, mais après le registre et avant le canal de la cheminée.

La *balance à gaz de Lux* est une variante de l'appareil Schumacher : le ballon parcouru par le courant gazeux est directement fixé à l'une des extrémités d'un fléau dont l'autre extrémité se déplace sur une graduation.

Dans le « *dasymètre* » *Siegert et Durr*, l'un des fléaux de la balance indicatrice porte un ballon de verre très léger, d'une contenance de deux ou trois litres et hermétiquement clos ; l'autre fléau est équilibré par un compensateur dont le poids est égal à celui du ballon. Le tout est plongé dans un courant de gaz résiduel de la combustion (fig. 43).

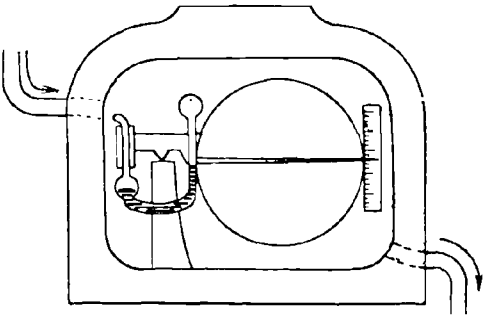

Fig. 43. — Dasymètre Siegert et Durr.

L'originalité de l'appareil est dans le compensateur formé d'un tube en U ouvert à une extrémité et terminé à l'autre par une boule remplie d'air, la partie inférieure contenant du mercure. Quand la densité du courant gazeux augmente ou diminuedu seul fait des varia-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

tions de température ou de pression atmosphérique, le mercure du tube en U agit sur un bras de levier plus ou moins long, et les dimensions du tout sont calculées de façon que ces variations soient exactement neutralisées. On règle l'appareil en faisant tourner sur son axe le tube en U, ce qui a pour effet d'augmenter ou de diminuer la longueur du bras de levier sur lequel il agit.

L'appareil Siegert et Durr est construit en cuivre doré, ce qui lui permet de résister à toute espèce de gaz, les couteaux de la balance sont pour la même raison en quartz ou onyx ; il est employé dans plusieurs usines allemandes.

91. Appareil manométrique de Krell-Schultze. — Il est aux indicateurs densimétriques à fléau oscillant ce qu'est l'appareil de Haldat à la balance hydrostatique de Masson : les branches d'un manomètre à alcool coloré sont remplies l'une d'air, l'autre de gaz ; les dénivellations sont proportionnelles aux variations de densité du gaz. On conçoit que, ne comportant ainsi aucune pièce mobile, l'appareil de Krell-Schultze ait certains avantages de rusticité. Il se compose (fig. 45) de deux tubes verticaux a et b, ayant un diamètre intérieur d'environ 30 millimètres et 1 m. 75 de hauteur. Ces tubes se réunissent à leur extrémité supérieure en x, où se greffe un tuyau à gaz g, descendant d'abord puis conduisant à l'appareil d'aspiration (petit éjecteur à air). Le tuyau g porte un petit manomètre régulateur j et le robinet d'arrêt h ; le premier sert au réglage de l'aspirateur, le second à fermer la conduite d'aspiration.

Les tubes a et b sont munis à leur extrémité inférieure, de robinets à trois voies l et k débouchant de côté dans

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

a et *b* et accouplés par une tige assurant leur manœuvre simultanée. Si l'on met en marche l'appareil d'aspi-

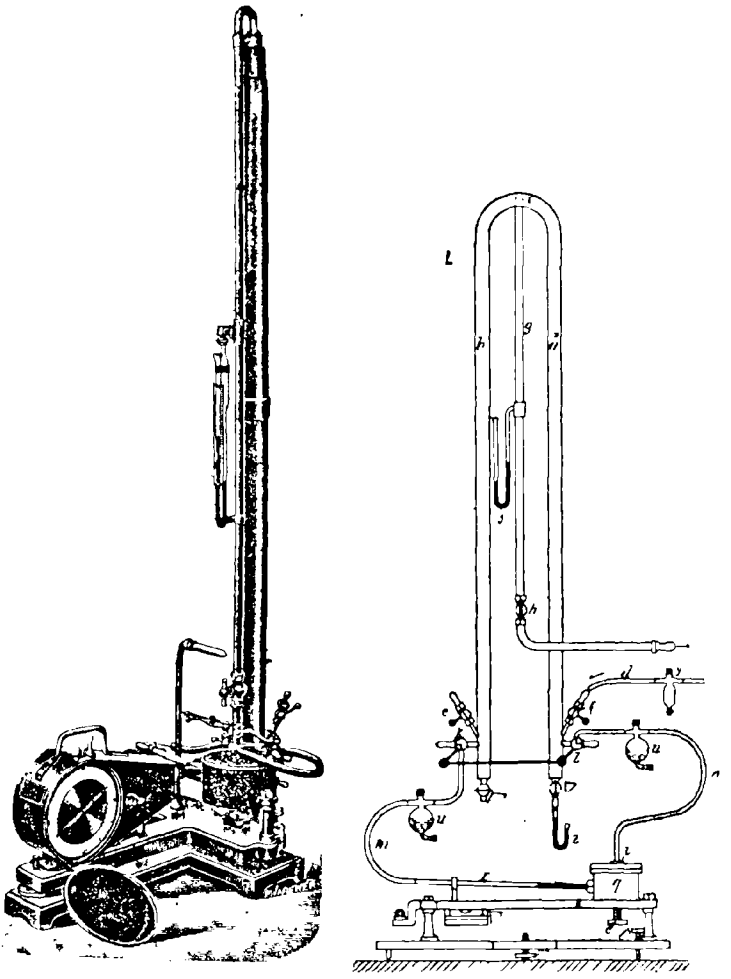

Fig. 44 et 45. — Appareil de Krell-Schultze. Vue de l'ensemble et schéma du fonctionnement.

ration relié au tube *g*, les gaz pénètrent par la conduite de gaz *d* et le robinet *f* dans le tube vertical *a*, tandis que de l'air entre par le robinet *e* dans le tube

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

vertical *b*. Les deux fluides montent et s'échappent en *x* par *g*. Les deux tubes verticaux *a* et *b* sont reliés au manomètre par d'épais tuyaux en caoutchouc *m* et *n*. Le manomètre comprend une boîte *q*, dans la paroi de laquelle se trouve fixé à un angle d'inclinaison déterminé le tuyau de lecture *r*, fait en verre épais. Deux niveaux d'eau permettent de rendre le plateau parfaitement horizontal. Si, en poussant la tige des robinets vers la droite, on met les deux colonnes gazeuses en communication avec les deux extrémités du manomètre préalablement rempli d'alcool coloré en rouge foncé, l'ascension du liquide dans le tube permet de lire immédiatement, sur l'échelle de l'instrument, la teneur en anhydride carbonique.

La firme Schultze construit également un appareil

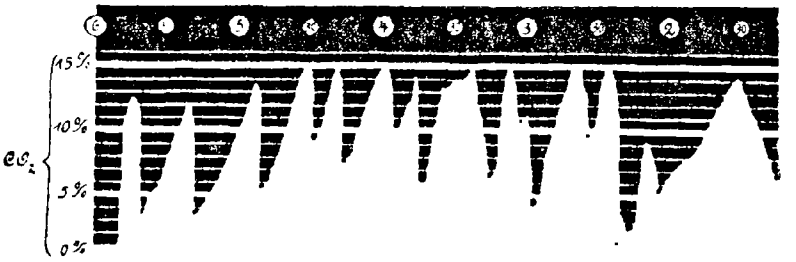

Fig. 46. — Diagramme donné par l'enregistreur Krell-Schultze.

enregistreur différant du modèle précédent par l'adjonction d'une lampe à incandescence qui projette l'image du niveau de liquide dans le manomètre, sur une feuille de papier sensible photographique disposée dans une chambre noire autour d'un cylindre mû par un mouvement d'horlogerie. On obtient par développement et fixage une courbe *continue* (fig. 46) indiquant la

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

densité des gaz, partant leur teneur approximative en anhydride carbonique.

Il convient de remarquer que la moindre différence de pression entre l'air ambiant et les gaz de la combustion influe sur les indications et les fausse ; or la constance de pression dans un milieu renouvelé sans cesse — et qui ne peut l'être que par aspiration ou refoulement — nous paraît bien problématique. Ajoutons que les variations doivent être d'ordre négligeable, l'appareil étant couramment employé en pratique industrielle.

92. Composimètre d'Uehling. — L'appareil est basé sur l'écoulement des gaz à travers les petits orifices ; nous en empruntons la description à Agis (1)

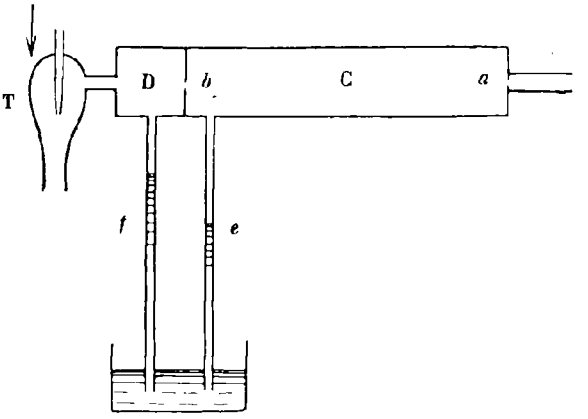

Fig. 47. — Schéma du composimètre d'Uehling.

(fig. 47) : « *a* et *b* sont respectivement les ouvertures d'entrée et de sortie d'une chambre C ; une succion constante est maintenue dans la chambre D par l'aspi-

(1) D'après le *Mois scientifique et industriel*. 1906.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

rateur T. Le gaz est aspiré au travers de l'ouverture *b* dans la chambre D en créant un appel dans la chambre C où les gaz arrivent par l'ouverture *a* ». La trompe T ayant un débit parfaitement constant, il s'établit en D et C des dépressions dont le rapport est fixe.

« Le phénomène se maintient pourvu que le gaz entrant en *a* et passant en *b* soit de densité constante, sinon il s'ensuit un vide relatif dans la chambre D. Si deux manomètres *e* et *f* communiquent respectivement avec les chambres C et D, la colonne du tube *f* indique la dépression constante en D, et la colonne du tube *e*, la dépression en C, qui est fonction exacte du pourcentage du gaz en anhydride carbonique ». Nous ne savons quels résultats le composimètre a pu donner en pratique industrielle.

II. — Enregistreurs analytiques

93. Pour si utiles que soient les enregistreurs de densité des gaz, on ne peut déduire de leurs indications la composition exacte des fluides ; la densité n'est qu'approximativement fonction de la teneur en anhydride carbonique ; la présence d'oxyde de carbone, de vapeur d'eau, la température influent aussi sur le poids spécifique.

Aussi a-t-on essayé de résoudre autrement le problème du contrôle continu de la teneur en CO^2 d'un courant de gaz, et, après de nombreux essais plus ou moins couronnés de succès, on est parvenu à créer de véritables machines à faire des analyses, qui effectuent de façon absolument automatique des dosages par absorption à intervalles réglables, aussi rapprochés qu'on le peut désirer.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Il existe plusieurs modèles, basés sur des principes différents et dont plusieurs fonctionnent parfaitement en pratique industrielle ; nous ne décrirons que les systèmes les plus répandus. Dans tous les appareils actuels, il y a une série de dosages discontinue: on mesure un volume fixe de gaz, on fait absorber CO^2, puis on mesure à nouveau, le volume trouvé étant enregistré. Tandis que Pintsch emploie comme absorbant de la chaux vive humide et pulvérisée, les autres inventeurs emploient une solution alcaline caustique. Nous décrirons ci-après la plupart des systèmes existants à l'exception de quelques modèles inusités ou basés sur le même principe que d'autres appareils. Remarquons d'ailleurs que tous les analyseurs dont nous exposons le fonctionnement sont loin d'avoir la même importance industrielle. Tandis, par exemple, que le modèle Ados fonctionne à des centaines d'exemplaires dans des usines de tous pays, l'appareil Leurson n'est pas pratiquement utilisable ; les constructeurs n'en sont qu'à la période d'essai. Mais il n'était pas moins intéressant d'exposer le principe, la valeur pratique pouvant dépendre seulement de quelques simples perfectionnements.

94. Analyseur Leurson et Lallemand (1). — Il se distingue de tous les autres en ce que l'appréciation du volume des gaz après absorption est faite par la mesure de la pression du gaz restant. L'appareil se compose (fig. 48) d'une conduite débitant l'eau goutte à goutte, et d'une seconde conduite amenant le courant du gaz

(1) *Sucrerie indigène*, 1902, p. 332.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

à analyser, d'un extracteur de gaz (A, B, C, D, S, M), d'un séparateur E, et d'un mesureur (H, G, J).

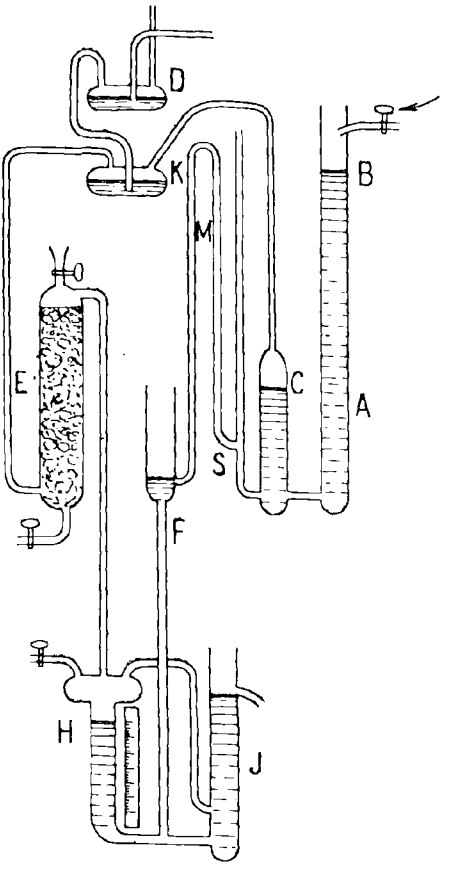

Fig. 48. — Schéma de l'appareil Leurson et Lallemand.

Le filet d'eau reçu en A détermine deux phases dans la marche de l'appareil : le refoulement, à-travers la soupape K, dans le séparateur E, du volume de gaz aspiré; l'aspiration, à-travers la soupape, d'un nouveau volume de gaz. En effet, le filet d'eau, en emplissant A, chasse le gaz en C ; mais, quand s'amorce le siphon M dont le débit est supérieur à celui en B, l'eau en C est

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

remplacée par le gaz à analyser. Le siphon est ensuite désamorcé et l'on recueille ainsi en C un volume fixe de gaz.

L'eau siphonnée en M est recueillie par l'entonnoir F dans la colonne G, elle refoule et chasse de H le gaz analysé qui y était emmagasiné depuis l'opération précédente. L'éprouvette H se trouve ainsi remise au point pour le dosage du gaz venant d'être aspiré. Dans la phase de refoulement, les gaz en C traversent le séparateur E contenant une matière inerte imprégnée de soude caustique ; ils s'y dépouillent de leur anhydride carbonique et le mélange arrive en H où le niveau du liquide indique la quantité de gaz restant. L'échelle H est corrigée en tenant compte de la pression de la colonne d'eau J, à niveau supérieur constant. La partie supérieure de H est reliée à un manomètre enregistreur de Richard à haute sensibilité.

93. Appareil Hellwachs. — L'enregistreur Hellwachs est mû par un faible courant d'eau dont le mouvement continu est transformé en mouvement alternatif par siphonnement. Nous en empruntons la description à M. Troller (1).

Les extrémités 1 et 2 du tube 3, 4 et 5 (fig. 49) sont reliées par des conduites en plomb à deux ouvertures pratiquées en deux points suffisamment distants sur la conduite d'échappement des gaz. La différence de pression entre ces deux points suffit à assurer un courant dérivé de gaz brûlés à-travers la conduite 1, 2 et 3 ; aux points 4 et 5 est branché un tube en verre E par où les gaz pourront être amenés à l'appareil analyseur ; ce tube E se recourbe en *e* et pénètre dans un autre tube

(1) *La Nature*. 1908.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

de verre vertical, terminé par une chambre graduée F, et sur lequel se branche, en *f*, le siphon G; le tube *f* plonge dans un réservoir R; il communique à sa partie supérieure, par un tube H, avec le flacon à potasse I. La prise et le refoulement automatiques du gaz dans l'analyseur sont assurés par le simple jeu du siphon BD, du vase C.

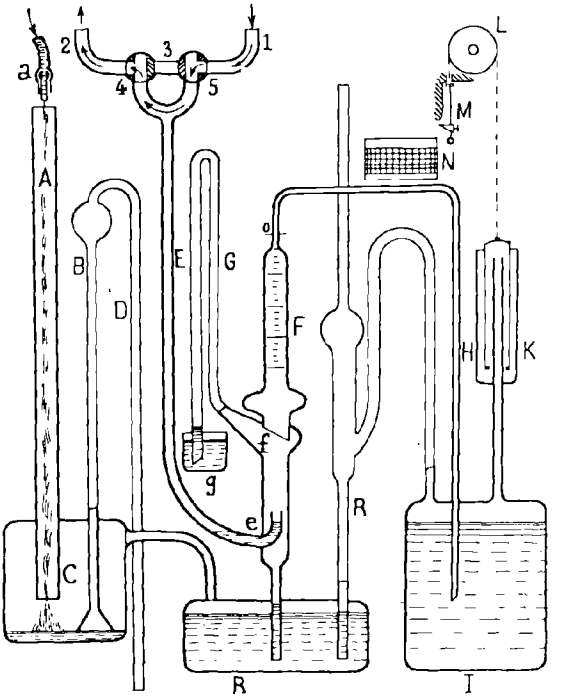

Fig. 49. — Coupe schématique de l'analyseur Hellwachs.

Supposons, en effet, les tubes E et F remplis de gaz brûlés; l'eau qui tombe goutte à goutte du robinet *a* dans le tube A, remplit peu à peu le réservoir C et en chasse l'air dans le réservoir R: l'eau de R comprimée monte dans le tube F, intercepte en *e* la communication avec la conduite de gaz, et refoule dans l'atmo-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

sphère, par le siphon G, une partie des gaz contenus dans F; puis l'eau parvient en *f*; elle intercepte alors la communication avec le siphon G et emprisonne, dans la chambre F, un volume fixe de gaz à une pression sensiblement égale à la pression atmosphérique. L'eau continue à s'écouler du robinet *a* dans le siphon; le niveau continue donc à monter à la fois dans les tubes B et F et les gaz sont refoulés dans le flacon à potasse I, où l'anhydride carbonique est absorbé ; les gaz restant s'échappent et se rendent sous la cloche-plongeur K, dont les mouvements sont transmis au stylet M et s'enregistrent sur le cylindre N.

Le sommet du tube H étant à un niveau inférieur à celui du sommet du tube B, le refoulement est complètement terminé avant que l'eau ne soit parvenue dans l'ampoule qui sépare la branche montante B de la branche descendante D. Lorsque l'eau est parvenue à ce niveau, elle redescend dans le tube D et le siphon se désamorce. Aussitôt la pression tombe dans tout l'appareil, l'eau redescend à son niveau primitif dans le tube F, en découvrant l'orifice *e* du tube E, et provoquant un appel des gaz brûlés; en même temps, le résidu gazeux de l'analyse est évacué dans l'atmosphère par la conduite R. Le siphon ABCD se remplit à nouveau et une nouvelle analyse recommence.

On règle le nombre d'analyses par heure en modifiant la vitesse d'écoulement en *a*; on pourrait ainsi faire plus de trente essais à l'heure avec une précision de 0,5 $^0/_0$ de la teneur en anhydride carbonique.

96. Appareil de Karl Joung (1). — Dans le vase A

(1) *Œsterreiche Chemiker Zeitung*, 1905, p. 174, et *Bull. de l'Association des Chimistes*, 1905, p. 324.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

(fig. 50) se meut un flotteur S muni d'un tube central R portant la tige T sur laquelle tournent deux disques P, P_1. La partie supérieure de T est reliée à la soupape V qu'elle maintient à peine ouverte. La tubulure K est reliée à la cheminée, elle porte un robinet qui permettra de régler la fréquence des dosages de CO^2.

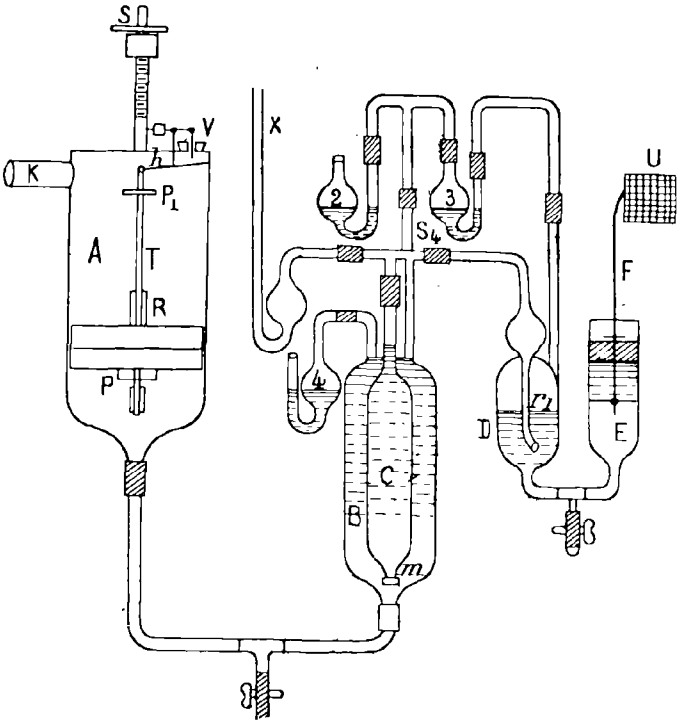

Fig. 50. — Analyseur automatique de Karl Joung.

Le vase A étant plein de glycérine et les disques P, P_1 réglés convenablement, on ouvre en 2 et charge la soupape V pour qu'elle ne soit pas soulevée par S. Le tirage de la cheminée fait monter le niveau de la glycérine en A et le fait baisser en B ; dès qu'il atteint *m*, on ferme le robinet en K et relie par des robinets *ad*

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

hoc B et C avec D. Après un instant, on ouvre K et décharge V, la glycérine baisse en A et monte en B et C, l'air de B étant chassé par la soupape 2; le gaz en C passe dans le tube D, monte en bulles à la partie supérieure de D et chasse en E une quantité correspondante de lessive ce qui produit un mouvement de l'aiguille F.

Quand la plume en U est au point 0, ce qui correspond à l'atteinte de *m* par la glycérine, on relie X à la cheminée, les gaz sont aspirés vers C jusqu'à ce que C soit plein du gaz à analyser, B renferme de l'air ; la soupape V est ouverte et la glycérine monte en B et C. L'air de B passe à l'extérieur par 2. Les 100 cc. de gaz en C passent en bulles à-travers la lessive caustique où ils se dépouillent de CO^2; le résidu se rassemble dans le haut de D et une partie correspondante de lessive est chassée vers E, où elle actionne F jusqu'à ce que la marque *m* soit atteinte en C. On atteint alors la phase suivante, V se ferme, la glycérine baisse en C et l'appareil exécute un nouveau dosage.

97. Appareil Ados. — C'est à M. Ados, d'Aix-la-Chapelle, que l'on doit le premier enregistreur réellement pratique; depuis sa création, son appareil a subi de nombreuses modifications; nous ne décrirons pas la première forme, mais seulement le récent modèle beaucoup plus employé en pratique industrielle (1).

L'enregistreur analyseur Ados (modèle F) est actionné par l'eau (fig. 51). L'injecteur Q aspire les gaz à tra-

(1) D'après M. L. Fabre : « Le dosage industriel de CO^2 dans les gaz, son analyse automatique et l'enregistrement des résultats », *Revue Générale de Chimie*, 1907 et 1908. Nous empruntons beaucoup à M. Fabre en ce qui concerne les appareils Ados et Simmance-Abbady.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

vers le tube E, le récipient mesureur C et le tube D; une partie de l'eau traversant l'injecteur Q passe dans le réservoir L et, par le petit robinet réglable et par le

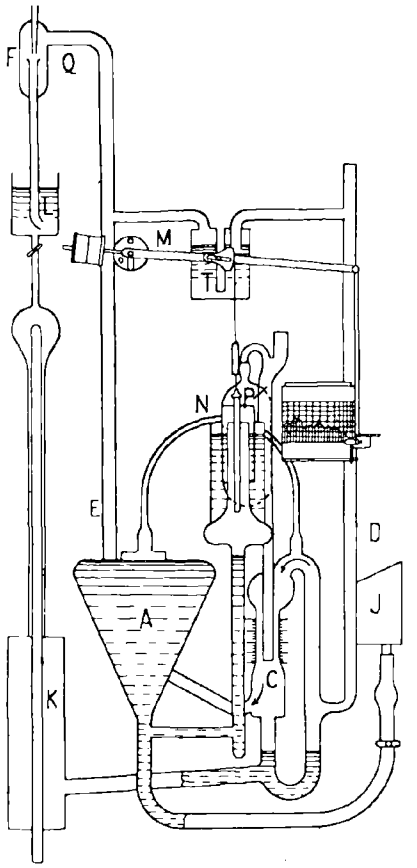

Fig. 50. — Schéma de l'appareil Ados (nouveau modèle).

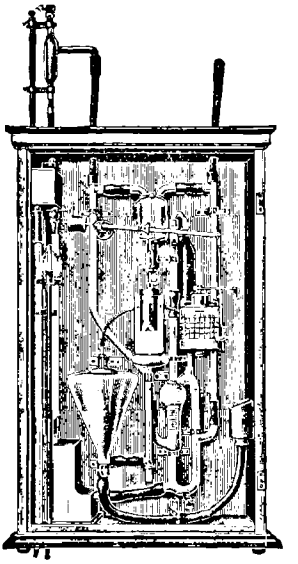

Fig. 51. — Vue extérieure de l'analyseur Ados.

tube H, dans le mécanisme hydraulique. La glycérine qui se trouve à la partie inférieure de K est repoussée et remonte dans le récipient mesureur C, bouchant la communication avec les tubes d'entrée et de sortie D et E.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Par le fait que la glycérine monte toujours dans C, les gaz y contenus sont comprimés dans le ballon P ; au moment où le zéro est atteint dans le récipient C, la communication avec P se ferme et les gaz en C, qui à ce moment ont atteint exactement un volume de 100 cc., sont forcés, poussés par la glycérine montant toujours, de passer à-travers le tuyau capillaire N et d'entrer en contact avec la potasse caustique contenue dans le vase A.

Les gaz non absorbés pressent sur la solution qui remonte dans le vase à cylindre plongeur, jusqu'à ce qu'elle bouche le tube étroit se trouvant dans le cylindre suspendu lui-même au levier enregistreur M. Si la solution caustique monte davantage, le cylindre plongeur subit un mouvement ascensionnel par suite de l'air renfermé au-dessous, et cela d'autant plus que s'élève le niveau du liquide. Or la solution alcaline s'élèvera d'autant plus qu'il y a moins d'anhydride carbonique absorbé. Le cylindre plongeur étant fixé au levier enregistreur, la plume trace, sur le papier fixé sur le tambour du mouvement d'horlogerie (faisant une rotation en 24 heures), des traits d'autant moins longs que la quantité de CO^2 est plus élevée (fig. 52).

Au moment où la glycérine est montée jusque dans le tube étroit se trouvant dans C, l'eau atteint le point le plus élevé d'un siphon qui, laissant écouler l'eau, permet à la glycérine de rentrer du récipient mesureur C dans la chambre K. Les gaz analysés pénètrent du vase A dans C et sont aspirés par l'injecteur aussitôt que les communications avec C et E deviennent libres. Lors de la fermeture du récipient mesureur C vers D

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

et E, les gaz sont aspirés continuellement par l'injecteur Q.

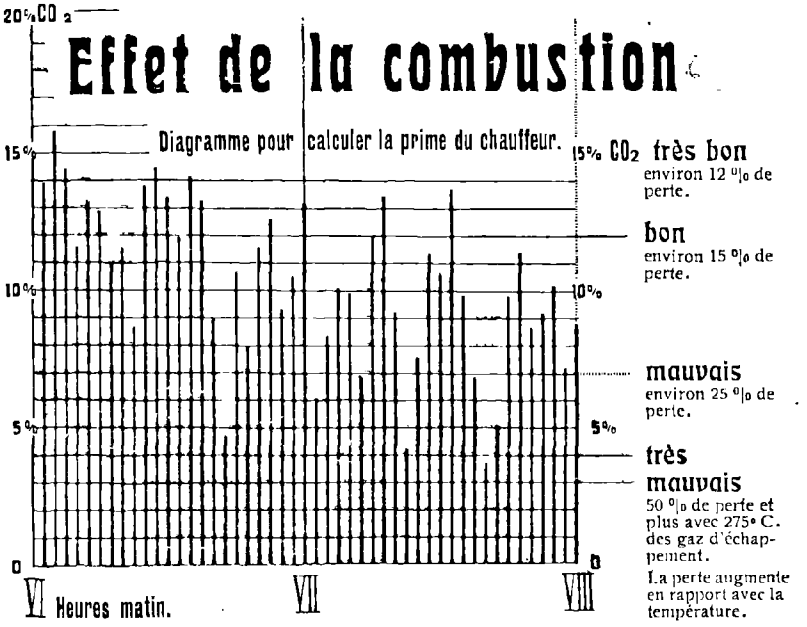

Fig. 52. — Type des indications données par l'analyseur enregistreur Ados.

Les analyseurs Ados sont certainement de beaucoup les plus répandus ; on compte en Allemagne des centaines d'installations dans des usines de toute sorte : Métallurgie (6 appareils aux établissements *Krupp*, de Essen) ; Stations centrales (36 appareils à la *Berliner Elektrizitätswerke*) ; Produits chimiques (*Badische Anilin* und *Soda Fabrik* : 16. *Deutsche Solway Werke* : 12). C'est, croyons-nous, un des seuls employés dans quelques usines françaises.

98. « Simmance and Abbady's Combustion Recorder ». — L'appareil de MM. Simmance et Abbady est

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

l'un des plus récents systèmes d'enregistreurs analyseurs. Il se distingue de tous les modèles précédents en ce que, par une très heureuse innovation, le cylindre rotatif, recevant les inscriptions relatives à la teneur en anhydride carbonique, enregistre également le tirage.

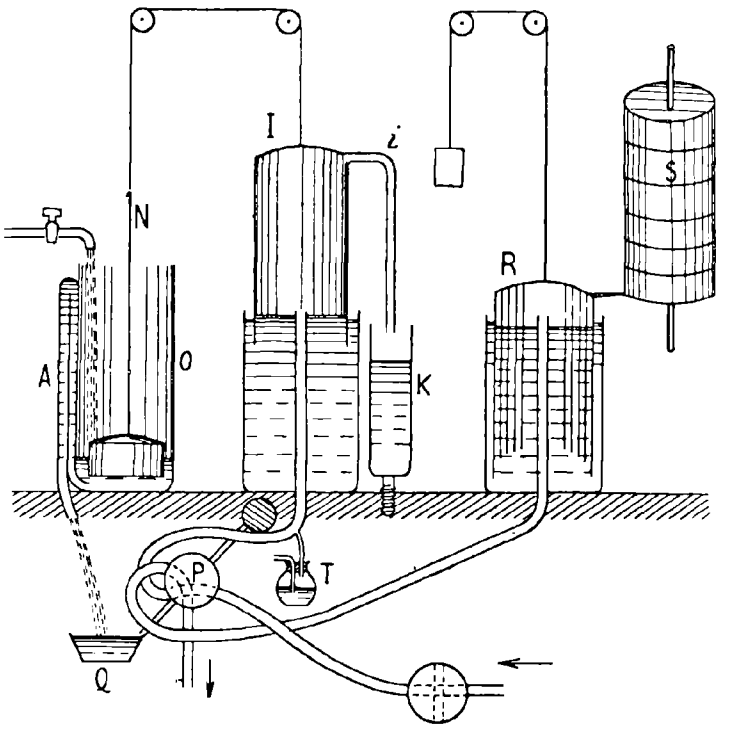

Fig. 53. — Appareil Simmance et Abbady.
Première phase : Aspiration et refoulement des gaz.

Espérons que les inventeurs, continuant à perfectionner leur appareil, lui adjoindront un thermomètre enregistreur ; ce serait d'autant plus rationnel que l'on ne peut chiffrer la perte en calories des gaz brûlés, si l'on ne connait, outre leur teneur en CO^2, leur température à la sortie des carneaux.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

L'analyseur de l'appareil se compose de trois récipients cylindriques : le réservoir O, l'extracteur I et l'analyseur R (fig. 53 et 54). Le réservoir O est destiné à être rempli d'eau jusqu'au niveau supérieur du siphon A. Dans son intérieur se trouve, relié au moyen d'un fil N à la cloche de l'extracteur, un flotteur

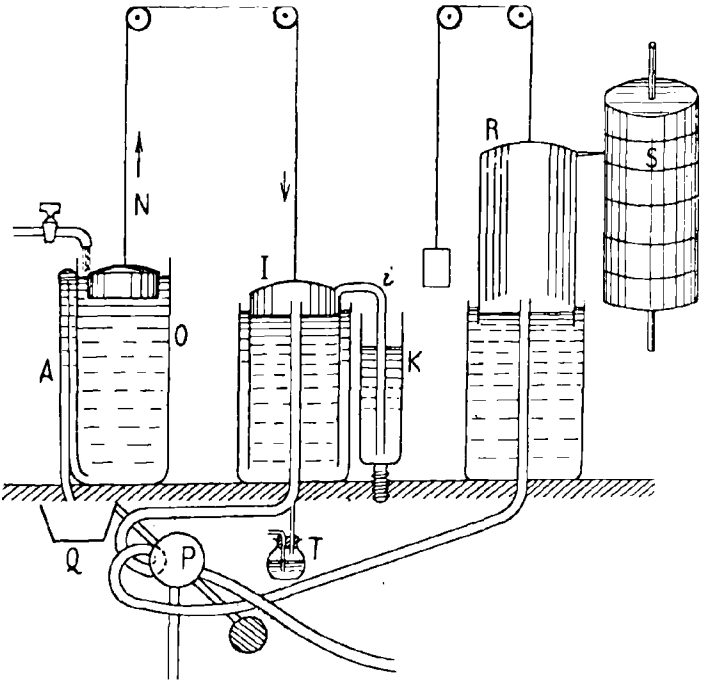

Fig. 54. — Appareil Simmance et Abbady.
Seconde phase : Passage du mesureur au séparateur.

qui, en s'élevant, permet à la cloche I de descendre. En obligeant la cloche de l'extracteur à se vider, l'eau sur laquelle surnage le flotteur arrive à la partie supérieure du réservoir où elle finit par amorcer le siphon automatique A. Ce siphon actionne un robinet à bascule P, qui, selon le cas, met en communication

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

les gaz venant des carneaux et l'extracteur, ou aspire les gaz résiduels de l'analyseur R. Naturellement, lorsque l'eau a été toute siphonnée du réservoir, le flotteur descend à l'intérieur et soulève la cloche de l'extracteur qui aspire une certaine quantité de gaz. Au fur et à mesure que cette cloche s'éleve, le petit tube *i*, soudé à sa calotte, est soulevé hors de l'éprouvette K contenant de la glycérine, et, au haut de sa course, un peu de glycérine reste dans le tube ainsi complètement obturé.

Le siphonnage étant terminé, la communication avec les gaz venant des carneaux est fermée par le robinet à bascule P, et l'extracteur I communique avec l'analyseur R (fig. 54). L'eau coule alors dans le réservoir, soulève le flotteur et laisse descendre la cloche de l'extracteur. Ainsi le contenu de la cloche est d'abord ramené à la pression atmosphérique, puis comprimé. Une partie du gaz est rejetée par le tube *i*. La cloche descendant encore, le tube est alors obturé par la glycérine, emprisonnant un volume définitif de gaz, et la descente s'arrête lorsque la résistance offerte par le liquide dépasse le poids de la cloche. En réglant la hauteur à laquelle le tube *i* pénètre dans la glycérine, on peut augmenter ou diminuer le volume de gaz prélevé avant introduction dans l'analyseur. Le réglage se fait en alimentant avec l'air qui, ne contenant

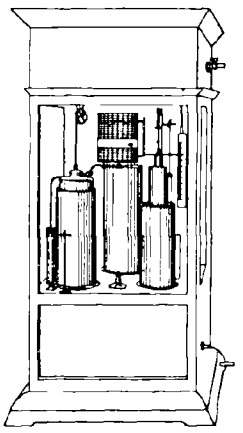

Fig. 53. — Vue extérieure de l'appareil Simmance et Abbady.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

pratiquement pas de CO^2, doit marquer 100 sur le cylindre gradué S.

Si maintenant on tourne le robinet P, ce que produit naturellement le siphonnement de A, le volume de gaz passe de l'extracteur à l'analyseur. L'anhydride carbonique est absorbé par la potasse caustique contenue dans la cuve de l'analyseur (les cloisons intérieures de la cloche à air, mouillées de solution caustique, facilitent le contact du gaz et du réactif) ; et, par le fait de cette absorption, la cloche R ne s'élèvera plus qu'à une certaine hauteur. Quand l'absorption est complète, une plume inscrit sur le diagramme la position de la cloche, c'est-à-dire, d'après la graduation de la feuille enregistreuse, la teneur en CO^2 du gaz analysé.

Le filet d'eau coulant sans interruption en AQ met en mouvement tout l'appareil et par le robinet P permet l'expulsion du contenu de la cloche R, puis la prise d'un nouvel échantillon. En T est un petit flacon contenant de la glycérine ; un tube ouvert à la partie inférieure pénètre de quelques millimètres dans le liquide, constituant un flacon de sûreté pour empêcher l'absorption de liquide au cas où l'on soulèverait sans précaution les cloches à la main.

Quant au dispositif enregistreur de tirage, il se rattache à l'un des types que nous avons décrits précédemment.

99. La pratique des analyseurs automatiques. — Dans tous les modèles d'analyseurs, on peut régler la fréquence des essais de façon à faire de un dosage à l'heure et moins à un dosage toutes les trois ou cinq minutes. On est pratiquement limité à ce maximum par la nécessité de laisser la solution de soude causti-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

que agir suffisamment sur le gaz pour en absorber tout l'anhydride carbonique. Il importe de régler chaque appareil pour obtenir des dosages le plus fréquemment possible. Le chauffeur, en effet, qui doit avoir constamment sous les yeux le résultat de chaque analyse s'aperçoit vite des circonstances provoquant une diminution de la teneur en anhydride carbonique. Dès lors, si l'appareil ne faisait qu'un prélèvement de gaz chaque quart d'heure par exemple, l'ouvrier saurait s'arranger de façon à charger et décrasser dans l'intervalle de deux analyses, ce qu'il lui est impossible de faire si les dosages sont renouvelés toutes les cinq minutes.

Mais, s'il faut se défier du chauffeur, on doit cependant le mettre à même de se rendre compte à chaque instant des chiffres enregistrés par l'analyseur. On devra le renseigner sur le temps mis par l'appareil pour le prélèvement et l'absorption de façon à ce qu'en voyant le style tracer les indications sur l'enregistreur, il ne rapporte pas le chiffre lu à la composition des gaz formés dans le même moment, mais à ceux prélevés quelques minutes auparavant.

Tous les analyseurs automatiques doivent être fréquemment contrôlés. S'ils viennent puissamment en aide au chimiste, ils ne le remplacent pas : celui-ci devra journellement vérifier les indications de chaque appareil en effectuant contradictoirement le dosage, sur une même prise de gaz, avec un des appareils usuels du laboratoire. On conçoit que, si bien construit que soit l'appareil, il est nécessairement compliqué et délicat, et qu'effectuant une centaine de dosages par jour, il puisse légèrement se dérégler.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

CHAPITRE XIII

MESURES DES TEMPÉRATURES

100. Il existe un très grand nombre de pyromètres pouvant s'appliquer aux mesures des foyers industriels ; nous décrirons quelques appareils de chaque genre en insistant sur les modèles d'usage plus pratique.

Pour la prise des températures, il importe, comme pour la prise d'échantillon, de choisir un point du carneau où il ne peut y avoir déjà eu des rentrées d'air : en deçà du registre par exemple. D'ailleurs, à moins qu'il n'y ait un thermomètre installé à demeure, c'est dans la plupart des cas le même regard qui sert à prélever les gaz et à prendre la température, ce que l'on fait au même moment, la température s'appliquant à l'interprétation des résultats de l'analyse.

M. Scheurer-Kestner a décrit un dispositif spécial pour la prise de température des gaz du carneau (fig. 56). La tige du thermomètre est introduite dans un tube-gaîne fixé à demeure, ce qui évite toute rentrée d'air par le regard, et de façon que le réservoir plonge dans un bain de paraffine. On conçoit qu'ainsi l'équilibre des températures s'effectue plus vite au contact d'un gaz ; de plus, la paraffine joue le rôle d'amortis-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

seur et l'indication lue au thermomètre est en quelque sorte une moyenne. Dans tous les cas, la partie sensible du thermomètre ou pyromètre devra être placée en plein courant de la veine gazeuse (fig. 57).

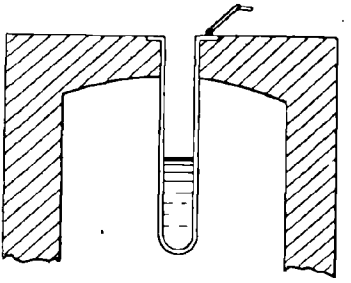

Fig. 56. — Tube pour la prise de température des gaz de la combustion.

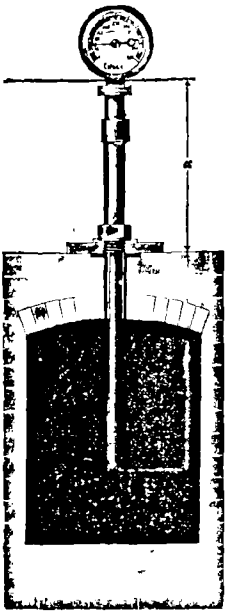

Fig. 57. — Pyromètre fixe installé dans un carneau.

101. Pyromètres pour hautes températures. — La *jauge photométrique* de Mors se compose d'un photomètre permettant de comparer la projection d'un rayon du foyer sur un écran, avec celle d'une lampe électrique dont on peut faire varier l'intensité. Non seulement chaque lecture nécessite une opération, mais les indications sont peu précises.

La *lunette pyrométrique* de Fery donne des renseignements plus exacts ; on vise le foyer dont on veut mesurer la température, ses rayons sont concentrés

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

par des lentilles sur un couple thermo-électrique constitué par deux fils fins, reliés à des bornes qui communiquent avec un galvanomètre spécial gradué non en unités électriques, mais en degrés centigrade.

Les *électropyromètres* de Siemens, de Le Châtelier se composent essentiellement aussi de couples thermo-électriques que l'on plonge au sein du foyer. Le couple de ce dernier appareil est formé de platine et d'un alliage de platine avec 10 0/0 de rhodium qui peut supporter des températures allant jusqu'à 1.600° C., maximum porté par Heræus à près de 2.100° C., par l'emploi d'un couple d'iridium pur et d'iridium allié à 10 0/0 de ruthène. Le couple est contenu dans une canne reliée par des fils souples aux bornes d'un galvanomètre. Ces appareils, très commodes et très exacts, s'appliquent plutôt aux recherches scientifiques qu'aux essais industriels usuels. On emploie plutôt dans ce dernier cas la modification pratique des constructeurs Chauvin et Arnould.

La canne pyrométrique Chauvin et Arnould se compose d'un tube de fer à parois épaisses (diamètre 14-18 mm.) à l'intérieur duquel est tendu un fil de constantan isolé à l'amiante et dont l'une des extrémités est soudée à la pointe de la canne; on constitue ainsi un couple fer-constantan dont le pouvoir thermo-électrique est le plus élevé (environ 55 millivolts pour une différence de 1.000° C. entre ses extrémités). La poignée porte les connexions des extrémités du fer et du constantan formant la partie froide du couple.

Pour l'emploi, il suffit de plonger le bout de la canne dans l'enceinte dont on veut connaître la température : les deux connexions de l'extrémité froide du tube sont reliées au galvanomètre. Ce dernier donne

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

la différence de température ; il suffit, pour obtenir la température exacte, d'ajouter au chiffre indiqué par l'aiguille du galvanomètre la température de la soudure froide lue sur le thermomètre que porte la poignée.

Dans la pratique du contrôle de la combustion, on n'a jamais à déterminer de très hautes températures ; il importe peu de connaître exactement la chaleur de la masse incandescente ou des parties recevant son rayonnement : seule la température des gaz à la sortie du générateur (et dans certains cas avant et après l'économiseur ou le surchauffeur) donne une précieuse indication ; elle doit être la plus basse possible. Dans le cas le plus fréquent de prise de température sur les gaz du carneau central à la sortie du générateur, il suffit de disposer d'appareils indiquant de 100 à 400° C. On trouve dans le commerce un grand nombre de systèmes basés sur des principes différents.

102. Thalpotasimètres. — Ces appareils se composent en principe d'un tube-réservoir relié par un tube capillaire à un tube-ressort d'acier du genre des manomètres Bourdon. Le réservoir est rempli, selon les cas, de mercure (température maximum 600° C.), d'eau (450° C.) ou d'éther (180° C.) ; la température est déterminée d'après la tension des vapeurs saturées. Le tube-ressort manométrique se redresse d'autant plus que la pression intérieure augmente et son mouvement est transmis par un secteur denté à une aiguille qui se meut le long d'un cadran gradué en degrés.

Les thalpotasimètres ont l'avantage de comporter un tube capillaire (3 mm. environ de diamètre intérieur) d'acier d'assez grande longueur (jusqu'à 50 mètres), ce qui permet de placer le cadran en un point éloigné

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

de la source de chaleur. Comme dans le modèle Schäffer et Budenberg, l'appareil peut être muni d'une aiguille indiquant le maximum et le minimum en formant un circuit actionnant des sonneries électriques.

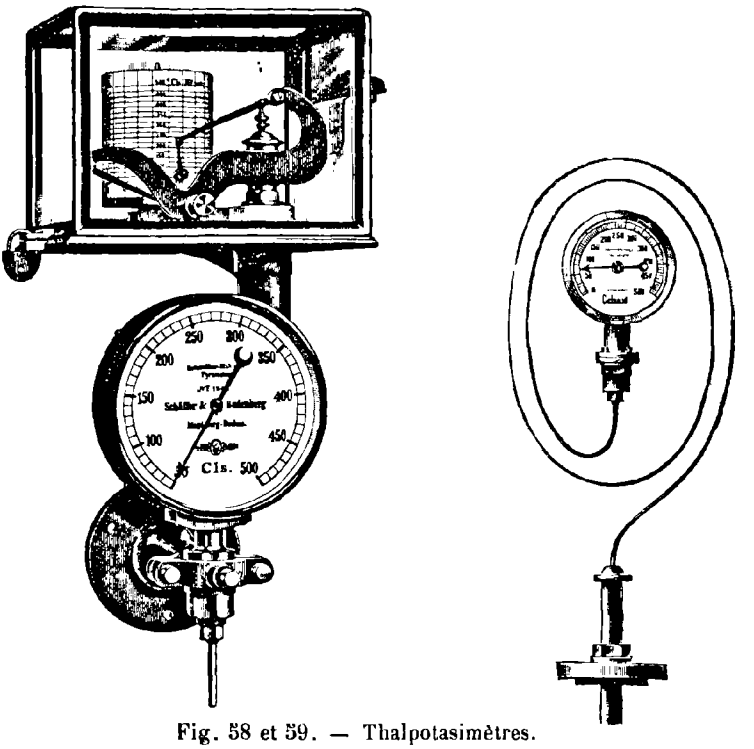

Fig. 58 et 59. — Thalpotasimètres.

Les thalpotasimètres sont d'ailleurs en général des appareils délicats, devant être contrôlés de temps à autre et plus propres à l'indication de températures moyennes qu'à celles, assez hautes quelquefois, des gaz de la combustion.

103. Pyro-thermomètres à dilatation de liquide. — Lorsqu'il s'agit de mesurer des températures supé-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

rieures à 360° C. (point d'ébullition du mercure à la pression ordinaire), les thermomètres usuels ne peu-

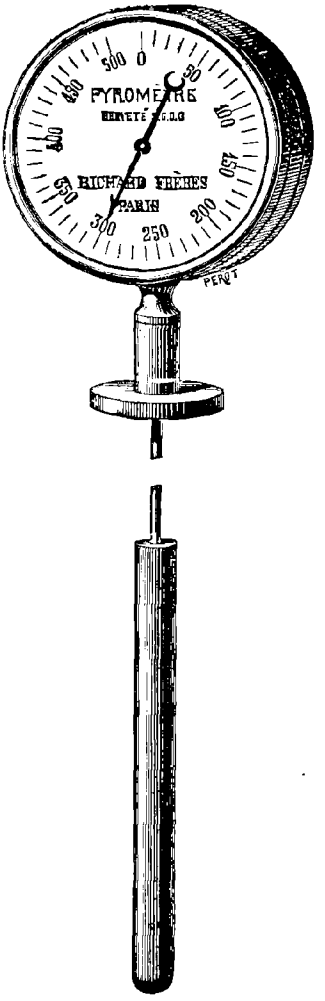

Fig. 60. — Pyromètre Richard.

Fig. 61. — Coupe du pyromètre Steinle et Hartung.

vent plus être employés. On construit dans ce cas des thermomètres en verre peu fusible, voire en quartz, qui l'est beaucoup moins encore, et on y comprime à

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

17-18 atmosphères un gaz indifférent tel que l'azote ou l'anhydride carbonique. La température maximum est calculée ainsi à 550° environ. On arrive au même résultat (600° C. maximum) en remplaçant le mercure par un alliage liquide de potassium et de sodium. Industriellement, tous ces appareils sont peu employés ; on leur reproche leur fragilité ainsi que le déplacement du zéro ; sous l'influence des changements brusques de température, le réservoir éprouve des changements de capacité.

La maison Steinle et Hartung a augmenté de beaucoup la rusticité des thermomètres à dilatation de mercure. Son modèle breveté se compose d'un réservoir d'acier communiquant avec un tube capillaire enroulé en spirale, le tout est complètement rempli de mercure et parfaitement clos (fig. 61). Par suite de l'échauffement, le ressort est détendu par la pression du mercure agissant à l'intérieur. Il met l'aiguille en mouvement par l'intermédiaire d'une longue tige métallique pouvant glisser librement dans le sens de la longueur sans influer sur la position de l'aiguille ; ainsi ni la dilatation, ni le poids dépendant de la position de l'appareil ne peuvent diminuer la précision des indications : seule agit la tension du ressort capillaire qui est transmise à l'aiguille.

Le thermomètre à cadran de Richard (fig. 60), est également basé sur le principe de la dilatation des liquides. Il est formé d'un réservoir en communication par un conduit de faible diamètre avec un tube manométrique Bourdon. Le tout est rempli d'un liquide qui, en se dilatant, fait mouvoir le tube manométrique ; le mouvement étant transmis à l'aiguille par un système très simple de leviers. Le thermo-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

mètre peut fonctionner jusqu'à 300° C.; aussi ne peut-on l'employer que dans les foyers munis de réchauffeurs ou économiseurs qui abaissent suffisamment la température des gaz.

104. Pyro-thermomètres à dilatation différentielle. — Les thermomètres à cadran *à ressort spirale*

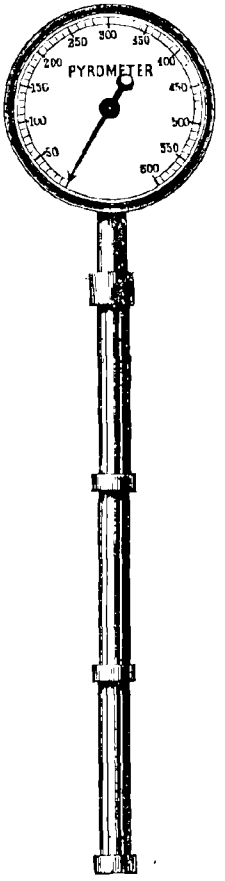

Fig. 62. — Pyromètre de Gauntelet (métal).

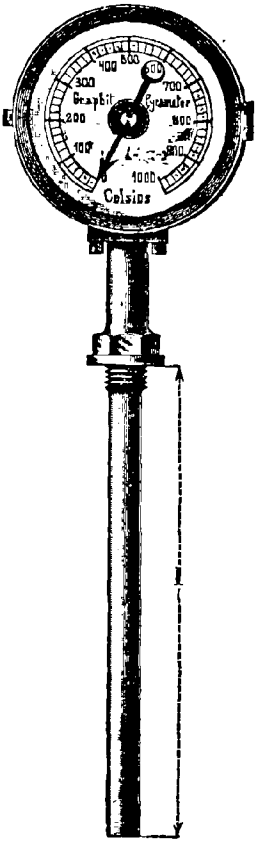

Fig. 63. — Pyromètre de Klepp (graphite).

se composent d'une lame métallique formée de deux bandes d'éléments se dilatant inégalement (cuivre et

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

acier, par exemple). Selon la température, le ressort se détend plus ou moins ; et ses indications sont transmises par des dispositifs mécaniques à l'aiguille d'un cadran.

Dans le *pyromètre de Gauntelet*, basé sur le même principe, deux tiges longitudinales de cuivre entourent une tige d'acier. Leurs trois extrémités sont, d'une part, fixées entre elles, et, d'autre part, se dilatent librement ; la différence des accroissements de longueur est transmise à une aiguille indicatrice (fig. 62).

On a enfin utilisé pour la mesure des hautes températures la propriété que possède un mélange d'argile et de graphite, de ne pas se dilater, tandis que les métaux se dilatent considérablement. Le tube de fer exposé à l'action de la chaleur renferme à son extrémité inférieure un bâton nickelé composé d'un mélange d'argile et de graphite. Comme la longueur du tube métallique varie avec la température, tandis que celle de la tige graphitique reste sensiblement constante, la distance de l'extrémité de cette tige au centre de l'aiguille croît et diminue avec la température. Les mouvements sont transmis par des tiges compensatrices qui annihilent les dilatations de toutes les parties situées au-dessus du bâton de graphite (fig. 63).

105. Enregistreurs. — En principe, tous les systèmes de thermomètres et pyromètres peuvent être munis d'un dispositif enregistreur ; on emploie surtout en France les enregistreurs de Richard. Le modèle plus particulièrement destiné aux températures assez hautes (supérieures à 400°) se compose (fig. 64) d'un réservoir métallique rempli d'azote pur et sec, communiquant par un tube filiforme flexible avec un manomètre enregistreur ;

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

la pression de l'air à volume constant doublant pour une élévation de 273° C. (Regnault), la température du milieu où est plongé le réservoir est fonction de la déviation du manomètre métallique. L'emploi d'azote permet de mesurer les hautes températures (jusqu'à 800° C); au contraire de l'oxygène, ce gaz n'est pas absorbé par le fer porté au rouge.

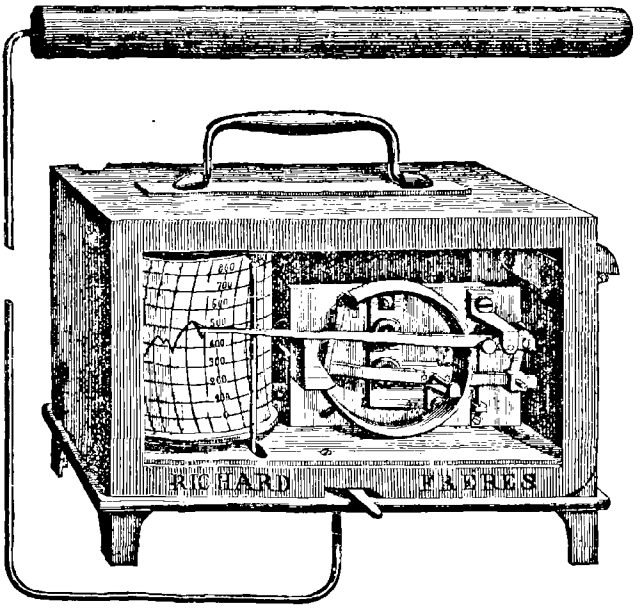

Fig. 64. — Pyromètre enregistreur de Richard.

On peut aussi employer des appareils ayant à la fois une aiguille indicatrice mobile sur un cadran gradué et une seconde aiguille munie d'un style enregistreur.

106. Etat hygrométrique. — Les gaz de la combustion contiennent toujours une certaine quantité de vapeur d'eau d'origines diverses (§ 58). La perte est d'ailleurs inévitable; encore ne doit-elle pas dépasser

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

5 à 6 0/0 de la perte totale produite par les gaz (ceux-ci ayant une composition normale). L'excès de vapeur d'eau provient d'un mouillage exagéré de la houille, ou de pertes des chaudières ; aussi est-il intéressant de pouvoir mesurer l'état hygrométrique des gaz de la combustion, soit pour des essais techniques, soit s'il y a lieu de soupçonner des fuites de vapeur. En pratique, la détermination n'a qu'une valeur secondaire.

L'hygromètre ordinaire ne pouvant s'appliquer à l'essai de gaz à hautes températures, on emploie différents modèles de psychromètres, appareils ne diffèrant des thermomètres qu'en ce qu'ils se composent de deux appareils dont l'un a son réservoir constamment mouillé. Des tables accompagnant chaque appareil permettent de trouver, d'après les températures, l'état hygrométrique de l'air et partant, puisque l'on connaît la température, la quantité de vapeur d'eau contenue dans 100 parties de gaz.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

CHAPITRE XIV

INSTALLATION DU CONTROLE

Quoique ayant soigneusement évité de donner le détail des choses ne se rattachant pas étroitement au sujet de notre étude ; quoique ayant aussi résumé le plus succinctement possible nombre de faits peu importants ou de descriptions non indispensables : par cela même que nous voulions faire une monographie complète du contrôle chimique de la combustion, nous avons dû décrire plusieurs méthodes différentes, nombre d'appareils servant au même usage ; entre lesquels le choix peut sembler difficile. Aussi est-il indispensable d'examiner la plupart des cas pouvant se présenter en pratique et quelle solution convient mieux pour chacun d'eux.

107. Contrôle de la chaufferie dans les petites et moyennes usines. — Dans tous les cas, et si modeste que soit l'installation, il ne peut y avoir de doute, le contrôle est toujours utile, il est toujours très facilement réalisable. Dans les conditions les plus modestes et en employant le strict minimum, on peut en effet se borner à déterminer la seule perte de chaleur par les gaz de la combustion, la plus importante et celle que l'on

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

peut le plus facilement réduire. Il suffit alors, pour fixer la valeur de cette perte et pour y remédier, avec un thermomètre et un indicateur de tirage, d'un aspirateur et d'un carbonimètre des modèles les plus simples, ce qui met le coût de l'installation à :

Thermomètre à mercure gradué de 100° C. à 350° (de 25 en 25° C.)	25 francs
Indicateur de tirage à tube en U	6 —
Aspirateur à flacon-bascule	8 —
Cloche graduée-carbonimètre.	5 —
Cuve à eau, tube, soude, réactifs, etc.	6 —
	50 francs

La dépense sera vite remboursée par les économies qu'elle permettra de réaliser.

Dans les petites installations, le chauffeur est tout désigné pour faire les essais ; s'il n'a qu'un foyer à entretenir, il jouit en effet de nombreux loisirs. Le chef d'atelier ou l'industriel lui apprendront très vite à faire, de façon suffisamment correcte, les simples manipulations du dosage de l'anhydride carbonique ; ils devront contrôler de temps à autre la composition des gaz pour vérifier les dires du chauffeur et constater ses progrès. Il ne peut d'ailleurs, dans ces conditions, être question d'un véritable contrôle, mais d'un moyen de donner à l'ouvrier la possibilité de se perfectionner ; on dépend de sa bonne volonté. Si bien stimulée soit-elle par des primes à l'économie de combustible, nous avons vu que le moyen ne suffisait pas toujours (§ 67).

Aussi, dans le cas d'une installation vraiment industrielle, comprenant un ou deux générateurs de puissance moyenne, est-il possible, est-il nécessaire de faire mieux. On utilisera dans ce cas des appareils moins

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

primitifs mais particulièrement rustiques, et permettant ainsi un contrôle parfait réalisable sans personnel spécial ; n'importe quel employé ou technicien se chargeant de toutes les manipulations. Par exemple, les aspirateurs de Ridder ou de Baillet conviennent très bien pour l'échantillonnage ; le carbonimètre Raffy, ou mieux encore l'appareil Orsat-Salleron permettront de faire l'analyse presque complète du gaz. Chaque foyer sera muni d'un indicateur de tirage à amplification. On prendra lors de chaque essai la température à l'aide d'un thalpotasimètre à cadran ; un second appareil enregistreur, fixé à demeure sur le carneau central, permettra de calculer la perte moyenne d'après les résultats de l'analyse de l'échantillon moyen.

Nous pouvons fixer ainsi le devis d'une semblable installation :

Thermomètre enregistreur gradué de 100 à 300° C. . .	150
Thalpotasimètre à cadran gradué de 100 à 400° C. . .	100
Aspirateur Baillet, soude, conduite et filtre.	80
Analysateur Orsat simplifié (Salleron, Lunge, etc.) . .	100
Deux manomètres différentiels Kretz-Rousset	20
	450

Au cas où l'usine ne posséderait pas de technicien au courant du contrôle de la combustion, il pourrait y avoir avantage à employer une série d'appareils tout installés, telle par exemple que le dispositif très pratique de M. Baillet (fig. 65), réunion de tous les appareils et accessoires nécessaires pour l'analyse des gaz. Il est indispensable que les manipulations soient exclusivement confiées à un employé sérieux ; s'il n'est pas nécessaire que ce soit un chimiste, on devra confier à un professionnel la mise en marche du contrôle.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Il faut, en effet, non seulement former l'analyste, mais appliquer pratiquement les résultats de l'analyse, savoir s'imposer suffisamment pour vaincre l'inertie

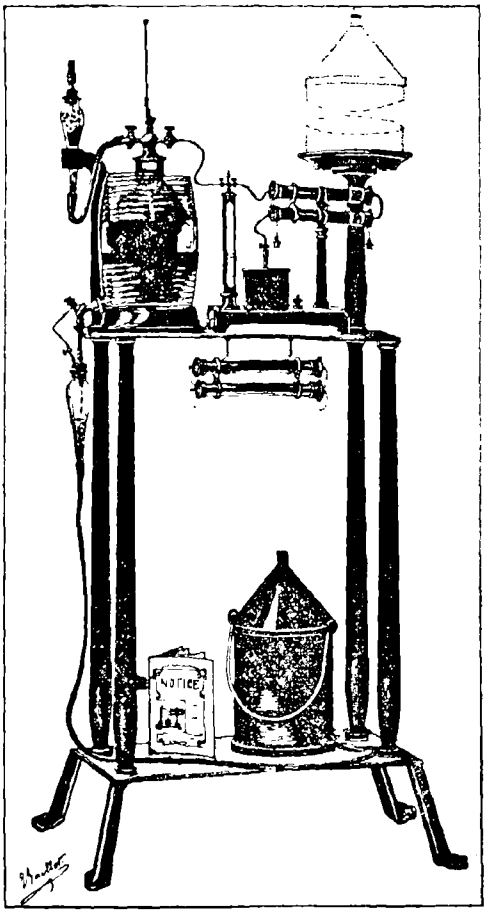

Fig. 63. — Dispositif Baillet.

ou la mauvaise volonté du chauffeur routinier. C'est ce que ne peut faire un débutant; ajoutons que, si les manipulations des appareils Orsat et Baillet ne sont pas très compliquées, elles sont néanmoins délicates;

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

la moindre erreur peut fausser les résultats; or il faut non seulement que l'employé chargé du service sache manipuler soigneusement, mais qu'il sache prendre une initiative lors d'un résultat bizarre ou d'un accident imprévu.

Dans certains cas spéciaux, comme par exemple celui d'un visiteur d'une association de propriétaires d'appareils à vapeur, on peut avoir besoin de déterminer la teneur en anhydride carbonique des gaz de la combustion, sans pouvoir disposer d'une installation fixe. Plutôt que d'employer des moyens de fortune, nous conseillons dans ce cas d'adopter un petit appareil également dû à M. Baillet : le « Nécessaire » (fig. 66) se composant de tous les accessoires indispensables réduits aux proportions minima et se rangeant pour le transport dans un étui très peu encombrant. Comme on le voit, l'analyseur est du type connu de l'auteur; seul l'aspirateur diffère : il se compose de deux litres ordinaires dont l'un est fermé par une garniture spéciale qui relie le fond du flacon au siphon et sa partie supérieure au carneau (1) (fig. 66, *a*).

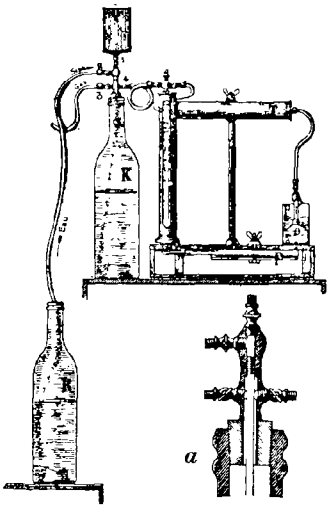

Fig. 66. — Nécessaire portatif Baillet.

(1) On remarquera toutefois que, contrairement à l'appareil décrit § 73, l'aspirateur portatif Baillet ne comporte pas de poche en caoutchouc. Des essais comparatifs ont permis à l'auteur de constater, comme nous l'avons déjà fait remarquer § 70, que l'influence dissolvante de l'eau est pratiquement nulle.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

108. Installation parfaite du contrôle de la combustion. — Il existe un grand nombre d'usines modèles où les industriels se sont efforcés de construire de luxueuses salles de machines, des chaufferies où toutes les manipulations sont automatiques (1). Et c'est un exemple d'autant plus de valeur que le luxe s'accorde dans ce cas avec le progrès, la perfection et l'économie. Il en est de même du laboratoire, quoique bien peu d'industriels se soient offerts — pour leur chaufferie — ce luxe-là. Ce serait maintenant d'autant plus facile qu'il existe, nous l'avons vu, des sortes de laboratoires automatiques, plus économiques et moins encombrants que ceux des chimistes. Le perfectionnement continu de ces appareils amènera, nous l'espérons, leur prompte vulgarisation.

L'emploi d'un indicateur continu de la teneur en anhydride carbonique des gaz de la combustion s'impose d'autant plus que c'est le seul moyen d'assurer le contrôle « permanent » de la chaufferie ; puisque les chiffres de la teneur en CO^2 sont le plus sûr critérium de la marche de la combustion. Nous avons plusieurs fois insisté sur ce point et l'importance de l'analyse :

(1) Cf. la description par Richard des chaufferies de la Station centrale de l'exposition de Chicago. « Dans cette galerie de 43 chaudières, fournissant 25.000 HP.., il n'y avait pour le service que deux chauffeurs *habillés tout en blanc*, puis un troisième placé à l'extrémité de la galerie dans une sorte d'observatoire muni de touches électriques... », *Revue Générale des Sciences*, 1894. Nous devons ajouter qu'il s'agissait de chauffage au pétrole. Quant aux salles de machines, il nous a été donné de visiter, entre autres installations particulièrement superbes, le grand hall des machines élévatoires des Farbenfabriken Bayer à Leverkusen, près de Cologne, qui est absolument merveilleux : tapis, étagères où brillent des collections de burettes dorées, panoplies de clefs..., tout donne à croire que l'on est dans une exposition et non dans une usine. Tous ces frais ne sont pas perdus, c'est une excellente réclame d'abord, et de l'installation parfaite résulte la marche parfaite, partant économique.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

tous les comptes rendus de concours de chauffeurs viennent étayer les théories de leurs témoignages. Nous reproduisons ci-contre, entre autres exemples probants, les résultats du concours de Liège ; on remarquera la concordance parfaite des chiffres de la teneur en anhydride carbonique avec le rang de chaque chauffeur et tous les résultats des mesures et des essais. Remarquons que les chiffres de l'analyse sont à la fois les plus simples, les plus facilement déterminables, ceux qui parlent le mieux à l'esprit et suivent de plus près la valeur économique de la combustion.

On a reproché aux analyseurs automatiques leur mécanisme trop complexe. Dans la récente édition de son ouvrage sur la combustion, M. Izart intitulait ainsi une note additionnelle : « L'instrument le plus pratique est le moins compliqué, l'enregistreur continu est forcément complexe ». Sans doute, mais il n'en faut pas conclure que, même dès maintenant et au degré de perfectionnement qu'ils possèdent, les analyseurs enregistreurs ne soient pas d'emploi pratique. Il s'agit, en effet, d'un appareil marchant automatiquement, c'est-à-dire sans contacts brusques et sans manipulations brutales. Enfermé dans une cage close, en contact avec un seul courant très lent d'eau d'une part, un courant de gaz filtré et desséché d'autre part, quelle que soit sa complexité, l'appareil — et l'expérience le prouve — fonctionne très longtemps sans se déranger ni se dérégler. Nous ajouterons que, dans plusieurs modèles, tous les mouvements sont produits par des phénomènes de vases communiquants, de siphons amorcés et désamorcés, sans qu'il y ait d'autre mécanisme que celui de l'enregistreur. On comprend que, dans ces conditions, rien ne s'use ni ne puisse se dérégler.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Influence de la composition des gaz dans la marche de la combustion (Smal et Timmermans).

N°s de classement des chauffeurs	Marche des feux	Composition des gaz en volume				Composition des gaz en poids (2)				Poids d'air par kgr. de houille sèche	Pertes en calories dues au tirage	Pertes en calories dues à la combustion incomplète	Pouvoir calorifique de la houille sèche	Rendement
		CO^2	O	CO (1)	Az (1)	CO^2	O	CO	Az					
1	très bonne conduite.	9,80	8,05	3,58	78,57	14,58	8,60	3,32	73,50	13,193	850	1060	7955	70.7 %
10	bonne conduite . . .	9,70	9,00	2,17	79,13	14,42	9,58	2,03	73,97	14,873	963	733	8000	68,7
20	» . . .	8,70	9,80	2,50	79,00	12,98	10,48	2,35	74,19	15,744	1013	856	7866	65,4
30	laisse à désirer . . .	7,15	11,20	2,75	78,90	10,74	12,06	2,60	74,60	17,814	1087	1188	7839	64,25
40	bonne conduite, mais les feux sont trop minces.	8,00	10,60	2,33	79,07	12,50	11,87	2,29	73,34	16,335	998	927	7936	60,4
50		6,93	11,36	2,85	78,86	10,43	12,24	2,70	74,63	17,991	1078	1114	7781	62,4
60	laisse à désirer . . .	8,56	10,13	2,18	79,13	12,79	10,83	2,05	74,33	16,425	887	796	7778	62,8
71	travaillent, côtés dégarnis	7,10	11,86	1,73	79,31	10,67	12,76	1,63	74,94	20,025	1182	527	7744	56,9
80	mauvaise conduite, irrégularités . . .	6,76	11,83	2,35	79,06	10,17	12,75	2,22	74,85	19,335	1179	995	7918	50.4
83	très mauvaise conduite des feux	4,60	14,83	0,95	79,62	6,98	16,11	0,90	76,00	32,000	1741	647	7920	49,5

(1) L'oxyde de carbone et l'azote ont été dosés indirectement ; nous croyons les chiffres ainsi obtenus, en ce qui concerne l'oxyde de carbone, sujets à caution ; dans les très nombreuses analyses par méthode directe qu'il nous a été donné de faire un peu partout, nous avons toujours trouvé des chiffres plus faibles.

(2) Calculés d'après les volumes.

Comme type d'installation bien comprise et pouvant s'appliquer pratiquement à des usines de moyenne importance, on peut citer celle de la sucrerie de Pawlowitz (1). Le personnel de la chaufferie y est contrôlé de façon continue par trois analyseurs Ados dont chacun dessert les deux générateurs d'un même chauffeur. La fréquence des dosages est de cinq minutes. Les appareils sont contrôlés chaque jour, on peut pour cela les relier à volonté par une canalisation spéciale à l'appareil Orsat du laboratoire. Après l'installation la teneur moyenne en anhydride carbonique s'éleva dans les gaz à 10-11 0/0.

L'usine importante parfaitement organisée comprendra donc un enregistreur-analyseur, accessoire indispensable de la chaufferie ; on comprendra que nous ne puissions recommander tel ou tel modèle. Le prix étant, dans tous les cas, assez élevé, il est bon avant de fixer son choix, de voir l'appareil fonctionner, et de se renseigner près des industriels l'employant depuis longtemps déjà. L'enregistreur communiquera avec la cheminée ou le carneau central (2) ; on enregistrera également la température de sortie des gaz, la température de l'eau d'alimentation, voire même le tirage moyen, quoique cette dernière moyenne importe beaucoup moins.

Il est bon de posséder, en outre, un second enregistreur, pouvant, en cas d'avarie au premier, être branché sur la même canalisation ; et servant, en marche

(1) Henninger, *Œsterreichische Ch. Ztg.*, 1905.

(2) L'idéal serait d'avoir un appareil pour chaque générateur, mais le coût de l'installation deviendrait alors très élevé ; il faut dans ce cas sinon éviter toutes rentrées d'air, ce qui est impossible, du moins les réduire au minimum (registres à papillon et non à coulisses, etc.).

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

normale, à contrôler séparément tel ou tel générateur. Dans tous les cas, il est indispensable de disposer aussi d'un appareil Orsat ou de burettes de Hempel destinés également au contrôle passager et permettant en outre de vérifier les indications de l'enregistreur et de faire l'analyse complète des gaz.

On peut établir ainsi le devis d'une installation parfaite, en négligeant les détails peu importants, tels que les accessoires que l'on peut faire à l'atelier de chaque usine, ainsi que les appareils dont on utilise les indications pour le contrôle, mais qui existent ou doivent exister partout : manomètres indiquant la pression de la vapeur, bascule pour la pesée du combustible, compteur d'eau d'alimentation....

Pour l'ensemble de la chaufferie	1 analyseur-enregistreur des gaz	1.000
	1 appareil Orsat avec eudiomètre	200
	1 enregistreur pour la température des gaz .	150
	1 thermomètre enregistrant la température de l'eau d'alimentation	150
		1.500
Pour chaque générateur	1 échantillonneur de Ridder.	175
	1 manomètre différentiel Kretz-Rousset . .	10
	1 thermomètre à cadran sur le carneau central.	125
		310

Il convient de remarquer que ce n'est là qu'une indication ; selon les cas le devis sera modifié. C'est ainsi que, si la question de prix n'est pas un obstacle, il serait très intéressant de munir chaque générateur d'un thermomètre enregistreur, pouvant être associé au cadran indicateur (appareil Klepp), ce qui permettrait, en comparant les moyennes recueillies aux carneaux et celles à la cheminée ou au conduit central, de chiffrer les rentrées d'air et de rapporter à la teneur

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

vraie le pour-cent d'anhydride carbonique trouvé à l'analyseur.

Un appareil non absolument indispensable, mais qui est très utile dans le cas d'une installation comprenant plusieurs enregistreurs, est le *planimètre*. Il

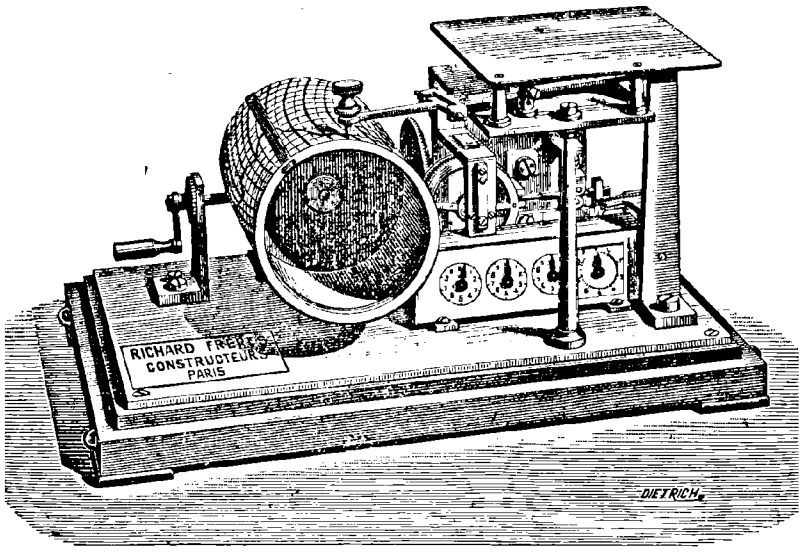

Fig. 67. — Planimètre Richard.

permet de prendre la moyenne de toutes les valeurs successives de la courbe enregistrée, et cela par une très simple manipulation : en suivant avec une pointe mousse la ligne diagramme de la feuille. Nous conseillons d'adopter, de préférence aux types classiques de Amsler ou similaires, le modèle Richard (fig. 67), spécialement destiné à prendre les moyennes des courbes de feuilles d'enregistreurs.

109. Organisation du contrôle. — Reste à organiser le service. Dans le cas d'une usine possédant un ou

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

plusieurs chimistes — et les industries où l'aide du laboratoire est indispensable sont de plus en plus nombreuses — la solution du problème est tout indiquée : la surveillance est confiée à l'un des chimistes de la fabrication. Il est en effet indispensable, pour assurer, dans les conditions que nous venons de poser, un contrôle régulier, sérieux et efficace, d'en charger un professionnel. Mais ce qui est simple pour l'industriel employant déjà des chimistes peut paraître de réalisation difficile dans le cas d'une station centrale par exemple. Si l'on admet la nécessité de l'emploi d'un ingénieur dans une installation mécanique d'une certaine importance, on admettra plus difficilement l'emploi d'un chimiste contrôlant une chaufferie. Pourtant, dans les deux cas, les raisons sont les mêmes.

Et, comme les meilleures démonstrations sont pratiquement moins efficaces que des preuves de fait, il nous suffira de nous en tenir à des chiffres. On peut estimer le minimum d'économies facilement réalisable, dans une installation non contrôlée, au dixième de la consommation de combustible. Brûle-t-il annuellement pour moins de 25.000 francs par an de charbon, l'industriel doit se borner à confier le contrôle à un employé ou technicien sérieux et parfaitement mis au courant. — On peut d'ailleurs ainsi parfaitement assurer le contrôle ; chimiste ne signifie pas plus savant que géomètre ne veut dire mathématicien, il est des analystes industriels qui sont excellents praticiens quoique dépourvus de culture scientifique. — Mais, si l'économie ainsi prévue atteint les quelque trois mille francs nécessaires pour rétribuer un chimiste faisant sérieusement et intelligemment le contrôle, l'industriel ne doit pas hésiter ; il y a bénéfice à l'employer.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Outre le contrôle de la combustion, on peut en effet s'occuper au laboratoire, de l'analyse de combustibles, de l'analyse des eaux et du contrôle de leur épuration, de l'essai des huiles de graissage et d'une infinité de choses utiles.

A ce propos nous voudrions mettre en garde le fabricant contre une tendance fâcheuse, malheureusement très généralisée. On se représente souvent le chimiste — ceux qui n'ont jamais fait de chimie — comme une sorte de divinité omnisciente et omnipotente à qui l'on peut tout demander. Le rôle du chimiste industriel est plus humble et parfois ingrat ; il ne doit rien inventer, mais être simplement un témoin enregistrant tout ce qui se passe. Souvent il ne pourra même remédier au mal qu'il signale. Si par exemple la surface de chauffe ou la surface de grille est trop faible pour la consommation de vapeur, quoi qu'il fasse, la combustion ne sera pas économique tant que l'on n'aura pas modifié l'installation.

Ainsi, l'on doit se garder de tout attendre du contrôle chimique ; on se ménagerait des désillusions. Il suffit d'estimer suffisamment son seul mérite : connaître ses défauts est le commencement de la sagesse, parce que l'on peut dès lors s'amender. Le chimiste de de la chaufferie indiquera les défectuosités de la marche, il pourra remédier à quelques-unes ; mais surtout le contrôle journalier montrera les défauts de l'installation. Et ce sont les modifications raisonnées suggérées ainsi qui permettront de réaliser définitivement une combustion méthodique et parfaite.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

CHAPITRE XV

LA PRATIQUE DU CONTROLE

110. Comptabilité technique. — Il est indispensable, pour assurer un contrôle régulier, d'inscrire sur un registre spécial tous les chiffres afférents à la marche de la combustion, tant ceux du contrôle direct que ceux résultant des analyses. Nous donnons, à titre d'exemples, des spécimens de registres employés pour la comptabilité de la combustion.

Il serait facile de multiplier les exemples, chaque industriel ayant le plus souvent un mode particulier de tenue de la comptabilité technique ; tous peuvent se valoir. Nous tenons cependant à mettre en garde contre l'adoption de tableaux trop parfaits. D'abord la plupart des chiffres contenus dans une comptabilité très complexe n'ont en pratique aucune utilité ; et ils ont l'inconvénient de nuire à la mise en relief des nombres utiles, perdus dans l'ensemble. Surtout ils nuisent en ce qu'ils exigent du technicien ou du chimiste une besogne de bureau qui l'ennuie et lui fait perdre un temps pouvant être mieux employé. Dernier inconvénient et le plus grave : il nous a été donné de constater, dans des comptabilités techniques ainsi trop bien faites, des chiffres mis *ad visum* par un chimiste

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Type employé dans plusieurs sucreries austro-hongroises (Saillard).

Date	Nombre de générateurs	Surface de grille	Surface de chauffe	Charbon consommé			Eau d'alimentation				Cendres et mâchefers % de charbon	Tirage du registre (mm. d'eau)	Gaz de la combustion			
				par jour	par m² de surface de grille et par heure	par tonne de betteraves	Température	Consommation par m² de surface de chauffe et par heure	par kgr. de charbon	par tonne de betteraves			Température au registre	Teneur en CO^2	Teneur en CO	Teneur en O

Tenue des résultats du contrôle permanent (Baillet).

Date	Contrôle direct						Contrôle de la combustion					Observations
	Houille		Eau			Rendement %	Teneur en		Tirage moyen	Température au registre	Pertes % à la cheminée	
	consommée ce jour	par m² de surface de grille	consommée ce jour	par kgr. de houille	Température		Anhydride carbonique	Oxygène				

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

qui s'était rendu compte de leur inutilité, pour qu'aux yeux des visiteurs la marche des choses parût plus parfaite. Or, quand l'habitude est prise, elle se peut quelquefois généraliser.

Voici, à titre d'exemple, un modèle de registre que nous recommandons dans le cas d'un contrôle réduit au strict minimum :

Consommation		Vaporisation par kgr. de houille	Teneur des gaz en CO^2	Température des gaz	Perte évitable	Observations
de charbon	d'eau					

Plus on fera d'observations régulières et plus naturellement le tableau deviendra complexe. Dans le cas d'un contrôle parfait, nous recommandons de noter journellement les seuls chiffres indispensables. On fait ensuite périodiquement, chaque semaine, chaque quinzaine ou chaque mois, les moyennes des résultats journaliers ainsi que les calculs des différents coefficients moyens. Dans ce cas, on emploie deux registres différents, ou mieux encore un seul comportant, toutes les 7, 15 ou 30 pages, un tableau spécial ; les feuilles pouvant être ainsi disposées :

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Inscriptions journalières.

Totaux relevés			Générateurs arrêtés	Moyennes relevées aux enregistreurs					Analyse complète des gaz			Perte suppressible dans les gaz
d'après les tickets de pesées du charb.	pesées des mâchefers et escarbilles	au compteur d'eau d'aliment.		de la temp. d'eau d'alimentation	de pression de la vapeur	du tirage	de la temp. des gaz de la combustion	de leur teneur en CO^2	CO^2	O	CO	

Inscriptions hebdomadaires ou mensuelles.

	Le combustible				L'eau d'alimentation			
	Pouvoir calorifique	Consommation journalière	Consommation par m^2 de surface de grille	Résidus 0/0 (escarbilles et mâchefers en carbone)	Température moyenne	Quantité évaporée journellement par m^2 de surface de chauffe	par kgr. de combustible	par unité de production de l'usine
Moyenne de la semaine.								
Résultats de la semaine précédente								
Moyenne de la dernière année.								
	Les gaz de la combustion				Les pertes			
	Température	Teneur en CO^2	en CO		Totales	dans le charbon non brûlé	dans les gaz de la cheminée	
Semaine								
Semaine précédente. . .								
Dernière année.								

111. Graphiques. — On a beaucoup recommandé l'établissement des résultats du contrôle sous forme de graphiques. On rend évidemment ainsi les valeurs plus tangibles et cela permet de les comparer facilement en jugeant les progrès réalisés. Encore faut-il alors se borner à établir un tableau très simple que l'on affichera au laboratoire et à la chaufferie, en le tenant constamment à jour. On y reportera, par exemple toutes les semaines, les moyennes de vaporisation et de pertes évitables par les gaz de la cheminée, les variations de hauteur des diagrammes indiquant immédiatement la marche plus ou moins économique de la combustion.

Dans un autre ordre d'idées, on a construit des graphiques, combinaisons de plusieurs abaques permettant de remplacer par un seul tableau un grand nombre de tables, donnant, d'après les chiffres du contrôle, ceux des pertes et coefficients divers. Nous reproduisons le graphique ainsi établi par M. Baillet et accompagnant ses appareils ; connaissant la teneur en CO^2, on détermine facilement (fig. 68) :

a) *le volume d'air froid employé* : partir sur l'échelle AB de la teneur en CO^2, suivre l'horizontale jusqu'à la courbe, monter verticalement, lire sur l'échelle AC ;

b) *la température des flammes* : de la teneur en CO^2, suivre l'horizontale jusqu'au triangle ; l'échelle CE représente le rendement de la combustion ;

c) *les pertes par la cheminée* : de la teneur en CO^2, suivre l'horizontale jusqu'à la courbe, monter verticalement jusqu'à la rencontre de l'oblique portant les degrés de température de la fumée, de là, suivre l'horizontale à gauche, lire sur l'échelle AD (les pertes

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

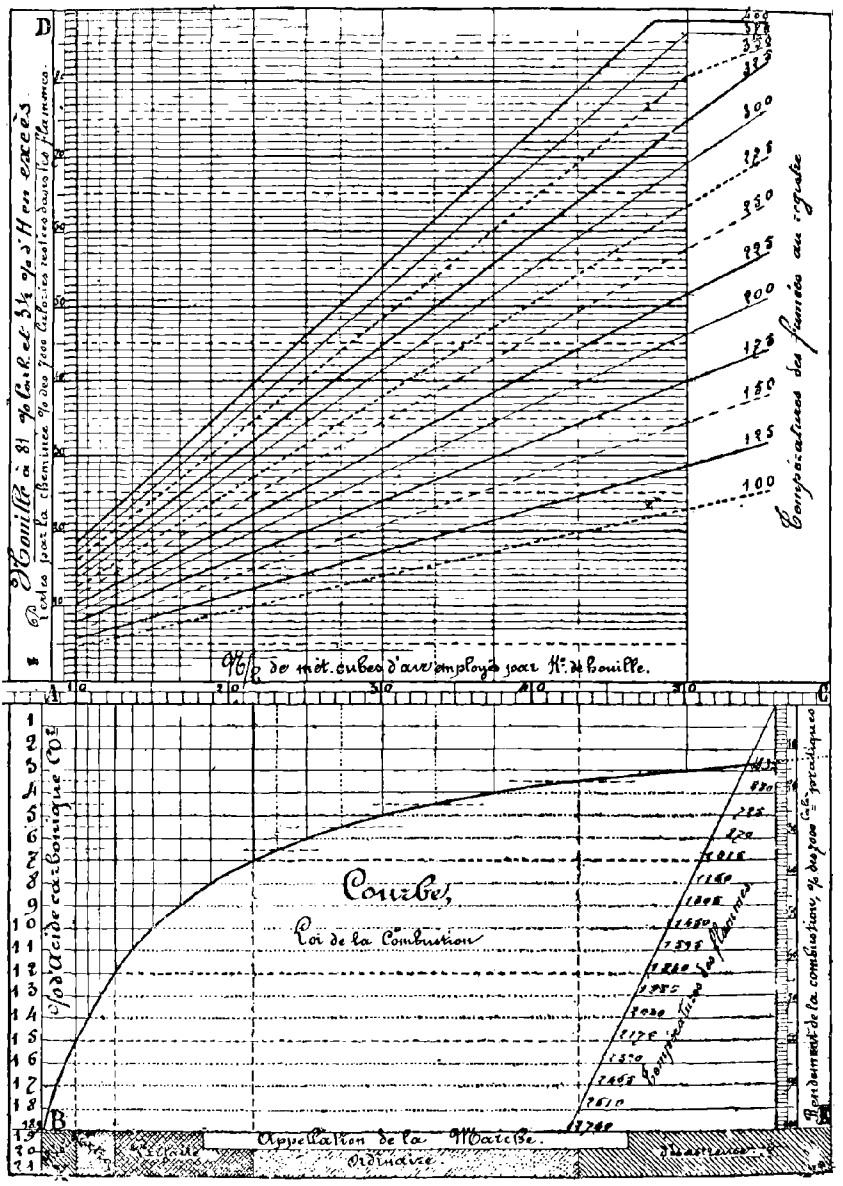

Fig. 68. — Graphique du contrôle de la combustion (Baillet).

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

dues à la radiation du foyer et de la maçonnerie, ainsi que celles pour le charbon et les gaz non brûlés, sont approximativement déduites).

Les rentrées d'air s'obtiennent par la différence en CO^2 des gaz pris derrière l'autel et au registre ; le *bénéfice des réchauffeurs d'eau* par la différence des températures à l'entrée et à la sortie de la fumée.

Nous mettant dans le cas le plus général, nous avons établi la tenue des livres du contrôle de la chauffe des générateurs. On remarquera les indications relatives à l'eau vaporisée : il est en effet indispensable de déterminer, pour le calcul de l'effet utile, la quantité de chaleur ainsi utilisée.

112. Mesure de l'eau d'alimentation. — Si pour les mesures de grande précision on alimente avec l'eau d'une bâche jaugée, en pratique l'emploi de compteurs est bien suffisant. Il existe un grand nombre de systèmes bien différents de compteurs d'eau d'alimentation ; les uns sont actionnés par la vitesse d'écoulement du fluide, les autres, plus exacts, par jaugeage du volume. Le compteur le plus employé en France est celui de Schmidt, se composant de deux cylindres à double effet dans lesquels la distribution pour un élément est commandée par le piston de l'autre. Un compteur enregistre le nombre de courses des pistons, partant le nombre des cylindrées d'eau débitée. La plupart des indicateurs fonctionnent indifféremment à l'eau froide ou chaude ; mais il importe de régler l'appareil à la température moyenne de l'eau qu'il mesure, la dilatation des liquides étant bien supérieure à celle des cylindres jaugeurs.

La *quantité d'eau vaporisée* ne correspond pas exac-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

tement à la quantité d'eau d'alimentation ; il y a toujours enlèvement de vésicules dans la vapeur. Pour mesurer la quantité de vapeur produite (ce qui en pratique peut être intéressant, sinon pour mesurer le total, du moins pour apprécier la variation du débit), on se sert de compteurs de vapeur ; d'après M. Izart, ces appareils « sont encore trop délicats, insuffisamment étudiés pour affronter avec succès la dure épreuve de la pratique ».

Aussi, dans le cas où l'on a intérêt à déterminer exactement la vaporisation, emploie-t-on la méthode indirecte consistant à retrancher de la quantité d'eau d'alimentation la quantité d'eau entraînée. On emploi pour cela soit les *calorimètres de détente* basés sur l'échauffement résultant de la détente de la vapeur humide, d'autant plus faible qu'il y a plus d'eau vésiculaire dans la vapeur ; soit les *calorimètres séparateurs*, moins exacts, mais pouvant s'appliquer à des vapeurs contenant plus de 2,5 0/0 d'eau liquide (ces derniers assurent la séparation mécanique des particules liquides entraînées).

Il importe, dans les essais précis, de mesurer la *température de l'eau*, tant pour faire la correction indispensable pour ramener à la température normale les indications du compteur d'eau, que pour faire entrer en ligne de compte les calories ainsi fournies à l'eau de la chaudière.

113. Coefficient de vaporisation. — Connaissant le volume et la température de l'eau d'alimentation, la quantité de combustible utilisé, on peut, en négligeant l'eau entraînée dans la vapeur à l'état liquide, calculer

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

facilement la quantité de vapeur produite par kgr. de charbon brûlé.

Pour plus de commodité dans la comparaison des résultats, on ramène le coefficient à une température d'eau égale à 0° et une température de vapeur de 100° C. Si par exemple 1 kgr. de charbon donne 9 kgr. 5 de vapeur à 150° avec de l'eau à 90°, on a, d'après la formule de Regnault (Saillard) :

Chaleur totale de vaporisation : $606{,}5 + 0{,}305 \times 150 =$	652
Calories apportées par kgr. d'eau d'alimentation . . .	90
Calories cédées par kgr. de vapeur de chauffe	562
Chaleur totale de vaporisation de la vapeur à 100 . . .	637
Coefficient de vaporisation . . . . . $\frac{9{,}5 \times 562}{637} = 8$ kgr. 4.	

« Le coefficient de vaporisation peut varier de 5 à 10 kgr., selon la qualité des charbons employés ; il se tient le plus souvent entre 7 et 8,5 kgr. pour les charbons ayant un pouvoir calorifique de 8.000 calories par kgr. » (Saillard).

Connaissant le coefficient de vaporisation et le pouvoir calorifique de la houille, il est facile de déterminer le *rendement* ; en effet, en rapportant toujours les résultats à 0 et le pouvoir calorifique de la houille étant par exemple 8.150 calories, la vaporisation théorique totale est de $8.150 : 637 = 12$ kgr. 79, et, si le rendement théorique est 100, on a :

$$\frac{\text{rendement}}{100} = \frac{8{,}4}{12{,}79} \text{ et rendement pour } 100 = 66.$$

La *puissance de vaporisation* est la quantité d'eau évaporée par mètre carré de surface de chauffe et par heure ; elle se détermine en divisant simplement l'évaporation à l'heure par la surface de chauffe. En prati-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

que, on confond le plus souvent l'eau évaporée avec l'eau d'alimentation, mesurée au compteur. Ces coefficients ont une grande valeur pratique; ils sont très variables selon la construction des chaudières, la position du foyer relativement aux tôles des bouilleurs. Leur comparaison permet ainsi de juger la perfection de l'installation.

Nous ne conseillons pas de déterminer le *pouvoir évaporatoire* des combustibles ; théoriquement, il devrait dépendre du pouvoir calorifique et de la chaleur totale de vaporisation du liquide bouillant ; en réalité il y a d'importantes pertes variant selon le coefficient de transmissibilité des métaux, le temps de contact, etc., si bien que toutes les formules proposées ne donnent jamais qu'un chiffre tout empirique. Voici, cependant, à titre de renseignement, le calcul en usage dans la marine française (1) : on prend les deux tiers du pouvoir évaporatoire théorique, déterminé lui-même en divisant le pouvoir calorifique par 637, chaleur totale de vaporisation de l'eau.

Quant aux chiffres normaux que doivent atteindre les différents coefficients, ils varient selon les diverses conditions. Le contrôle permettra de constater leurs variations et de déterminer la valeur qu'il est possible d'atteindre dans chaque installation. Pour obtenir des chiffres de valeur absolue, il est d'ailleurs souvent nécessaire de faire des essais spéciaux possibles seulement lors d'un concours ou d'une réception d'appareils, mais non dans la pratique industrielle du contrôle de la combustion. On trouvera tous renseignements à ce sujet dans les « Normes » élaborées dans les Congrès

(1) E. Bazin, *Revue Générale de Chimie*, 1904.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

des Ingénieurs d'associations de propriétaires d'appareils à vapeur (1).

114. Calcul des pertes suppressibles. — Dans le cas d'un générateur de vapeur, il est facile, connaissant le pouvoir calorifique de la houille et la quantité de vapeur produite, de déterminer la perte totale. Il est beaucoup plus intéressant de connaître le détail de ces pertes ; dans tous les cas, il est facile, d'après la température et la composition des gaz, de déterminer la quantité de calories ainsi perdues dans l'atmosphère. En pratique, il importe peu de faire des corrections complexes d'après l'analyse des combustibles, la chaleur latente de l'oxyde de carbone, de l'hydrogène, etc. Il ne faut pas s'illusionner sur la valeur des indications déduites par calcul et sur le nombre de décimales. En chimie industrielle l'extrême précision apparente est un leurre : ou elle est supérieure à l'approximation des méthodes analytiques, ou elle dépasse les variations de l'échantillon pris à une minute ou à l'autre. De plus, elle ne sert à rien : on ne modifie pas le travail, on ne réprimande pas un ouvrier selon que la perte varie de quelques décimales.

La houille étant du carbone impur, on peut admettre en moyenne que, pour brûler 1 kgr., il faut, au lieu de 11,594 d'air, 10 kgr. 500, correspondant à 11 kgr. 500 de gaz brûlés. La température de ces gaz étant T, la perte de calories par kgr. de charbon sera :

$$11{,}5 \times T \times 0{,}23,$$

0,23 étant la chaleur spécifique. Si l'on admet 20,5

(1) Boysen et Maach, *Normen des Internationalen Verbandes der Dampfkessel-Ueberwachungs-Vereine.*

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

comme richesse théorique en CO^2 0/0 de gaz et un pouvoir calorifique de 8000 calories, la formule donnant la perte 0/0 sera (C étant la teneur réelle en CO^2 0/0 de gaz) :

$$\frac{11{,}5 \times T \times 0{,}23 \times \left(\frac{20{,}5}{C}\right) \times 100}{8000} \quad \text{soit} \quad \frac{0{,}68\,T}{C}.$$

Pour chiffrer la perte suppressible du seul fait de la bonne marche de la combustion, il convient de tenir compte qu'en pratique la teneur maximum des gaz en CO^2 est de 14 0/0 et qu'il est impossible de refroidir les gaz au delà d'une certaine limite ; Baillet estime à 60-80° la différence minimum entre la température de l'eau dans la chaudière et celle des gaz sortant du carneau central. D'après la table de Regnault on aurait ainsi, dans une installation ne comportant pas d'économiseur, et selon les pressions de la vapeur :

Tension de la vapeur	4 atm.	6 atm.	8 atm.
Température de l'eau	144° C	159°	171°
Température normale des gaz . .	210-230	225-245	235-255

En désignant par t la température d'ébullition de l'eau dans la chaudière augmentée de 60-80° selon le type de chaudière utilisant plus ou moins la chaleur du foyer, on peut chiffrer ainsi les pertes inévitables :

$$\frac{0{,}68\,t}{14},$$

qui, retranchées des pertes totales dans le gaz, donneront la perte suppressible.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

$$\text{Economie réalisable} : \frac{0{,}68\ T}{C} - \frac{0{,}68\ t}{14},$$

valeur qui, étant pour un cas déterminé uniquement fonction de T et de C, peut être calculée à l'avance pour tous les cas par la confection d'une table à double entrée.

Nous reproduisons la table de Dupont qui donne, pour les diverses valeurs de T et de C, les économies théoriquement réalisables correspondantes (1).

Pertes en charbon 0/0 résultant d'une mauvaise combustion

Température des gaz	Leur teneur en CO^2 %										
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
200° C . . .	27	22	19	17	15	13	12	11	10	10	9
250	34	28	24	21	18	17	15	14	13	12	11
300	40	34	29	25	22	20	18	17	16	14	13
350	47	39	34	27	26	24	21	20	18	17	16
400	54	45	35	34	30	27	25	23	21	19	18

Il est facile, à l'aide de ce tableau, de calculer le gain de calories produit par l'installation d'un économiseur ; il suffit de faire la différence des pertes correspondant aux températures de gaz avant et après le passage dans l'économiseur.

115. Le détail des pertes. — Il est facile, connaissant le rôle joué par les différents éléments et les résul-

(1) Nous avons choisi à dessein une des tables les plus simples, mais il en est de plus complètes ; nous citerons entre autres celle de Beckert (*Eisenhüttenkunde*), donnant les températures de 10 en 10° C. On peut également consulter le graphique de Baillet (§ 111).

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

tats numériques donnés pour chaque cas au cours de notre étude, de déterminer la perte attribuable à l'action des divers facteurs influant sur la combustion. Nous donnons ci-après, à titre d'exemple et d'après M. Baillet, le détail des pertes dues à la vapeur d'eau contenue dans les gaz de la combustion, selon qu'elle provient : 1° de l'humidité hygroscopique du combustible ; 2° du mouillage du charbon ; 3° de l'humidité de l'air comburant ; 4° des fuites de la chaudière ; 5° de la combustion de l'hydrogène des houilles.

1° *L'humidité hygroscopique*, outre qu'elle diminue de son importance le poids net de combustible, prend de la chaleur au foyer. Elle en cède bien une partie dans les carneaux, mais elle en conserve lors de son passage au registre (1). Si la houille a été jetée au feu à 20°, un kg. de vapeur d'eau aura conservé :

637-20 calories pour atteindre la vaporisation saturée. . .	=	617 calories
et, pour se surchauffer de 150°, $1 \times 150 \times 0{,}48$ . . .	=	72 »
Total pour 1 kg. d'humidité		689 calories

Si l'humidité de la houille n'est que 3 0/0, la perte réelle sera :

$$\frac{689 \times 3}{100} = 20 \text{ calories } 6 \text{ pour } 1 \text{ kg. de houille.}$$

2° *L'humidité de mouillage* produit autant de perte par kg. d'eau ; et, si le mouillage moyen est de 10 0/0, la perte sera :

$$\frac{689 \times 10}{100} = 69 \text{ calories par kg. de houille.}$$

3° *Humidité de l'air comburant* : Si nous brûlons le

(1) La vapeur est dans un état de surchauffe, puisqu'elle est soumise à la pression atmosphérique et que sa température est bien au-dessus de 100°, quand elle passe au registre (environ 250°, c'est-à-dire 150° de surchauffe).

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

kg. de houille avec 20 mètres cubes d'air sec à 22° C. (7 à 8 0/0 CO^2) et si cet air n'a été que saturé par l'eau qui s'évapore du cendrier, il en contient 16 grammes par kg. d'air ; or il y a $20 \times 1,3 = 26$ kg. d'air, et $26 \times 16 = 416$ grammes d'humidité. Or il faut, pour un kg. de vapeur à surchauffer de 22° à 250°, soit de 228° :

$$1 \times 228 \times 0,48 = 109 \text{ calories } 4$$

Comme l'air contient 416 gr. de vapeur par kg. de charbon brûlé, la perte sera de $109,4 \times 0,416 = 45$ cal. par kg. de houille.

4° Si la vapeur *provient de fuites* de la chaudière, soit à 6 kilos de pression et 165° de température, elle se surchauffe de $250 - 165 = 85°$ et prend :

$1 \times 85 \times 0,48 = 40$ calories par kg. de vapeur de fuite.

5° *Combustion de l'hydrogène.* — Si la houille contient 4 1/2 0/0 d'hydrogène en poids, il faut, pour brûler 45 grammes de cet élément, $45 \times 8 = 360$ grammes d'oxygène, formant ensemble $360 + 45 = 405$ grammes d'eau placée dans les conditions de celle en 1°. On aura donc :

$$689 \times 0,405 = 279 \text{ calories par kg. de houille.}$$

Si l'on veut ajouter l'apport de l'humidité de l'air (3°) qui a brûlé l'hydrogène, on a :

$$\frac{360 \times 5}{1,30} = 1.384 \text{ litres d'air ;}$$

et, faisant le rapport avec les 20 m. c. du 3° :

$$\frac{1,38}{20} = \frac{X}{45}$$

$$X = 3 \text{ cal.}$$

d'où total $279 + 3 = 282$ calories par kg. de houille.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Récapitulant : par kg. de houille brûlée, on aura :

	Poids d'eau	Perte en calories
1° Pour l'humidité hygroscopique	30 gr.	20,6
2° Pour l'humidité de mouillage.	100 »	69,0
3° Pour l'humidité de l'air	240 »	45,0
4° Pour les fuites, s'il y en a		
5° Pour la combustion de l'hydrogène . . .	405 »	282,0
Totaux. . .	775 »	416,6

soit 5 1/2 à 6 0/0 des 7.000 calories emportées par les flammes.

116. Conclusions pratiques des résultats du contrôle. — Les différents facteurs agissant sur la marche de la combustion étant ainsi rigoureusement déterminés, et tout se passant aussi rationnellement dans le foyer de la chaudière que dans la nacelle de l'obus calorimétrique, il devient possible d'attribuer chaque variation de marche aux causes qui l'ont produite.

C'est ainsi que les différentes indications obtenues dans le contrôle le plus simple (intensité du tirage, température des gaz et leur teneur en anhydride carbonique) permettent de se rendre parfaitement compte de la marche de la combustion. Pratiquement, tous les cas se ramènent aux quelques règles suivantes, que nous énumérerons simplement ; on trouvera la raison et le développement de chacune au cours des différents chapitres de cet ouvrage.

a) Une température de gaz *inférieure* à la normale accuse un *défaut de construction* : surface de grille trop petite ou rentrées d'air par les fissures du massif de maçonnerie. Les briques mêmes étant très poreuses, on doit, quand le massif est surélevé, le recouvrir d'un enduit imperméable.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

b) Au contraire, une température continuellement *trop élevée* indique une *surface de chauffe insuffisante*. (Il convient d'étudier une installation de surchauffeur de vapeur, de surchauffeur d'eau d'alimentation ou, si besoin est, de séchoir type Huillard).

c) *Un fort tirage et une basse température* constatés simultanément indiquent l'*encrassement* de la grille, qu'il suffit de débarrasser de son mâchefer.

d) Un *tirage très élevé*, que l'on ne peut réduire sans provoquer un abaissement de la pression dans la chaudière, indique la *mauvaise qualité du charbon*, trop maigre ou trop mouillé, sa répartition en charges trop fortes, ou enfin des rentrées d'air dans les carneaux.

e) Un *tirage très faible* dans le carneau et cependant normal à la cheminée résulte de l'*obstruction des carneaux* par dépôt de suie ou effondrement de cloisons maçonnées ; visite et nettoyage s'imposent d'urgence.

f) La *baisse du manomètre* coexistant avec une température et un tirage trop élevés est causée par des dépôts de tartre dans la chaudière. Il faut nettoyer et, si le fait se renouvelle fréquemment, épurer l'eau d'alimentation.

g) Si, toutes choses égales (qualité du charbon, pression, ouverture du registre, etc.), la *température* des gaz et le *tirage* varient sans cesse, les irrégularités sont causées par les conditions atmosphériques (pluie, tempête, etc.).

On ne peut d'ailleurs résumer ainsi tous les cas qui peuvent se présenter en pratique ; un peu d'habitude permettra d'analyser le mécanisme de toutes les fluctuations de marche révélées par les appareils du contrôle, de distinguer la raison de toutes les apparentes anomalies.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Causes des pertes			Leur contrôle	Moyens d'y remédier
Le combustible		Humidité du charbon.	Analyse chimique.	Parc à charbon couvert.
		Cendres »		Choix d'une bonne qualité.
		Escarbilles et mâchefer.	Pesée, analyse.	*a*) Choix d'une bonne grille ; *b*) récupération des escarbilles.
		Suie.	Coloration de la fumée.	*a*) Emploi de charbon maigre ; *b*) température élevée au foyer.
		Allumage.	Pesée du charbon consommé pendant la mise en pression.	Marche à feu couvert.
		Conduite du feu.	Pesée du charbon et mesure de l'eau d'alimentation.	*a*) Primes au chauffeur ; *b*) foyers à chargement mécanique.
Le comburant		Humidité de l'air.	Hygromètre.	?
		Excès ou manque d'air.	Indicateurs de tirage.	*a*) Régler le registre d'après l'indicateur ; *b*) tirage forcé.
		Refroidissement du foyer.	Pyromètres.	*a*) Fermeture automatique du registre pendant l'ouverture des portes ; *b*) foyers mécaniques ; *c*) chauffage de l'air par les chaleurs perdues.
Pertes thermiques	Chaleur latente	Oxydation incomplète du carbone et des carbures.	Analyse des gaz.	*a*) Foyers mécaniques ; *b*) garnitures réfractaires du foyer.
		Fumée noire.	Coloration de la fumée.	*a*) Emploi de charbon maigre ; *b*) température élevée du foyer.
	Chaleur dégagée	Radiation du massif . . .	Temp. ambiante de la chaufferie.	Massif isolant ou garnitures calorifuges.
		Chaleur emportée par les cendres et mâchefers.		
		Humidité des gaz de la combustion.	Analyse des gaz.	Employer des charbons secs et maigres.
		Chaleur emportée par les gaz.	Thermomètre enregistreur.	*a*) Grande surface de chauffe ; *b*) économiseurs, surchauffeurs, séchoirs.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Nous donnons ci-contre, d'après M. Izard, un schéma simple et clair de toutes les causes de pertes de calories avec, ce qui est indispensable, le moyen de constater chacune de ces pertes et, ce qui est mieux encore, le moyen d'y remédier. Pour élémentaire que soit forcément un tel tableau, il résume très heureusement l'essence, les moyens et la nécessité du contrôle de la combustion.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

CHAPITRE XVI

APPLICATIONS DIVERSES DU CONTROLE DE LA COMBUSTION

117. Les différentes combustions industrielles. — Nous avons jusqu'ici presque toujours envisagé uniquement le cas de la combustion dans les foyers de générateurs à vapeur. C'est de beaucoup le plus intéressant, par suite tant de l'importance de ses applications que de la facilité d'établissement du contrôle et des résultats économiques à obtenir.

Mais le contrôle chimique peut et doit s'étendre à toutes les sortes de combustions industrielles. Le principe est d'ailleurs le même pour toutes les applications, et les méthodes de dosage conviennent dans tous les cas. Seule, l'interprétation des résultats diffère ; leur étude relève plutôt des technologies spéciales aux différentes industries que de l'étude générale de la combustion. Quant aux quelques détails pouvant aussi différer, c'est à chacun de les régler selon l'installation, les moyens dont on dispose et le but proposé.

Aussi nous suffira-t-il d'examiner succinctement les divers cas en indiquant les quelques particularités propres à chacun d'eux. Nous voulons moins guider dans la pratique des différentes industries que mettre en

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

lumière l'importance, la nécessité du contrôle chimique dans tous les cas où il y a combustion.

118. Foyers métallurgiques. — Si le foyer d'un four à puddler, par exemple, ne diffère que par des détails des foyers ordinaires et peut être contrôlé de la même façon ; il n'en est pas de même pour les fours métallurgiques où le combustible est en contact avec les matières en traitement et où ce traitement utilise les réactions chimiques de la combustion : c'est le cas pour les hauts fourneaux, les convertisseurs, etc.

Le contrôle chimique des *hauts fourneaux* est indispensable à la bonne marche de l'installation ; comme dans un foyer ordinaire, il consiste à établir le bilan de l'ensemble des réactions thermo-chimiques ; on connaît la quantité de houille, de minerai et de castine d'une part, la quantité d'air injecté d'autre part, ainsi que les compositions et les températures ; l'analyse et la mesure des gaz dégagés, de la fonte et du laitier permettent de retrouver autant de matière et autant de calories apparentes ou latentes qu'il en était entré.

Le contrôle ne doit pas se borner à l'appréciation des résultats globaux : il est en effet possible, en analysant les gaz recueillis aux différentes hauteurs du four et en prenant la température du milieu, de se rendre compte des réactions qui se passent dans les différentes régions du haut fourneau. On peut admettre, en négligeant la faible quantité de combinaisons cyanurées formées dans l'ouvrage, que l'azote de l'air insufflé n'éprouve aucune modification. « Si du volume total d'oxygène contenu dans le gaz on retranche ce qui est originaire de l'air, dit Ledebur, l'excédent provient des matières du lit de fusion ou du combusti-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

ble, c'est-à-dire de la réduction des oxydes, de la décomposition des carbonates... En analysant des échantillons pris dans la même région que le gaz, on peut se rendre compte de l'origine. Si le gaz contient moins d'oxygène que l'air n'en contenait, il faut admettre qu'il s'est fait une oxydation de corps solides ou en fusion, fer, manganèse, silicium » (1).

Voici, d'après Schœffel (2), les compositions en volumes de gaz pris aux différentes hauteurs d'un même haut fourneau.

Hauteur de prise du gaz	Composition des gaz					Rapport $\frac{CO}{CO^2}$
	CO	CO^2	CH^4	H	Az	
Au gueulard	13 96	24 44	0 34	4 85	55 42	0 57
A 4 m. 40 au-dessous . .	14 64	26 30	»	8 20	50 86	0 55
A 5 m. 70 » . .	12 67	25 99	0 93	6 90	53 15	0 49
A 9 m. 10 » . .	12 78	28 57	0 20	2 84	56 23	0 44
A 10 m. 10 » . .	12 07	29 33	0 03	2 78	56 55	0 41
A 10 m. 70 » . .	7 92	29 01	»	2 31	60 76	0 27
Région des tuyères. . . .	2 07	33 72	0 06	1 39	62 63	0 06

Nous ne pouvons étudier spécialement le contrôle de la combustion dans les hauts fourneaux ; ce serait sortir du cadre de notre ouvrage, consacré à dessein à l'étude de la seule chaufferie. Mais les méthodes d'analyse diffèrent peu, le principe du contrôle est le même,

(1) Ledebur, *Métallurgie du fer*, traduction de Langlade et Valton.
(2) *Jahrbuch der Bergakademien zu Leoben*, XXI, 232-288.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

et, quant aux détails d'application, on les trouvera dans les traités spéciaux de métallurgie (1).

Encore que l'inventeur du *convertisseur*, Bessemer, ait intitulé son procédé « Fabrication du fer et de l'acier *sans* combustible », le principe de l'affinage est cependant une véritable combustion intermoléculaire ; ce métal en fusion soumis à l'action de jets d'air fortement comprimé est débarrassé du silicium, du manganèse, du phosphore et autres impuretés qu'il contient par oxydation, c'est-à-dire par combustion, avec formation de SiO^2, Mn^3O^4, MnO, P^2O^5, que l'on fixe en garnissant la cornue d'un revêtement basique ou acide selon les cas. L'opération étant très rapide et discontinue, on ne peut songer à la contrôler au laboratoire ; on y analyse le produit obtenu, et c'est d'après l'aspect de la gerbe de flammes sortant du convertisseur que l'on règle l'injection d'air et la durée du traitement.

Il importe d'ailleurs de constater que le rendement thermique de la combustion est absolument négligeable ; on ne vise que l'obtention d'un produit convenable ; il n'en est pas de même dans les hauts-fourneaux où l'on sait maintenant récupérer, soit par les appareils genre Siemens soit par des moteurs à gaz pauvre, la plupart des calories s'échappant dans les gaz de la combustion.

119. Gazogènes. — Il est indispensable, pour juger de la marche d'un gazogène, d'analyser fréquemment le gaz produit. Le nombre de gaz différents et la variété d'appareils font qu'il est impossible de donner le détail de l'application pratique des données de l'ana-

(1) Pour l'étude des réactions, V. Ledebur (*loc. cit.*), et, pour le calcul du bilan de l'ensemble des réactions, L. Gages, *Foyers métallurgiques*.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

lyse sur la conduite du gazogène. On peut cependant remarquer que, dans tous les cas, on doit s'efforcer d'obtenir un gaz contenant le plus possible de CO et le minimum de CO^2 ; on trouvera dans l'étude des combustibles (§ 16) des compositions types de gaz pauvres, à l'eau, etc. Dans la plupart des cas (appareils à gaz pauvre de houilles maigres, bois, déchets), la production de CO^2, voire d'O libre est la conséquence d'une couche trop faible de combustible.

Il suffira, pour le contrôle de la combustion dans un appareil gazogène, d'en suivre minutieusement la marche pendant quelque temps, au point de vue tant des analyses que des conditions diverses de fonctionnement, pour se rendre parfaitement compte de l'influence de chaque facteur sur la composition des gaz, partant sur le rendement du gazogène. Ajoutons que la création de calorimètres-enregistreurs à marche automatique et continue (§ 35) permettra désormais un contrôle idéal de la marche des gazogènes.

120. Moteurs à explosion. — Le contrôle de la combustion dans les moteurs à explosion ne s'applique guère que dans des cas tout à fait spéciaux : concours, étude de la construction d'un moteur ou d'un carburateur.... Théoriquement, le phénomène étant une variété particulière de combustion, on peut, pour l'analyse tant du combustible que des gaz résiduels, utiliser les méthodes générales. Comme dans le cas d'un foyer, il doit y avoir excès minimum d'air ; d'après les essais de Sorel sur des moteurs alimentés avec des mélanges d'alcool et de carbures légers, « pour brûler complètement l'hydrogène, il faut dans les moteurs actuels introduire au moins 1,33 fois la quantité théo-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

rique d'air, et, pour brûler le carbure, de 1,5 à 1,7 fois cette quantité » (1).

Le contrôle continu de la combustion dans les moteurs n'aurait pas d'ailleurs sa raison d'être comme pour un foyer ; en effet, il y a toujours, dans le premier cas, dosage automatique et rigoureux des quantités nécessaires de comburant et de combustible. Une fois les quantités judicieusement fixées, le phénomène se répétant toujours dans des conditions rigoureusement égales, le contrôle n'a plus les mêmes raisons d'être.

121. Fours à chaux. — Un grand nombre d'industries chimiques : la sucrerie pour l'épuration des jus par chaulage et carbonatation, les soudières pour la caustification des lessives, emploient de la chaux vive fabriquée dans des fours continus par la calcination de la craie mélangé au coke, ou par chauffage de la craie à l'aide de foyers gazogènes ; on préfère habituellement le premier dispositif, plus économique.

Le contrôle de la marche d'un four à chaux doit comprendre la pesée des charges de coke et de calcaire, ainsi que leur analyse et l'essai des gaz de la combustion. D'après Décluy, dans un four marchant dans les meilleures conditions possibles, c'est-à-dire à allure vive (et à mélange coke-calcaire), on doit employer 11,1 parties de coke pour 100 parties de calcaire et obtenir 31 environ d'anhydride carbonique pour cent de gaz. Théoriquement, on devrait avoir 35 0/0 ; en réalité, on obtient en bonne marche cou-

(1) Sorel, *Carburation et combustion dans les moteurs à alcool*, Paris, 1904. Ouvrage auquel nous pouvons renvoyer pour l'étude spéciale du contrôle de la combustion dans les moteurs à explosion.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

rante des teneurs variant de 28 à 31 0/0 avec un four bien installé, de 18 à 25 0/0 dans nombre d'usines.

Dans les sucreries où l'on utilise avec la chaux l'anhydride carbonique dégagé, on contrôle assez fréquemment par l'analyse la composition du gaz ; on se borne le plus souvent à doser CO^2 par absorption dans un carbonimètre. Il importe de doser aussi CO et, comme moyen de contrôle, l'oxygène. En effet, la réaction normale étant :

$$CO^3Ca + C + 2O = CaO + 2CO^2,$$

la quantité de O est fonction de la teneur en CO^2, puisque le rapport O/Az de l'air est constant. S'il y a formation d'oxyde de carbone :

$$CO^3Ca + C = CaO + 2CO,$$

il ne cesse pas d'y avoir relation entre les quantités de chaque élément.

Il ne doit d'ailleurs pas y avoir formation de CO. On a ainsi non seulement une perte d'anhydride carbonique utilisable, mais une perte de combustible, la chaleur latente qui se dégage dans l'oxydation de CO étant inutilisée. L'excès d'oxygène et d'azote indique également une perte de calories (employées à chauffer l'excès d'air).

La prise d'échantillon se fait sur la conduite de refoulement de la pompe à gaz ; elle est d'autant plus facile qu'il est inutile d'aspirer le fluide puisqu'il est sous pression. Dans de nombreuses sucreries un tube de faible diamètre branché sur la canalisation dessert le laboratoire ; c'est évidemment le dispositif le plus commode. Il suffit, lors de l'analyse, de laisser assez longtemps le gaz s'échapper pour que la conduite soit

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

complètement purgée. Quand une première analyse donne une très faible teneur en anhydride carbonique, il est indispensable de faire un nouveau dosage ; il suffit en effet que la prise d'échantillon corresponde avec la période d'ouverture de la trémie du four, pour qu'il y ait notable aspiration d'air, ce qui fausse la composition du gaz ; les variations ne sont attribuables au régime qu'autant qu'un second essai justifie les résultats du premier.

Dans le cas de plusieurs fours dont les tuyaux d'aspiration sont réunis avant la pompe à gaz, il importe de pratiquer des prises à la sortie de chaque four ; on peut ainsi, quand la marche est anormale, analyser les gaz avant leur mélange et attribuer sûrement les variations au four qui les provoque.

122. Fours à soufre. — La combustion du soufre a reçu de nombreuses applications industrielles, parmi lesquelles les fours à pyrites des fabriques d'acide sulfurique et les appareils producteurs d'anhydride sulfureux des sucreries sont les plus importantes.

Les pyrites sont de composition très variable et, dans tous les cas, doivent être analysées ; quant au soufre en canon employé en sucrerie, c'est un produit presque absolument pur. L'anhydride sulfureux étant très soluble dans l'eau, il importe de recueillir sur le mercure les gaz destinés à l'analyse. D'ailleurs, si leur composition peut intéresser au point de vue des applications du gaz, le contrôle de la combustion elle-même n'a aucune importance ; en effet, la chaleur produite étant le plus souvent perdue — et dans tous les cas cette production n'étant pas le but poursuivi — il importe peu qu'il y ait des pertes de calories par excès d'air. Aussi

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

mentionnons-nous simplement la question ; on la trouvera développée dans des ouvrages spéciaux (1).

(1) Horsin Déon, *Bull. du Synd. des Fab. de sucre*, 1899, et Truchot, *Les pyrites*, Paris, 1902.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

APPENDICE

A. — L'EAU D'ALIMENTATION DES CHAUDIÈRES A VAPEUR

123. Analyse de l'eau. — Quoique n'entrant pas dans le cadre de notre étude, la question des eaux d'alimentation s'y rattache étroitement. Il est évident que, le contrôle chimique de la combustion s'appliquant presque uniquement à la chaufferie, c'est au chimiste qui s'en occupe à s'occuper aussi de l'influence des impuretés de l'eau sur la vaporisation.

Il importe de déterminer tout d'abord la nature et la quantité de ces impuretés. On peut avoir pour cela recours aux méthodes générales d'analyse, mais, en pratique industrielle, un simple essai hydrotimétrique suffit. On prend, comme d'ordinaire (1), le degré hydrotimétrique total (*a*), puis recommence l'essai sur de l'eau privée de chaux (on ajoute à 50 cc. d'eau 2 cc. d'une solution à 1/40 d'oxalate d'ammoniaque, on laisse reposer 15 minutes et on filtre), et obtient un second degré (*b*). On fait ensuite bouillir 100 cc. d'eau pendant une demi-heure, laisse refroidir, complète

(1) Voir le mémoire original de Boutron et Boudet, ainsi que tous les traités de chimie analytique ou d'analyse des eaux.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

à 100, filtre et recommence l'essai sur le liquide filtré (*c*); puis après précipitation à l'oxalate (*d*) (on opère sur 50 cc. du liquide filtré, comme précédemment). Schématiquement on peut représenter ainsi les valeurs correspondant aux degrés trouvés :

$$a = CO^2 + CO^3Ca + SO^4Ca + SO^4Mg$$
$$b = CO^2 + SO^4Mg.$$
$$c = SO^4Ca + SO^4Mg.$$
$$d = SO^4Mg.$$

D'où l'on peut tirer (chiffres exprimés en grammes par litre) :

Carbonate de chaux $= a - (b + c - d)$, soit $[a - (b + c - d)] \times 0{,}0013$
Sulfate de chaux $= c - d$, soit $(c - d) \times 0{,}014$
Sulfate de magnésie $= d$, soit $d \times 0{,}0125$.

Les coefficients employés ont été fixés expérimentalement par Boutron et Boudet par des essais hydrotimétriques faits avec des solutions salines pures de concentration connue. On n'obtient d'ailleurs ainsi que des résultats très approximatifs, le nombre de décimales obtenues ne devant pas être pris pour un gage de précision. Mais, pour empirique que soit la méthode, elle a le grand avantage d'être très simple, à la portée de tous et d'exécution rapide, ce qui n'est pas le cas d'une véritable analyse chimique. Aussi se contente-t-on le plus souvent des résultats ainsi obtenus.

Toutes ces impuretés s'accumulent dans les chaudières des générateurs en formant soit des incrustations sur les tôles, ce qui nuit à la transmission de la chaleur et peut amener des explosions ; soit des dépôts boueux amenant des entraînements par la vapeur. Aussi, dans le cas d'eaux fortement chargées de sel (au-dessus de 25-30° hydrotimétriques), est-il indispensable d'épurer

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

préalablement les eaux en précipitant les impuretés par des réactifs appropriés dans des appareils spéciaux ; même dans le cas d'eau ordinaire (à moins que l'on n'emploie surtout des eaux de condensation), on peut avoir avantage à introduire dans la chaudière certains de ces réactifs dans le but d'éviter la formation d'incrustations.

124. Propriétés des désincrustants. — Les bases caustiques (chaux, soude) se combinent avec l'anhydride carbonique des bicarbonates, avec précipitation de carbonates insolubles :

$$(CO^3H)^2Ca + 2NaOH = CO^3Ca + CO^3Na^2 + 2H^2O.$$

Le carbonate de soude (sel Solvay) décompose les bicarbonates de chaux et de magnésie en formant du sesquicarbonate de soude qui, à la température de la chaudière, se dissocie en anhydride carbonique et carbonate de soude :

$$(CO^3H)^2Ca + 2CO^3Na^2 = 2CO^3NaH + CO^3Na^2 + CO^3Ca$$
$$2CO^3NaH + CO^3Na^2 = 2CO^3Na^2 + H^2O + CO^2.$$

Les sulfates de chaux et de magnésie, qui fournissent des incrustations dangereuses, sont également transformés en carbonates qui se déposent en boues :

$$SO^4Ca + CO^3Na^2 = CO^3Ca + SO^4Na^2$$
$$SO^4Mg + CO^3Na^2 = CO^3Mg + SO^4Na^2.$$

L'aluminate de soude produit, en pratique, un effet analogue à celui donné par la soude caustique ; l'alumine se précipite en flocons légers qui clarifient l'eau :

$$Al^2O^4Na^2 + (CO^3)^2CaH^2 + 2H^2O = CO^3Na^2 + 2AlO^3H^3 + CO^3Ca.$$

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Le silicate de soude transforme le carbonate de calcium en silicate gélatineux :

$$SiO^3Na^2 + (CO^3H)^2Ca = SiO^3Ca + CO^2 + H^2O + CO^3Na^2.$$

Il agit également sur les sulfates de calcium et de magnésium :

$$SiO^3Na^2 + SO^4Ca = SO^4Na^2 + SiO^3Ca$$
$$SiO^3Na^2 + SO^4Mg = SO^4Na^2 + SiO^3Mg.$$

Le chlorure de baryum précipite les sulfates, mais, tandis que le sulfate de baryum ainsi formé n'a, à l'encontre du sulfate de calcium, aucune propriété incrustante, le chlorure de magnésium est nuisible :

$$SO^4Ca + 2BaCl^2 + SO^4Mg = CaCl^2 + MgCl^2 + 2SO^4Ba.$$

Aussi peut-il y avoir avantage à remplacer le chlorure de baryum par la baryte, quoique le réactif soit assez coûteux ; il y a précipitation des carbonates et des sulfates :

$$(CO^3H)^2Ca + Ba(OH)^2 = CO^3Ca + CO^3Ba + 2H^2O$$
$$SO^4Ca + Ba(OH)^2 = SO^4Ba + Ca(OH)^2.$$

Le fluorure de sodium ajouté à l'eau d'alimentation contenant du bicarbonate de chaux en diminue la dureté :

$$(CO^3)^2CaH^2 + 2NaFl = 2CO^3NaH + CaFl^2 ;$$

le fluorure de calcium se précipite, il n'est soluble que dans 26.000 fois son poids d'eau (2 fois plus environ que le carbonate de chaux).

L'orthophosphate trisodique agit de même, l'eau est adoucie et clarifiée :

$$3SO^4Ca + 2PO^4Na^3 = 3SO^4Na^2 + P^2O^8Ca^3.$$

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

On emploie aussi les sels ammoniacaux ; il y a double décomposition entre les sels de chaux et augmentation de la solubilité. Les limailles métalliques de fer et de zinc ont été proposées également : à la température élevée des chaudières, et sous l'action de l'anhydride carbonique dissous dans l'eau d'alimentation, le métal s'oxyde en décomposant l'eau ; il y a précipitation des bicarbonates par l'oxyde formé. Le sucre forme un sucrate monocalcique soluble, se dédoublant par la chaleur en mélange de sucrates plus ou moins solubles ; on l'emploie sous forme de mélasse.

L'action du tannin, employé sous forme de copeaux de bois ou d'extraits aqueux, a été également utilisée ; la chaux et la magnésie sont précipitées à l'état de tannates, les matières colorantes forment des laques insolubles. Mais le tannin attaque les tôles des chaudières ; il en est de même de l'hyposulfite de soude agissant comme dissolvant du sulfate de chaux.

Un grand nombre de produits entrant également dans la composition des désincrustants n'ont aucune action chimique : l'argile, le sable, le talc, le verre pilé, la fécule, par exemple, divisent simplement les précipités et en empêchent l'adhérence aux tôles. Ils ont l'inconvénient d'être entraînés par la vapeur et de détériorer les robinets, cylindres de machines et autres organes métalliques.

Les graisses, huiles d'asphalte, résines, goudrons, ont un effet analogue : ils empêchent l'adhérence aux parois des chaudières ; on leur reproche de faire mousser l'eau (1).

(1) On trouvera dans l'ouvrage de H. de la Coux, *L'eau dans l'industrie*, une étude détaillée de chaque réactif employé pour éviter les dépôts de tartre des eaux d'alimentation de chaudières.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

125. Composition des mélanges désincrustants. — On trouvera dans les traités généraux d'analyse quantitative les méthodes à employer pour doser les différents constituants des mélanges tartrifuges du commerce. Tant pour guider l'analyste que pour aider à la composition de différentes formules, nous donnons, d'après plusieurs auteurs et des textes de brevets, la composition de différents produits « tartrifuges » usités industriellement.

Compagnie des chemins de fer de l'Est. — On emploie deux litres, par locomotive et par jour de service moyen, du mélange suivant, préparé dans des cuves de bois :

Eau	70 litres
Carbonate de soude. .	16 kg. 7
Extrait de campêche .	5 2
Extrait de quebracho .	1 7

Pasquale Alfieri (B. F.) préviendrait les incrustations et les dissoudrait si déjà formées par le mélange suivant :

Carbonate de baryte. .	250 gr.
Azotate d'ammoniaque .	325
Sel marin	225
Noir animal	200

John Callatt (U. S. P. 1905) emploie la composition ci-après :

Silicate de soude . . .	75
Cachou.	10
Glucose	10
Carmin	1

S. Robert (B. F., 363.259). Mélange de sulfates acides, de phosphates neutres, de soude et de potasse caustique, le tout coloré par une matière colorante neutre.

L. Verslugs (B. F. 329.783). Mélange d'un sulfure de K, Na, Ca ou AzH^4 ; d'un oléate ou margarate de K,

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Na ou AzH^4 ; de phosphate de soude, etc. Par exemple le suivant, vendu sous le nom de « poligravite ».

Sulfure alcalin	25	100
Margarate	24	
Phosphate de soude . .	11	
Décoction de Panama . .	30	
Carbonate de soude. . .	9	
Créoline.	1	

Rousseau et Grognot (B. F. 335.981) fabriquent leur désincrustant en mélangeant du lactate de baryte, de la chaux et des oxalates ; *Bounotte* (B. F. 337.796) en chauffant et brassant un mélange de :

Borax	20 kgr.
Mélasse	200 gr.
Cochenille	20 gr.
Fécule de pomme de terre.	20 kgr.
Eau de pluie	60 lit.

on peut employer le mélange à l'état de pâte, ou le dessécher et pulvériser.

Fenonil (B. F. 325.599) obtient un produit dit « paratartre » en mélangeant :

Silicate de soude . . .	10
Carbonate de soude . .	2
Soude caustique . . .	7
Colorant.	10
Infusion de chicorée . .	71

On pourrait allonger la liste indéfiniment ; ce serait d'autant moins intéressant que recettes et brevets n'ont souvent aucune valeur : les produits mis dans le commerce sous des noms plus ou moins bizarres sont des combinaisons de réactifs connus, la plupart additionnés de poudre colorante n'ayant d'autre effet que de justifier le prix élevé grevé par la réclame et les remises de courtiers.

Les antitartres du commerce sont forcément de composition arbitraire, puisque la quantité des différents

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

réactifs doit naturellement varier selon la composition des impuretés de l'eau ; aussi les fabricants sérieux demandent-ils un échantillon d'eau d'alimentation pour composer, d'après l'analyse, un réactif précipitant spécial. Mais c'est là une chose qu'il est facile de faire soi-même.

126. Composition rationnelle d'un désincrustant. — La composition de l'eau ayant été déterminée par essais hydrotimétriques successifs (V. § 123), il est facile de calculer les quantités respectives de réactifs précipitants nécessaires.

Nous empruntons à H. de la Coux la marche à suivre et les tableaux numériques donnés dans son ouvrage : *L'eau dans l'industrie.*

a) L'eau ne contient que du carbonate de chaux (*eaux calcaires*) : dans tous les cas et quel que soit le réactif employé, la réaction est la même et la quantité de produits à employer ne varie que d'après le poids moléculaire de chaque réactif. A l'aide du tableau ci-dessous on peut calculer la quantité de réactif en multipliant le poids du carbonate de chaux à précipiter par le nombre correspondant à la base et à l'acide du sel employé :

Bases :	Carbonate	Oxalate	Oxyde	Silicate	Aluminate
Sodium	1 06	1 34	0 80	1 22	6 60
Potassium. . .	1 38	1 66	0 94	1 54	6 92
Magnésium . .	»	»	0 40	»	»
Calcium. . . .	»	»	0 56	»	»
Baryum. . . .	»	»	»	»	7 51

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

b) L'eau contient du carbonate et du sulfate de chaux (*eaux séléniteuses*) en quantités telles que le rapport sulfate-carbonate ne dépasse pas 1,36. L'on emploie comme réactifs des oxydes, carbonates, silicates et aluminates. En précipitant le carbonate comme en (*a*), il se forme un carbonate soluble réagissant sur le sulfate avec formation de carbonate insoluble. Ainsi chaque molécule de réactif précipite une molécule de carbonate et une molécule de sulfate ; si donc il n'y a pas dans l'eau d'alimentation plus d'une molécule de sulfate par molécule de carbonate, c'est-à-dire si le rapport en poids est trouvé $\leq 1{,}36$, il suffit d'ajouter le réactif nécessaire pour la précipitation du carbonate (*a*).

c) L'eau séléniteuse est précipitée par les mêmes réactifs, mais le rapport sulfate-carbonate dépasse 1,36. La quantité de réactif utilisée en (*a*) ou (*b*) ne suffit plus ; aussi doit-on ajouter un excès de précipitant variable avec l'excès de sulfate de chaux. Selon le désincrustant, on déterminera le surplus en multipliant la quantité de sulfate non précipitable par action secondaire par les coefficients :

0,779 pour le carbonate de sodium,
1,001 pour le carbonate de potassium,
0,617 pour le carbonate de magnésium,
1,529 pour le chlorure de baryum.

d) L'eau séléniteuse est traitée par l'oxalate, le chromate ou le bichromate de potassium ou de sodium, ne donnant pas lieu à la formation de réactions secondaires. On emploie des quantités de réactifs calculées en multipliant par les coefficients suivants les poids de carbonate et sulfate calciques à précipiter :

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Réactif	pour la précipitation de	
	CO^3CaCO^2	SO^4Ca
Oxalate de potassium.	1 66	1 220
» sodium.	1 34	0 985
Chromate de »	1 62	1 194
» potassium.	1 94	1 430
Bichromate de »	2 95	2 169
» sodium	2 63	1 933
Aluminate de baryum	7 51	5 521

Enfin, nous donnons d'après Izart (1), pour guider dans le choix économique des réactifs, les prix relatifs des différents agents les plus employés en fonction de leur pouvoir précipitant.

Nature du réactif	Pour précipiter 1 kgr. de carbonate de chaux		Pour précipiter 1 kgr. de sulfate de chaux	
	il faut :	coûtant :	il faut :	coûtant :
Chaux	0kg 56	0fr. 028	»	»
Soude.	0 80	0 240	»	»
Baryte	3 15	0 945	»	»
Carbonate de soude .	»	»	0kg 85	0fr. 085
Chlorure de baryum .	»	»	1 53	0 306
Phosphate de soude .	2 18	0 654	1 60	0 48
Extrait tannique. . .	11 92	3 576	8 76	2 63

(1) *L'économie dans la chaufferie.*

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

B. — RENSEIGNEMENTS DIVERS

127. Bibliographie. — Nous ne connaissons en français aucun ouvrage sur le contrôle chimique de la combustion (1) ; mais son étude a fait l'objet de monographies sommaires parues dans des revues techniques ; nous citerons parmi les plus complètes celle de F. DUPONT, dans le *Bulletin de l'Association des chimistes* (1898), la communication de BAILLET, dans le *Bulletin de la Société industrielle du Nord* (1905), le travail de E. SAILLARD paru dans la *Circulaire du Syndicat des fabricants de sucre* (1903).

Il existe par contre un grand nombre d'ouvrages sur la combustion et les combustibles ; nous ne saurions trop recommander à nos lecteurs, pour l'étude théorique, le récent ouvrage de LE CHATELIER, *Le carbone et la combustion* ; et, pour la partie de technologie industrielle, l'excellent traité de J. IZART, *Les méthodes économiques de combustion*, très heureusement conçu dans un esprit simple, clair et pratique, mais toujours étayé sur les données théoriques. *Le manuel du chauffeur* de H. MATHIEU contient également d'excellents conseils pratiques. *Les combustibles industriels* de COLOMER et LORDIER ; les études de SAILLARD dans le *Bulletin du Syndicat des fabricants de sucre*, 1904, abondent en renseignements utiles. On trouvera dans *L'essai des combustibles* de SIDERSKY un recueil des procédés les plus usités pour l'analyse des divers com-

(1) Depuis l'achèvement de notre ouvrage, M. Sidersky a publié dans l'encyclopédie Léauté un travail sur l'*Economie de combustible* qui renferme l'exposé succinct de la pratique du contrôle chimique de la combustion.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

bustibles industriels ; pour plus de détails, on consultera les *Etudes sur le pouvoir calorifique des combustibles* de MAHLER, les *Combustibles* de PHILLIPS, le *Manuel pour l'essai des combustibles* de FISCHER, et surtout l'ouvrage de SCHEURER-KESTNER, *Pouvoir calorifique des combustibles*, où l'on trouvera une description de la plupart des calorimètres successivement employés pour les essais de combustibles.

Outre le *Traité* magistral de BERTHELOT, on pourra consulter pour l'analyse des gaz le traité de WINKLER : *Analyse industrielle des gaz.* La plupart des procédés qui y sont décrits datant un peu, nous recommandons plutôt le *Manuel* de POZZI-ESCOT que l'on pourra compléter par les très intéressants mémoires de SMET et VOLDÈRE sur l'*Analyse des gaz* et de FABRE sur les *Analyseurs automatiques* de l'anhydride carbonique parus en 1907 et 1908 dans la *Revue Générale de Chimie.*

Nous devons consacrer une mention spéciale à certaines brochures qui, pour être faites dans un but commercial, ne sont pas moins intéressantes : les notices publiées par MM. GALLOIS, POULENC, KLEPP, et surtout la monographie de M. BAILLET, très complète, très bien étudiée, dont nous avons du reste reproduit de nombreux passages.

Nous avons indiqué, dans le cours de l'ouvrage, les auteurs et ouvrages auxquels on pourrait se référer pour les différents détails (1). Donnons à ce propos quelques explications : nous avons beaucoup emprunté

(1) On trouvera d'ailleurs un grand nombre d'indications bibliographiques sur la combustion industrielle dans le volume publié par le *Mois scientifique et industriel* sur « *L'économie dans la chaufferie* », ainsi que dans l'ouvrage de Scheurer-Kestner. *Pouvoir calorifique des combustibles.*

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

à tous les auteurs que nous citons, et reproduit assez souvent une partie du texte original. Car, quand une chose est si bien faite que l'on ne peut espérer faire aussi bien, ne fait-on pas mieux simplement de la copier ? Souvent aussi, en indiquant ou non l'auteur, nous avons reproduit quelque passage en le modifiant ; ce n'était pas que nous le jugeassions mal fait, mais simplement parce que l'unité de la rédaction le demandait, ou que nous n'étions pas tout à fait du même avis. Nous remercions tous nos collègues des emprunts que nous leur avons faits (1).

128. Bibliothèque du laboratoire. — Le chimiste effectuant le contrôle de la combustion devra posséder au laboratoire un certain nombre d'ouvrages qu'il puisse consulter au besoin. Quoi que l'on en croie trop souvent, livres et revues techniques sont pour le chimiste des instruments de travail indispensables au même titre que la balance ou l'étuve : avant d'étudier tel cas, de faire tels essais, de résoudre une difficulté, on doit d'abord se documenter sur les travaux déjà faits. Et, si bien que le technicien connaisse la question, il aura ainsi toujours à apprendre.

Voici la liste des volumes dont nous conseillons l'achat lors d'une installation parfaite : on remarquera que leur prix ne grève pas sensiblement le coût total (§ 108), cependant qu'ils permettent de mieux utiliser tous les résultats du contrôle.

(1) Nous remercions également MM. Olivier, de la *Revue Générale des Sciences*, Baillet, Klepp, Schæffer-Budenberg, Gallois, Poulenc, Dégremont, Orenstein-Koppel, des clichés qu'ils ont bien voulu mettre à notre disposition.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

BAILLET, *Notice* et *Documents* sur le contrôle de la chauffe, in-8°. Lille, 1906 et 1909.

BERTHELOT, *Traité d'analyse des gaz*. Gauthier-Villars, 1900.

COLOMER et LORDIER. — *Les combustibles*, in-8°. Dunod-Pinat, 1907.

DONATH. — *Ueber den Zug und die Kontrolle der Dampfkesselfeuerungen*. Vienne, 1902

FABRE. — *Le dosage industriel de l'anhydride carbonique*. Revue Générale de Chimie, 1907, 3 numéros.

FISCHER (traduct. Gautier). — *Manuel pour l'essai des combustibles*, in-12. Béranger, 1902.

IZART. — *Méthodes économiques de combustion*. Dunod, 1908.

IZART. — *L'économie dans la chaufferie*, in-8°. Mois scientifique et industriel, 1904.

LE CHATELIER. — *Le carbone et la combustion*, in-8°. Hermann, 1908.

MAHLER. — *Etudes sur le pouvoir calorifique des combustibles*, in-8°. Béranger, 1903.

MATHIEU. — *Manuel du chauffeur*, in-8°. Béranger, 1902.

PHILLIPS (traduction Rosset). — *Essai des combustibles*, in-12. Gauthier-Villars.

POZZI-ESCOT. — *Manuel d'analyse des gaz*, in-12. Encyclopédie Léauté, 1902.

SAILLARD. — *Les combustibles employés en sucrerie*. Syndicat des fabricants de sucre, 1904.

SCHEURER-KESTNER. — *Pouvoir calorifique des combustibles*, in-12. Masson, 1896.

SEYFFART. — *Kesselhaus und Kalkofen Kontrole*. Vienne, 1904.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

SIDERSKY. — *Essai des combustibles*, in-12. Encyclopédie Léauté, 1904.

SIDERSKY. — *Consommation et économie de combustible*. Encyclopédie Léauté, 1909.

SMALL ET TIMMERMANS. — *Concours de chauffeurs de Liège*. Revue universelle des mines, 1906.

WINKLER. — *Analyse industrielle des gaz*, in-8°, Paris, 1886.

129. Prix des divers appareils. — *Analyse des combustibles* : Calorimètre de Mahler, 900 fr. ; de Parr, 350 francs.

Indicateurs de tirage : Manomètre des gaziers, 15 francs ; de Démichel, 25 francs ; de Leurson, 70 fr. ; de Parrot, 30 francs ; de Richard, 50 francs ; de Rousset, 10 à 15 francs. Enregistreurs Richard, 150 francs ; Ellinghaus-Fuess, 500 francs.

Echantillonneurs : A bascule, 15 francs ; de Schmidt et Démichel, 200 francs ; de Ridder, 175 francs ; de Baillet, 90 francs.

Appareils pour l'analyse des gaz : Carbonimètre cloche, 4 francs ; de Stammer, 6 francs ; de Raffy, 30 francs ; Burette de Bunte, 6 francs ; de Hempel, 45 francs ; appareils Orsat, 75 à 125 francs ; Baillet, 190 à 200 francs ; Orsat-Vignon, 190 francs.

Enregistreurs de la teneur des gaz en CO^2 : Appareil Krell-Schultze, 600 à 1.700 francs, Analyseurs Hellwachs, Ados, Simmance et Abbady, environ 1.000 francs.

Thermo-pyromètres. — Thalpotasimètre à azote Richard, 200 francs ; pyromètre Richard à dilatation de liquide, 140 francs ; Steinle et Hartung, 100 à 150 francs ; Gauntelet, 75 à 100 francs ; enregistreur Richard, 350 francs.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

130. Adresses. — Baillet, 57, rue Roland, Lille. Ingénieur-conseil.

Dégremont, Le Cateau (Nord). Appareils Krell-Schultze.

Dubuisson, 76, rue Colbert, Lille. Constructeur des appareils Baillet.

Fuess, Steglitz près Berlin. Anémomètres, volumètre-enregistreur.

Gallois, 37, rue de Dunkerque, Paris. Appareils d'Orsat, de Hempel ; carbonimètres de Stammer, de Raffy ; piézomètre de Leurson et de Parrot ; analyseur Leurson-Lallemand.

Golaz, 23, avenue du Parc-Montsouris, Paris. Obus calorimétrique Mahler et accessoires.

Klepp, 54, rue Richard-Lenoir, Paris. Indicateur de Ridder, thermomètres et thalpotasimètres.

Kehler et Martini, Berlin, et 11, rue du Perche, Paris. Calorimètre de Parr.

Orenstein et Koppel, 31, rue de Londres, Paris. Appareils Ados.

Poulenc frères, boulevard Saint-Germain. Appareils Orsat, Vignon, Démichel.

Richard, 25, rue Mélingue, Paris. Manomètres, thermomètres et thalpotasimètres, appareils enregistreurs.

Schæffer et Budenberg, 185, boulevard Voltaire, Paris. Pyromètres et thermomètres, manomètres.

Simmance et Abbady, 9, rue Pétrelle, Paris. Analyseurs-enregistreurs.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

ERRATA

Page 43, 4e ligne à partir du bas, *au lieu de* : 10000 $C^v + H$, *lire* : 10.000 ($C^v + H$).

Page 45, 9e ligne à partir du bas, *lire* : P = 100 — (80 eau + cendres) — *c*.

Page 80, 3e ligne, *lire* : Pratiquement on doit avoir sur grille un tirage de 3 à 4 mm.

Page 93, 10e ligne, *au lieu de* : sous, *lire* : sur.

Page 96, *in fine*, *ajouter* : de la première tranche, les gaz se composent d'un mélange très chaud d'anhydride carbonique, d'oxygène et d'azote.

Page 101, 7e ligne, *après* : cendrier, *ajouter* : contenant de l'eau.

Page 108, 2e ligne à partir du bas, *au lieu de* : le régler suivant l'encrassage des feux, *lire* : s'occuper de la bonne allure des feux.

Page 119, 5e et 6e lignes, *au lieu de* : cheval-vapeur, *lire* : kilowatt-heure.

Page 128, 3e ligne, *au lieu de* : ceux-ci, *lire* : la cloche.

Page 136, à la fin du § 78, *ajouter* : on trouvera page 203 les résultats d'un certain nombre d'analyses types de gaz produits lors de combustions plus ou moins bien faites.

Page 145, note, *au lieu de* : § 78, *lire* : § 76.

Nous avons certainement, en outre, laissé passer à notre insu des inexactitudes et des affirmations con-

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

testables. Aussi serions-nous très heureux de voir nos lecteurs critiquer le contenu de ce petit volume. Nous leur serions très reconnaissant de bien vouloir nous informer de leurs observations. C'est un défaut commun à la plupart de nos revues techniques d'accueillir uniformément toutes les publications par des comptes rendus incolores et neutres. Nous souhaitons vivement d'être critiqué ; cela seulement est utile et permet de mieux affirmer ses idées ou de les changer pour de meilleures.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

INDEX ALPHABÉTIQUE

(Les numéros renvoient aux pages)

Ados (appareil), 176.
Adresses utiles, 252.
Air (propriétés, composition de l'), 65 ; (température de l'), 75 ; (mesure de l'air comburant), 67, 71.
Alcool (l') combustible, 27.
Analyse des combustibles, 31, des gaz, 131.
Anémomètres, 71.
Anhydride carbonique (dosage de l'), 134.
Applications diverses du contrôle, 228.
Arth (formule de), 42.
Aspirateurs, 124.
Azote (dosage de l'), 35 ; excès d'azote, 98 ; calcul de l'azote, 155.
Baillet E.), 65, 67, 73, 95, 102, 105, 128, 146, 198, 200, 247.
Balling (formule de), 42.
Beasley (calorimètre), 59.
Berthelot, 7, 20, 123, 248.
Berthier (formule de), 44.
Bibliographie, 247.
Bois combustibles, 25.
Bunte (appareil de), 139.
Burettes à gaz, 141.
Burnat, 71.
Calorie (définition de la), 15.
Calorimètre *Parr*, 55 ; *Mahler*, 48 ; divers, 54 ; le générateur calorimètre, 62 : calorimètre enregistreur, 59.
Carbone, 18 ; dosage du carbone fixe, 34 ; total, 35 ; carbone résiduel, 38 ; propriétés du, 18.
Carbonimètres, 136.
Carbures (dosage des) dans les gaz, 135.
Carneaux, 72.
Cendres (dosage des) dans les charbons, 34.
Chaleur : nature, 11 ; mesure, 12 ; chaleur spécifique, 15 ; latente, 16.
Charges (régime des), 104.
Chauffage de l'air, 75.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Chauffeur, 112.
Chauvin et *Arnould* (pyromètre), 187.
Cheminée, 72.
Chimiste (Rôle du), 208.
Coefficient de vaporisation, 216.
Colomer et Lordier, 31, 247.
Colorimètre *Izart*, 160.
Comburant (Air), 65 ; divers, 77.
Combustibles, 17 ; pouvoir évaporatoire des, 217.
Combustion : historique, 7 ; théorie, 8 ; données numériques, 69.
Composition des mélanges désincrustants, 242.
Comptabilité technique, 209.
Conclusion des résultats, 224.
Concours de chauffeurs de Liège (Résultats), 64, 121, 203
Conduite des feux, 101.
Consommation de combustible, 37 ; par m² de surface de grille. 110.
Contrôle (nécessité du) chimique de la combustion, 3.
Convertisseurs, 231.
Cornu (formule de), 43.
Correction due à la vapeur d'eau dans l'analyse des gaz, 156.
Custodis (appareil), 161.
Darling (calorimètre), 54.
Décrassage, 106.
Démichel, 87, 125.
Deny, 109.
Désincrustants, 239, 242.
Détail des pertes de chaleur, 221.
Devis d'installation, 197, 198, 205.
Dulong (formule de), 41.
Dupont (*F.*), 117, 141, 247.
Eau d'alimentation : analyse de l', 237 ; calcul de la quantité, 215.
Echantillonnage des combustibles, 31 ; des gaz, 122.
Economie réalisable, 118.
Economiseur *Sturtevant*, 75.
Education du chauffeur, 116.
Ellinghaus (volumètre), 92.
Enregistreurs analytiques de la composition des gaz, 169.
Enregistreurs densimétriques de la composition des gaz, 161.
Enregistreur (thermomètres), 193 ; (de tirage), 191.
Epaisseur des feux, 102.
Equivalence mécanique de la chaleur, 11.
Escarbilles (table pour l'évaluation des pertes dues aux), 40.
Exactitude relative des formules pour le pouvoir calorifique, 47.
Fabre, 176, 248.
Ferrini (formule de), 43.
Filtres à gaz, 130.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Fischer, 25.
Fours à chaux, 233 ; à soufre, 235.
Foyers soufflés, 74.
Fuess (volumètre), 92.
Fumée (production et coloration), 159.
Gauntelet (pyromètre de), 193.
Gaz combustibles, 28 ; composition, 30
Gaziers (manomètre des), 86.
Gazogènes, 231.
Gill, analyse de comburant, 78
Gmelin (formule de), 45.
Goutal (formule de), 44.
Graphiques, 167, 213.
Grille, 109 : (surface de), 110.
Grüner, 22.
Gruson (appareil), 32.
Guedon (essais de), 76.
Hauts fourneaux, 229.
Hellwachs (appareil de), 172.
Hempel (appareil de), 141.
Hirn, (formule de), 72; (appareil de), 85.
Horsin-Déon, 89, 122.
Houille, 20 ; conservation, 21 ; composition, 22.
Hudder (appareil de) 81.
Humidité influence de l'), 98 ; dosage dans les combustibles, 33 ; dans les gaz, 156 ; pertes par l', 222.
Hydrocarbures (dosage des), 150.
Hydrogène : dosage dans la houille, 36 ; dans les gaz, 135.
Hygromètres, 195.
Importance du contrôle, 5.
Indicateurs de tirage, 81.
Influence de la qualité des combustibles, 64 ; des qualités du chauffeur, 121.
Installation du contrôle, 196.
Intensité du tirage, 79.
Interprétation des résultats, 224.
Izart (*J.*), 18, 38, 40, 62, 73, 100, 115, 160, 247.
Joung (*K.*) (appareil de), 174.
Junkers (calorimètres de), 57.
Kasalowsky (table de), 157.
Kern (formule de), 43.
Krell-Schultze, 118 ; (appareil de), 165.
Kretz (manomètre différentiel de), 87.
Kræker (calorimètre), 54.
Lavoisier, ses travaux sur la combustion, 8.
Leurson (piézomètre de), 83; analyseur de *Leurson* et *Lallemand*, 170.
Lignites, 23.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Linde, suroxygénation de l'air. 77.
Lux (balance à gaz) 164.
Mâchefers, 96, 106.
Mahler (formule de), 43 ; appareil de, 48 ; analyses, 27, 35 ; ouvrage, 248.
Manomètres métalliques, 80 ; à eau, 85.
Mathieu, 101, 105, 247.
Matières volatiles dans la houille, dosage, 33.
Mond (gaz), 29.
Moteurs à explosion, 232.
Muck (procédé), 33.
Muller (manomètre), 86.
Obus calorimétrique, 48.
Organisation du contrôle de la combustion, 196, 206.
Orsat (appareil), 143, 149.
Oxyde de carbone (dosage), 134.
Oxygénation de l'air, 76.
Oxygène absorbé dans la combustion, 67 ; dosage de l', 36.
Parr (calorimètre), 55.
Parrot (indicateur de tirage de), 84.
Pertes suppressibles de chaleur, 118, 219 ; détails des, 221 ; pertes totales, 99.
Pétroles, 26.
Planimètre *Richard*, 206.
Poupardin (essais sur le chauffage de l'air), 76.
Pouvoir calorifique dans les différentes réactions, 19.
Pouvoir calorifique des combustibles, 41 ; théorique et pratique, 60.
Pouvoir évaporatoire, 218.
Primes aux chauffeurs, 114.
Prix des appareils, 231 ; des désincrustants divers, 246.
Protochlorure de cuivre, 134.
Puissance de vaporisation, 217.
Pyrogallate, 133.
Pyromètres, 186.
Raffy (carbonimètre), 138.
Réactifs absorbants des gaz, 132 ; préparation, 133.
Réactions diverses dans la combustion, 10.
Redtenbacher (formule de), 43.
Régime des charges, 104.
Registre (réglage du), 107.
Richard (indicateur de tirage), 81 ; enregistreur, 194 ; thermomètre, 191.
Riché (gaz), 29.
Ridder (appareil de), 125.
Ringelmann, 159.
Rousset (manomètre), 89.
Saillard (table de), 45 ; divers, 33, 34, 111, 247.
Schœffer et *Budenberg* (enregistreur), 91.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Scheurer-Kestner, 42, 47, 70, 72, 107, 136, 158, 247.
Schmidt, 75, 119; (échantillonneur), 125.
Schumacher (appareil), 163.
Schwackhœfer (formule de), 42.
Ser, 68.
Sidersky, 25, 247.
Siegert et *Durr* (appareil), 164.
Simmance et *Abbady* (appareil), 179.
Smal et *Timmermans*, 63, 103, 112, 155.
Solubilité des gaz, 123.
Sorel, 28.
Stammer (carbonimètre), 137.
Stations anglaises (consommation du charbon), 119.
Steinle et *Hartung* (pyromètre), 191.
Sturtevant (tirage correspondant aux principaux combustibles), 80.
Suroxygénation de l'air, 76.
Table analytique des matières, 261.
Table des pertes d'après la composition des gaz résiduels, 221.
Température de l'air (influence de la), 75.
Tension des vapeurs, 16.
Tenue des livres, 209.
Thalpotasimètres, 188.
Théories anciennes de la combustion, 7.
Tirages correspondant aux hauteurs de cheminée, 74; intensité du, 79; tirage mécanique, 74; tirage différentiel, 93.
Tourbes combustibles, 23
Uehling (composimètre de), 168.
Vapeur d'eau dans les gaz brûlés, 156.
Vaporisation, 15, 217.
Variétés de houilles, leur classification, 22.
Vignon (appareil), 149.
Vivien, 124; (formule de), 43.
Volatiles (dosage des matières) dans la houille, 33.
Voldere et *de Smet*, 131.
Volquartz, 117.
Volume de l'air d'alimentation, 70.
Volume des gaz résiduels, 157.
Volumètre *Ellinghaus*, 92.
Welter (formule de), 44.
Winkler, 122, 248.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

TABLE DES MATIÈRES

Pages

PRÉFACE 1

LIVRE Ier. — Données historiques et théoriques

CHAPITRE Ier. — Conceptions successives des phénomènes de combustion : les anciens, Stahl, Lavoisier ; la combustion est une oxydation. Caractéristiques d'une combinaison chimique. Réactions exothermiques ; mesure des quantités de chaleur, calories. Changements d'état de l'eau. 7

LIVRE II. — Les combustibles

CHAPITRE II. — Variétés de combustibles industriels, propriétés et pouvoirs calorifiques de la houille, des lignites et tourbes, du bois, des hydrocarbures et de l'alcool, des gaz 17

CHAPITRE III. — Analyse chimique des combustibles. Prélèvement et préparation des échantillons. Dosage de l'humidité, des matières volatiles, du carbone fixe et des cendres. Analyse complète : hydrogène, carbone, oxygène, azote. Application des résultats aux quantités consommées et résiduelles 31

CHAPITRE IV. — Pouvoir calorifique des combustibles, formules de Dulong et modifications ; table de Saillard ; inexactitude des procédés indirects. Procédés directs, obus calorimétrique Mahler, calorimètre de Parr. Pouvoir calorifique des gaz. Pouvoir calorifique pratique. 41

LIVRE III. — Le comburant

CHAPITRE V. — Composition et propriétés de l'air, quantité nécessaire à la combustion, détermination par calcul et mesure directe. Cheminées, carneaux, tirage forcé. Température de l'air, emploi d'air suroxygéné et de comburants divers. 65

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Pages

CHAPITRE VI. — Le tirage, vitesses nécessaires d'afflux de l'air. Mesure du tirage avec les manomètres métalliques, mécaniques, hydrauliques. Appareils des gaziers, de Kretz, de Rousset . . . 79

LIVRE IV. — La combustion

CHAPITRE VII. — Etude théorique de la combustion. Rôle du charbon, de l'air, chaleur dégagée, pertes par l'humidité, le rayonnement, chauffage préalable du combustible et du comburant. . . 95

CHAPITRE VIII. — Etude pratique ; conduite des feux, leur épaisseur Le régime des charges, les décrassages. Réglage et manœuvre du registre. La grille, qualités d'une bonne grille, sa surface, la consommation de charbon par mètre carré de grille. 101

CHAPITRE IX. — Le chauffeur, l'importance économique du choix d'un chauffeur, les primes, l'éducation du chauffeur. Les économies réalisables du fait d'une chauffe bien conduite. Exemples des stations anglaises, du concours de Liège 112

LIVRE V. — Les gaz de la combustion

CHAPITRE X. — Prélèvement de l'échantillon, aspirateurs ordinaires, aspirateurs automatiques et continus réglables pour un temps donné : Schmidt et Démichel, Ridder, Baillet. 122

CHAPITRE XI. — Analyse des gaz Absorption de l'anhydride carbonique, de l'oxyde de carbone, de l'oxygène, dosage de l'hydrogène. Composition des réactifs, carbonimètres de Stammer, de Raffy. Burettes de Bunte, de Hempel. Appareils Orsat, Baillet, Vignon. Calculs et corrections. Volume des gaz. La fumée. 131

CHAPITRE XII. — L'analyse automatique et continue des gaz. Appareils densimétriques, Custodis, Schumacher, Krell-Schultze, Siegert, Uehling. Enregistreurs analytiques Leurson-Lallemand, Hellwachs, Yung, Ados, Simmance et Abbady 161

CHAPITRE XIII. — Mesure des températures. Pyromètres, thalpotasimètres. Thermomètres à dilatation de liquide, à dilatations différentielles. Enregistreurs. Etat hygrométrique. 185

LIVRE VI. — Le contrôle de la combustion

CHAPITRE XIV. — Installation du contrôle dans les petites, les moyennes, les grandes chaufferies. Devis, organisation. Ce que l'on doit attendre du service 196

CHAPITRE XV. — La pratique, tenue des livres de laboratoire. Tableaux types, graphiques. Mesures de l'eau d'alimentation, de la

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

Pages

vaporisation, du pouvoir évaporatoire. Calcul des pertes. Conclusions pratiques. Nature, contrôle et remède de chaque perte . . 209

CHAPITRE XVI. — Application du contrôle aux différentes combustions industrielles. Hauts fourneaux, gazogènes, moteurs à explosion. Fours à chaux, à soufre 228

Appendice

A. — L'eau d'alimentation des générateurs à vapeur ; analyse. Désincrustants divers, leurs propriétés ; composition d'un mélange rationnel 237

B. — Renseignements divers ; bibliographie, prix des appareils de contrôle ; ouvrages à consulter, adresses utiles 247

Errata. 253

Index alphabétique des principaux noms cités, appareils et méthodes décrits. 255

LAVAL. — IMPRIMERIE L. BARNÉOUD ET Cie.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

ENCYCLOPÉDIE DES TRAVAUX PUBLICS (*suite*)

OUVRAGES DE PROFESSEURS A L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES

M. Aguillon. *Législation des mines, française et étrangère*, 40 fr. On vend séparément :
— La *Législation en France, dans les colonies et protectorats*, 2e édition (très augmentée), 1 très fort volume (1.011 pages) . . . . . 25 fr.
— Les *Législations étrangères*. . . . . 15 fr.
M. Pelletan. *Lever des plans et nivellement souterrains* (Voir ci-dessus : *Durand-Claye*).
M. Chesneau. *Lois générales de la Chimie*, 1 vol. avec 37 figures. . . . . 7 fr. 50
MM. Vicaire et Maison. *Cours de Chemins de fer de l'Ecole des Mines*; 582 p., 493 fig. 20 fr.

OUVRAGE D'UN PROFESSEUR A L'ÉCOLE NATIONALE FORESTIÈRE

M. Thiéry. *Restauration des montagnes*, avec une *Introduction* par M. Lechalas père. Vol. de 442 pages, avec 173 figures. . . . . 15 fr.

OUVRAGES DE DIVERS AUTEURS

M. Charpentier de Cossigny, ingénieur civil des mines, lauréat de la Société des agriculteurs de France. *Hydraulique agricole*, 2e édit., 1 vol., avec 160 figures . . 15 fr.
M. Degrand, inspecteur général honoraire des ponts et chaussées. *Ponts en maçonnerie* (Voir ci-dessus : *J. Résal*).
M. Doniol, inspecteur général des ponts et chaussées en retraite. *Réglementation des chemins de fer d'intérêt local, des tramways et des automobiles* 1 vol. avec figures. 10 fr.
— *Complément à l'ouvrage ci-dessus* . . . . . 3 fr.
M. le Dr Duchesne, ancien président de la Société de médecine pratique. *Hygiène générale et Hygiène industrielle*, ouvrage rédigé conformément au programme du *Cours d'hygiène industrielle* de l'Ecole centrale. 1 vol. de 740 pages, avec figures . . 15 fr.
M. L. Fargue, inspecteur général des ponts et chaussées en retraite. *Hydraulique fluviale. La forme du lit des rivières à fond mobile*, 1 volume de 187 pages avec 15 planches hors texte et de nombreuses figures dans le texte . . . . . 9 fr.
M. Henry (Ernest), inspecteur général des ponts et chaussées. *Théorie et pratique du mouvement des terres, d'après le procédé Bruckner* 1 vol., 2 fr. 50. — *Ponts métalliques à travées indépendantes : formules, barèmes et tableaux* 1 vol. de 639 pages, avec 267 figures, 20 fr. — *Traité pratique des chemins vicinaux*, volume de près de 800 pages. . 20 fr.
M. Maurice Koechlin, ingénieur. *Applications de la statique graphique*. 1 vol., avec 311 figures et 1 atlas de 34 planches, seconde édition, revue et très augmentée, 30 fr. — *Recueil de types de ponts pour routes*. 1 vol. de 306 pages et un atlas. . . . 25 fr.
M. Lallemand, ingénieur en chef des mines. *Nivellement de précision* (Voir ci-dessus *Durand Claye*).
M. Lavoinne. *La Seine maritime et son estuaire*, 1 vol., avec 49 figures. . . . 10 fr.
M. Lechalas père, inspecteur général des ponts et chaussées. *Hydraulique fluviale*. 1 vol., avec 78 figures. 17 fr. 50. — *Des conditions générales d'établissement des ouvrages dans les vallées* (Voir ci-dessus : *J. Résal et Degrand*; c'est l'introduction à leur *Traité des Ponts en maçonnerie*).
M. Lechalas fils, ingénieur en chef des ponts et chaussées. *Manuel de droit administratif*. Tome I, 20 fr.; tome II, 1re partie, 10 fr.; tome II, 2e partie . . . . . 10 fr.
M. Lévy-Lambert, ingénieur civil, inspecteur principal à la Compagnie du Nord. *Chemins de fer à crémaillère*. 2e édition. 1 vol. de 479 pages avec 137 fig. 15 fr. — *Chemins de fer funiculaires, Transports aériens*. 1 vol., avec 150 figures . . . . . 15 fr.
M. Leygue, ancien ingénieur auxiliaire des travaux de l'Etat, agent-voyer en chef de la province d'Oran. *Chemins de fer. Notions générales et économiques*. 1 vol. de 617 pages, avec figures . . . . . 15 fr.
M. P. Niewenglowski, ingénieur au corps des mines. *Précis d'électricité*, 1 vol. de 200 pages avec 64 figures . . . . . 6 fr.
M. E. Pontzen, ingénieur civil (l'un des auteurs de *Les chemins de fer en Amérique*) : *Procédés généraux de construction : Terrassements, tunnels, dragages et dérochements*. 1 vol. de 572 pages, avec 234 figures (médaille d'or à l'Exposition de 1900). . 25 fr.
M. Tarbé de Saint-Hardouin, inspecteur général des ponts et chaussées, ancien directeur de l'Ecole de ce corps. *Notices biographiques sur les ingénieurs des ponts et chaussées*. un vol. . . . . 5 fr.
M. N. de Tédesco, ingénieur. *Recueil de types de ponts pour routes en ciment armé*, 1 vol. de 307 pages avec atlas . . . . . 25 fr.

Chaque ouvrage se vend séparément (et aussi chaque volume des ouvrages qui en comprennent plusieurs). Il n'y a pas de numérotage général des volumes formant la collection.

Les ouvrages entrant dans les *Encyclopédies des Travaux publics* et *Industrielle* sont en vente chez Ch. Béranger et chez Gauthier-Villars.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

ENCYCLOPÉDIE INDUSTRIELLE

Vol. grand in-8°, avec de nombreuses figures

Exploitation technique des Chemins de fer, par A. Schœller et A. Fleurquin, 1 vol. de 408 pag. avec 109 fig. . 12 fr.

Calcul infinitésimal à l'usage des Ingénieurs, par E. Rouché et L. Lévy, 2 vol. de 557 et 829 p. Chaq. vol. . . 15 fr.

Cours de géométrie descriptive de l'Ecole centrale, par C. Brisse, prof. de ce cours, et H. Picquet, 478 pag. avec 300 fig . . . . . 17 fr. 50

Construction pratique des navires de guerre, par A. Croneau, 2 vol. (996 pag. et 664 figures) et 1 bel atlas double in-4° de 11 pl., dont 2 en 3 coul. . . 33 fr.

Verre et verrerie, par Léon Appert, et J. Henrivaux. 460 p. 130 f. et 1 atlas 20 fr.

Blanchiment et apprêts; teinture et impression, matières colorantes, 1 vol. de 674 p., avec 368 fig. et échantillons de tissus imprimés, par Guignet, Dommer et Grandmougin (de Mulhouse) . . 30 fr.

Éléments et organes des machines, par A. Gouilly, 1 vol. de 410 pages, avec 710 figures . . . . . 12 fr.

Les associations ouvrières et les associations patronales, par Hubert-Valleroux, avocat. 1 vol. de 361 pages. 10 fr.

Traite pratique des ch. de fer (entier local) **et des Tramways**, par P. Guedon. 11 fr.

Traité des Industries céramiques, par Emile Bourry. 1 vol. de 755 pages avec 349 fig. ou groupes de fig. et une planche (Cet ouv. a été traduit en angl. . 20 fr.

Le vin et l'eau-de-vie de vin, par Henri de Lapparent, insp. gén. de l'agriculture. 1 vol. de 545 p., 110 fig. et 28 cartes 12 fr.

Métallurgie générale, par La Verrière : **Procédés de chauffage**, 1 vol. de 370 pages avec 171 figures . . . 12 fr.

Procédés métallurgiques et étude des metaux, 1 vol. de 403 p. avec 138 fig. et 10 planches . . . . . 12 fr.

La Betterave agricole et industrielle, par Geschwind et Sellier, 1 vol. avec 129 figures (méd. d'arg. soc. nat. d'agr. et méd d'or des agric. de France). . . 20 fr.

Cours de chemins de fer de l'Ecole des Mines, par Vicaire et Maison, 582 p. avec 493 fig. . . . . 20 fr.

Chimie organique appliquée, par A. Joannis, professeur à la Faculté des Sc. de Paris. 1406 p. en 2 vol. . . 35 fr.

Traité des machines à vapeur, à gaz, à pétrole et à air chaud, par Alheilig et Roche. 2 vol., 1176 p., 693 fig. 38 fr.

Chemins de fer. Superstructure, par E. Deharme (Voir : *Encyc. des Travaux publics*).

Chemins de fer : Resistance des trains. Traction par E. Deharme et A. Pulin, ingénieur de la Cie du Nord, 447 p., 95 f. et 1 planche . . . . . 15 fr.

Chaudières de locomotives, par les mêmes, 130 fig. et 2 pl. . . . 15 fr.

Locomotives : *Mécanisme, Châssis Types de machines*. 1 fort vol. avec un bel atlas de 18 pl. double in 4°, par les mêmes. 25 fr.

Electricité industrielle, 2e éd., v. de 826 p., 404 fig. (C. de M. Monnier à l'Ec. Cent.). 25 fr.

Machines frigorifiques, par Lorenz, professeur à la faculté de Halle; traduction de Petit et Jaquet, 195 p., 131 fig. 7 fr.

Industries du sulfate d'aluminium, des aluns et des sulfates de fer, par L. Geschwind. 372 p. avec 195 fig. Traduit en anglais . . . . . 10 fr.

Accidents du travail et assurances contre ces accidents, par G. Fédon (Méd. d'arg. Exp. 1900), 1 vol. de 646 p. 7 fr. 50

Traité des fours à gaz à chaleur régénérée, par Toldt (trad. Dommer), 392 pages 98 fig. . . . . 11 fr.

Résistance des matériaux et Eléments de la théorie mathematique de l'elasticité, par A. Föppl, trad. de E. Hahn, 489 p., 75 fig. . . . . 15 fr.

Industries photographiques, par le Prof. Fabre, 602 p., 183 fig 18 fr.

La Tannerie, par Meunier, Vaney et Vignon (650 p., 98 fig.) . . . . 20 fr.

Industrie des cyanures, par Robine et Lenglen . . . . . 15 fr.

Traité des essais de matériaux, par A. Martens, traduction de P. Breuil. 1 vol. de texte de 671 pages avec 558 fig. et un atlas de 31 grandes planches. 50 fr.

L'Energie hydraulique et les Recepteurs hydrauliques, par U. Masoni. 1 vol. de 320 p. avec 207 fig . . 10 fr.

Le Bois, par J. Beauverie, 2 fascicules de XI-1402 pages avec 485 figures (méd d'or de la soc. nat d'agric.) . . 20 fr.

Etude expérimentale du Ciment armé, par R. Feret, 786 pag. avec 196 fig. 20 fr.

Traite général des Automobiles à petrole, par L. Perisse, 503 pages avec près de 300 figures. . . . 17 fr. 50

COURS D'ÉCONOMIE POLITIQUE

Professé à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées par C. COLSON, Inspecteur general des Ponts et Chaussées, Conseiller d'Etat

Livre I : *Théorie général des phénomenes économiques*. Un volume de 446 pages. 2e édition considérablement augmentee, 1907. Livre II : *Le travail et les questions ouvrières*. Un volume de 344 pages, 1901. — Livre III : *La propriété des biens corporels et incorporels*. Un volume de 342 pages, 1902. — Livre IV : *Les entreprises, le commerce et la circulation*. Un volume de 444 pages, 1903, avec un appendice de 1909. — Livre V : *Les Finances publiques et le budget de la France*. Un volume de 466 pages, 2e édition mise a jour, 1909 — Livre VI : *Les Travaux publics et les transports*. Un volume de 528 pages, 1907. — Supplement contenant les chiffres relatifs au commerce international, au budget de la France, aux Travaux publics et aux Transports en France et à l'étranger paraitra chaque annee à partir de 1910 (prix 1 fr.) Chaque livre . . . . . 6 fr.

LAVAL. — IMPRIMERIE PARISIENNE, L. BARNÉOUD ET Cie.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1