

Le dégagement des bulles au moment où l'on verse la matière est tout à fait caractéristique. Ces bulles ne peuvent évidemment provenir que de la poudre. Si elles étaient formées de l'air atmosphérique adhérent à la surface des grains, le niveau de l'alcool s'abaisserait au lieu de monter, et il en serait de même si l'alcool pénétrait dans les grains en chassant l'air qu'ils renferment. Mais on peut se demander si ces bulles ne proviendraient pas de l'air atmosphérique condensé par le charbon de la poudre : l'introduction de l'alcool en chasserait successivement l'air condensé à plusieurs degrés, et il ne resterait dans les pores, au bout d'un certain temps, que de l'air au premier degré de condensation. Cette interprétation est infirmée par ce fait que, d'après les expériences de Heeren, le phénomène en question se reproduit parfaitement avec de la poudre chauffée immédiatement avant l'épreuve et débarrassée de l'air qu'elle renferme sous la cloche d'une pompe pneumatique ; comme d'ailleurs la condensation des gaz par le charbon ne se fait que progressivement, la poudre n'a pu absorber une quantité d'air notable dans l'intervalle des deux opérations. — On arriverait à des conclusions analogues, si l'on considérait les bulles comme composées de gaz hydrogène.

Quant à l'accroissement de volume de la liqueur, il semble qu'on ne puisse l'expliquer que par l'élévation de la température résultant du contact de l'alcool avec le charbon et avec le soufre. Si, en effet, on humecte du charbon ou du soufre avec de l'alcool, il se produit, comme l'a montré Pouillet, une élévation de température de  $1^{\circ},270$  pour le charbon, et de  $0^{\circ},173$  pour le soufre, d'où résulte, pour une poudre contenant les deux corps en proportions égales, une élévation totale de  $1^{\circ},443$  : ce chiffre concorde bien avec celui qu'avait indiqué Upmann. Mais cette explication n'est pas encore suffisante, car l'alcool, ayant à  $12^{\circ},5$  un poids spécifique de  $0,808$ , ne reçoit, entre  $10$  et  $15^{\circ}$ , pour une élévation totale de température de  $1^{\circ},25$ , qu'un accroissement relatif de volume égal à  $0,001313$  du volume occupé à  $10^{\circ}$ . — On peut encore chercher la cause de cette augmentation de volume dans une absorption de vapeur d'eau par l'alcool.

d) Procédé de Heeren.

Heeren a essayé d'éliminer les causes d'erreur résultant de l'emploi de l'alcool en opérant de la manière suivante.

On fait l'essai dans un flacon bouché à l'émeri, d'une capacité de  $33^{\text{cc}}$  environ, portant latéralement un trait de repère ; on détermine une fois pour toutes le poids du flacon rempli d'alcool absolu à la température de  $21^{\circ},25$ .

La poudre soumise à l'épreuve, placée dans un tube de verre large et court ou dans une petite capsule de porcelaine, est chauffée pendant quelques heures au bain de sable à la température de  $50$  à  $62^{\circ}$  ; on la met ensuite dans un vase rempli de sable chaud et l'on porte le tout sous le récipient de la pompe à air ; puis on pèse rapidement, et l'on verse la poudre dans le flacon, qu'on remplit d'alcool jusqu'à moitié. On porte le flacon sous le récipient de la pompe à air, et l'on fait le vide tant qu'il se dégage des bulles d'air de l'intérieur des grains : l'alcool entre alors en ébullition, en donnant naissance à de grosses bulles de vapeur facilement reconnaissables. Quand l'air contenu dans les grains a été entièrement chassé, on les abandonne à eux-mêmes pendant 1 heure environ, pour laisser l'alcool s'infiltrer dans les pores ; puis on remplit le flacon d'alcool jusqu'au bord, et on le suspend pendant 1 heure dans un vase contenant de l'eau à  $21^{\circ},25$ . On retire le flacon, on ajoute un peu d'alcool, dans le cas où quelques bulles d'air se seraient encore dégagées, on fait rapidement sécher les parois extérieures et l'on pèse. On décante l'alcool avec précaution, et l'on verse la poudre sur un double de papier à filtre, sur lequel on la retourne à l'aide d'un couteau, jusqu'à ce qu'elle ne soit plus que fortement humide. On la verse alors dans un petit flacon cylindrique, formé d'un large tube de verre, muni d'un fond plat, à bords rodés et hermétiquement fermé par une plaque de verre également rodée. Pour se débarrasser de l'alcool qui mouille la surface des grains, on coupe une bande de papier à filtre pouvant s'introduire facilement dans le flacon, on bouche celui-ci avec le pouce ou mieux avec une plaque de verre, et l'on agite assez longtemps pour sécher la surface extérieure des grains, ce qu'on reconnaît soit à la loupe, soit à ce signe que la poudre n'adhère plus aux parois du verre ni au papier. On pèse enfin la poudre, dont les pores sont complètement imprégnés d'alcool, et l'on a tous les éléments nécessaires pour le calcul des poids spécifiques relatif et absolu.

Soient, en effet :

$\alpha$  le poids du flacon rempli d'alcool,

- $\beta$  le poids de la poudre séchée,  
 $\gamma$  le poids de la poudre imprégnée d'alcool,  
 $\delta$  le poids du flacon rempli d'alcool et de poudre imprégnée d'alcool,  
 $\varepsilon$  le poids spécifique de l'alcool,  
 $x$  le poids spécifique relatif de la poudre;

on démontre que l'on a la formule :

$$x = \frac{\beta \varepsilon}{\alpha + \gamma - \delta}$$

On en déduit facilement le poids spécifique absolu.

D'après Heeren, une même espèce de poudre a donné les résultats suivants :

NUMÉRO de l'expérience.	POIDS SPÉCIFIQUE des grains, $\gamma$ compris les pores.	POIDS SPÉCIFIQUE de la matière, non compris les pores.
1	1,523	1,969
2	1,526	1,983
3	1,524	1,972
4	1,529	1,969
5	1,534	1,986
Moyenne	1,527	1,976

On voit que les pores occupent 22,7 p. 100 du volume des grains. La même poudre, essayée à Spandau par un expérimentateur soigneux et habile, a donné, comme moyenne de 5 épreuves successives, un poids spécifique relatif de 1,5592.

La méthode que nous venons d'exposer étant trop longue pour des épreuves courantes, Heeren a proposé un mode d'opérations applicable dans tous les pays où les différentes poudres ont le même dosage, comme, par exemple, en Prusse et en Angleterre. Dans ce cas, le poids spécifique absolu reste constant. On le détermine une fois pour toutes, et le procédé se réduit à saturer d'alcool un poids de poudre connu et à mesurer l'augmentation de poids correspondante, que nous désignerons par  $\gamma$ . Si l'on suppose connu le

poids spécifique absolu  $\omega$  de la matière, on aura :

$$x = \frac{\beta \varepsilon \omega}{\beta \varepsilon + \omega \gamma}$$

e) Résultats généraux.

Heeren a vérifié l'exactitude de sa méthode par les épreuves suivantes. De la poudre à canon, pulvérisée en grains fins et arrosée de 8 p. 100 d'eau, fut pressée dans une matrice en fer et séchée. Un fragment de la galette fut pesé, chauffé légèrement et enduit d'acide stéarique fondu : la densité, prise dans l'eau par la méthode ordinaire, fut trouvée de 1,470. Un autre fragment fut grené en poudre à canon, épousseté et soumis à l'épreuve de densité par le procédé de Heeren : on obtint ainsi 1,480 et 1,455, soit, en moyenne, 1,467. — Une autre galette, plus fortement pressée et enduite de vernis, accusait dans l'eau une densité de 1,579 : elle donna, par la méthode de saturation, 1,572 et 1,580, soit, en moyenne, 1,576.

Si l'on rapproche ces chiffres de ceux que nous avons précédemment indiqués (d), on reconnaîtra que l'on touche de bien près à la solution rigoureuse du problème qui nous occupe. En prenant les densités des deux galettes dont nous venons de parler par l'ancien procédé (a), on trouve 1,657 et 1,746, au lieu de 1,467 et 1,576.

Des expériences ultérieures ont donné les résultats suivants :

ESPÈCE DE POUDRE.	POIDS SPÉCIFIQUE RELATIF	
	Procédé de saturation. (d)	Procédé de versement. (a)
Poudre à canon, de Waltham-Abbey (28 février 1850).	1,556	1,715
Poudre à canon, de Waltham-Abbey (fabricat. anc.).	1,524	1,617
Poudre à canon, de Bomlitz (Hanovre) . . . . .	1,401	1,568
Poudre à canon, de Aerzen (Hanovre) . . . . .	1,470	1,520
Poudre à canon de Champy, poudrerie inconnue . . . . .	1,440	1,568

Pour mettre en évidence les différents degrés de densité de ces poudres, Heeren a calculé, pour chacune d'elles, le rapport du volume des pores remplis d'air au volume total des grains et au volume de la matière solide. Il a ainsi formé le tableau suivant :

ESPÈCE DE POUDRE.	VOLUME DES PORES	
	Volume total des grains = 100.	Volume de la matière solide = 100.
Poudre à canon, de Waltham-Abbey (28 février 1850).	22,6	29,2
Poudre à canon, de Waltham-Abbey (fabricat. anc.).	24,1	31,8
Poudre à canon, de Bomlitz. . . . .	30,3	43,4
Poudre à canon, de Aerzen. . . . .	26,9	36,8
Poudre à canon de Champy, poudrerie inconnue. . .	28,3	39,4

On a cherché à substituer à l'alcool l'essence de térébenthine (p. 394) et des huiles grasses fixes, sans pouvoir atteindre la précision du procédé de Heeren. Mais cette précision est encore dépassée par la méthode du général Otto.

#### F. Densité par la méthode hydrostatique.

Le principe du procédé d'Otto consiste à recouvrir la galette d'un enduit destiné à empêcher le contact immédiat de la galette et de la dissolution employée, et se prêtant, en outre, à une détermination rigoureuse de son poids et de son volume. A la suite d'une série d'essais, le collodion a paru satisfaire à ces deux conditions. Le fragment de galette soumis à l'essai est pesé et enduit de collodion. On détermine le poids spécifique de cet enduit en revêtant d'un enduit semblable une plaque de verre dépoli de poids connu, qu'on fait sécher et qu'on pèse dans l'eau distillée. Si donc on pèse dans l'air atmosphérique la galette avec son enduit, la différence donnera le poids de l'enduit de collodion, et, si on la pèse ensuite dans l'eau distillée, on en déduira le poids spécifique cherché.

Voici le détail des opérations :

Pour revêtir la galette d'un enduit imperméable à l'eau, on la fait sécher avec précaution, on la pèse et on la chauffe, puis on passe 20 couches de collodion additionné d'un peu de vernis à l'huile (40 gouttes de vernis pour 8<sup>es</sup> de collodion tel qu'on le trouve dans les pharmacies) ; ce vernis a pour but d'assurer l'adhérence de l'enduit à la galette, et de prévenir les déchirures qui donneraient passage à l'eau lors de la prise de densité. On passe chacune des couches dès que la précédente est sèche; on ne doit, sous aucun

prétexte, approcher la galette d'une source de chaleur quelconque pour accélérer le séchage, car il se produirait des boursouffures ou des bulles dans l'enduit même, ce qui détruirait toute la précision du procédé. Cette opération terminée, la galette est de nouveau pesée, d'abord dans l'air, puis dans l'eau distillée.

Si l'on désigne par :

P le poids de la galette non enduite de collodion,

P' le poids de la galette enduite de collodion,

Q le poids inconnu de la galette sans enduit et dans l'eau,

Q' le poids de la galette enduite de collodion et dans l'eau,

S le poids spécifique de l'enduit de collodion,

G le poids spécifique cherché de la galette,

on aura :

$$P - Q = P' - Q' - \frac{P' - P}{S},$$

et :

$$G = \frac{P}{P - Q}$$

Pour déterminer le poids spécifique S de l'enduit, on pèse une plaque de verre dépoli, d'environ 50 à 65<sup>es</sup>, d'abord dans l'air, puis dans l'eau; on la sèche avec précaution, et on la revêt, comme précédemment, d'un enduit de collodion additionné de vernis à l'huile; on la pèse de nouveau dans l'air, puis dans l'eau. Si l'on désigne par L, L', W, W' les quantités analogues à P, P', Q, Q', L' - L sera le poids de l'enduit, et L' - L - (W' - W) la perte de poids du collodion quand on le plonge dans l'eau. On aura donc :

$$S = \frac{L' - L}{L' - L - (W' - W)}.$$

Comme preuve de l'exactitude de cette méthode, nous rapporterons les expériences suivantes, exécutées sur un fragment de galette soigneusement choisi et partagé en 12 morceaux :

NUMÉROS des morceaux de galette.	POIDS de la galette sans enduit dans l'air.	POIDS de la galette avec enduit dans l'air.	POIDS de la galette avec enduit dans l'eau.	POIDS de l'enduit.	PERTE de poids de la galette avec enduit plongée dans l'eau.	POIDS spécifique relatif de la galette.
1	13 <sup>sr</sup> ,695	13 <sup>sr</sup> ,974	5 <sup>sr</sup> ,393	0 <sup>sr</sup> ,279	8 <sup>sr</sup> ,581	1,639 30
2	15 ,056	15 ,374	5 ,939	0 ,318	9 ,435	1,640 72
3	14 ,393	14 ,676	5 ,672	0 ,283	9 ,004	1,640 43
4	14 ,358	14 ,666	5 ,639	0 ,308	9 ,027	1,635 94
5	14 ,167	14 ,571	5 ,590	0 ,404	8 ,981	1,637 32
6	15 ,076	15 ,397	5 ,955	0 ,321	9 ,442	1,642 08

La moyenne des poids spécifiques de la galette est donc de 1,639 30, et l'écart moyen est inférieur à 0,00178. Le poids spécifique de l'enduit est de 1,23.

Ces expériences, exécutées le 5 novembre 1857, furent répétées avec les mêmes fragments le 2 décembre de la même année. Après la pesée hydrostatique, les morceaux furent séchés avec soin et soumis à l'épreuve de densité par immersion dans l'alcool; puis on enleva avec précaution l'enduit qui les recouvrait, et l'on prit de nouveau la densité à l'alcool. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau suivant, où sont rappelés ceux du 5 novembre précédent :

NUMÉROS des morceaux de galette.	POIDS SPÉCIFIQUE RELATIF			
	PAR LA MÉTHODE HYDROSTATIQUE.		PAR IMMERSION DANS L'ALCOOL.	
	5 novembre 1857.	2 décembre 1857.	Avec enduit.	Sans enduit.
1	II	III	IV	V
1	1,639 30	1,639 23	1,658 62	1,641 8
2	1,640 72	1,641 79	1,624 37	1,694 5
3	1,640 43	1,641 33	1,626 35	1,677 4
4	1,635 94	1,636 70	1,639 80	1,628 4
5	1,637 32	1,638 88	1,633 15	1,722 5
6	1,642 08	1,642 98	1,626 95	1,657 4
Moyennes	1,639 30	1,640 15	1,634 87	1,670 32

On voit que les moyennes des densités prises aux deux époques

par la méthode hydrostatique ne diffèrent que de 0,00085, quantité absolument négligeable. La colonne IV indique des densités un peu faibles, qui peuvent sans doute s'expliquer par l'adhérence de l'alcool aux parois du vase. Quant aux résultats de la colonne V, nous les avons suffisamment justifiés dans le paragraphe précédent (p. 401).

L'exactitude rigoureuse du procédé d'Otto le ferait naturellement choisir pour la détermination de la densité des poudres à gros grains, et en particulier des poudres prismatiques, cylindriques ou parallépipédiques; mais il exige beaucoup de temps et présente d'assez sérieuses difficultés de manipulation. Les densimètres à mercure, que nous allons décrire, sont en général d'un maniement plus facile et permettent d'opérer avec une grande rapidité. Ils donnent, en outre, une approximation très-suffisante pour les besoins de la pratique et, en tous cas, comparable à celle qui résulte de l'application du procédé de Heeren.

#### C. Densité au mercure.

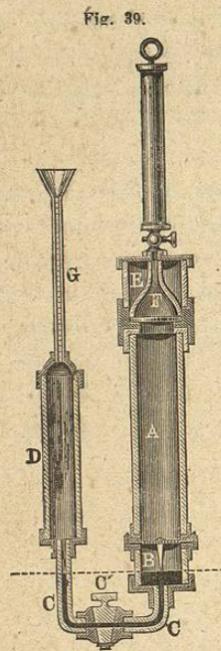
Nous décrivons cinq types principaux d'appareils :

- 1° Le densimètre Marchand, pour les poudres à grains ordinaires;
- 2° Le densimètre Bothe, pour les poudres à gros grains;
- 3° Le densimètre Hoffmann, destiné à déterminer la porosité relative de la poudre;
- 4° Le densimètre Ricq, pour toutes sortes de poudres;
- 5° Le densimètre Bianchi ou Mallet, avec œuf en verre, pour les poudres à grains ordinaires, ou en fonte, pour les poudres à gros grains.

##### a) Densimètre Marchand.

Un cylindre A (*fig. 39*), destiné à recevoir la poudre, est fermé à sa partie inférieure par un tamis en fils de fer à mailles très-serrées, capable de retenir les grains de poudre les plus fins. Ce tamis est solidement vissé sur le cylindre et porte en dessous une pointe d'ivoire qui pénètre dans le petit cylindre B, également vissé sur A. Le cylindre B est mis en communication avec le cylindre D, exactement calibré, au moyen du tube C qui est muni d'un robinet en acier C'. A la partie supérieure de D est vissé un tube de verre G, calibré et divisé en dixièmes de centimètre cube qu'on peut lire

facilement à  $1/50$  près. A la partie supérieure de A est vissée une garniture à laquelle est fixé le cylindre court E, qui communique avec A par le tube F, large par en bas et très-étroit par en haut, sur lequel se trouve un trait de repère horizontal. Entre le tube F et le cylindre A, on peut visser une plaque mince de bois de buis ou tendre un disque de peau de chamois. Sur le cylindre E est disposée une petite pompe à air.



On verse du mercure dans B par le tube G, jusqu'à ce que la pointe d'ivoire affleure le niveau. On pèse alors une quantité déterminée de mercure, et l'on en verse dans le tube G jusqu'au moment où, par l'action de la pompe à air, le cylindre A se trouve exactement rempli jusqu'au trait de repère du tube F, le niveau du mercure dans le tube C étant d'ailleurs le même que dans la première opération : on en déduit le volume de A et de la partie de B située au-dessus de la pointe d'ivoire. On ferme le robinet C', et l'on verse par G exactement la même quantité  $p$  de mercure en D : D étant plus petit que A, une partie du mercure monte dans G, jusqu'à une hauteur qu'on note exactement. — On dévisse E, on fait sortir le mercure, et l'on verse sur le tamis un poids de poudre suffisant pour remplir presque entièrement le cylindre A. On remonte l'appareil, on verse du mercure par G jusqu'à ce qu'il affleure exactement la pointe d'ivoire, puis on en ajoute la quantité  $p$  précédemment mesurée. On manœuvre alors la pompe à air pour faire monter lentement le mercure jusqu'au trait de repère du tube F, et l'on note le niveau du mercure dans le tube G. — On a ainsi, par ces deux lectures, la différence entre le volume de la poudre et celui du poids  $p$  de mercure.

Ce procédé n'est pas resté longtemps en usage, parce que l'appareil est trop compliqué et aussi trop fragile, à cause de la longueur du tube G. Pour que la différence de niveau du mercure soit sensible, il faut opérer sur  $33^{\text{e}}$  de poudre au moins. Il faut, en outre, pour chaque épreuve, amener exactement par deux fois le niveau

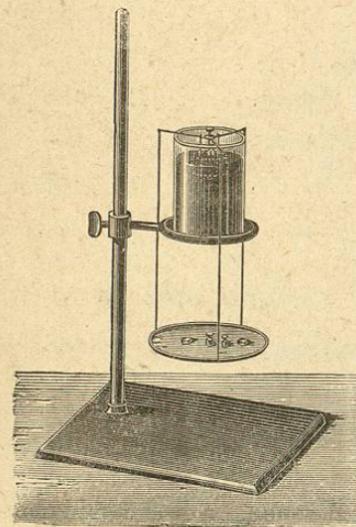
du mercure au contact de la pointe d'ivoire, et mesurer aussi par deux fois une même quantité de mercure dans un vase indépendant de l'appareil. A ces difficultés pratiques vient s'ajouter une cause d'erreur spéciale : le mercure qui s'élève dans le tube A par suite de la raréfaction de l'air est bien loin d'occuper tous les interstices compris entre les grains, ce qui s'explique, d'une part, par la forte cohésion du mercure et, de l'autre, par ce fait que l'air contenu dans les pores subit également l'action de la pompe. Il peut arriver, en effet, que le mercure se précipitant autour des grains dès le début de la raréfaction, l'air renfermé dans les pores ne commence à se dégager que lorsque les grains sont déjà plongés dans le liquide : cet air, ne pouvant se dégager entièrement à cause de la pression de la colonne qui le surmonte, produit alors un refoulement du mercure tout autour des grains.

#### b) Densimètre Bothe.

Le capitaine Bothe a construit récemment un appareil destiné à déterminer la densité des poudres à gros grains, et spécialement celle des poudres prismatiques ou cylindriques.

L'appareil (fig. 40) se compose essentiellement d'un support, d'un

Fig. 40.



vase de verre à parois épaisses et d'un plateau de balance. L'anneau métallique du support est destiné à recevoir le vase de verre. Ce dernier est rodé sur les bords et doit avoir une épaisseur suffisante pour résister à la pression du mercure qu'on y versera. Le plateau de balance est en acier. Les trois tiges qui le supportent sont reliées, à leur extrémité supérieure, à trois bras horizontaux qui concourent en un point où se trouve une aiguille mobile en acier; chacun d'eux porte également, dans le voisinage de l'aiguille mobile, une aiguille en acier solidement vis-

sée. Les extrémités de ces trois dernières aiguilles étant dans un