BALISTIQUE INTÉRIEURE.

10

ÉTUDE

SUR LES EFFETS

DES POUDRES VIVES ET DES POUDRES LENTES

DANS LES BOUCHES A FEU RAYÉES

PAR

F.-C.-E. WYNANTS,

CAPITAINE DU GÉNIE.

BRUXELLES,

IMPRIMERIE DE B.-J. VAN DOOREN, CHAUSSÉE DE WAVRE, 25.

1868.

à Mr J Vignoles FRS
Comme bien affectueux souv

ÉTUDE

SUR LES EFFETS

DES POUDRES VIVES ET DES POUDRES LENTES

DANS LES BOUCHES A FEU RAYÉES.

EXTRAIT DES ANNALES DES TRAVAUX PUBLICS DE BELGIQUE, T. XXII.

BALISTIQUE INTÉRIEURE.

ÉTUDE

SUR LES EFFETS

DES POUDRES VIVES ET DES POUDRES LENTES

DANS LES BOUCHES A FEU RAYÉES

PAR

F.-C.-E. WYNANTS,

CAPITAINE DU GÉNIE.

BRUXELLES,

IMPRIMERIE DE B.-J. VAN DOOREN, CHAUSSÉE DE WAVRE, 25.

1865.

ÉTUDE

SUR LES EFFETS

DES POUDRES VIVES ET DES POUDRES LENTES

DANS LES BOUCHES A FEU RAYÉES.

Bien des recherches ont été faites pour déterminer les efforts qu'exercent sur les projectiles et les parois des bouches à feu, les gaz développés par la déflagration des charges, et cependant on n'a pu formuler encore avec une exactitude suffisante les lois qui régissent le mode d'action des poudres, lorsque les gaz qu'elles produisent ne peuvent librement se détendre. C'est qu'indépendamment des difficultés analytiques du problème, on manque de données positives sur les circonstances de l'inflammation et de la combustion des charges de poudre contenues dans des espaces limités. Les difficultés et les dangers des expériences résultant de la grande vivacité des poudres ordinaires et l'impossibilité presque absolue d'apprécier des différences en temps extrêmement petites, ont presque toujours empêché les observateurs de tenir un compte suffisant de ces différences.

Ainsi, dans son traité si remarquable d'ailleurs sur les propriétés et les effets de la poudre, Piobert admet que la rapidité de combustion est constante et indépendante de la température et de la tension des gaz dans la capacité où cette combustion s'opère. Une expérience bien simple prouve que cette hypothèse n'est pas conforme à la vérité. Si dans un tube résistant fermé à l'une de ses extrémités, on tasse une certaine quantité de pulvérin, de manière à lui donner la densité de la poudre, il brûle, lorsqu'on l'enflamme, par couches régulières et sa combustion s'achève dans un temps qu'il est facile de mesurer. Si l'on charge le tube de la même façon, mais qu'on fixe solidement sur son orifice un obturateur percé d'une lumière étroite, la déflagration s'accomplit avec explosion dans un temps infiniment plus court. L'accroissement de tension résultant de l'obstacle apporté à l'échappement du gaz, a donc augmenté considérablement la rapidité de combustion. L'accélération de la vitesse de combustion se manifeste plus clairement encore lorsqu'on répète cette expérience en employant au lieu de pulvérin des poudres lentes grainées, telles que les poudres barytiques : ces poudres fusent lorsque l'orifice du tube reste ouvert ou que l'obturateur est percé d'une lumière d'un diamètre un peu grand, tandis qu'elles font explosion dès que la lumière est assez étroite pour que les gaz de la poudre puissent développer dans le tube une tension suffisante. Dans le phénomène du *long feu*, en général, on constate encore qu'une combustion lente d'abord, augmente de rapidité avec la tension.

L'hypothèse de l'invariabilité de la vitesse de combustion n'est donc pas admissible et ne peut être prise comme point de départ d'une théorie sur les effets des poudres.

Si l'on suppose une charge de poudre composée de grains sphériques, homogènes, simultanément enflammés à l'air libre, on comprend que les quantités de gaz produites par la combustion de cette charge, dans des intervalles de temps égaux, iront en décroissant, parce que la poudre doit brûler par couches d'épaisseur égale dans des temps égaux, et que les surfaces des grains en ignition diminueront avec les diamètres de ces grains, et cela en raison des carrés de ces diamètres. Mais, dans une pièce d'artillerie, comme les gaz retenus par le projectile ne peuvent se dissiper à mesure qu'ils se produisent, la pression et la température augmenteront dans l'espace occupé par la poudre, et la rapidité de combustion cessera d'être uniforme ; elle croîtra avec la pression et la température : celles-ci varieront par le déplacement du projectile ; déplacement qui à son tour s'effectuera en vertu de la pression du gaz de la poudre ; série de phénomènes dépendant les uns des autres et formant une chaîne dont on ne peut isoler un seul anneau.

On sait pourtant que la rapidité de combustion de la poudre brûlant sous pression est très-grande, et l'on conçoit que la force de pression agissant sur le projectile puisse aller en croissant à mesure que la poudre se combure, jusqu'à ce que le projectile ait acquis dans l'âme de la pièce une vitesse qui dépasse celle avec laquelle les gaz se produisent. Si l'on représentait par une courbe l'intensité variable de l'action exercée sur le projectile et les parois de la bouche à feu, que l'on prît à cet effet pour abscisses les distances, à partir de l'origine du mouvement, des points successivement occupés par le projectile, et pour ordonnées les pressions exercées sur le projectile correspondantes à ces points, cette courbe aurait une ordonnée maxima pour le point du trajet pour lequel la vitesse de translation serait égale à la rapidité de combustion. En effet, tant que le projectile n'aurait pas atteint ce point, les gaz de la poudre affluant plus vite que l'espace en arrière du projectile n'augmenterait, la pression croîtrait ; tandis qu'une fois ce point dépassé, l'espace augmentant plus vite que les gaz n'affluent, la pression diminuerait. La courbe exprimant le mode de variation des pressions se composerait donc de deux parties ou branches : l'une ascendante, depuis la position initiale du projectile jusqu'au maximum; l'autre descendante à partir du maximum jusqu'à hauteur de la bouche de la pièce. Le travail total fourni au projectile se composant de la somme des pressions ou impulsions successives qu'il aurait reçues, serait représenté par la surface comprise entre l'axe des abscisses et la courbe, depuis l'origine du mouvement jusqu'à la bouche de la pièce.

Les projectiles ayant un poids assez grand, surtout pour les gros calibres, et conséquemment une masse considérable, présentent à l'effort des gaz une résistance d'inertie qui ne peut être que progressivement vaincue. Si la poudre est très vive elle aura produit une grande quantité de gaz, avant que le projectile se soit sensiblement déplacé; dès lors la pression des gaz et les ordonnées qui la figurent croîtront très vite, et la première branche de la courbe dont nous avons parlé plus haut, aura une direction rapidement ascendante. De plus, en vertu de cette action violente, le projectile acquerra promptement une vitesse considérable, de sorte que le point maximum de la courbe des tensions sera assez rapproché de l'origine du mouvement. Si, au contraire, la poudre brûle plus lentement, les accroissements de pression seront moins grands, la direction de la première branche de la courbe, moins rapidement ascendante, et l'ordonnée maxima plus éloignée de l'origine (1).

(1) Comme les espaces parcourus et les vitesses acquises dépendent de l'intensité des pressions, on pourrait croire que pour les poudres lentes les pressions augmentant lentement, les déplacements du projectile seront aussi moins considérables; de sorte que les abscisses variant peu comme les ordonnées, la courbe des tensions ne changerait pas de forme, et les ordonnées ne seraient pas déplacées. Démontrons qu'il ne peut en être ainsi.

Sans rien préjuger, quant à la nature de la fonction qui exprimerait la loi du mouvement du projectile, nous savons que si l'on a pour valeur des espaces parcourus $x = (F, t)$ on aura pour la vitesse acquise après le même temps t, $v = \frac{dx}{dt} = (F', t)$ et pour la pression ou force accélératrice $\varphi = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2} = (F'', t)$, Ainsi la courbe tout entière se trouvera déplacée et ses paramètres seront modifiés sans toutefois qu'elle change de nature.

Comme le travail des poudres a pour mesure la surface des courbes ayant pour ordonnées la grandeur des pressions successives, des poudres agissant d'une manière fort différente et dont le mode d'action serait conséquemment représenté par des courbes de paramètres différents, pourront fort bien imprimer aux projectiles des vitesses égales; il suffira pour cela que leurs courbes représentatives offrent des surfaces équivalentes : mais les réactions que ces

c'est-à-dire que les grandeurs des vitesses et des pressions seront fournies par les première et seconde dérivées de la fonction qui donne les espaces parcourus en fonction du temps. Ces expressions sont tout-à-fait générales et s'appliquent aux effets produits par toute espèce de poudre. Les coëfficients numériques des termes de chacune de ces expressions seront seuls différents pour les différentes variétés de poudres.

Remarquons toutefois que φ est ici la fonction génératrice, c'est de son mode de variation par rapport au temps que l'on peut déduire les vitesses acquises et les espaces parcourus par le projectile. Nous disons qu'une poudre P' est plus lente qu'une autre P lorsqu'elle développe ses gaz dans un temps plus long, lorsqu'elle fait croître moins rapidement la tension dans l'espace limité où la combustion s'accomplit ; en supposant mobile une des parois de la capacité qui la renferme, nous ne modifions pas l'hypothèse.

Si nous représentons par une courbe la fonction $\varphi = (F'' t)$ en prenant les temps t pour abscisses et les pressions φ pour ordonnées, les vitesses $v = \int \varphi \, dt$ seront figurées par les espaces compris entre cette courbe et l'axe des abscisses. Ces surfaces augmenteront d'autant plus rapidement que φ croîtra plus vite par rapport à t ou que la poudre sera plus vive. Mais si pour passer de la valeur $\varphi = \alpha$, à celle très voisine $\varphi = \alpha + h$ il faut pour la poudre vive un temps $\Delta\ t$, tandis que pour la poudre lente il faille un temps $\Delta' t = n\,\Delta\, t > \Delta\, t$ la vitesse dans le premier cas aura augmenté de $\frac{2\alpha + h}{2} \Delta t$ et dans le second de $n \frac{2\alpha + h}{2} \Delta t$ de sorte qu'en définitive, lorsqu'une poudre lente aura agi sur un projectile pendant un temps assez long pour exercer sur lui la même pression qu'une poudre vive, elle lui aura imprimé une vitesse plus grande.

Le même mode de raisonnement s'applique à la relation entre les vitesses et les espaces. Si une force agit sur un mobile de façon à lui faire atteindre une certaine vitesse dans un temps plus long, elle aura fait parcourir à ce mobile un espace plus considérable, qu'une autre force qui aurait imprimé au mobile la même vitesse dans un temps plus court. Ainsi pour des poudres plus lentes comparées à des poudres plus vives, des tensions égales correspondent nécessairement à des vitesses plus grandes et à des parcours plus étendus.

poudres exerceront sur les parois des bouches à feu seront loin d'être semblables.

Soit ABC, $A\,B'C'$ (fig. 1, pl. I), deux courbes que nous supposerons représenter l'action de deux poudres différentes P et P' dans une pièce donnée. La courbe ABC, relative à la poudre vive P offre une première branche rapidement ascendante jusqu'à la pression maxima $m\,B$ correspondante au point m du trajet du projectile; pour la courbe $A\,B'C'$, relative à la poudre lente P', la première branche est moins raide et le maximum de pression $m'\,B'$ plus éloigné de l'origine. Si les surfaces comprises entre l'axe des abscisses $A\,X$ et les courbes $A\,B\,C$, $A\,B'\,C'$, sont égales, les projectiles arrivés en X, c'est-à-dire à la bouche de la pièce, auront reçu la même somme d'impulsions et seront animés de la même vitesse, soit qu'on ait employé la poudre vive P, soit qu'on se soit servi de la poudre lente P'; mais si l'on a fait usage de la poudre P, la partie postérieure de l'âme de la pièce, comprise entre le point m et le fond de la chambre, aura été soumis à un effort $m\,B$, tandis qu'avec la poudre P', du fond de l'âme en m', la pièce n'aura dû supporter qu'un effort $m'\,B'$ sensiblement moins grand que $m\,B$. Toutes choses égales d'ailleurs, il est clair que la poudre P' fatiguera bien moins la pièce que la poudre P.

On n'ignorait pas que les poudres vives et les poudres lentes agissent d'une manière différente, on se rendait fort bien compte de leur mode d'action et l'on avait reconnu depuis longtemps les inconvénients des poudres trop rapides et leurs effets brisants dans les forts calibres; mais on ne pouvait guère tirer parti de ces notions et de ces inductions, faute de moyens pratiques d'étudier et de déterminer les effets mécaniques réels qui se produisent dans la déflagration des charges. D'ailleurs, comme on obtenait des bouches à feu et de la poudre en usage, les effets désirés, on ne se préoccupait pas beaucoup de la balistique intérieure.

Mais dans ces derniers temps, la substitution de projectiles forcés de forme allongée et de poids considérables aux projectiles ronds simplement ensabottés, a singulièrement modifié les conditions du tir, et l'on n'a pas tardé à remarquer qu'avec la poudre ordinaire, employée même à faibles charges, les nouvelles pièces d'artillerie sont soumises à des efforts si grands qu'ils atteignent presque leur coëfficient de résistance.

L'étude de la balistique intérieure, des phénomènes mécaniques relatifs à l'action des poudres, est devenue conséquemment d'une importance capitale, et l'artillerie belge a reconnu la nécessité de reprendre les expériences que vers la fin de l'année 1853 on avait tentées en Prusse sous la direction du capitaine Neumann.

L'appareil dont on s'est servi à cet effet est fort simple. Dans une pièce rayée d'ordonnance, on perce latéralement une lumière horizontale débouchant dans la chambre, à hauteur de la tranche postérieure du projectile. Cette lumière est prolongée à l'extérieur par un bout de canon de fusil bien alézé et solidement fixé à la pièce. Si l'on introduit dans ce canon un projectile cylindrique de calibre, on conçoit que sous l'effort des gaz de la charge de la bouche à feu, ce cylindre sera lancé en même temps que le projectile de la pièce avec une vitesse proportionnelle au temps pendant lequel il aura été soumis à la pression des gaz.

Si le cylindre offre, à section égale, la même résistance au déplacement que le gros projectile, il prendra la même vitesse que celui-ci et parcourra le même espace dans le même temps; si pour une même section sa résistance au déplacement n'est que la moitié de celle du gros projectile, il parcourra dans le même temps un espace double, et il aura acquis une vitesse double.

Supposons qu'on ait introduit dans le canon latéral un cylindre offrant pour l'unité de section un poids qui soit le quart de celui correspondant à l'unité de section du gros projectile, et que l'on ait enfoncé ce cylindre jusqu'à ce que sa tranche postérieure se trouve à $0^m,20$ de la bouche du canon latéral : lorsque la charge s'enflammera la pression des gaz de la poudre agira en même temps sur le gros projectile et sur le cylindre ; mais ce dernier moins résistant prendra une vitesse quadruple et sera soustrait à l'action du gaz après avoir parcouru un trajet de $0^m,20$, tandis que le gros projectile se sera déplacé de $0^m,05$ seulement. Si donc, l'on mesure à l'aide d'appareils électro-balistiques, la vitesse initiale du cylindre, il suffira de prendre le quart de cette vitesse pour avoir celle acquise par le gros projectile après un parcours de $0^m,05$ dans l'âme de la pièce.

Pour que cela fût absolument vrai, il faudrait que dans toute la capacité de la chambre, de la lumière et du canon latéral, les gaz eussent exactement la même tension ; or, il n'en est pas ainsi : les parties les plus éloignées du centre d'explosion de la charge sont probablement sous une tension moindre ; on doit donc croire que dans le dispositif décrit ci-dessus, le gros projectile aura toujours une vitesse un peu plus grande et les gaz une tension un peu plus forte que celles que l'on déduira de l'observation de la vitesse des cylindres. Les différences entre les vitesses et les tensions calculées et les vitesses et les tensions réelles seront d'autant plus grandes que ces dernières seront plus considérables et que les cylindres seront enfoncés moins profondément dans le canon latéral et conséquemment plus loin du centre d'explosion.

Il ne faut donc pas attacher une confiance absolue aux indications de l'appareil, mais on peut très bien les admettre comme suffisamment exactes pour la détermination des rapports entre les effets des différentes poudres ; car les erreurs sur les grandeurs à comparer étant toutes dans le même sens, les rapports entre ces grandeurs n'en seront pas sensiblement altérés.

L'appareil d'épreuve a été adapté à une pièce rayée de

24 ℔, les tirs ont eu lieu à la charge réglementaire de $2^{k},260$ de poudre ordinaire (dite de 1857) avec l'obus emplombé pesant $29^{k},370$. On a employé, comme projectiles dans le canon latéral, deux cylindres, l'un du poids de $61^{gr},192$, l'autre de $122^{gr},384$, correspondant respectivement à un quart et à moitié du poids du projectile à section égale. Les vitesses acquises par les cylindres au sortir du canon latéral, ont été mesurées au moyen de l'appareil électro-balistique du lieutenant Le Boulanger.

Le tableau suivant renseigne les résultats constatés :

Tirs du canon rayé de 24 lançant des projectiles du poids

(1) POIDS des CYLINDRES.	(2) Espaces parcourus par les cylindres.	(3) Vitesses acquises par les cylindres.	(4) Espaces parcourus par le projectile.	(5) Vitesses acquises par le projectile après le parcours de ces espaces, d'après l'expérience.	(6) Accroissement des vitesses d'après l'expérience.	(7) Pressio[illegible] d'aprè[illegible] formul[illegible] $F = m v$[illegible]
gr	m	m	m	m	m	
61,192	0,09	120,35	0,0225	30,09		120,72[illegible]
	0,11	143,01	0,0275	35,75	5,66	121,40[illegible]
	0,13	183,14	0,0325	45,78	10,03	275,50[illegible]
	0,15	252,67	0,0375	64,17	18,39	708,05[illegible]
122,384	0,075	129,24	»	64,62		
	0,085	153,86	0,0425	76,93	12,76	588,97[illegible]
	0,095	168,50	0,0475	84,25	7,32	370,05[illegible]
	0,105	191,66	0,0525	95,83	10,58	608,32[illegible]
			0,0565			
	0,15	227,05	0,075	113,52		
	0,20	245,21	0,100	122,60		

70 à la charge ordinaire de $2^{k},260$ de poudre ordinaire.

es ées.	(9) Accroissement des vitesses corrigées.	(10) Pressions d'après la formule : $F = m\,v\,\frac{d\,v}{d\,x}$.	(11) Pressions constantes qui eussent donné ces vitesses en agissant pendant le parcours de ces espaces.	(12) Pressions à la fin des parcours, si la pression avait crû proportionnellement aux espaces parcourus.	(13) Vitesses en supposant l'accélération constante moyenne 1825,71 par mètre.	(14) Pressions déduites de l'hypothèse de l'accroissement constant des vitesses.
	m	k	k	k	m	k
0		158,698	79,349	158,698	41,09	225,000
0	8,5	219,300	100,854	201,709	50,21	275,000
0	9,5	299,250	127,211	254,423	59,34	325,000
0	10,00	375,000	158,383	316,766	68,46	375,000
	»					
0	10,50	459,900	188,082	376,164	77,59	425,000
0	11,00	554,400	222,821	445,642	86,72	475,000
5	11,85	657,487	262,500	525,000	95,85	525,000
					103,15	565,000

Dans la troisième colonne du tableau, on a inscrit les vitesses des cylindres observées, ou plutôt les moyennes arithmétiques des nombres différents obtenus dans une série de coups tirés dans les mêmes conditions apparentes ; mais ces moyennes et les vitesses du projectile qui y correspondent (colonne 5) ne forment pas une progression régulière; ce qui permet de supposer qu'on a admis dans leur supputation, des chiffres fournis par quelques coups anormaux. Si l'on cherche en effet à faire passer une ligne continue par les points déterminés par les nombres de la 5^{me} colonne, on y remarque des irrégularités, des ressauts qui ne peuvent évidemment exister. (Voir le tracé pointillé fig. 3).

En régularisant le tracé de la courbe, on arrive par cette correction graphique aux chiffres indiqués dans la 8^{me} colonne du tableau et c'est d'après ces chiffres corrigés qu'on a établi ceux des colonnes suivantes.

Les chiffres de la 8^{me} colonne diffèrent en plus ou en moins des moyennes inscrites dans la 5^{me} colonne, mais sont néanmoins compris dans les limites des coups extrêmes que l'on a admis dans le calcul des moyennes.

Les résultats tels quels fournis par l'expérience (3^{me} et 5^{me} colonne) montrent tout d'abord :

1° Que la vitesse du projectile croît à mesure qu'il avance;

2° Que l'accélération de vitesse n'est pas uniforme.

Si l'on fait disparaître les irrégularités d'après les indications de la 8^{me} colonne, on voit, que pour un même espace parcouru, soit 0^{m},005 la vitesse du projectile nulle à l'origine augmente successivement de 8^{m},50, 9^{m},50, 10^{m}, etc., jusqu'à ce qu'il soit arrivé à 0,0525 de sa position initiale ; dans le parcours des cinq derniers millimètres la vitesse croît de près de 12 mètres et s'élève à 96 mètres environ par seconde.

D'autre part les observations relatives aux points situés à 0,075 et à 0,100 de l'origine indiquent en ces points des vitesses de 114 et 123 mètres.

Si l'on admet pour un instant l'exactitude de ces observations, on remarquera que du point (0,0525) au point (0,075) la vitesse n'augmente que de 19 à 20 mètres (soit une accélération de moins de 5 mètres par 5 millimètres), et du point (0,075) au point (0,100) de 8 mètres seulement (soit moins de 2 mètres par 5 millimètres). On saura donc que depuis l'origine du mouvement jusqu'à 0,0525 environ, l'accélération de vitesse est croissante, tandis qu'au delà, bien que la vitesse grandisse toujours, son augmentation proportionnelle au parcours diminue.

Si nous représentons graphiquement (fig. 3) ces circontances, la courbe figurant le mode d'accroissement des vitesses du projectile aura une direction ascendante de plus en plus rapide pour la première partie du parcours, puis s'infléchira pour continuer à s'élever sous une inclinaison de moins en moins sensible, jusqu'au point correspondant à la bouche de la pièce, où la vitesse pourra être constatée par l'expérience immédiate.

De ce que la vitesse va toujours en augmentant on doit conclure que le projectile est constamment sollicité par la pression des gaz (car si cette pression cessait d'agir, la vitesse deviendrait uniforme); et de ce que l'accélération de vitesse est variable, on conclura que la pression varie.

Comme une pression *uniformément* croissante déterminerait un accroissement *constant* de vitesse (1), l'inclinaison de plus en plus prononcée de la tangente à la courbe des vitesses, dans la première partie du trajet parcouru par le projectile (depuis l'origine du mouvement jusqu'à hauteur du point d'inflexion) montre que pendant ce trâjet les pressions deviennent de plus en plus grandes et que la courbe des

(1) Soit $\varphi = n\,x = \frac{d\,v}{d\,t}$ comme $\frac{d\,x}{d\,t} = v$ on aura $d\,t = \frac{d\,x}{v}$ d'où $n\,x = v\,\frac{d\,v}{d\,x}$, $v^2 = n\,x^2$ et $v = (\sqrt{n})\,x$, une force accélératrice uniformément croissante avec le parcours, imprime donc à un mobile une vitesse augmentant proportionnellement à l'espace parcouru.

pressions tourne sa convexité vers l'axe des abscisses. A partir du point d'inflexion non-seulement les accroissements de vitesse commencent à diminuer (ce qui indiquerait simplement que les pressions augmentent moins vite), mais de plus on remarque que les sous-normales de la courbe des vitesses diminuent de longueur, ce qui prouve que l'intensité absolue des pressions est décroissante (1). Le maximum de pression correspond donc au point d'inflexion de la courbe des vitesses.

Si maintenant on examine l'allure de la courbe tracée conformément aux indications de la 8^me^ colonne du tableau,

(1) Soit $v = (F x)$ l'équation de la courbe des vitesses, on sait que la vitesse $v = \frac{d x}{d t}$ et que la force accélératrice est $\varphi = \frac{d v}{d t} = \frac{d v}{d x} \frac{d x}{d t} = v \frac{d v}{d x}$ d'où $\varphi = (F x)(F' x)$ (A), c'est-à-dire que la pression en un point quelconque x est représentée par la sous-normale à la courbe des vitesses (fig. 1).

Si la courbe des vitesses était réellement continue, si elle pouvait se représenter par une équation unique $v = (F x)$, pour trouver le maximum de pression il suffirait de poser $\frac{d \varphi}{d x} = (F' x)^2 + (F x)\ (F'' x)$ $(B) = o$ de rechercher la valeur de x qui satisfait à cette équation et de substituer cette valeur dans l'équation (A). Mais il est clair que jusqu'au point d'inflexion les deux facteurs de cette dernière équation augmenteraient simultanément, qu'au delà du point d'inflexion $(F x)$ continuerait à croître tandis que $(F' x)$ diminuerait ; de plus pour le point d'inflexion $(F'' x)$ s'annulerait et l'équation (B) se réduirait à $\frac{d \varphi}{d x} = (F' x)^2$ de sorte que le maximum de φ ne pourrait coincider avec le point d'inflexion et devrait se trouver au-delà. Cependant lorsque partout des données de l'expérience, on calcule $\varphi = (F x)\ (F' x)$, c'est-à-dire, lorsqu'on multiplie la vitesse par son coëfficient d'accroissement, on trouve que le produit est d'autant plus grand qu'on se rapproche davantage du point d'inflexion de la courbe expérimentale des vitesses, on voit par là que le maximum de pression correspond en réalité au point d'inflexion de la courbe des vitesses. On constate de plus que la courbe des pressions tourne constamment sa convexité vers l'axe des abscisses et qu'en conséquence son ordonnée maxima correspond à un point de rebroussement ou plutôt d'arrêt et non à un maximum géométrique. On doit forcément en conclure que ni la courbe des vitesses, ni celle des pressions ne sont des courbes continues, mais qu'elles sont formées au contraire de la réunion de deux arcs de courbes différentes. La première branche de la courbe des pressions se rapporte à la période de combustion de la poudre, pendant laquelle la pression va croissant à mesure que les gaz se forment, tandis que la seconde branche exprime les efforts successifs de moins en moins grands exercés par ces gaz dans la période de détente.

on verra que son point d'inflexion doit être compris entre les abscisses (0,0525 et (0,075), plus rapproché de la première que de la seconde et que le maximum de pression doit également tomber dans cet intervalle. Telles sont les conclusions que l'on peut déduire logiquement du tableau des expériences et des figures représentant les résultats obtenus.

Essayons de faire quelques pas de plus. A cet effet, cherchons quelles seraient les pressions capables d'imprimer au projectile les vitesses constatées en agissant sur ce mobile pendant la durée des trajets parcourus.

Depuis l'origine du mouvement jusqu'à un point distant de 0,0225 de cette origine, la vitesse du projectile nulle d'abord a été en croissant jusqu'à 34,50 mètres par seconde. Cette vitesse de 34,5 par seconde eût généralement été imprimée au projectile, si pendant le trajet il avait été soumis à une pression constante équivalente à un poids de 79,349 kilogr. ou bien s'il avait été soumis à l'action d'une force accélératrice uniformément croissante proportionnellement au parcours depuis 0 jusqu'à 158,698 kilogr. (1). Si l'accroissement des tensions des gaz de la poudre suivait la loi que nous venons de formuler, si la tension augmentait proportionnellement au parcours, la pression de ces gaz aurait donc été de 158,798 lorsque le projectile serait arrivé au point (0,0225). Au point (0,0275) le projectile

(1) Soit v la vitesse acquise par le projectile après le trajet X, comme la quantité de travail est la moitié de la force vive, on a $F X = \frac{1}{2} m v^2$ d'où $F = \frac{\frac{1}{2} m v^2}{X}$ pour expression de la force accélératrice constante qui donnerait la vitesse v après un espace parcouru X.

Si la force accélératrice φ croissait proportionnellement à l'espace parcouru, on aurait pour expression de cette force en un point quelconque $\varphi = n x$ et, d'après les lois du mouvement accéléré $\int \varphi \, d x = \int n x \, d x = \int m v \, d v$ d'où $n x^2 = m v^2$ et pour le point X, $n X = F' = \frac{m v^2}{X}$ ou $2 F$.

Pour le cas actuel $m = \frac{P}{g} = \frac{29^{k},370}{9^{m},8088} = 3.$

a acquis une vitesse de 43 par seconde; la force accélératrice constante qui donnerait cette vitesse pour un parcours de 0,0275 est 100,854, la force accélératrice uniformément croissante susceptible de la produire s'élèverait jusqu'à 201,709 et ainsi de suite. Les valeurs des pressions ainsi calculées sont renseignées aux 11^{me} et 12^{me} colonnes du tableau. Notons que ces pressions doivent toutes être inférieures aux pressions réelles (colonnes 9 et 10) (1).

Quoiqu'il en soit, si nous effectuons le tracé rectifié de la portion de la courbe des vitesses dont l'expérience nous a fourni approximativement les ordonnées, et si nous exprimons ces ordonnées à une échelle mille fois plus petite que l'échelle des abscisses, nous obtenons une branche de courbe assez peu infléchie (fig. 3); la courbure paraîtrait bien moins sensible encore, si nous pouvions donner à la branche son véritable tracé en figurant les ordonnées et les abscisses à la même échelle. Nous ne commettrons donc pas dans l'évaluation du travail une erreur bien sensible en substituant à la courbe, la corde qui réunit ses points extrêmes (0) et (0,0525) ce qui revient à supposer que pendant le parcours, la vitesse a crû d'une manière uniforme ou que l'accélération de vitesse a été constante, hypothèse d'après laquelle nous avons calculé les pressions correspondantes aux vitesses pour chaque point. (Col. 13 et 14). Or, une vitesse croissant d'une manière uniforme depuis

(1) En effet, la pression uniformément croissante de 0 à 201,709 nécessaire pour donner au projectile la vitesse de 43 mètres à 0,0275 de l'origine, aurait été au point (0,0225) de 165,034, et le projectile aurait eu une vitesse de 35,17, or nous avons indiqué seulement 158,698^k pour la pression et 34,50 pour la vitesse en ce point, il faut donc que la somme des impulsions imprimées au projectile pendant le trajet du point (0,0225) au point (0,0275) ait été plus grande que celle résultant de l'hypothèse d'un accroissement uniforme depuis l'origine jusqu'au point (0,0275); en ce dernier point elle a dû conséquemment dépasser 201,709^k. Les chiffres inscrits dans la 12^{me} colonne du tableau ne représentent donc pas les tensions réelles correspondantes aux différents points du trajet; chacun d'eux implique une somme plus forte d'impulsions antérieures. (Les chiffres réels des pressions sont inscrits dans la 10^{me} colonne).

l'origine jusqu'au point (0,0525) et atteignant en ce point $95^m,85$ par seconde aurait été produite par une force accélératrice uniformément croissante aussi et exerçant en ce dernier point une pression de 525,000 kilogr. c'est-à-dire une force accélératrice augmentant de 10,000 kilogr. par millimètre de parcours (1). Nous savons d'ailleurs que le maximum de pression est un peu au delà du point 0,0525, nous pourrons donc admettre que jusqu'à ce point maximum, la pression suivra encore le même mode d'accroissement ou augmentera de 10,000 kil. par millimètre.

Nous savons de plus qu'à partir du maximum la pression décroît rapidement. Si l'achèvement de la combustion de la poudre coïncidait avec l'instant ou le projectile arrive au point où la pression est au maximum, c'est-à-dire, si dans cet instant tous les gaz que la poudre peut théoriquement fournir existaient tout formés dans l'espace en arrière du projectile (2), nous pourrions calculer les efforts qu'ils

(1) En général, si la vitesse croît proportionnellement aux espaces parcourus, on aura ;

$v = \alpha\, x$ et $\varphi = v \dfrac{d\,v}{d\,x} = \alpha^2 x$ ou plutôt $F' = m\, \alpha^2\, x$. Le coefficient moyen d'accroissement de vitesse est ici :

$$\alpha = \frac{95^m,85}{0,0525} = 1825,71 \text{ d'où :}$$

$m\,\alpha^2 = 3 \times (1825,71)^2 = 10,000,000^k$ ou par millimètre 10,000 kil.

Comme $v = \alpha\, x = \dfrac{d\,x}{d\,t}$ donne $t = \dfrac{1}{\alpha}$ log. X, pour un coefficient d'accroissement de vitesse α' on aurait $t' = \dfrac{1}{\alpha'}$ log. X pour le temps employé à parcourir le même espace, d'où :

$$t : t' :: \alpha' : \alpha \text{ ou } :: \sqrt{\varphi'} : \sqrt{\varphi}$$

Les temps employés pour le parcours d'un même espace sont donc en raison inverse des racines carrées des forces accélératrices, ou tensions.

(2) Nous avons tout lieu de croire que cette hypothèse est conforme à la réalité des faits. La rapidité de combustion croissant avec la pression et la poudre enflammée fournissant ainsi des quantités de gaz de plus en plus grandes à mesure qu'elle brûle, il est infiniment probable que la pression ne cesse d'augmenter que lorsque toute la poudre est consumée.

Les gaz générés, d'abord comprimés dans l'espace resserré où ils se sont déveexercent en se détendant, en ayant soin de tenir compte de l'abaissement de température qu'ils subissent par l'effet même de leur détente. La loi de décroissement des pressions dans cette hypothèse serait facile à exprimer analytiquement (1).

loppés par l'afflux de nouveaux gaz, agissent sur le restant de la charge comme l'air refoulé dans un briquet pneumatique, pénètrent dans les pores des grains et portent ainsi à la fois toute la masse à la température nécessaire pour que les éléments de la poudre réagissent.

C'est ce que confirme d'ailleurs la coïncidence du maximum de pression avec le point d'inflexion de la courbe des vitesses et la forme de la courbe des pressions: l'existence d'un point de rebroussement ou plutôt d'arrêt dans cette courbe montre que l'accroissement de plus en plus rapide de pression s'arrête brusquement et qu'instantanément les gaz n'agissent plus que par détente.

La supposition que le maximum de pression pourrait se produire avant la combustion totale de la charge, lorsque la vitesse acquise par le projectile et la rapidité de combustion de la charge se feraient équilibre, ne semble donc pas admissible, dans les circonstances normales du tir, c'est-à-dire lorsque le projectile présente à l'action des gaz une résistance suffisante pour utiliser convenablement cette action. Nous ferons observer encore que si elle était exacte, comme les poudres lentes brûlent moins vite que les poudres vives, le maximum de pression devrait, pour les poudres lentes, correspondre à une moindre vitesse du projectile. Or, c'est le contraire qui arrive comme on le verra plus loin; à charges égales plus la poudre est lente et plus le projectile a acquis de vitesse à l'instant où le maximum de pression se produit.

(1) Si une quantité donnée de gaz occupe sous la pression p un volume v à la température t et que l'on réduise la pression de manière à lui faire occuper le volume $v' = n\, v$, la température du gaz s'abaissera et deviendra $t' = \frac{t}{1.412n}$ ou $t' = \frac{t}{1.421}\,\frac{v}{v'}$ (le coëfficient 1.421 est relatif à l'air atmosphérique; pour les gaz de la poudre, il serait un peu différent peut-être, mais faute de données exactes, nous l'avons adopté comme suffisamment approché).

Ceci posé soit :

C, la longueur de l'espace qu'occupent les gaz de la poudre à l'instant où la combustion se termine,

S, la section de l'âme de la pièce,

Q, la quantité de gaz produits par la combustion ramenés à o et à la pression d'une atmosphère,

t, la température de ces gaz,

a, le coëfficient de dilatation des gaz, environ $\frac{11}{3000}$,

P, la pression qu'ils exercent sur la surface postérieure du projectile.

On aura :

$$P = \frac{Q}{CS}(1 + a\,t)\,(10320)\,S = \frac{Q}{C}\,(10320)\,(1 + a\,t).$$

Si le projectile cède à la pression de manière que C devienne x, la pression

Supposons donc :

1° Que la vitesse croisse de quantités égales dans le parcours d'espaces égaux, jusqu'à ce que le projectile ait acquis une certaine vitesse, ou ce qui est la même chose, que les pressions croissent proportionnellement aux espaces parcourus, jusqu'au point maximum dont la position est indéterminée.

2° Qu'à partir du moment correspondant au maximum de pression et à l'évolution complète des gaz de la poudre, ceux-ci n'agissent plus que par leur détente.

La branche ascendante de la courbe des pressions devien-

deviendra $p = \frac{Q}{x}$ (10320) $(1 + a\,t')$ mais le volume des gaz ayant augmenté dans le rapport de $\frac{x}{C}$ on aura $t' = \frac{t}{1.421}\,\frac{C}{x}$ d'ou $p = \frac{Q\,(10320)}{x}\left(1 + \frac{a\,t}{1{,}421}\,\frac{C}{x}\right)$,

$$p = Q\,(10320)\left\{\frac{1}{x} + \frac{a\,t\,C}{1.421}\,\frac{1}{x^2}\right\},$$

sera l'équation qui donnera la valeur des pressions pendant la détente des gaz.

Si nous représentons cette équation par une courbe dont les pressions seront les ordonnées, nous pourrons trouver la surface de cette courbe.

On aura :

$$S = Q(10320)\int dx\left\{\frac{1}{x} + \frac{a\,t\,C}{1.421}\,\frac{1}{x^2}\right\},\ S = Q\,(10320)\left\{\log.\,x - \frac{a\,t\,C}{1.421}\,\frac{1}{x}\right\}.$$

En prenant cette intégrale entre les limites, $x = l$ longueur totale de la bouche à feu et $x = C$ distance du point de départ de la courbe de détente au fond de l'âme, on trouvera $S = Q\,(10320)\left(\log.\,\frac{l}{C} + \frac{a\,t}{1.421}\,\frac{l-C}{l}\right)$.

$\left(\log.\,\frac{l}{C}\right.$ est le logarithme népérien du rapport, donc $\left.\log.\,\frac{l}{C} = 2.30\ \mathrm{Log.}\,\frac{l}{C}\right)$.

Le travail total de la poudre étant par hypothèse, la surface du triangle compris entre la droite figurant l'accroissement des pressions et l'axe des abscisses, augmenté de la surface de la courbe de détente, on aura pour expression de ce travail, dans la pièce de 24 dont la chambre a 0,25 environ de longueur

$$T = \frac{P\,(C - 0{,}25)}{2} + Q\ (10320)\left\{2{,}30\ \mathrm{Log.}\,\frac{l}{C} + \frac{a\,t}{1.421}\,\frac{l-C}{l}\right\}.$$

P étant la pression maxima correspondante à $x = C$.

dra dès lors une ligne droite, comme la première partie de la courbe des vitesses, tandis que la courbe de détente sera définie par la forme de son équation générale.

Ceci posé : la direction de la droite exprimant le mode d'accroissement moyen des vitesses fournie par l'expérience donne immédiatement la direction de la droite qui exprime le mode d'accroissement des pressions ; on connaît d'autre part l'équation de la courbe qui exprime leur décroissance à partir du maximum, il ne reste donc plus qu'à trouver la position de ce maximum.

A cet effet, rappelons-nous que le travail de la poudre a pour mesure la surface comprise entre l'axe des abscisses, soit l'axe de la bouche à feu, et la courbe représentant les pressions successives.

D'après ce que nous venons de dire plus haut, les lignes limites de cette surface sont :

1° La droite représentant le mode d'accroissement des pressions depuis l'origine du mouvement jusqu'au maximum;

2° La courbe dont la loi de la détente des gaz fournit l'équation;

3° L'ordonnée correspondante à la bouche de la pièce;

et 4° Enfin l'axe de la bouche à feu.

L'étendue de cette surface nous est connue puisque nous savons par la vitesse initiale du projectile, le travail qui a dû être dépensé pour lui donner cette vitesse. Pour déterminer toutes les circonstances du mouvement, il suffira donc de rechercher sur la droite indéfinie figurant le mode d'accroissement des pressions, un point tel, que si on le prend pour point de départ de la courbe de détente, la surface comprise entre les lignes indiquées plus haut, soit égale au travail effectif.

En appliquant cette méthode à la recherche du mode d'action de la charge normale $2^{k},260$ de poudre ordinaire sur le projectile creux pesant $29^k,370$ et les parois de l'âme de la pièce de 24 rayée on trouve (1) :

(1) Nous avons vu (note 1, p. 18) que l'équation de la courbe de détente est

$$p = Q\ (10320)\left\{\frac{1}{x}+\frac{a\,t\,c}{1.421}\,\frac{1}{x^2}\right\}\ (1)$$

et que la pression maxima est $P = \frac{Q}{C}\ (10320\ (1 + a\,t)\quad (2).$

Nous savons d'autre part que la surface totale représentant le travail est

$$T = \frac{P\,(C - 0{,}25)}{2} + Q\ (10320)\ \left\{2{,}30\,\text{Log.}\,\frac{l}{C} + \frac{a\,t}{1.421}\ \frac{l - C}{l}\right\}\quad (3).$$

Or, la vitesse initiale du projectile au sortir de la bouche à feu étant 300^m, on aura $T = {}^1/_2\, m\, V^2 = 1.5^k \times 90{,}000^m = 135000^{km}$.

Nous avons supposé que les pressions sur le projectile croissent régulièrement de 10,000 kil. par millimètre ou de 10 millions de kil. par mètre, d'où

$$P = 10{,}000{,}000^k\,(C - 0{,}25).$$

Nous connaissons la longueur totale de l'âme $l = 2{,}644$, nous connaissons également la quantité de gaz produits par la charge de poudre

$$Q = 2{,}260 \times 0{,}3385 = 0^{mc},765.$$

Les équations (2) et (3) deviennent donc :

$$(4)\quad 10{,}000{,}000\ (C - 0{,}25) = \frac{0{,}765}{C}\ (10320)\left(1 + \frac{11}{3000}\,t\right)\quad \text{et}$$

$$(5)\quad 135{,}000^{\,km} = \frac{10{,}000{,}000\,(C - 0{,}25)^2}{2} + 0{,}765\,(10320) \times \left\{2{,}30\,\text{Log.}\,\frac{2{,}644}{C} + t\,\frac{11}{3000 \times 1{,}421}\ \frac{(2{,}644 - C)}{2{,}644}\right\}.$$

En éliminant t entre les équations (4) et (5), on trouve la valeur de C en fonction de quantités connues. Cette valeur est sensiblement 0,3065, elle exprime la distance entre le fond de l'âme et le point où la tension est maxima. Comme la position initiale du projectile est à 0,25 du fond de l'âme, le parcours a été de $(0{,}3065 - 0{,}25) = 0{,}0565$. En substituant à C sa valeur dans l'équation (4), on trouve $t = 5705^o,45$.

Remplaçant ensuite Q, t et C par leurs valeurs dans l'équation (1) de la courbe de détente, cette équation devient :

$$p = 7894{,}85\left(\frac{1}{x} + 4{,}5123\,\frac{1}{x^2}\right) = 7894{,}85\left(\frac{x + 4.5123}{x^2}\right),$$

et donne en kilogrammes les pressions exercées sur le projectile pour tous les points de l'âme au-delà du maximum. (L'origine des coordonnées étant supposée au fond de l'âme).

En divisant les chiffres des pressions en kil. par $176{,}71 \times 1^k,032 = 182^k,36$, qui représente la pression d'une atmosphère sur le projectile, on a la tension in-

A. Que le maximum de pression des gaz se produit lorsque le projectile a parcouru un espace de 0,0565 à partir de sa position initiale,

B. Que cette pression maxima est de 565,000 kil. pour la section du projectile, ce qui correspond à une tension de 3098 atmosphères,

C. Qu'à partir du maximum, la pression exercée par les gaz diminue très-rapidement et qu'elle n'est plus à la bouche de la pièce que de 8076^k ou de 44 atmosphères.

Les tirs dont les résultats moyens ont servi de base à nos calculs, ont été exécutés en plusieurs séances et dans des conditions atmosphériques diverses qui ont dû modifier, en plus ou en moins, la vivacité de la poudre employée. Les vitesses correspondantes à certains points du parcours du projectile ont donc pu être déterminées pour une qualité de poudre très-vive, tandis que pour d'autres points les indications fournies par les appareils se rapportent à la même poudre un peu ralentie. C'est en partie pour ce motif que nous avons substitué à la courbe des vitesses une droite offrant à peu près son inclinaison moyenne ce qui fausse nécessairement la détermination des pressions. Dès que l'on pourra, par un nombre suffisant d'essais répétés, constater avec exactitude les vitesses correspondantes aux différents points du parcours du projectile dans l'âme de la pièce, rien ne sera plus facile que de construire exactement la courbe des pressions. En effet, la pression correspondante à un point donné de la courbe des vitesses est repré-

térieure en atmosphères. Voici ces pressions et ces tensions pour quelques points du parcours.

A 0,3065	du fond de l'âme	(pression maxima)	565,000^k	ou	3,098	atmosphères.
» 0,40	»	»	242,370	»	1,329	»
» 0,50	»	»	158,285	»	868	»
» 0,60	»	»	112,184	»	615	»
» 1,00	»	»	43,505	»	238	»
» 1,50	»	»	21,194	»	115	»
» 2,00	»	»	14,767	»	64	»
» 2,644	(bouche de la pièce)	»	8,076	»	44	»

sentée par la sous-normale de cette courbe, et il suffit de multiplier la grandeur de la sous-normale par la masse du projectile pour avoir la mesure de la pression (1). (v. fig. 1).

Les expériences faites à la pièce de 24 rayée avec la charge normale de $2^k,260$ et le projectile plein pesant 36^k, ont indiqué pour des parcours égaux, des vitesses plus grandes encore que celles constatées dans le tir à obus, mais seulement dans la première partie du parcours (fig.3). Pour comparer les effets des charges dans ces circonstances, nous sommes forcés de suivre un peu plus rigoureusement les indications fournies par l'expérience que nous ne l'avons fait quand nous cherchions seulement les directions générales des courbes des vitesses et des tensions pour la poudre ordinaire. Nous tracerons en conséquence les courbes des vitesses suivant les données du tableau page 24. Les colonnes 4 et 5 de ce tableau contiennent encore des nombres approximatifs arbitraires s'écartant plus ou moins des moyennes arithmétiques des chiffres constatés dans les tirs (quoique ne sortant pas des limites des coups extrêmes) et nécessaires pour donner aux courbes des vitesses des tracés un peu réguliers. Les colonnes 8 et 9 indiquent les pressions exercées sur les projectiles aux différents points du trajet.

(1) On a vu (note 1, p. 14) que la force accélératrice φ a pour valeur $F\,x\,F'x$ ou $v\,\frac{d\,v}{d\,x}$ pour l'unité de masse. Cette valeur devient $m\,v\,\frac{d\,v}{d\,x}$ ou $m\,Fx\,F'x$ si la masse du projectile est m.

Tirs du canon rayé de 24 lançant, à la charge de $2^k,260$ de poudre ordinaire, des obus pesant $29^k,370$ et des projectiles pleins pesant 56 kilog.

Espaces parcourus par le projectile. (1)	Vitesses déduites de la moyenne des expériences.		Vitesses corrigées.		Accroissement des vitesses.		Pressions correspondantes d'après la formule $F=mv\frac{dv}{dx}$.	
	Obus. (2)	Projectiles pleins. (3)	Obus. (4)	Projectiles pleins. (5)	Obus. (6)	Projectiles pleins. (7)	Obus. (8)	Projectiles pleins. (9)
m	m	m	m	m	m	m	k	k
0,0225	30,09	32,45	30,00	33,25			120,000	187,502
0,0275	35,75	45,10	38,00	44,00	8,00	10,75	182,400	360,993
0,0325	45,78	53,93	48,50	58,50	10,50	14,50	305,550	647,884
0,0375	64,39	59,01	62,25	67,50	13,75	9,00	513,562	429,300
0,0425	76,93	71,85	74,50	73,50	12,25	6,00	547,573	336,570
0,0475	84,25	78,67	84,00	78,25	9,50	4,75	478,880	283,674
0,0525	95,83	80,02	91,00	82,25	7,00	4,00	382,200	251,092

On voit d'après ces chiffres, que les vitesses et les accroissements de vitesse sont plus grands pour les projectiles lourds, que les tensions sont plus considérables, et que le maximum de tension est plus élevé et plus près de l'origine du mouvement (1).

En somme il est hors de doute qu'en raison de l'extrême rapidité de combustion de la poudre ordinaire, cette poudre développe presque instantanément dans la chambre des pièces, une énorme quantité de gaz élevés à une haute température dont la tension imprime immédiatement au projectile de grands accroissements de vitesse, de sorte que la courbe des vitesses prend dans sa partie voisine de l'origine du mouvement une direction rapidement ascendante qui s'infléchit bientôt.

(1) Si l'on détermine les conditions du mouvement, en supposant que pour le projectile creux dont la masse est 3, le maximum de pression se trouve à 0,29 du fond de l'âme, d'où $C = 0,29$ et $C - 0,25 = 0,04$, on trouve pour la pression maxima $P = 607,648^k$ et pour la température au moment du maximum $t = 5815^o$, l'équation de la courbe de détente devient ainsi pour le projectile creux $p = 7894,85\left(\frac{x + 4,351}{x^2}\right)$ qui ne diffère pas beaucoup de celle que nous avons indiquée dans la note 1, page 21.

Pour le projectile plein dont la masse est 3,66 et qui sort de la bouche à feu avec une vitesse de 268^m (ce qui indique un travail utile de $131,438^{km}$ seulement, au lieu de 135,000), le calcul conduit aux conclusions suivantes : en admettant que le maximum se rencontre après un parcours de $0,0328 = \frac{0,04 \times 3^m}{3^m,66}$, d'où $C = 0,2828$, la pression maxima serait $P = 611,612$ k, la température maxima $t = 5702^o$ et l'on aurait pour équation de la courbe de détente $p = 7894,85\left(\frac{x + 4,161}{x^2}\right)$. Si le travail utile de la poudre sur le projectile avait été le même dans le tir avec le projectile plein que dans le tir à obus, on aurait trouvé pour la pression maxima la valeur $P = 635,106^k$ et pour la température maxima 5931^o et pour l'équation de la courbe $p = 7894,85\left(\frac{x + 4,328}{x^2}\right)$.

Il se présente donc ici une circonstance digne de remarque et qui doit être examinée avec attention. Il semble que dans le tir à projectiles pleins, une partie de la force vive, que la charge est susceptible de produire, ne soit pas employée à la propulsion du projectile. Quel est le travail qui absorbe ainsi quelques mille kilogrammètres à chaque coup, n'y aurait-il pas refoulement du métal, déformation des parois de la pièce ?

Examinons actuellement comment agissent les poudres lentes.

On a mis en expérience au polygone deux espèces de poudres-saxifragines, l'une plus vive composée de 9 parties de poudre ordinaire et une partie de poudre barytique, l'autre plus lente contenant 20 p. °/₀ de poudre barytique.

Les tirs ont été exécutés à la charge de 3 kil. de poudre saxifragine, le projectile était l'obus emplombé du poids de $29^k,370$. Ces tirs ont donné les résultats consignés dans le tableau page suivante.

L'appareil indicateur des vitesses dont on s'est servi, n'a malheureusement pas permis de mesurer celles correspondantes à des points de l'âme distants de plus de 0,10 de l'origine du mouvement; mais il est facile de reconnaître d'après les chiffres du tableau, que les courbes des vitesses pour les poudres-saxifragines ont des directions générales formant avec l'axe des abscisses des angles bien moins ouverts que celui formé par la droite que nous avons substituée à la courbe des vitesses de la poudre ordinaire. Nous pouvons en conclure que ces courbes ont des courbures moins prononcées et que nous ne commettrons pas de grandes erreurs en les remplaçant à leur tour par des lignes droites. (fig. 3).

En adoptant pour coëfficient d'accroissement moyen des vitesses, le rapport $\frac{750^m}{1^m}$ pour la poudre saxifragine n° 1 $\left(\frac{1}{10}\text{ poudre barytique}\right)$ on trouve que l'accroissement moyen des pressions sur le projectile, doit être de $1687^k,5$ par millimètre de parcours jusqu'au maximum. Opérant ensuite comme nous l'avons fait à propos de la poudre ordinaire, c'est-à-dire cherchant sur la droite indéfinie figurant l'accroissement des pressions, un point tel, que la surface limitée par cette droite, la courbe de détente, l'ordon-

Tirs du canon rayé de 24 lançant des projectiles du poids de 29k,370 avec charges de poudres saxifragines.

N° des poudres et charges.	Poids des cylindres.	Espaces parcourus par les cylindres.	Vitesses acquises par les cylindres.	Espaces parcourus par le projectile.	Vitesses du projectile après le parcours de ces espaces. d'après les moyennes.	Vitesses du projectile après le parcours de ces espaces. corrigées.	Pressions correspondantes.	Vitesses initiales du projectile.	Pressions maxima.
POUDRE SAXIFR. N° 1.									
3 kil.	gr. 122,384	0,075	m. 67,73	0,0375	m. 33,86	m. 28,125			
	»	0,105	82,74	0,0525	41,37	39,375		m. 318	k. 368,818
	»	0,150	110,64	0,0750	55,32	56,25			
	»	0,200	149,75	0,100	74,87	75,00	k. 168,750		
4 kil.	»	0,200	256,43	0,100	128,21	128,00	491,520	377	648,806
POUDRE SAXIFR. N° 2.									
3 kil.	122,384	0,105	54,57	0,0525	27,28	22,05			
		0,150	62,92	0,075	31,46	31,50			
		0,200	84,38	0,100	42,19	42,02	53,000	290	212,000
4 kil.		0,200	151,87	0,100	75,93	76,00	73,800	353	419,337

née terminale, et l'axe des abscisses soit égale au travail total de la poudre, on trouve que ce point maximum des pressions se rencontre à 0,2185 de l'origine du mouvement et que la pression s'y élève à 368,818 kil. soit 2022 atmosphères. Elle est ainsi environ d'un tiers moins forte que le pression maxima engendrée par la poudre ordinaire, tandis que la vitesse acquise par le projectile au sortir de la bouche à feu est d'une vingtaine de mètres plus grande (1).

La poudre saxifragine n° 2 (20 p. % de poudre barytique) a donné des résultats plus remarquables encore. En prenant pour coëfficient d'accroissement moyen des vitesses, le rapport $\frac{420,2}{1^{m}}$, on trouve que l'accroissement moyen des pres-

(1) La poudre saxifragine n° 1 à 10 p. c. de poudre barytique, doit d'après sa composition produire 390 litres de gaz par kil., soit pour 3 kil. $Q = 1,170$.

Le coëfficient d'accroissement des pressions est $1687^{m},50$. On a donc pour la pression maxima :

$$P = 1,687,500\,(C - 0,25) = 1,170 \times 10320\,(1 + a\,t),$$

d'autre part, la vitesse initiale du projectile est 318^{m}, le travail est conséquemment $\frac{(318)^2 \times 3}{2} = 151638^{km}$.

$$\text{D'où } T = 151,638^{km} = \frac{P \times (C - 0,25)^2}{2} + (1,170 \times 10320) \left\{ 2,30 \text{ Log. } \frac{l}{C} + \frac{a\,t}{1,421}\,\frac{l - C}{l} \right\}.$$

La valeur de C qui satisfait à ces équations est $C = 0,4685$ distance entre le fond de l'âme et le point où la tension est maxima.

$C - 0,25 = 0,2185$ est le trajet parcouru par le projectile depuis l'origine du mouvement jusqu'au point maximum. La température au moment du maximum est $t = 3630°$. La pression maxima est 368,818 kil. ou 2022 atmosphères.

L'équation de la courbe de détente $p = 12074,4\left(\frac{x + 4,3837}{x^2}\right)$.

Voici les pressions ou tensions pour quelques points de l'âme :

A	0,4685	368,818	kil. ou	2022	atmosphères.
»	0,50	235,800	»	1293	»
»	0,60	167,109	»	916	»
»	1,00	64,645	»	354	»
»	1,50	32,000	»	175	»
»	2,00	19.645	»	107	»
»	2,544	12,147	»	66	»

sions doit être de 530 kil. par millimètre de parcours et on en conclut d'après la méthode indiquée, que le point maximum des pressions se trouve sensiblement à 0,40 de l'origine du mouvement et qu'en ce point la pression sur le projectile ne dépasse pas 212,000 kil. soit 1163 atmosphères; c'est-à-dire qu'elle est un peu plus que le tiers de la pression maxima de la poudre ordinaire, la vitesse du projectile n'est cependant moins grande que d'une dixaine de mètres (1).

On a tiré à la charge de 4 kil. un coup de chacune des poudres saxifragines. Ces charges ont imprimé à l'obus emplombé des vitesses de 377 mètres pour la poudre n° 1 (10 p. % de poudre barytique) et 353 mètres pour la poudre n° 2 (20 p. % de poudre barytique) et ont indiqué res-

(1) La poudre saxifragine n° 2 à 20 p. c. de poudre barytique donne d'après sa composition 402 litres de gaz par kilogramme ou pour 3 kil. $Q = 1,206$. Le coëfficient d'accroissement des pressions est 530.

On a donc pour la pression maxima

$$P = 530,000\,(C - 0,25) = \frac{1,206 \times 10320}{C}\,(1 + at).$$

D'autre part la vitesse initiale du projectile est 290m, le travail est conséquemment $\frac{(290)^2 \times 3}{2} = 126,150^{km}$.

$$\text{D'où } T = 126,150^{km} = \frac{P\,(C - 0,25)^2}{2} + 1,206 \times 10320 \left(2,30 \text{ Log. } \frac{l}{C} + \frac{at}{1,421}\,\frac{l - C}{l} \right).$$

La valeur de C qui satisfait à cette équation est $C = 0,65$ distance entre le fond de l'âme et le point où la tension est maxima.

$C - 0,25 = 0,40$ est le trajet parcouru par le projectile depuis l'origine du mouvement jusqu'au point maxima.

La température au moment du maximum est $t = 2746°$. La pression maxima est 212,000 k. ou 1163 atmosphères.

L'équation de la courbe de détente est $p = 12445.92 \left(\frac{x + 4,607}{x} \right)$.

Voici les pressions et tensions qu'on en déduit pour quelques points de l'âme.

A 0,65	212,000	ou	1163	atmosphères.
» 1,00	69,779	»	382	»
» 1,50	33,763	»	185	»
» 2,00	20,535	»	112	»
» 2,644	12,881	»	70	»

pectivement des vitesses de 128 et de 76 mètres à 0,10 de l'origine du mouvement, ce qui montre que ces charges produisent des accroissements de tension de $4915^k,20$ et de $1732^k,8$ par millimètre de parcours (1).

Les courbes des tensions déduites de ces circonstances font voir comment avec des ordonnées maxima à peu près

(1) Ces données conduisent aux conséquences suivantes :

1° Pour la poudre barytique n° 1 tirée à la charge de 4 kil.

$$\text{travail } T = \frac{(377)^2 \times 3}{2} = 213{,}193 \text{ km}.$$

C distance du fond de l'âme au point où la pression est maxima 0,382, ou $C - 0{,}25 = 0{,}132$ trajet parcouru par le projectile depuis l'origine du mouvement jusqu'au maximum,

t température au moment du maximum de pression 3925°,

P pression maxima, $648{,}806^k$ ou 3557 atmosphères,

équation de la courbe de détente $p = 16100 \left(\frac{x + 3{,}865}{x^2}\right)$,

d'où tensions en quelques points de l'âme :

A 0,382	648,806	ou	3557	atmosphères.
» 0,50	281,106	»	1541	»
» 0,60	199,630	»	1094	»
» 1,00	78,326	»	429	»
» 1,50	38,389	»	210	»
» 2,00	23,606	»	129	»
» 2,644	14,989	»	82	»

2° Pour la poudre barytique n° 2 tirée à la charge de 4 kil.,

$$\text{travail} \frac{(353)^2 \times 3}{2} = 186{,}913,$$

C distance du fond de l'âme du point où la pression est maxima 0,492 d'où $(C - 0{,}25)$ trajet parcouru par le projectile $= 0{,}242$,

t température au moment du maximum 3177°,

P pression maxima 419,337 ou 2304 atmosphères,

équation de la courbe de détente $p = 16594 \left(\frac{x + 3{,}957}{x^2}\right)$,

d'où tensions en quelques points de l'âme :

A 0,492	419,337	2304	atmosphères.
» 0,60	210,052	1154	»
» 1,00	82,257	452	»
» 1,50	40,245	221	»
» 2,00	24,737	135	»
» 2,644	15,668	86	»

égales ou inférieures, les courbes relatives aux poudres lentes offrent plus de surface que celle de la poudre ordinaire et représentent conséquemment une somme plus grande d'impulsions communiquées aux projectiles pendant le parcours de l'âme de la pièce. Elles font voir encore que l'orsqu'on augmente les charges, on obtient immédiatement des accroissements de vitesse et de tension beaucoup plus considérables (1).

Il n'est donc pas possible d'arriver, avec les projectiles un peu lourds et la poudre ordinaire, à des vitesses sensiblement plus grandes que celles dont on est forcé de se contenter aujourd'hui, car déjà les faibles charges employées, produisent sur les pièces des pressions énormes qu'une légère augmentation rendrait destructives. Les poudres lentes seules fournissent la possibilité de donner de grandes vitesses aux projectiles pesants.

(1) En comparant les coefficients fournis par l'expérience pour les charges de 3 kil. avec ceux constatés pour les charges de 4 kil., il semble que les accroissements de vitesse pourraient bien être entre eux comme les carrés des charges.

Nous voyons en effet que la poudre barytique n° 1 à la charge de 3 kil. produit un accroissement moyen de vitesse de $\frac{750^m}{1^m}$ et à la charge de 4 kil. de $\frac{1280^m}{1^m}$; que la poudre barytique n° 2 donne à la charge de 3 kil. un accroissement moyen de vitesse de $\frac{420^m}{1^m}$ et à la charge de 4 kil. de $\frac{760^m}{1^m}$;

Or, les rapports $\frac{750}{9} = 83{,}3$ et $\frac{1280}{16} = 80{,}0$,

$$\frac{420}{9} = 46{,}6 \text{ et } \frac{760}{16} = 47{,}5,$$

fournissent des nombres assez rapprochés pour que les corrections, que l'on devra apporter plus tard aux données d'expériences, par suite de nouveaux essais, fassent disparaître les différences.

Remarquons que si les vitesses primitives croissent comme les carrés des charges, les accroissements des tensions primitives seront en raison des 4mes puissances de ces charges.

En examinant avec un peu d'attention le tableau ci-dessous (1) et la figure 4 qui représente, à des échelles uniformes, les vitesses et les tensions relatives aux différentes poudres et aux différentes charges essayées et qui permet ainsi de comparer leurs effets mécaniques, on reconnaîtra :

1° Que plus la combustion d'une poudre est rapide, plus les accélérations de vitesse du projectile sont grandes et plus est ouvert l'angle formé entre la direction générale de la courbe des vitesses et l'axe des abscisses ;

2° Que la direction de la courbe des vitesses indique immédiatement celle de la première branche de la courbe des tensions ;

3° Que le maximum des tensions est d'autant plus élevé et plus rapproché de l'origine du mouvement, que l'accélération de vitesse est plus grande à charges égales ;

4° Que la décroissance des tensions est d'autant plus ra-

(1) **Tableau des vitesses et des tensions correspondantes à quelques points de l'âme pour les poudres essayées.**

C. Distance à partir du fond de l'âme.	Espace parcouru par le projectile.	Poudre ordin. ch. 2.260		Poudre saxifr. nº 1 ch. 3.00		Poudre saxifr. nº 2 ch. 3.00		Poudre saxifr. nº 1 ch. 4 kil.		Poudre saxifr. nº 2 ch. 4 kil.	
		vitesses en mètres.	tensions en atmosph.	vitesses en mètres.	tensions en atmosph.	vitesses en mètres.	tensions en atmosph.	vitesses en mètres.	tensions en atmosph.	vitesses en mètres.	tensions en atmosph.
0,3065	0,0565	103,11	3,098								
0,382	0,132							168,96	3,557		
0,400	0,15	171	1,329								
0,4685	0,2185			163,87	2,022						
0,492	0,242									183,92	2,304
0,500	0,250	206	868	175,00	1,293			238,00	1,541		
0,600	0,350	228	615	209	916			270	1,094	228	1,154
0,650	0,400					168	1,163				
1,00	0,75	260	238	267	354	230	382	325	429	294	452
1,50	1,25	282	115	294	175	263	185	332	210	323	221
2,00	1,75	291	64	308	107	278	112	366	129	341	135
2,644	2,394	300	44	318	67	290	70	377	82	353	86

pide après le maximum, que ce maximum est plus rapproché de l'origine du mouvement, et que la tension au moment de ce maximum est plus élevée (1);

5° Que pour les poudres qui produisent beaucoup de gaz et des températures relativement peu élevées, la décroissance des tensions est moins rapide que pour les poudres plus vives;

6° Qu'en augmentant les charges, on détermine de plus grandes accélérations de vitesses et que l'inclinaison géné-

(1) La rapide décroissance des tensions est l'objection la plus grave que l'on puisse faire valoir contre les poudres très vives que l'on appelle souvent improprement très fortes, telles que les fulminates, les pyroxyles, etc. Les produits gazeux de ces poudres sont pour une forte proportion de la vapeur d'eau ; or, pour cette vapeur la chaleur spécifique à pression constante, ne diffère pas beaucoup de la chaleur spécifique à volume constant, de sorte que leur rapport s'exprime par un chiffre beaucoup plus voisin de l'unité que (1.421), rapport entre les chaleurs spécifiques de l'air à pression constante et à volume constant et que nous avons admis comme applicable, dans le calcul des effets de la détente des gaz permanents de la poudre (voir note 1, page 18).

Si nous supposons que des poudres quelconques produisent des pressions maxima égales $P = \frac{Q}{C}$ (10320) $(1 + at)$. Les effets de la détente devront être déterminés par la formule

$$p = Q\,(10320)\left(\frac{1}{x} + \frac{a\,t\,C}{1.421}\,\frac{1}{x^2}\right)$$

si elles ne donnent que des gaz permanents, tandis que si parmi ces gaz dont la quantité est Q il y a beaucoup de vapeur d'eau, le coefficient $\frac{1}{1.421}$ devra être remplacé par $\frac{1}{n} > \frac{1}{1,421}$.

Il est facile de voir que dans ce dernier cas les pressions varieront plus vite en raison des valeurs successives de x, que la détente sera plus rapide et que la courbe qui la représentera offrira une moindre surface.

Pour que les poudres dont la déflagration produit de la vapeur d'eau au lieu de gaz donnent des surfaces de travail équivalentes et soient conséquemment susceptible d'imprimer aux projectiles des vitesses égales dans les armes longues, il faut donc qu'elles déterminent des tensions maxima plus grandes, c'est-à-dire des réactions plus fortes sur les parois de l'âme.

Ces poudres ne sauraient convenir en conséquence, que pour les armes courtes et les projectiles légers.

Les poudres ordinaires à charbon roux (hydrogéné) présentent à un certain degré le même défaut; on sait depuis longtemps que ces poudres sont en général plus brisantes que celles à charbon noir.

rale de la courbe des vitesses *semble* être à peu près en raison des carrés des charges;

7° Qu'en conséquence pour une même poudre employée à des charges différentes, les accroissements de tension semblent être entre eux comme les quatrièmes puissances des charges;

8° Qu'à charges égales, l'augmentation du poids des projectiles donne lieu à des accroissements de vitesse et de tension plus rapides et à des tensions maxima plus élevées et plus rapprochées de l'origine du mouvement;

9° Que la réaction sur la pièce de 24 rayée déterminée par l'explosion de la charge normale de $2^k,260$ (environ $\frac{1}{13}$ du poids du projectile creux) est énorme et qu'il ne serait guère prudent d'augmenter cette charge dans les pièces en fonte pour obtenir des vitesses initiales plus grandes et des portées plus longues;

10° Qu'au contraire, il serait très-facile d'obtenir des vitesses *beaucoup plus grandes*, sans aucun danger d'éclatement, en employant des poudres plus lentes (1).

11° Que, si employées à petites charges les poudres vives donnent des vitesses initiales plus grandes que les poudres lentes, la différence entre les vitesses obtenues diminue à mesure qu'on augmente les charges, de sorte que sous tous les rapports il y a avantage à employer des poudres d'autant plus lentes qu'on veut user de plus fortes charges en vue d'obtenir de très-grandes vitesses;

12° Qu'enfin la poudre ordinaire très-convenable pour les petites armes lançant des projectiles légers avec de petites charges, devient très-désavantageuse et très-dangereuse pour les gros calibres de la nouvelle artillerie.

(1) La densité des poudres saxifragines augmente avec la proportion de poudre barytique qu'elles renferment : on peut donc sans augmentation de la capacité des chambres, employer des charges d'autant plus considérables que les poudres dont on se sert sont plus lentes.

On nous objectera peut-être que nous avons tiré des conclusions beaucoup trop étendues de données peu certaines et peu nombreuses, que les différentes hypothèses que nous avons faites sont très-contestables et que si elles ne se vérifiaient pas, toutes nos conclusions tomberaient avec elles. Nous sommes tout prêt à reconnaître que les expériences exécutées jusqu'aujourd'hui ne peuvent servir à déterminer des chiffres, des rapports exacts, aussi faisons-nous bon marché de ces chiffres : mais il nous paraît évident que les changements qu'il faudra y apporter dans la suite, n'infirmeront nullement nos conclusions. Reprenons à cet effet les suppositions que nous avons faites et voyons dans quel sens il pourrait y avoir lieu de les modifier.

1° Nous avons admis que les vitesses constatées pour les cylindres correspondent à celles des projectiles, c'est-à-dire que la pression des gaz est uniforme dans toute la capacité de la chambre de la pièce et du canon latéral ; or, il est possible, nous dirons plus, il est probable, que cela n'est pas exact ; mais dans ce cas les données relatives aux différentes poudres devront être modifiées dans le même sens. Pour toutes les poudres, les vitesses du gros projectile déduites de l'observation de celles des cylindres, devront être augmentées, toutes les courbes des vitesses devront être redressées, comme toutes les courbes des tensions, et tous les maxima seront plus grands que ceux indiqués. Mais que tous ces maxima soient avancés ou reculés de quelques millimètres, augmentés chacun d'un vingtième ou d'un dixième et nos conclusions n'en resteront pas moins debout.

2° Nous avons rectifié d'une manière un peu arbitraire le tracé fourni par l'expérience de la courbe des vitesses pour la poudre ordinaire, et l'on pourrait admettre pour cette courbe un tracé plus conforme à la vérité, d'après lequel le point d'inflexion serait plus rapproché de l'origine. Mais, dans ce cas, pour se rapprocher d'avantage des points fournis par l'expérience, il faudrait diminuer les rayons de courbure en deçà et au delà du point d'inflexion, lui donner une forme d' S plus prononcée (1). La tangente au point d'inflexion formerait, dans ce cas, un angle plus ouvert avec l'axe des abscisses, et l'ordonnée correspondante de la courbe des tensions deviendrait beaucoup plus grande; le point maximum serait ainsi un peu reculé, mais non abaissé. (Voir la note 1, page 25).

3° Nous avons substitué à la courbe des vitesses pour la poudre ordinaire une corde passant par l'origine et par le point distant de 0,0525 de cette origine. En opérant ainsi nous avons supposé les vitesses plus grandes qu'elles ne le sont en réalité et leur accroissement uniforme, ce qui a réduit à une ligne droite la courbe des tensions.

Si pour tous les points de la courbe des vitesses, nous avions déterminé les tensions d'après la grandeur des sous-normales, les vitesses étant moindres et leur accroissement plus petit que l'accroissement uniforme moyen, pour les points voisins de l'origine, nous aurions eu pour cette partie du trajet des tensions moins grandes; mais, un peu plus loin, les accroissements réels des vitesses devenant plus grands que l'accroissement moyen supposé, nous aurions trouvé des tensions plus grandes. La courbe des tensions réelles coupe donc (comme on le voit, fig. 3) la droite des tensions déduite de l'hypothèse d'un accroissement uniforme des vitesses, et la valeur de la tension maxima est sensiblement plus élevée que celle que nous lui avons assignée. On remarquera cependant que la surface de la courbe des tensions réelles et celle du triangle qui a pour hypothénuse la droite des tensions, sont sensiblement équivalentes, de sorte que les courbes de détente doivent être à peu près équivalentes en surface dans l'une ou l'autre hypo-

(1) C'est ce que nous avons fait, fig. 2, pour comparer les effets résultants de la substitution du projectile plein à l'obus ordinaire.

thèse, et il est facile de reconnaître qu'un léger déplacement de leur point de départ n'en changerait pas la figure.

4° Pour déterminer la courbe de détente, nous avons supposé qu'au moment du maximum de tension, la poudre est complétement brûlée; nous avons supposé que la poudre produit la proportion de gaz théorique, et nous avons négligé de tenir compte de l'influence refroidissante des parois de la pièce sur ce gaz.

S'il reste quelques grains de poudre non brûlés à l'instant correspondant au maximum de tension, cette tension maxima, dont nous connaissons approximativement l'énorme grandeur, aurait été produite par une quantité de gaz moindre que nous ne l'avons supposé; ces gaz auraient dû être conséquemment à une température plus élevée et se refroidir plus promptement par l'effet de la détente; mais, d'autre part, si la combustion avait pu continuer après le maximum, s'il s'était encore formé des gaz, le retrait, résultant de la détente et du refroidissement des premiers, aurait dû être moins sensible, de sorte que la forme de la courbe de détente ne pourrait en être sensiblement altérée, car la surface totale de la courbe des tensions doit être toujours égale au travail.

On ne connaît pas au juste la proportion de gaz que produisent les poudres lorsqu'on les emploie à lancer de lourds projectiles. Les expériences des chimistes, faites sous des pressions très-faibles, assignent au volume des gaz une valeur bien moins grande que le chiffre théorique que nous avons adopté; mais il est clair que lorsque les gaz produits sont libres de se détendre, la température de la combustion doit en être énormément abaissée et les réactions chimiques bien moins complètes que dans les circonstances du tir. Si l'on calcule le nombre de calories que doit produire la combustion du charbon (considéré comme carbone) que renferment les poudres, on verra que cette quantité de chaleur pour une poudre théorique (six, as et as) serait capable (sous une pression suffisante pour s'opposer à l'expansion des gaz) d'élever les produits gazeux et solides à une température de 12000° (1) et plus, et l'on comprend qu'à une pareille température les combinaisons chimiques doivent être bien différentes de ce que l'on constate dans un tube à analyse. Nous avons admis ce qui nous a paru le plus probable ; après tout, nous avons appliqué le même mode d'appréciation à la poudre ordinaire et aux poudres saxifragines : s'il n'est pas exact, il faudra augmenter ou réduire les coëfficients dont nous nous sommes servi dans le calcul des effets produits par les poudres, et, encore une fois,

(1) La densité gravimétrique de la poudre ordinaire étant à très peu près 1,00, un kil. de poudre occupe sensiblement 1 décimètre cube. La poudre dosée théoriquement contiendrait par kil. 0k,1323 de carbone qui, brûlant à l'état d'acide carbonique, produirait $0{,}1323 \times 7{,}170 = 948{,}59$ calories. Elle donne 338,5 de gaz pesant 0k,5883 et un résidu de sulfure de potassium de 0k,4117. La chaleur spécifique des gaz étant 0,267 et celle du sulfure de potassium environ 0,19, on aurait, si les gaz pouvaient se dilater librement :

$$t\,(0{,}4117 \times 0{,}19 + 0{,}5883 \times 0{,}267) = 948{,}59, \text{ d'où } t = 4200^\circ \text{ environ.}$$

Mais, si nous supposons que les gaz soient maintenus dans l'espace primitif de 1 décimètre cube avec les résidus solides de la combustion dont la densité est environ 1,5, ils ne pourront occuper que $\left(1^{\text{lit}},00 - \frac{0{,}4117}{1{,}5}\right) = 0{,}7225$ et, comme à 0° ils se développeraient jusqu'à $338^{\text{l}},5$, l'équation donnant la température devient :

$$t\left(0{,}4117 \times 0{,}19 + 0{,}5883 \times 0{,}267\,\frac{0{,}7225}{338{,}5 \times 1{,}421}\right) = 948{,}59$$

d'où $t = \frac{948{,}59}{0{,}078435} = 12095^\circ$.

La force expansive de la poudre ordinaire pourrait être évaluée en conséquence à $E = \frac{Q}{V}(1 + at) = \frac{338{,}5}{0{,}7225}\left(1 + \frac{11}{3000}\,12095\right)$

d'où $E = 468{,}3 \times 45{,}26 = 21{,}195$ atmosphères.

Il est bien clair que nous n'avons nullement l'intention de donner comme exacts les chiffres relatifs à la température de combustion et à la force expansive de la poudre indiqués ci-dessus. Nous avons en effet négligé de tenir compte des quantités de chaleur absorbées ou émises par la décomposition de l'acide nitrique, la réduction de la potasse, la sulfuration du potassium ; nous avons supposé que le charbon était du carbone pur tandis qu'il renferme toujours plus ou moins l'hydrogène, etc. ; cependant on voit que, fallût-il modifier sensiblement ces chiffres, les températures et les pressions que l'expérience nous conduit à reconnaître s'expliqueraient encore assez facilement.

cette modification n'entraînera pas de changements bien grands dans les rapports de ces effets.

Nous avons négligé l'influence refroidissante des parois de la bouche à feu pour toutes les poudres. Si nous en avions tenu compte, il en serait résulté pour les courbes de détente un abaissement d'autant plus rapide que la température au moment du maximum aurait été plus élevée, et, comme c'est pour la poudre ordinaire que la température est plus haute, la courbe de détente, pour cette poudre, aurait dû être abaissée plus que les autres. Dès lors, pour lui conserver la même surface, il eût fallu nécessairement relever l'ordonnée maxima.

4° Enfin pour les poudres barytiques, nous avons assigné aux accroissements de vitesse une valeur moyenne déduite de l'observation de quelques points assez rapprochés de l'origine du mouvement, et donné ainsi à l'accroissement moyen de vitesse une valeur peut-être inexacte.

Nous en convenons volontiers; mais, fallût-il varier de quelques degrés en plus ou en moins l'inclinaison de la droite, que nous avons fixée un peu arbitrairement, il n'en est pas moins évidemment certain que la direction des courbes de vitesse, pour la poudre ordinaire et les poudres saxifragines, diffère considérablement, et qu'en conséquence, pour des vitesses égales imprimées au projectile, les tensions maxima sont de beaucoup moins fortes (1).

Nous nous croyons donc fondés à maintenir pleinement nos conclusions, sauf à rectifier d'après les expériences futures les chiffres des rapports que nous avons établis provisoirement sur des données encore trop peu certaines.

Lorsqu'on remarque la grande différence qui existe entre

(1) Dans l'évaluation du travail de toutes les poudres, nous n'avons tenu compte ni de l'effort nécessaire pour forcer le plomb dans les rayures de la pièce, ni du frottement dans ces rayures; mais ce travail n'est qu'une très-petite fraction du travail absorbé pour imprimer une certaine vitesse à la masse du projectile, et peut être négligé sans grande erreur.

les efforts auxquels sont soumises les régions de l'âme des bouches à feu rayées, lorsqu'on voit que la partie *très-voisine* de la chambre est soumise à d'énormes tensions, tandis que la volée n'a plus à résister qu'à des pressions modérées, on est frappé de la disproportion évidente qui existe entre ces efforts et les épaisseurs des parois des bouches à feu, on doit reconnaître combien la distribution du métal est peu rationnelle, et l'on s'explique sans peine les accidents qui peuvent résulter de ce défaut. Pour que dans la pièce de 24 rayée, tirée à la charge ordinaire de $2^k,260$ avec projectile creux, par exemple, il y eût à peu près équilibre entre les pressions et les résistances, il faudrait donner aux parois de la bouche à feu, à hauteur de la chambre, une épaisseur environ huit fois plus grande que ce qu'elle devrait être à la volée, tandis qu'on ne leur donne qu'une épaisseur triple. Nous savons bien que dans le tracé des bouches à feu on ne doit pas se préoccuper exclusivement de l'équilibre entre les tensions et les résistances, et qu'il faut avoir égard à d'autres convenances, mais la première considération doit être prépondérante et l'écart que nous signalons est évidemment trop fort.

C'est en vain d'ailleurs que, pour mettre des bouches à feu en état de résister longtemps à de plus grands efforts, on rendrait leurs parois plus épaisses ; au delà d'une certaine limite, un surcroît d'épaisseur n'ajoute presque plus rien à la solidité de la pièce. En vertu de l'élasticité du métal, la résistance des couches concentriques à l'âme n'entre en feu que successivement. Si la pression croît brusquement, les couches intérieures peuvent être déchirées, rompues, avant que les couches extérieures aient subi une tension dépassant la limite de leur extensibilité, et l'inégalité des efforts auxquels sont soumises les différentes couches est d'autant plus sensible que l'épaisseur des parois est plus grande. Une pièce très-épaisse ne cédera peut-être pas au premier coup, mais il se produira autour de la chambre des fissures rayonnantes qui se prolongeront peu à peu jusqu'à éclatement. On remarque souvent l'existence de fissures intérieures anciennes lorsque les pièces éclatent, surtout les pièces en fonte. Les tensions déterminées par la déflagration des poudres saxifragines étant beaucoup moins inégales pour les différentes régions de l'âme, on pourrait, en employant ces poudres, donner aux pièces des formes plus rationnelles et des proportions plus régulières.

Les effets fâcheux de l'instantanéité d'action du rapide accroissement de vitesse imprimée au projectile par les poudres vives, ne réagissent pas seulement sur le métal des bouches à feu ; les appareils de fermeture et l'affutage en souffrent tout autant. Le recul de la pièce est brusque comme la propulsion du projectile, et c'est là une cause de prompte dislocation du matériel, que l'on peut à peine atténuer en rendant les pièces et les affuts plus lourds et moins maniables. Sous ce rapport encore, l'usage de poudres lentes, en permettant l'emploi d'affuts plus légers et plus élastiques, offrirait de grands avantages.

Nous terminerons en citant deux faits d'expérience de nature à faire entrevoir quelles conséquences peut amener l'introduction de l'usage des poudres saxifragines dans l'artillerie. Ces faits les voici :

Des projectiles pleins, pesant 36 kil., lancés par la pièce de 24 rayée, à la charge de 5 kil. de poudre saxifragine, (à 40 p. °/₀ de poudre barytique) ont percé *de part en part* la plaque de la cible cuirassée qui avait une épaisseur de seize centimètres du meilleur fer ; tandis que ce même projectile tiré à la charge de $2^{k},260$ de poudre ordinaire (reconnue déjà comme dangereuse pour la pièce) ne prend qu'une vitesse de 268^{m} avec laquelle il produit sur la plaque une *impression* d'une dizaine de centimètres de profondeur au plus.

Une charge de 17 kil. de la même poudre saxifragine donne au projectile du 68, pesant 103 kil., une vitesse de

390m; une charge égale de poudre ordinaire (si l'on osait l'employer) donnerait au même projectile une vitesse qui ne dépasserait pas 367m, en supposant que les vitesses initiales soient entre elles comme les racines carrées des charges.

Cette étude est loin d'être complète ; nous avons laissé à l'écart bien des problèmes intéressants et bien des observations curieuses sur lesquelles nous pourrons revenir, lorsque de nouveaux essais auront jeté plus de lumières sur les faits. Jusqu'ici l'on n'a mis en expériences que des poudres homogènes, il serait très-important de rechercher quels résultats balistiques on obtiendrait en employant, comme charge, des mélanges de poudres de rapidité différente.

Notre but principal a été de chercher à démontrer que le changement radical apporté dans l'artillerie par l'augmentation de poids et le forcement des projectiles, appelle comme complément indispensable le changement de la nature des poudres. Or, il a été constaté par de nombreuses et longues expériences que toutes les poudres au salpêtre bien faites sont, dans les grosses pièces, à fort peu près, aussi vives les unes que les autres; nous ne voyons donc aux difficultés d'obtention des poudres lentes convenables, d'autre solution que l'adoption des poudres barytiques dont on peut graduer à volonté la vivacité, et qui satisfont d'ailleurs à toutes les conditions qu'on peut exiger pour des poudres de guerre.

Si nous n'avons pas réussi à convaincre nos lecteurs, nous espérons cependant que nos remarques leur sembleront dignes de quelque attention et qu'elles pourront servir au moins à indiquer la direction dans laquelle il serait utile de faire de nouvelles recherches.

BALISTIQUE INTÉRIEURE.

PL. I.

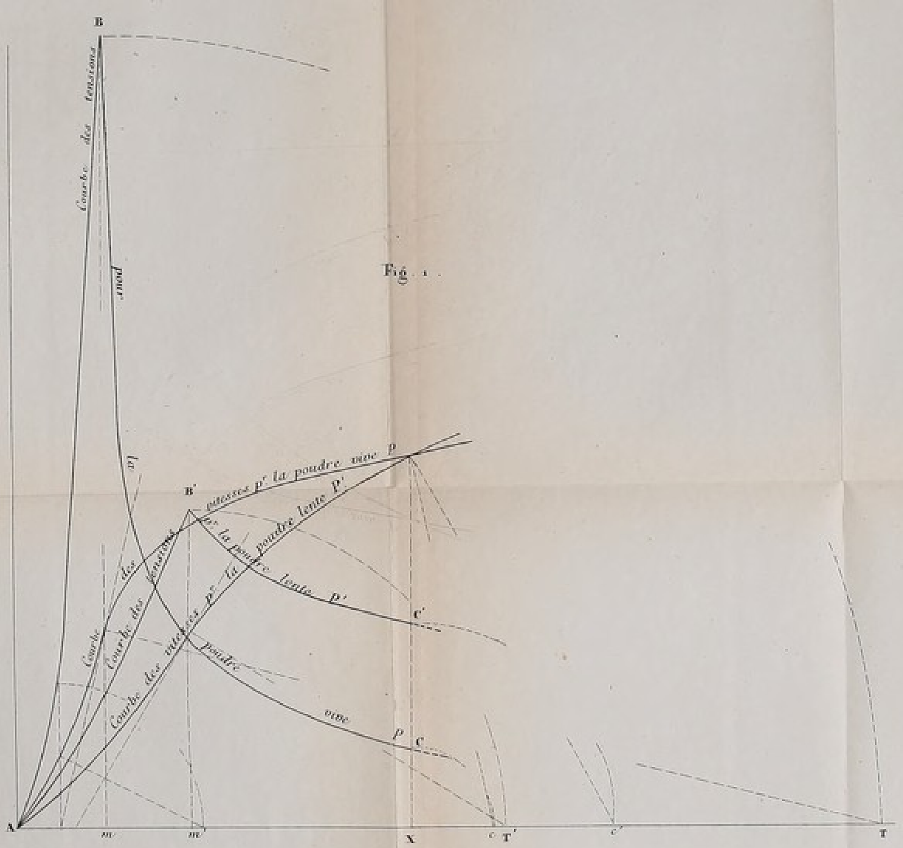


Fig. 1.

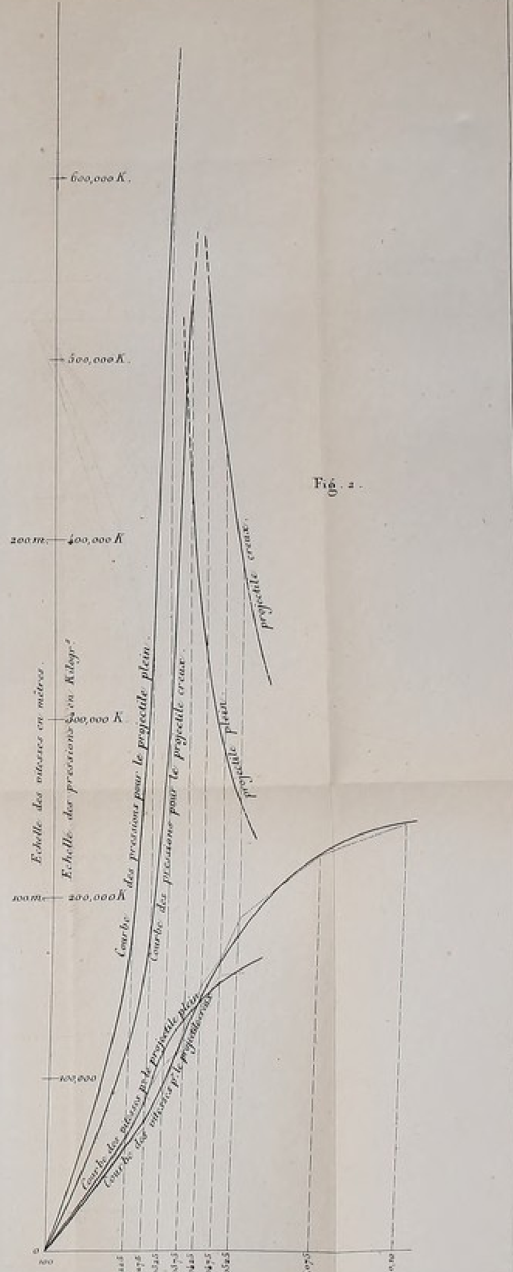
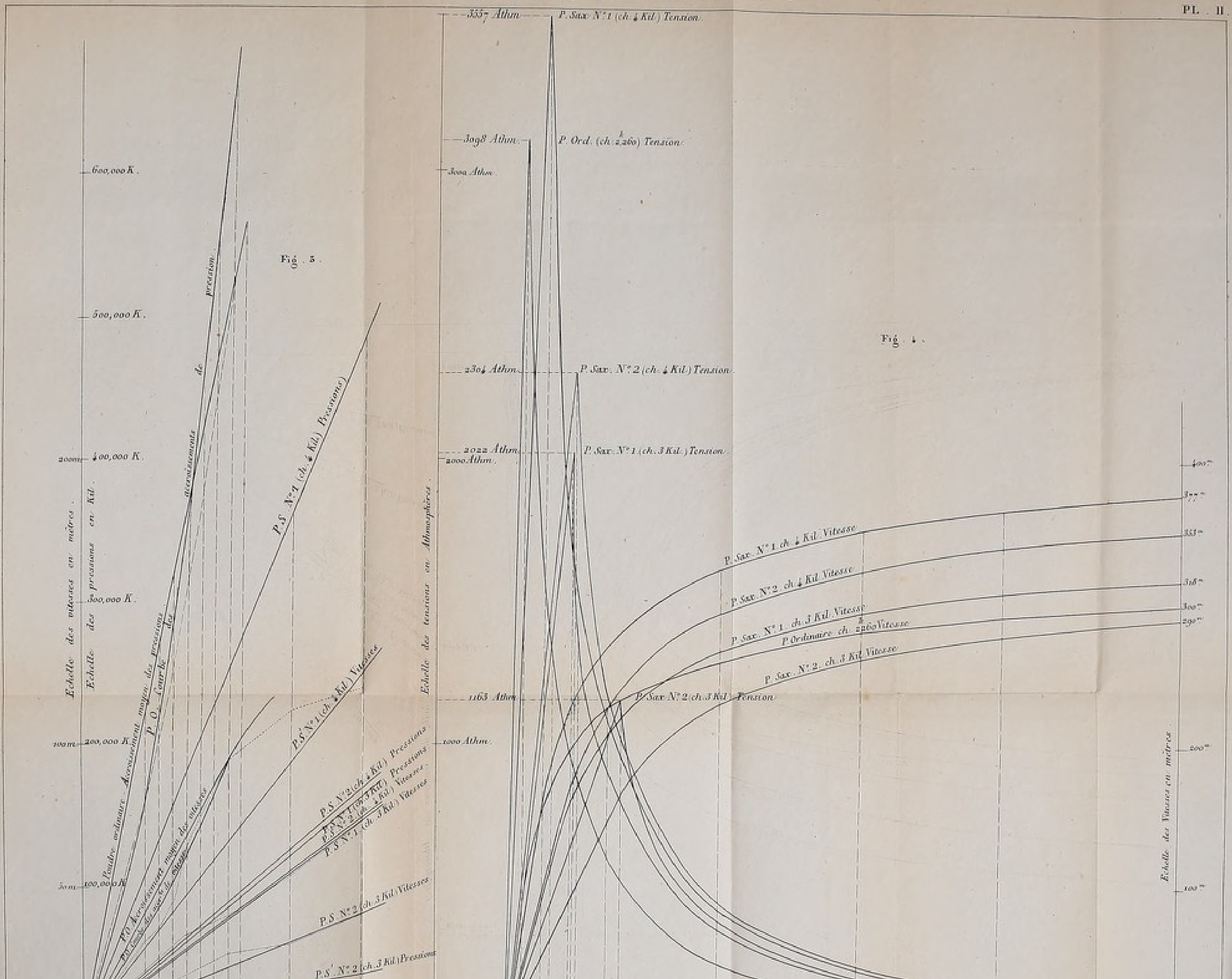


Fig. 2.

J.B. Blasseau Sculp. Imp. de H. Borremans à Brux.



J. B. Blasseau Sculp. Lith. de H. Borremans à Brux.