

même plan horizontal, celle de l'aiguille mobile doit se trouver à 2<sup>mm</sup> au-dessus de ce plan. Pour réaliser cette disposition le plus simplement possible, on place sur l'anneau du support une plaque de verre destinée à recevoir les extrémités des trois aiguilles fixes; on pose sur la plaque le plateau de balance, on dévisse l'aiguille centrale et l'on introduit en dessous une plaque de verre plus petite, ayant exactement 2<sup>mm</sup> d'épaisseur; puis on visse l'aiguille centrale jusqu'à ce qu'elle touche la seconde plaque. On peut alors procéder à une prise de densité.

On installe l'appareil sur une table horizontale solide, et l'on remplit le vase de mercure. Le mercure employé doit être exempt de poussières et chimiquement pur; s'il en est autrement, on commence par en déterminer le poids spécifique.

A cet effet, on prend un étui en acier pesant 217<sup>gr</sup>, dont le poids spécifique à 13°,75 est de 7,6352. On note la température de l'enceinte, on place l'étui sur le mercure, et l'on dispose sur l'étui les trois aiguilles fixes du plateau de balance préalablement pesé; puis on charge de poids le plateau, jusqu'à ce que l'aiguille centrale affleure exactement le niveau du mercure. Si l'on désigne par :

- S' le poids de l'étui,
- p le poids spécifique de l'étui,
- V le volume de l'étui,
- W le poids total du plateau de balance,
- G' la somme des poids placés sur le plateau,
- Q' le poids du mercure déplacé,
- P le poids spécifique du mercure,

il viendra :

$$P = \frac{Q'}{V};$$

or on a :

$$Q' = S' + W + G', \quad V = \frac{S'}{p};$$

donc :

$$P = \frac{(S' + W + G')p}{S'}.$$

Le poids spécifique du mercure étant connu, on prend un grain de poudre prismatique ou cylindrique, on le débarrasse du poussier adhérent à la surface au moyen d'un pinceau, on le pèse à l'aide

d'une balance de précision et on le place sur le mercure. On installe le plateau de balance de façon que les trois tiges verticales ne touchent ni le vase ni l'anneau du support, et l'on fait en sorte que le grain de poudre ne frotte pas contre les parois intérieures du vase. On charge alors le plateau de manière que les quatre aiguilles plongent dans le mercure, puis on retire des poids peu à peu, jusqu'à ce que l'aiguille centrale affleure exactement la surface; pour arriver à maintenir horizontaux les bras qui relient l'aiguille centrale aux trois tiges, il suffit de placer convenablement les poids sur le plateau de balance. L'équilibre flottant étant obtenu, on a tous les éléments nécessaires pour le calcul du poids spécifique cherché.

Soient, en effet :

- P le poids spécifique du mercure à la température de l'expérience,
- S le poids du grain de poudre,
- W le poids total du plateau de balance,
- G la somme des poids placés sur le plateau,
- Q le poids du mercure déplacé,
- V le volume du grain de poudre,
- Z le poids spécifique cherché du grain de poudre;

on aura :

$$Z = \frac{S}{V};$$

or on a :

$$V = \frac{Q}{P} = \frac{S + W + G}{P};$$

donc :

$$Z = \frac{SP}{S + W + G}.$$

#### c) Densimètre Hoffmann.

Hoffmann a cherché à éviter les causes d'erreur inhérentes aux déterminations directes de la densité en mesurant, par un appareil spécial, la porosité relative de la poudre, dont on peut déduire ensuite le poids spécifique.

A une plaque métallique A, divisée de bas en haut en lignes de Paris et solidement installée sur un pied B, sont fixées les longues branches C, C' de deux tubes de verre recourbés, ayant environ 0<sup>m</sup>,018 de diamètre (fig. 41). Les petites branches D, D' sont munies d'un

anneau en acier E, E', formant écrou pour recevoir les pièces en acier

Fig. 41.

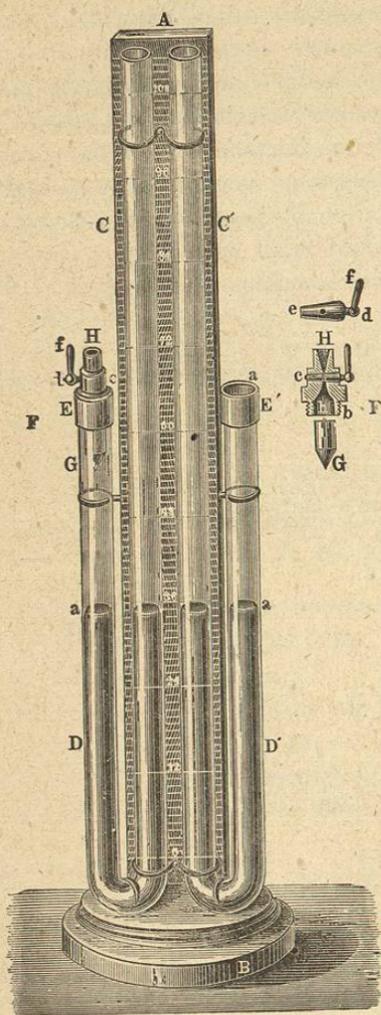
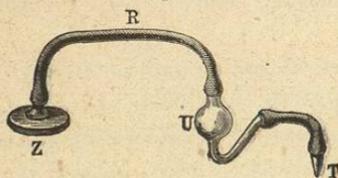


Fig. 42.



F, terminées par les vis *b*; ces pièces sont disposées de telle sorte que les cylindres creux en acier G pénètrent à l'intérieur de D, D', tandis que les parties H restent complètement en dehors; la fermeture est d'ailleurs hermétique. L'ouverture dont la partie H est percée de haut en bas se continue à travers la partie renforcée *c*, et rencontre en *h* un tamis métallique extrêmement fin. La partie *c* est, en outre, percée d'un canal horizontal, dans lequel se meut la clef *d* sans donner lieu à aucune fuite d'air. Suivant donc que le trou *e* de la clef sera mis ou non en communication avec l'intérieur de D, D', ce qu'on réalise en tournant la petite manivelle *f*, on permettra ou on empêchera l'accès de l'air dans les deux tubes. Les cylindres G ne sont maintenus que par le frottement de leurs bords supérieurs, qui présentent quatre fentes à angle droit; ils peuvent facilement s'enlever. Dans les tubes de verre recourbés se trouve du mercure à peu près jusqu'en *a, a*.

Dans les deux cylindres G, G, dont le fond terminé en pointe porte des trous très-fins ne permettant que le passage du mercure, on verse deux espèces de

poudre différentes n° 1 et n° 2, on les pèse, on visse les deux pièces F, F sur D, D', et l'on fait le vide au-dessus du mercure au moyen d'un tube en caoutchouc R (fig. 42), qu'on met en relation avec l'intérieur de D, D' au moyen de la pointe d'acier T introduite dans l'ouverture de H, et avec la platine d'une machine pneumatique au moyen de la plaque Z. Le mercure monte dans D, D', et remplit les interstices des grains que renferment les cylindres G, G. Dès que le mercure se montre dans la petite boule de verre U, on intercepte l'arrivée de l'air extérieur en tournant de 90° la clef *d*, dont le trou était jusque-là dirigé de bas en haut, on enlève le tube de caoutchouc, on porte l'appareil sous la cloche d'une machine pneumatique, et l'on fait le vide au-dessus du mercure qui reste dans les longues branches. L'air renfermé dans les pores des grains de poudre en sort peu à peu, chasse le mercure des cylindres G, G et produit une ascension correspondante du niveau dans les longues branches. La différence entre le niveau actuel du mercure et le niveau initial mesure la pression qui s'exerce à sa surface dans la petite branche et, par suite, la quantité d'air contenue dans les pores. On peut ainsi comparer, dans une seule expérience, la porosité relative de deux sortes de poudres. Si, par exemple, *r* mesure la différence des niveaux du mercure pour la poudre n° 1, dont on a pesé *g* grammes, et *r'* celle qui correspond à la poudre n° 2, dont on a pesé *g'* grammes, le rapport des porosités des deux poudres sera  $\frac{rg'}{r'g}$ .

Nous avons vu (p. 407) que le mercure ne mouille pas complètement la poudre et ne remplit pas tous les interstices; en outre, quand il se retire, une partie du liquide reste adhérente aux grains. L'appareil d'Hoffmann fournit donc des indications tout à fait incertaines. Au surplus, abstraction faite des causes d'erreur que comporte ce procédé, on n'en déduit qu'un simple rapport de porosité entre deux poudres déterminées: aussi la méthode d'Hoffmann a-t-elle été rapidement abandonnée.

Les seuls appareils actuellement employés en France sont le densimètre Ricq (1875) et le densimètre Bianchi (1847). Ce dernier est aujourd'hui d'un usage général.

## d) Densimètre Ricq.

L'appareil du capitaine Ricq est d'un maniement facile et rapide, et le prix en est relativement peu élevé.

Le principe de l'opération est le suivant : on détermine le volume de la poudre en évaluant la différence entre ce volume et un volume-type convenablement choisi; cette différence, qu'on rend aussi petite que possible, est mesurée au moyen d'un tube gradué permettant de lire le dixième de centimètre cube.

Le volume-type est représenté par 10 billes en verre dont le volume, égal à 215<sup>cc</sup> environ, est vérifié de temps en temps par le procédé employé pour la mesure des densités à l'eau saturée (p. 395) ou par toute autre méthode analogue. Ces billes sont immergées dans un vase plein de mercure, et l'on observe le niveau dans le tube gradué: on les remplace par un poids connu de poudre, et l'on observe de même le niveau. Si l'on désigne par :

P, V, D le poids, le volume et la densité de la poudre,  
 $V_0$  le volume type des billes,  
 $\varepsilon$  l'excès positif ou négatif du volume de la poudre sur celui des billes,

on aura :

$$V = V_0 + \varepsilon,$$

et :

$$D = \frac{P}{V} = \frac{P}{V_0 + \varepsilon}.$$

L'appareil (Pl. VI, fig. 2) consiste essentiellement en un vase en fonte composé de deux cylindres superposés : le cylindre supérieur (diamètre 0<sup>m</sup>,14, hauteur 0<sup>m</sup>,04) reçoit alternativement les billes et la poudre; le cylindre inférieur (diamètre 0<sup>m</sup>,06, hauteur 0<sup>m</sup>,18 environ) contient un piston destiné à faire varier le niveau du mercure dans l'intérieur du vase et mû par l'intermédiaire d'un volant et d'une petite manivelle. Ce piston porte un obturateur système de Bange, que l'on serre modérément sur l'écrou au moyen d'une clef; il est percé, à la partie inférieure, d'un petit canal fermé par un bouchon fileté et destiné à permettre l'écoulement du mercure au moment du démontage de l'appareil. Le vase porte, à sa partie supérieure, un couvercle assujéti à l'aide de 4 boulons et percé en son centre d'une ouverture, où s'engage un bouchon à vis sur lequel est mastiqué

un tube gradué; c'est par cette ouverture que l'on retire les billes et que l'on introduit la poudre. Enfin un tampon en bois, portant une rondelle en caoutchouc que l'on peut serrer au moyen d'un petit écrou à oreilles, peut glisser dans le tube gradué et être fixé en un point convenable pour permettre de faire le vide dans l'appareil. Toutes les fermetures sont rendues hermétiques au moyen de rondelles en caoutchouc.

Pour faire une épreuve de densité, on commence par descendre à fond le piston; on verse la quantité de mercure nécessaire au moyen d'un entonnoir en verre, on introduit les billes et l'on assujéti le bouchon porte-tube. On remonte le piston jusqu'à la surface d'arrêt: le niveau du mercure doit alors venir affleurer dans le tube vers la division 50<sup>cc</sup>; sinon, on ajouterait ou l'on enlèverait un peu de mercure à l'aide d'une pipette, jusqu'à ce que ce résultat fût obtenu. On introduit dans le tube le tampon obturateur, on l'amène au contact de la surface libre du mercure, on serre l'écrou à oreilles, et l'on descend le piston jusqu'à ce qu'en remuant légèrement la table on entende les billes s'entre-choquer: les bulles d'air restées dans le vase remplissent tout l'espace devenu libre et n'ont plus qu'une tension très-faible. On remonte le piston; le niveau du mercure étant arrivé vers le milieu du tube, à 8 ou 10<sup>cc</sup> environ au-dessous de la position primitive, on desserre le tampon obturateur, pour éviter de comprimer outre mesure l'air qui aurait pu rentrer accidentellement, et l'on achève de monter le piston jusqu'à la surface d'arrêt. On lit alors le niveau du mercure; soit  $n$  le nombre trouvé. En général, avec les billes et avec les poudres à gros grains, il ne reste plus d'air dans le mercure après cette opération; pour s'en assurer, on fera de nouveau le vide dans le tube en serrant le tampon, et descendant puis remontant le piston: si le niveau ne varie pas de plus de 0<sup>cc</sup>,2, on admettra la seconde lecture. On descend ensuite le piston jusqu'à ce que le niveau du mercure soit arrivé au-dessous de l'ouverture du cylindre supérieur, qu'on dégage; on sort les billes avec précaution, de manière à ne pas laisser perdre de mercure, et l'on descend le piston à fond. — On verse alors la poudre, et l'on opère pour chasser les bulles d'air comme on a fait avec les billes. On lit le niveau, et l'on s'arrête quand deux lectures consécutives donnent le même résultat à 0<sup>cc</sup>,1 près; soit  $n'$  le nombre trouvé. On a :

$$\varepsilon = n' - n.$$

Pour les poudres à fins grains, on éprouve une certaine difficulté à chasser les bulles d'air; il convient, dans ce cas, d'opérer sur des quantités de poudre peu considérables, 200<sup>es</sup> environ. — Si l'on dispose d'une machine pneumatique, on peut la substituer avec avantage au tampon obturateur. — Pour diminuer autant que possible l'influence des inexactitudes dans la graduation du tube en verre, on opère sur un poids variable de poudre, que l'on détermine, d'après la densité supposée, de manière que la valeur de  $\varepsilon$  soit aussi petite que possible. — Enfin, on vérifie le fonctionnement de l'appareil en répétant plusieurs fois l'opération avec les billes, qu'on enlève et qu'on remet successivement : on doit toujours lire le même nombre sur le tube.

e) Densimètre Bianchi.

Cet appareil se distingue de tous les autres densimètres par une disposition spéciale, d'après laquelle le mercure qui entoure les grains de poudre se trouve soumis à une pression de 2 atmosphères et, par suite, forcé de pénétrer dans les plus petits interstices.

Il existe 2 sortes de densimètres de ce système : les uns ont un œuf en verre et sont destinés aux poudres à grains moyens et à fins grains; les autres, dont l'œuf est en fonte et de plus grand volume, sont réservés pour les poudres à gros grains. Nous décrivons un densimètre de la première catégorie.

Le mode d'opération consiste à peser l'œuf plein de mercure, puis à le peser plein de mercure et d'un poids déterminé de poudre. Connaissant la densité du mercure à la température de l'expérience, on en déduit aisément le poids spécifique cherché.

L'appareil (Pl. VI, fig. 3) se compose essentiellement d'un vase en verre A à deux tubulures garnies de viroles en fonte, sur lesquelles se vissent des chapeaux en fonte B, C, portant des robinets  $p$ ,  $r$ . Deux diaphragmes, garnis, l'un en peau de chamois pour le bas du vase, l'autre en toile métallique très-fine pour la partie supérieure, se placent à la jonction des viroles et des chapeaux. Au chapeau inférieur se visse un ajutage en fonte à bec effilé  $a$ , dont l'extrémité descend jusqu'au fond de la cuvette en fonte E destinée à recevoir le mercure. Au chapeau supérieur est fixé un tube barométrique T, maintenu et préservé des fractures par une pièce en fonte surmontant un support S également en fonte qui porte tout l'appareil. Le tube barométrique est muni d'un robinet  $q$  dans le bas : son extré-

mité supérieure est garnie d'une virole et d'une douille pour recevoir l'une des extrémités d'un tuyau en caoutchouc  $t$  à âme métallique, dont l'autre extrémité se fixe sur le nez d'une machine pneumatique du système Bianchi; sur le trajet du tuyau se trouve un flacon en verre destiné à recueillir le mercure qui pourrait s'échapper.

On commence par déterminer la densité du mercure employé pour l'épreuve, au moyen d'un flacon de cristal avec bouchon à l'émeri percé d'un trou. On remplit le flacon successivement de mercure et d'eau distillée, à l'aide d'un entonnoir à bec très-effilé qui descend jusqu'au fond, afin que, le flacon se remplissant de bas en haut, il ne reste pas de bulles d'air adhérentes à la paroi intérieure. On retranche le poids du vase de chacune des pesées, et le rapport ainsi obtenu, multiplié par la densité de l'eau à la température  $\tau$  de l'expérience, donne la densité  $D_\tau$  du mercure à cette température. La densité à 0° étant alors :

$$D_0 = D \left( 1 + \frac{\tau}{5550} \right),$$

la densité du mercure à une température quelconque  $\tau'$  sera :

$$D_{\tau'} = D_0 \frac{5550}{5550 + \tau'}.$$

Pour procéder à une prise de densité, on fait 3 pesées de 100<sup>es</sup> de la poudre soumise à l'épreuve; si cette poudre était humide, on la ferait sécher vers 60°, et on la pèserait après refroidissement. — On monte l'appareil comme l'indique la figure, et l'on établit la communication avec la machine pneumatique. On ferme le robinet inférieur  $r$ , on ouvre  $p$  et  $q$ , et l'on fait le vide jusqu'à ce que le mercure de l'éprouvette reste stationnaire. On ouvre  $r$ , et on le referme dès que le mercure apparaît dans le bas du vase A. On fait de nouveau le vide, on ouvre  $r$ , et on laisse monter le mercure jusqu'à une hauteur voisine de la hauteur barométrique. On ferme le robinet  $r$ , et l'on rend l'air dans le haut du tube, en tournant à cet effet l'éprouvette de la machine pneumatique, pour soumettre le mercure renfermé dans le tube et dans le vase à une pression de 2 atmosphères; puis on ferme les robinets  $p$  et  $q$ . — On dévisse le bec effilé  $a$ , ainsi que l'œuf plein de mercure avec ses deux chapeaux, en ayant soin de ne pas poser les mains sur le verre, et l'on pèse l'œuf sur un chevalet en fer placé sur l'un des plateaux d'une ba-