

CHAPITRE II.

MESURE DES PRESSIONS.

Les gaz produits par la combustion d'une charge de poudre soit en vase clos, soit à l'intérieur d'une bouche à feu, développent une série de pressions éminemment variables avec la nature de la poudre et les conditions mêmes de l'expérience. Dans tous les cas, la pression atteint, dans les premiers instants de la combustion, un maximum plus ou moins élevé, pour décroître ensuite d'une manière plus ou moins rapide; cette dernière partie du phénomène résulte de la chute de température due au refroidissement par les parois, effet auquel vient s'ajouter, pour le tir dans une bouche à feu, le refroidissement dû à la détente résultant du déplacement du projectile. Si l'on prend pour abscisses les temps et pour ordonnées les pressions, les courbes ainsi obtenues seront caractéristiques des poudres correspondantes.

Mais le phénomène est loin de présenter, dans son ensemble, une succession de pressions continues et parfaitement régulières : les gaz produits paraissent, en effet, former de véritables tourbillons, d'autant plus comparables à ceux qui prennent naissance dans les masses liquides que la pression est plus élevée. Les différents filets gazeux sont, d'ailleurs, à des états de compression différents, d'où résultent des variations irrégulières extrêmement rapides; il arrive ainsi, surtout pour les poudres à combustion vive, que les gaz passent, comme des vagues perturbatrices des pressions, d'un bout de la charge à l'autre, et que cette fluctuation peut durer pendant tout le parcours du projectile à l'intérieur de l'âme. Le mouvement se communique donc au mobile, non par une pression continue

graduellement décroissante, mais par une série de chocs plus ou moins violents; et, si l'on cherche à représenter par une courbe la loi de variation des pressions avec le temps, on n'obtiendra de courbe régulière qu'en prenant une série de valeurs moyennes entre les résultats réels.

On peut se proposer de mesurer, soit les pressions développées au bout d'instant successifs déterminés, soit le maximum de la pression produite. Cette mesure peut s'effectuer à l'aide d'appareils dont le principe repose sur deux méthodes entièrement distinctes.

La pression développée à chaque instant par les gaz de la poudre, sur un élément de surface donné, est une véritable force, exprimable en kilogrammes et ne différant des forces que l'on considère habituellement que par sa grandeur et par l'extrême rapidité de ses variations. Or, il n'existe que deux méthodes pour mesurer une force :

1° La *méthode statique*, d'après laquelle on oppose à la force à mesurer une force variable, dont on connaît l'intensité et avec laquelle on cherche à lui faire équilibre : le type des appareils fondés sur cette méthode est la balance;

2° La *méthode dynamique*, d'après laquelle on laisse agir librement la force sur un corps pesant, dont elle détermine la mise en mouvement, et l'on déduit de la connaissance de ce mouvement celle de la force qui l'a produit : c'est ainsi qu'en astronomie on déduit de l'observation du cours des astres les lois de leurs attractions mutuelles (*).

Ces deux méthodes ont été alternativement appliquées à l'étude des pressions produites par les gaz de la poudre. Nous diviserons les appareils successivement imaginés pour la mesure des pressions en deux grandes catégories, suivant qu'ils se rapportent à la méthode statique ou à la méthode dynamique.

(*) Sébert, *loc. cit.*, p. 9.

§ I.

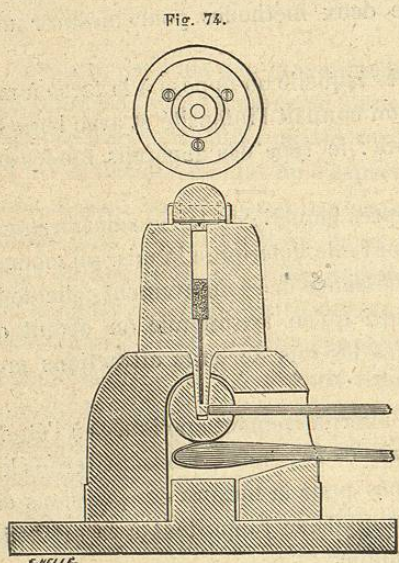
MÉTHODE STATIQUE.

I. APPAREIL DE RUMFORD (1792).

C'est à Rumford qu'on doit les premières expériences destinées à déterminer, par la méthode statique, la pression des gaz de la poudre; nous en avons précédemment discuté les résultats (p. 504).

a) Description de l'appareil.

L'appareil employé par Rumford consistait essentiellement en un petit canon en fer forgé (fig. 74), placé verticalement sur un support



en bronze qui reposait lui-même sur un disque en fer forgé; le tout était établi sur un bloc de pierre très-dure monté sur un lit de maçonnerie. La bouche du canon était fermée par un hémisphère solide en acier trempé de 29^{mm},46 de diamètre, sur lequel reposait le poids destiné à faire équilibre à la pression des gaz; ce poids était guidé dans le sens vertical par des moises horizontales, qui pouvaient glisser le long de poteaux encastrés dans le bloc de pierre et fixés par le haut à une pièce de charpente transversale. L'âme

du canon avait 6^{mm},35 de diamètre sur 54^{mm},10 de longueur, et se terminait par un canal inférieur très-étroit, qui n'avait pas plus de 1^{mm},78 de diamètre sur 43^{mm},56 de long et par lequel le feu était communiqué à la charge; du centre de la base du canon partait une saillie qui formait l'enveloppe de cette sorte de lumière.

Pour produire l'inflammation, on chauffait jusqu'au rouge un boulet de fer, évidé à la partie supérieure pour recevoir l'enveloppe de la lumière et muni d'un long manche en fer, qu'on introduisait à travers

le sens vertical par des moises horizontales, qui pouvaient glisser le long de poteaux encastrés dans le bloc de pierre et fixés par le haut à une pièce de charpente transversale. L'âme

du canon avait 6^{mm},35 de diamètre sur 54^{mm},10 de longueur, et se terminait par un canal inférieur très-étroit, qui n'avait pas plus de 1^{mm},78 de diamètre sur 43^{mm},56 de long et par lequel le feu était communiqué à la charge; du centre de la base du canon partait une saillie qui formait l'enveloppe de cette sorte de lumière.

Pour produire l'inflammation, on chauffait jusqu'au rouge un boulet de fer, évidé à la partie supérieure pour recevoir l'enveloppe de la lumière et muni d'un long manche en fer, qu'on introduisait à travers

une ouverture cylindrique pratiquée dans le support et qu'on maintenait sous l'enveloppe à l'aide d'un levier. Une rondelle de cuir gras, ayant exactement le diamètre de l'âme du canon avec 3^{mm},30 d'épaisseur, était introduite de force après la poudre, de façon à éviter toute fuite de gaz lorsque le poids n'était pas soulevé. Enfin, pour garantir la surface plane de l'hémisphère d'acier de la corrosion des gaz, on avait couvert la tranche de l'âme avec une plaque circulaire de cuir huilé de faible épaisseur, surmontée d'une plaque très-mince de cuivre battu.

b) Expériences de Rumford.

Les expériences furent faites dans la cour de l'arsenal de Munich. Le canon étant chargé, on mettait en place le boulet rouge: la chaleur, se communiquant à l'appendice, mettait bientôt le feu à la poudre, qui faisait explosion. Si l'effort exercé par les gaz sur la base du couvercle était inférieur aux poids antagonistes, les gaz restaient enfermés et l'on n'entendait aucun bruit; si, au contraire, cet effort était supérieur à ces poids, le couvercle était soulevé et les gaz s'échappaient. La méthode de Rumford consistait à faire varier, pour une charge de poudre donnée, les poids placés sur le couvercle, jusqu'à ce qu'ils fussent tout juste soulevés: on peut ainsi juger, par les chiffres relatifs à chaque série de tâtonnements, de l'approximation avec laquelle chaque détermination s'est trouvée effectuée.

Nous avons vu (p. 505) que les résultats des expériences de Rumford accusent, pour la loi des pressions, une série de discontinuités (Pl. VII, fig. 1) qui sont probablement dues au mode d'expérimentation adopté. Rumford évaluait, en outre, à 55 004 atmosphères au moins la pression développée par la poudre brûlant dans son propre volume, évaluation certainement exagérée et résultant d'une erreur de calcul (p. 504).

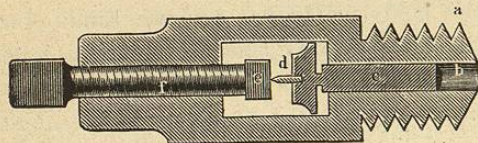
II. POINÇON RODMAN (1857).

Plus d'un demi-siècle s'écoula sans que les essais de mesure des pressions par la méthode statique fussent renouvelés. En 1857, le major Rodman, de l'artillerie des États-Unis, proposa un procédé qui, malgré son peu de précision, ne tarda pas à se répandre en raison de sa grande simplicité et de sa commodité d'emploi.

a) Description de l'appareil.

Le manomètre de Rodman (*fig. 75*) se compose d'une partie filetée

Fig. 75.



a, percée d'un trou *b* ayant environ $8^{\text{mm}},7$ de diamètre, à l'intérieur duquel se meut un piston *c*; ce dernier porte un poinçon ou couteau en acier *d*, de forme py-

ramidale et d'une dureté parfaitement déterminée. Vis-à-vis de la pointe du poinçon se trouve un disque *e* de cuivre bien pur, que l'on peut amener exactement au contact du couteau à l'aide de la vis *f*. L'appareil est vissé dans un canal percé normalement à travers la paroi de la bouche à feu et évasé vers l'extérieur; il reste toujours un certain intervalle entre la base inférieure du piston *c* et la surface intérieure de l'âme.

Lorsque les gaz de la poudre pressent sur le piston, le poinçon pénètre dans le disque de cuivre jusqu'à ce que la résistance du métal fasse équilibre à l'effort développé par les gaz : il produit ainsi une empreinte en forme de losange, dont la grandeur varie avec la pression développée. Pour évaluer la pression qui correspond à une grandeur d'empreinte déterminée, on place l'appareil sous une machine à éprouver la résistance des métaux, et l'on construit une table indiquant, pour un poinçon déterminé, les efforts nécessaires pour produire des empreintes de longueurs successivement croissantes; Rodman a d'ailleurs publié une table qui donne, pour une forme de poinçon dont il indique le tracé, les longueurs d'empreinte qui correspondent à des pressions variant depuis 45 jusqu'à 2 200^k : la plus petite empreinte a 3^{mm} de longueur et la plus grande 28^{mm}.

b) Expériences de Rodman.

La poudre employée dans les expériences de Rodman était de la poudre Dupont, fabriquée exprès en 1859, à grains de $2^{\text{mm}},5$ environ.

Rodman appliqua d'abord son appareil à l'étude des pressions développées sur la culasse, dans le tir d'un canon de 42, avec différents modes de chargement. Il obtint 4300^{atm} de pression avec

deux projectiles, et 3185^{atm} avec un seul. A égalité de poids du projectile, si l'on faisait varier la charge de 1^{k},5} à 6^{k}}, la pression s'élevait jusqu'à 3599^{atm}. Enfin, la charge restant égale à 2^{k},5}, si le poids du projectile variait de 17^{k},5} à 42^{k},5}, la pression passait de 1115^{atm} à 2754^{atm}. Rodman rechercha également les pressions des gaz en différents points de l'âme, dont la distance à la culasse variait, de 2 en 2 calibres, depuis 2 jusqu'à 14 calibres; il étudia l'effet de poudres diverses, et en particulier celui des poudres comprimées, ainsi que l'influence du vent du projectile et celle des sabots.

En 1860, Rodman étudia la résistance à l'éclatement de cylindres creux en fonte d'épaisseur variable, dans lesquels il faisait détoner la poudre, en notant, à l'aide de son appareil, la pression produite à chaque essai : les pressions ainsi observées s'élevèrent parfois au-dessus de 12300^{atm}.

Les expériences furent ensuite reprises avec un canon de 7 pouces, un de 9 pouces et un de 11 pouces; les pressions étaient mesurées simultanément en 7 points, échelonnés le long de l'âme à des distances régulières de 0^{m},35}. La plus grande pression ainsi observée était voisine de 6700^{atm}.

Enfin, Rodman répéta les expériences de Rumford sur la combustion de la poudre en vase clos, en se servant d'une sphère creuse en fonte très-épaisse, percée de deux trous taraudés, l'un disposé pour le poinçon, l'autre recevant un grain pour le canal de lumière; ce dernier livrait issue aux gaz, d'où résultait une grande infériorité sur la méthode de Rumford. Rodman étudia l'influence de la densité de chargement au moyen de sphères de capacité constante, et celle de la grandeur absolue de la charge au moyen de sphères de capacité variable. Il fut ainsi conduit à cette conclusion, que la pression développée est indépendante de la valeur absolue de la charge et ne dépend que du rapport de cette charge au volume de la chambre; nous reproduisons (Pl. VII, *fig. 1*) la courbe des pressions en fonction des densités de chargement telle qu'elle résulte de ces expériences. Rodman se servit, en outre, de sphères d'épaisseur variable qui lui permirent de fixer à 15 000^{atm} environ la limite inférieure de la pression développée par la poudre brûlant dans son propre volume.

c) Conclusion.

Le poinçon Rodman est un appareil d'une grande simplicité, qui peut se placer en un point quelconque de l'âme ou simplement

au fond de la chambre, sans rien changer aux conditions du tir. Mais, à côté de ces avantages, il présente de graves inconvénients.

D'abord, l'installation même dans les parois de la bouche à feu en paraît défectueuse : nous avons vu, en effet, que la base inférieure du piston n'affleure pas la surface intérieure de l'âme, de sorte que les molécules gazeuses acquièrent une vitesse propre, qui peut être considérable, avant d'agir sur le piston; il en résulte que les pressions indiquées sont plus considérables que les pressions réellement exercées à l'intérieur de l'âme.

D'un autre côté, le mode de tarage des disques de cuivre ne semble pas moins défectueux; il y a, en effet, à considérer la question de durée, laquelle est entièrement différente pour le tarage et pour l'expérience de tir. A force égale, plus la vitesse du poinçon sera grande, plus grande aussi sera la résistance du disque de cuivre, les molécules choquées ne pouvant pas s'écarter assez rapidement dans le cas d'une action brusque. En d'autres termes, le tarage de l'appareil se fait uniquement par la méthode statique, tandis que le fonctionnement met en jeu des phénomènes dynamiques, puisque le piston se déplace, sous l'action des gaz, d'une quantité égale à l'enfoncement. Ce déplacement de 4 ou 5^{mm}, tout faible qu'il est, n'est certainement pas négligeable; la masse de l'appareil déplacé intervient par l'effet de l'inertie, et d'une manière d'autant plus sensible que l'effort est plus considérable et l'action plus rapide. La mesure des pressions avec le poinçon Rodman n'est pas sans analogie, comme le remarque Sébert, avec l'opération qui consisterait à déterminer le poids d'un marteau en en frappant un coup sur le plateau d'une balance.

Enfin, le manomètre de Rodman, destiné, comme tous les manomètres à écrasement, à fournir l'indication de la pression maximum, ne donne en réalité qu'une sorte d'intégrale des pressions successivement développées, et cette intégrale ne peut être considérée comme représentant la pression maximum avec une approximation suffisante que dans des conditions de tir tout à fait spéciales.

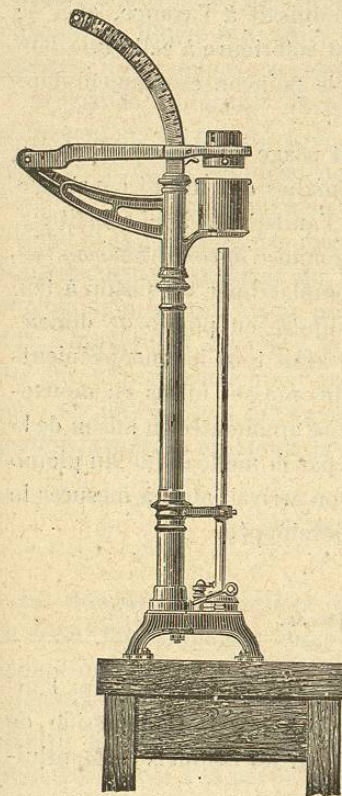
III. ÉPROUVETTE D'UCHATIUS (1862).

A peu près vers la même époque, en Autriche, le colonel d'Uchatius appliquait à l'étude des propriétés des poudres un appareil

fondé sur le même principe. Dès 1860, il avait employé à la mesure de la dureté comparative des métaux un manomètre dont le couteau présentait un tranchant courbe en forme d'arc de cercle; en 1862, il eut l'idée d'appliquer ce poinçon à la construction d'une éprouvette spéciale pour l'étude des poudres.

Cette éprouvette (fig. 76) se composait d'un canon de fusil rac-

Fig. 76.



courci, placé verticalement, dont la culasse était formée par le piston même du poinçon et qui était surmontée d'une masse de plomb, fixée à l'extrémité d'un levier disposé de manière à parcourir un arc gradué; ce levier, soulevé par le choc de la balle placée dans le canon, en mesurait la vitesse au moyen d'un tarage préalable, pendant que l'empreinte obtenue à l'aide du poinçon mesurait la pression développée. En appliquant le même système à un canon de fusil d'infanterie laissé entier, d'Uchatius avait également établi un appareil destiné à remplacer le fusil-pendule dans les poudreries; en même temps, il avait construit un appareil d'expérience, dans lequel les poinçons étaient placés latéralement en différents points de l'âme du fusil, et qui lui avait servi à étudier les effets de divers composés explosifs et l'influence des divers modes de chargement;

enfin, il avait indiqué la manière d'appliquer le même appareil sur les bouches à feu de gros calibre.

La forme courbe donnée au poinçon a l'avantage de produire des empreintes dont les longueurs croissent avec les pressions dans un rapport plus constant que celles des empreintes du poinçon pyramidal; mais cette forme est plus difficile à préparer et à reproduire identique à elle-même.

IV. APPAREIL RODMAN MODIFIÉ (1870).

C'est la Russie qui exécuta, en Europe, les premiers essais du poinçon Rodman appliqué au tir des canons et des fusils. Le général Gadolin proposa en même temps un mode d'emploi peu pratique, bien que théoriquement exact, et destiné à éviter les causes d'erreur dues au déplacement de l'appareil : on produisait à l'avance, avec le poinçon même, une entaille légèrement inférieure à celle que l'on s'attendait à observer, et l'on plaçait le poinçon exactement dans cette empreinte.

L'artillerie de la marine française fit usage du poinçon Rodman pour la première fois en 1868. Les anomalies qui furent constatées dans le fonctionnement de cet appareil l'amènèrent à lui substituer, dès 1870, un instrument connu sous le nom d'*appareil Rodman modifié*, dans lequel le poinçon était remplacé par un piston à tête plate produisant l'écrasement d'un cylindre en plomb de dimensions assez considérables. Cet appareil avait tous les inconvénients du poinçon Rodman sous le rapport des masses mises en mouvement, et ces inconvénients étaient encore augmentés en raison de la plus grande course permise au piston par la malléabilité du plomb et de la durée même de l'expérience : on arrivait ainsi à mesurer le travail produit plutôt que la pression développée.

V. APPAREIL DE MEUDON.

Le principe de l'appareil Rodman modifié se retrouve dans l'appareil de Meudon, actuellement employé par la Commission de Tarbes et successivement perfectionné par les colonels de Montluisant et de Reffye.

Dans cet appareil, on observe l'écoulement même d'une masse de plomb cylindrique qui, soumise à la pression des gaz, se trouve en quelque sorte moulée dans un canal de moindre diamètre placé derrière le cylindre. Ce canal était d'abord cylindrique; mais on dut bientôt chercher à créer une résistance à l'écoulement du plomb, afin d'établir un équilibre entre cette résistance et la pression des gaz et d'éviter ainsi les projections du métal. A cet effet, de Reffye employa un canal conique dont la petite base affleurait la surface

extérieure du tube, de sorte que la masse de plomb rencontrait une résistance graduellement croissante.

Les efforts nécessaires pour obtenir des cônes de plomb d'une longueur déterminée furent établis par des essais directs exécutés au Conservatoire des Arts et Métiers; il résulta de ces essais que, dans les limites de la pratique, cette longueur restait toujours proportionnelle à l'effort employé. Les formules de mécanique sur la déformation des corps solides paraissent d'ailleurs justifier cette conclusion. De Reffye et Pothier ont réussi, à l'aide de cet appareil, à mesurer les pressions exercées sur le culot du projectile.

La grande uniformité de résistance que le plomb présente à la déformation, la facilité avec laquelle on peut couler un grand nombre de petits cylindres de ce métal identiques et parfaitement homogènes, enfin la longueur relativement grande du cône que l'on obtient et la précision des mesures qui en résulte, tels semblent être les principaux avantages de l'appareil de Meudon. Toutefois, les objections que nous avons présentées pour l'appareil Rodman modifié s'appliquent *a fortiori* à cet instrument; la durée de l'action des gaz, vraisemblablement assez variable, a une influence très-sensible sur les résultats, et l'on ne peut déduire de la valeur de la déformation la mesure exacte de la force que si l'on connaît cette durée.

VI. MANOMÈTRE CRUSHER.

La Commission anglaise des substances explosives, instituée en 1868, fut également amenée à modifier le poinçon Rodman et adopta un nouvel appareil, dit *crusher* ou écraseur, proposé par le capitaine Noble qui, dès 1860, avait eu l'idée de mesurer l'effet dû à l'inertie des projectiles à l'aide de l'écrasement de petits cylindres en cuivre placés à la partie antérieure.

a) Description de l'appareil.

Le *crusher* ou *crusher-gauge* (fig. 77 et 78) se compose d'une vis creuse en acier, dont l'ouverture inférieure est munie d'un obturateur à vis mobile, permettant d'introduire dans la chambre CDEF de petits cylindres en cuivre B. La surface supérieure de ces cylindres repose sur l'enclume A, tandis que la surface inférieure s'appuie contre le piston mobile C', sur lequel agit le ressort *i*.