

sidérations suivantes : les premiers gaz développés par la combustion repoussent en arrière la masse restante de la charge ; les grains, séparés les uns des autres, sont ensuite plus aisément atteints par la flamme, et la combustion, par suite, est moins complète. Pour faciliter l'application du mode de chargement de M. Delvigne, on pourrait ménager au fond de l'âme une petite chambre d'un diamètre inférieur à celui de la gorgousse, et placer la lumière à l'avant de la charge ; mais cette méthode n'a pas passé dans la pratique.

— *Effets de la résistance de l'air.* La résistance de l'air tend, à chaque instant, à ralentir la vitesse des projectiles : on la regarde comme proportionnelle à la section maximum du mobile, faite par un plan perpendiculaire à la direction du mouvement, et à une puissance de la vitesse, dont on déterminera l'exposant. On a admis pendant longtemps que la résistance de l'air était proportionnelle au carré de la vitesse ; des expériences, exécutées à Metz en 1839 et 1840, ont montré que l'exposant 2 est trop faible ; la puissance $\frac{5}{2}$ de la vitesse paraît devoir être adoptée. Les expériences donnent, pour l'accélération négative due à la résistance de l'air, pour un boulet

plein en fer, $r = \frac{0,0002018}{3,7144 a} V^{\frac{5}{2}}$, a désignant le diamètre de ce boulet estimé en décimètres, et V sa vitesse évaluée en mètres par seconde.

Voici deux tables des vitesses d'un projectile à différentes distances :

Pour un boulet sphérique massif de 1 décimètre 89, dont la vitesse initiale était de 500 m. par seconde, la vitesse a été trouvée de :

Mètres.	Mètres.
484	à 50 de la pièce.
469	à 100
455	à 150
442	à 200
429	à 250
371	à 500
287	à 1,000
228	à 1,500
185	à 2,000

Pour un boulet creux de 2 décimètres 202 de diamètre, pesant 27 kilo., lancé avec une vitesse initiale de 550 m. par seconde, on a trouvé :

Mètres.	Mètres.
528	à 50 de la pièce.
507	à 100
487	à 150
468	à 200
450	à 250
374	à 500
271	à 1,000
206	à 1,500
161	à 2,000

— *Pénétration des projectiles sphériques dans les milieux solides.* Les expériences relatives aux pénétrations dans les milieux solides ne peuvent pas conduire à des formules d'une bien grande précision, parce que la résistance des milieux est difficile à apprécier, et se retrouve rarement la même dans les expériences successives. Le mobile, en pénétrant dans le milieu, y forme un vide terminé par une surface de révolution, dont les sections transversales décroissent depuis l'entrée jusqu'au fond, et la méridienne tourne sa convexité vers l'axe, excepté dans la partie où s'est arrêté le projectile. Dans la terre argileuse, le vide diffère peu d'un cône ; dans le plomb, il a la forme d'une tulipe, et le métal refoulé se relève en bourrelet autour de l'orifice. Dans les expériences faites à Metz, on a remarqué qu'il existait un rapport constant entre le volume du vide et la force vive du projectile à son entrée ; la valeur du rapport dépendait naturellement de la nature du milieu. Des considérations théoriques permettent de faire de cette remarque une loi générale. Voici une table des profondeurs auxquelles un boulet massif de 30 a pénétré dans des murs de diverses qualités :

VITESSE du boulet.	PÉNÉTRATION.		
	BONNE maçonnerie.	MÉDIOCRE.	BRIQUES.
mètres.	m. c.	m. c.	m. c.
500	0 72	0 90	1 21
450	0 64	0 80	1 07
400	0 56	0 70	0 93
300	0 39	0 50	0 65
150	0 13	0 16	0 22

Le vide produit dans la maçonnerie a une forme très-évasée ; le diamètre d'entrée est égal à quatre ou cinq fois le diamètre du projectile. Pour passer du boulet de 30, auquel se rapporte la table, à d'autres calibres, on peut regarder la pénétration comme proportionnelle au diamètre du boulet, toutes choses égales d'ailleurs. Dans la terre, la pénétration peut aller jusqu'à 5 m. ; dans le bois de chêne, elle approche de 2 m.

— *Projectiles creux.* Les projectiles creux sont en fonte de fer ; la chambre intérieure est une sphère concentrique à la surface extérieure. L'inflammation de la charge détermine la rupture de la fonte, et les débris du boulet sont lancés en tous sens. Quelquefois, la lumière reste fermée jusqu'au moment de la rupture ; c'est ce qui a lieu pour les boulets

creux munis de mécanismes percutants. Souvent, la lumière n'est bouchée que par une fusée, dont le canal est ouvert au moment où l'inflammation commence. Pour un obus de 22 centimètres de diamètre extérieur et de 2 1/2 centimètres d'épaisseur, la charge nécessaire pour déterminer la rupture est d'à peu près 630 grammes ; le nombre des fragments pesant plus de 100 grammes est de 20 à 25, et leur vitesse moyenne est de 150 m.

— *Trajectoire d'un boulet sphérique.* Si l'on ne tenait pas compte de la résistance de l'air, on trouverait, pour la trajectoire du boulet, une parabole contenue dans le plan vertical mené par la direction de la vitesse initiale, tangente à cette direction, ayant son axe vertical et son sommet à la hauteur dont devrait tomber un corps pour acquérir une vitesse égale à la composante verticale de la vitesse initiale. Dans les anciens traités, on supposait la résistance de l'air dirigée suivant la tangente à la trajectoire, et proportionnelle au carré de la vitesse (v. CHUTE DES CORPS, en tenant compte de la résistance de l'air) ; les formules déduites ainsi du calcul ne s'accordent pas tout à fait avec les résultats des expériences. La puissance $\frac{5}{2}$ de la vitesse paraît mieux convenir, comme nous l'avons déjà dit ; mais les formules analytiques auxquelles conduit cette hypothèse sont trop compliquées pour être pratiques, et n'ont d'ailleurs pas toute l'exactitude désirable. On a donc dû chercher à construire directement une formule empirique qui suivit de plus près les résultats des expériences. Si le mouvement avait lieu dans le vide, l'équation de la trajectoire, rapportée à la verticale du lieu et à l'horizontale contenue dans le plan de tir, serait

$$y = x \tan \alpha - \frac{gx^2}{2V^2 \cos^2 \alpha}$$

α désignant l'angle de la vitesse initiale V avec l'horizon, et g la gravité. Celle du mouvement dans l'air doit donc pouvoir se ramener à la forme

$$y = x \tan \alpha - \frac{gx^2}{2 \cos^2 \alpha} \left(\frac{1}{V^2} + \varphi(x) \right)$$

L'expérience prouve qu'on peut prendre $\varphi(x)$ égal à Kx ; et, pour déterminer la constante K , on a, en désignant par X la portée ou la distance du point de départ au point où le boulet repasse dans le même plan horizontal, la formule

$$0 = \tan \alpha - \frac{gX}{2 \cos^2 \alpha} \left(\frac{1}{V^2} + KX \right),$$

ou, plus simplement,

$$\frac{1}{V^2} + KX = \frac{\sin 2\alpha}{gX}$$

La trajectoire serait ainsi remplacée par une courbe du troisième degré fort simple. Le coefficient K doit être d'autant moindre que le boulet a plus de masse, et que la densité de l'air est plus faible ; on a donc été naturellement porté à le regarder comme proportionnel à $\frac{1}{ad^3}$, d désignant la densité de l'air, d celle du boulet et a le diamètre de ce boulet. Cela posé, voici quelques valeurs de K données par l'expérience, et multipliées par 10^6 pour qu'elles devinssent appréciables.

CANON DE 30, N° 3.

Longueur de l'âme 2 m. 250.

Diamètre 0 m. 1643.

Boulets massifs. . . diamètre 0 m. 1596.

Poudre du Ripault.

CHARGE du CANON.	VITESSE initiale du boulet.	ANGLE de départ.	PORTÉE moyenne.	VALEUR de 10^6 ad K.
8 kil.	415 m.	37° 47'	323	40,6
		1° 45' 19"	718	48,9
		5° 26' 18"	1,647	40,7
		10° 45' 56"	2,489	39,2
2 k. 5.	392 m.	39° 40'	307	42,9
		1° 44' 5"	981	42,8
		5° 25' 50"	1,594	39,7
		10° 17' 40"	2,234	47,5

L'extrême petitesse des variations relatives de adK paraît justifier complètement les prévisions ; les écarts pouvant être regardés comme dus aux anomalies des expériences. Ainsi, toutes les fois que l'angle α ne surpassait pas 10° , la valeur de K serait à peu près indépendante de cet angle. Cette conclusion est très-importante. Des expériences faites à Vincennes, sur des fusils d'infanterie, ont confirmé la même théorie. La quantité K , sensiblement constante tant que l'inclinaison de la bouche à feu ne surpassait pas 10° , croît avec cette inclinaison.

— *Déviation des projectiles sphériques.* La distance qui, à chaque instant, sépare le projectile de la trajectoire moyenne a reçu le nom de *déviation*. Cette déviation est *verticale*, *latérale* ou *longitudinale*. La déviation verticale est la quantité dont le projectile s'élève au-dessus de la trajectoire moyenne ou s'abaisse au-dessous ; la déviation latérale est la quantité dont, au point de chute, le projectile s'écarte du plan de tir, soit à droite, soit

à gauche ; enfin, la déviation longitudinale est la quantité dont la portée particulière que l'on considère diffère de la portée moyenne, soit en plus, soit en moins.

Outre les incertitudes relatives à la grandeur de la vitesse initiale, incertitudes qui pèsent sur les résultats fournis par les formules, mais qui ne constituent pas par elles-mêmes des causes de déviation proprement dites, puisqu'elles ne résident que dans de simples erreurs d'observation que l'on pourrait concevoir rectifiées, on attribue les déviations observées, d'abord à des inégalités dans la répartition de la masse totale du boulet à l'intérieur de la surface sphérique qui l'enveloppe ; en second lieu, à la résistance latérale que peut exercer l'air frottant contre la surface du projectile, par suite du mouvement giratoire dont il est toujours plus ou moins animé. Un boulet massif de 30, n° 1, animé d'une vitesse initiale de 485 m. par seconde, a donné, en moyenne, les déviations latérales suivantes :

mètres.	mètres.
à 600 de distance,	1 0 de déviation.
à 800	1 9
à 1,000	3 0
à 1,200	4 6
à 1,600	9 0
à 2,000	15 5
à 2,400	24 6

La déviation est un peu plus forte pour le boulet creux de même calibre.

— *Rupture des canons.* Chaque explosion, alors même que la limite de l'élasticité ne serait pas dépassée, produit une légère déformation permanente qui, en se répétant un grand nombre de fois, finit par amener la pièce à un état tel, qu'un plus long service doit la faire éclater. C'est dans le plan méridien passant par l'axe de la lumière que la rupture se fait le plus ordinairement. Une petite fente longitudinale interne se produit d'abord ; elle s'allonge et s'agrandit peu à peu, et finit par enlever à la pièce la force nécessaire pour résister à l'explosion. Le cercle passant par le centre de l'orifice de la lumière forme habituellement une seconde ligne de rupture. La partie antérieure de l'âme n'est généralement pas altérée. La destruction de la bouche à feu est assez rapide lorsque la gorgousse est poussée jusqu'au fond de l'âme, et qu'elle se trouve en contact immédiat avec le projectile. 400 coups à la charge de 5 kilo., et à boulets massifs, suffisent pour déterminer la rupture d'un canon de 30, n° 1. Mais il n'en est plus de même lorsqu'un valet d'étoupe, d'algue ou de foin est placé entre la gorgousse et le projectile. Des bouches à feu ainsi chargées ont pu supporter plus de 2,000 coups ; mais les lumières avaient acquis des dimensions énormes, et des fentes de 30 à 40 millimètres de profondeur s'étaient déjà formées à l'intérieur. Les expériences qui viennent d'être rapportées ont indiqué la nécessité de renforcer la pièce dans les environs de la lumière ; c'est ce que l'on fait maintenant. On écarte une autre chance de rupture en raccourcissant le plan du fond de l'âme et la partie cylindrique par un quart de cercle d'un rayon égal au quart du calibre.

II. — *CANONS RAYÉS.* Les rotations irrégulières des projectiles sphériques amènent des déviations assez grandes pour rendre le tir fort incertain. Des boulets oblongs devaient présenter de grands avantages, pourvu qu'on pût en maintenir l'axe dans la direction du mouvement. Pour assurer cette fixité de l'axe, il suffisait, d'après une théorie connue de la dynamique des corps solides, d'imprimer aux projectiles un mouvement rapide de rotation autour de cet axe, dirigé, au départ, dans le sens du mouvement de translation. On sait, en effet, qu'un corps qui n'est soumis à l'action d'aucune force tourne à chaque instant autour du diamètre de son ellipsoïde central, dont l'extrémité est en contact avec un plan invariable de direction, et dont la distance au centre de gravité reste constante. Ce plan n'est autre que le plan du maximum des aires. Si l'axe de rotation du corps est, à un instant, l'un des axes principaux d'inertie de son ellipsoïde central, la rotation persiste indéfiniment autour de cet axe, qui reste parallèle à lui-même dans le mouvement. Si l'ellipsoïde central du corps est de révolution autour de l'axe considéré, et qu'un couple perturbateur vienne à agir sur lui, l'axe instantané de rotation prend une direction un peu oblique par rapport à l'axe de révolution ; mais l'angle des deux directions est d'autant moindre, pour une même action perturbatrice, que la rotation initiale du corps autour de son axe était plus rapide. A partir du moment où l'axe de la rotation a cessé de coïncider avec l'axe de figure, celui-ci tourne d'un mouvement lent autour de la perpendiculaire au nouveau plan du maximum des aires, en même temps que la rotation rapide continue à se faire autour de lui. D'ailleurs, le nouveau plan du maximum des aires fait, avec l'ancien, un angle d'autant moindre que la vitesse initiale de rotation était plus grande. La grandeur de la rotation initiale assure donc la fixité de l'axe de rotation. Dans la pratique, le moment résultant des quantités de mouvement du boulet par rapport à son axe de figure, axe de la rotation initiale, est toujours assez grand pour que les couples perturbateurs, qui proviennent de la résistance de l'air, ne produisent qu'une

déviation très-petite dans la direction de l'axe de la rotation.

Le corps du boulet est cylindrique, la partie antérieure a une forme ogivale ; le rapport de la longueur totale au diamètre est un peu supérieur à 2 ; le poids est à peu près double de celui du boulet sphérique qui aurait même diamètre. Le mouvement de rotation est imprimé par des *tenons* qui font saillie sur la partie cylindrique du boulet, et qui s'engagent dans des rayures hélicoïdales pratiquées à l'intérieur de l'âme de la pièce. Les tenons sont faits d'un métal assez mou pour que les rayures ne puissent pas être entamées ; on y emploie le zinc ou le plomb, suivant que la bouche à feu est en fonte de fer ou en bronze. Les rayures ne sont encore que longitudinales au fond de l'âme ; elles prennent ensuite, par rapport à l'axe, une inclinaison croissante jusqu'à l'extrémité de la volée. Cette disposition était nécessaire pour que le mouvement de translation pût commencer dès les premiers instants de l'inflammation de la poudre, et que la pièce, par suite, n'éprouvât pas de trop grandes pressions intérieures. Chaque tenon reçoit, de la part de la rayure dans laquelle il est engagé, des réactions obliques qui, transportées au centre de gravité, donneraient lieu à la naissance de couples dont les axes seraient inclinés sur l'axe de figure du boulet, et qui, par conséquent, tendraient à produire des mouvements de rotation différents de celui qu'on veut principalement obtenir. On évite ces inconvénients : 1° en disposant les rayures symétriquement autour de l'axe, de façon que les réactions obliques se neutralisent le plus possible ; 2° en fixant les tenons dans le plan de la section menée perpendiculairement à l'axe par le centre de gravité du boulet. La composante, perpendiculaire à l'axe, de la réaction de la rayure se trouve ainsi passer par le centre de gravité, et ne produit plus de couple perturbateur.

Le mobile une fois lancé, si la pesanteur agissait seule, le centre de gravité décrirait sa parabole, et l'axe de rotation se transporterait parallèlement à lui-même ; mais la résistance de l'air produit des effets qu'il est possible de préciser. Cette résistance, qui, à l'origine, était dirigée suivant la tangente à la trajectoire, fait avec elle un angle de plus en plus grand, à mesure que le boulet a parcouru de plus grandes distances ; d'ailleurs, elle ne passe généralement pas par le centre de gravité. Il en résulte que l'axe prend un mouvement de précession, en même temps qu'il s'élève ou s'abaisse, suivant que la résultante générale de la résistance passe en avant ou en arrière du centre de gravité.

— *Trajectoire des boulets ogivaux.* Pour connaître la trajectoire du projectile, on peut chercher ses deux projections sur le plan de tir et sur le plan horizontal. Il est naturel d'examiner si, de même que pour les projectiles sphériques, la projection sur le plan de tir de la trajectoire ne serait pas encore représentée avec une approximation suffisante par l'équation du troisième degré

$$y = x \tan \alpha - \frac{gx^2}{2 \cos^2 \alpha} \left(\frac{1}{V^2} + Kx \right),$$

α désignant, comme précédemment, l'angle de départ, V la vitesse initiale et g l'intensité de la pesanteur. L'expérience donne, pour $10^6 K$, une valeur moyenne inférieure à 10, tandis que, pour les boulets sphériques, la valeur de la même quantité était quatre fois plus grande. La résistance de l'air, si du moins on en mesurait les effets par la grandeur du coefficient K , serait donc quatre fois moindre sur les boulets modernes que sur les anciens. On a remarqué d'ailleurs que la valeur de K varie à peu près en raison inverse de la vitesse V . Quant à ce qui concerne la projection horizontale de la trajectoire, il importe de rapporter en premier lieu que la déviation du plan de tir se fait toujours du côté vers lequel tourne la partie supérieure du projectile, à gauche dans l'artillerie navale, à droite dans l'artillerie de terre, parce qu'on a adopté dans les deux armes des sens différents pour les rayures des canons. Ainsi, tandis que les boulets sphériques déviaient du plan de tir, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, sans qu'on pût rien prévoir à l'avance à cet égard, au contraire, le sens de la déviation peut toujours être prévu dans le tir moderne. Les déviations sont d'ailleurs moins fortes, et, de plus, elles paraissent indépendantes de l'inclinaison de la pièce.

III. — *PENDULE BALISTIQUE.* Le pendule balistique se compose essentiellement d'un récepteur cylindrique creux, terminé par une culasse en forme de mortier. L'âme de cette sorte de mortier est bourrée de matières molles, au milieu desquelles le projectile doit se loger. Le récepteur est suspendu horizontalement au moyen de quatre tiges en acier qui se réunissent à un axe supérieur, supporté par des coussinets à l'aide de tourillons. L'appareil entier forme une sorte de pendule pouvant osciller autour de l'axe supérieur, qui est fixé horizontalement dans une direction perpendiculaire à celle des génératrices du cylindre. Le projectile est lancé horizontalement dans l'intérieur de l'âme du récepteur, et autant que possible suivant son axe. Les matières molles l'y retiennent.

Lorsque le pendule s'écarte de sa position d'équilibre, un taquet placé à la partie inférieure pousse un index sur une rainure circu-