

chaque canon, chaque charge et chaque espèce de poudre du service réglementaire anglais; 2° le travail théorique maximum par kilogramme de poudre qu'il serait possible de réaliser dans chaque canon avec chaque charge; 3° le coefficient d'efficacité pour chacune des charges de chaque canon. Ce coefficient, qui varie de 50 à 93 p. 100, augmente avec le calibre des bouches à feu.

Quant au potentiel, on peut en calculer la valeur en intégrant entre v_0 et ∞ , ce qui donne :

$$H = \int_{v_0}^{\infty} p dv = 332^{\text{m}}, 128.$$

Cette valeur est un peu inférieure à celles que nous avons précédemment indiquées pour les poudres de guerre, parce que l'expression de p a été établie dans l'hypothèse de l'existence de produits solides ou liquides, qui n'agiraient sur la détente que par la chaleur qu'ils communiqueraient à la partie gazeuse.

Noble et Abel font remarquer, à ce sujet, que le potentiel de la houille, qui a pour valeur $H = 3400^{\text{m}}$, est décuple de celui de la poudre; ils cherchent à expliquer cette infériorité relative de la poudre à canon par ce fait, que cette dernière dépense une quantité de travail considérable pour amener son oxygène à l'état de gaz, tandis que la houille peut immédiatement se l'assimiler sous cette forme. Au surplus, l'emmagasinage de l'oxygène dans la matière de la poudre est fort dispendieux, et l'on peut démontrer ainsi l'impossibilité pratique d'établir économiquement des machines empruntant leur puissance motrice à la force de la poudre à canon.

§ IV.

FORCE.

I. GÉNÉRALITÉS.

La *force* d'une substance explosive peut être définie : la pression, par unité de surface, des gaz de l'unité de poids de la substance occupant, à la température de combustion, l'unité de volume.

On avait autrefois sur la force de la poudre les idées les plus va-

gues et les moins exactes. Schreiber dit, à ce sujet, dans son *Büchsenmeister Discours* de 1656 : « Si l'on fait brûler du soufre sous un litre de sel froid, celui-ci se met à rejaillir et à cracher, tant la chaleur du soufre lui est contraire; ainsi, la chaleur et le froid produisent cette forte vapeur qui, sans leur opposition, resterait à l'état liquide. » Pour augmenter la force de la poudre, on recommandait spécialement l'emploi du sel ammoniac ou salmiac, du camphre, de l'arsenic, du mercure et du vert-de-gris (*).

Plus tard, on imagina que l'humidité renfermée dans la poudre et convertie en vapeur était pour beaucoup dans la force d'expansion des produits. Or, on sait que la tension de la vapeur d'eau produite ne suffit pas à compenser la quantité de chaleur absorbée pour sa formation. Robins (1743) a le premier remarqué que l'humidité ne pouvait que diminuer la force de la poudre, et nous avons signalé plus haut (p. 422) son influence sur la vitesse imprimée au projectile.

On supposa enfin que la force de la poudre était due à l'accroissement d'élasticité de l'air contenu dans les grains et dans leurs interstices, la poudre n'exerçant par elle-même que les fonctions d'un agent calorifique. Cette opinion, soutenue par de la Hire (1702), fut combattue par Robins, qui démontra que l'élasticité ainsi acquise ne devait pas dépasser 5 atmosphères et que la pression résultante ne représentait pas la 1/200 partie de l'effort nécessaire pour produire les effets observés. En même temps, on reconnaissait (p. 461) que la combustion de la poudre engendre un certain volume de gaz permanents, et, dès 1741, un manuscrit prussien portait que « le salpêtre développe, quand on le chauffe, une certaine quantité d'air qui est l'élément actif de la poudre, bien plutôt que

(*) Nous transcrivons, à titre de curiosité, l'extrait suivant d'un manuscrit allemand portant la date de 1563 :

« Zu Salpeter zu giftigem Hauch giebt man, wenn er geschmolzen, [so entstehen] kleine Schlangen, Kröten, Spinnen, Blindschleichen und Basilisken. Letztere werden, wenn man sie nicht hat, auf folgende Weise artificialiter dargestellt. Man bringt frische, mit Leinöl gesalbte Eier 14 Tage in Schafmist, es entstehen dann Würmer drin, die sich auffressen. Den letzten speist man mit Menschenblut, das man lässt in den Badstuben, oder mit dem Hintertheil einer Ratte. Beim Füttern verbindet man sich Nase und Mund mit Raute und Salbei. Nach 14 Tagen brennt man ihn in einem wohl lutirten Glase auf freiem Felde zu Asche. — Ebenso kann man zwei zweijährige Hähne mit brandrothen Augen zusammensperren bis sie sich begatten, die Eier lässt man von einer grossen Kröte ausbrüten. »

l'air interposé entre les grains » : ce qui n'a pas empêché Coxthupe (1842) de proposer, d'ailleurs sans aucun succès, d'enfermer de l'air entre la charge et le projectile, sous prétexte qu'on pouvait ainsi réaliser une économie de 20 p. 100 sur la poudre employée.

La force d'une poudre, telle que nous l'avons définie, paraît dépendre surtout de deux éléments : la quantité de chaleur dégagée et le poids des gaz permanents correspondant à l'unité de poids de la substance. Ces éléments sont très-variables pour les différentes poudres; mais il est remarquable que ces variations s'effectuent en sens inverse, de manière que la valeur de la force reste sensiblement constante. Il peut toutefois arriver, dans certains cas, que cette valeur s'écarte notablement des limites habituelles : les poudres trop vives, dites brisantes, sont le plus souvent caractérisées par la faiblesse de leur densité et l'inflammabilité de leur charbon.

On a pu déterminer par l'expérience les forces relatives de la plupart des substances explosives. Quant aux valeurs absolues, elles ont été calculées à l'aide de diverses hypothèses, que nous passerons rapidement en revue.

II. DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE.

Les forces relatives des diverses substances explosives ont été déterminées par les expériences de Roux et Sarrau (1874). Les appareils employés étaient des bombes en fonte identiques, provenant d'une même coulée et fermées par des bouchons en cuivre taraudés, qui permettaient d'enflammer électriquement la matière. Le principe de l'expérience consistait à chercher la charge de la substance explosive nécessaire pour produire la rupture de la bombe.

On opéra sur la poudre, la nitroglycérine, le coton-poudre, l'acide picrique, les différents picrates métalliques et le fulminate de mercure. Les forces relatives étaient obtenues à 1/40 ou 1/50 près de leur valeur.

Roux et Sarrau ont ainsi reconnu que toutes les substances ont deux ordres d'explosion :

- 1° L'explosion de premier ordre ou *détonation*, provoquée par un agent détonant tel que le fulminate de mercure;
- 2° L'explosion de second ordre ou *explosion simple*, produite par l'inflammation ordinaire de la substance.

Ce phénomène avait été déjà constaté par Nobel (1864) pour la nitroglycérine.

Ces expériences ont, en outre, mis en évidence les faits suivants : la nitroglycérine, le coton-poudre, l'acide picrique et les picrates satisfont à la loi générale énoncée ci-dessus; la poudre ordinaire, en grains ou à l'état de poussier, ne détone que par l'action de la nitroglycérine amorcée par le fulminate; enfin, le fulminate de mercure produit l'explosion de premier ordre par simple inflammation.

Les explosions des deux ordres se distinguent par leurs intensités.

On a comparé les forces de toutes les substances à celle de l'ancienne poudre à fusil, dite B, dont il fallait 13^{gr} pour produire la rupture d'une bombe. En désignant par p, p', p'', \dots les poids de la substance à essayer et des détonateurs auxiliaires qui constituaient la charge de rupture, et par f, f', f'', \dots les forces connues des détonateurs, on avait :

$$pf + p'f' + p''f'' + \dots = 13,$$

d'où :

$$f = \frac{13 - (p'f' + p''f'' + \dots)}{p}.$$

On a pu ainsi former le tableau suivant des forces relatives de diverses substances explosives :

SUBSTANCE EXPLOSIVE.	FORCE RELATIVE.	
	Détonation f_1 .	Explosion f_2 .
Poudre à fusil, dite B.	4,34	1,00
Nitroglycérine.	10,13	4,80
Fulminate de mercure. .	9,28	»
Coton-poudre.	6,46	3,00
Acide picrique.	5,50	2,04
Picrate de potasse. . . .	5,31	1,82
Picrate de baryte. . . .	5,30	1,71
Picrate de plomb. . . .	5,84	1,55
Picrate de strontiane. .	4,51	1,35

Il est difficile de chercher l'explication de ces deux sortes d'explosion dans la différence des chaleurs dégagées ou des quantités de

gaz permanents: l'expérience montre (p. 479) que, sauf pour les picrates et pour la nitroglycérine, ces éléments restent sensiblement les mêmes dans les deux cas. Il semble qu'on puisse attribuer ce phénomène à des relations intermédiaires, provoquées par des circonstances locales et sans influence sur l'état final des produits, par exemple à une dissociation plus ou moins complète de la partie gazeuse au moment de la pression maximum.

III. DÉTERMINATION THÉORIQUE.

On peut calculer la force théorique d'une matière explosive correspondant à l'explosion du second ordre, en supposant tous les éléments réduits à l'état gazeux, ou en admettant, au contraire, l'existence de produits solides ou liquides à la température de combustion.

La première hypothèse ne peut donner qu'une limite supérieure de la valeur absolue de la force.

a) Hypothèse de la gazéification totale.

Dans ce cas, la force (p. 492) est la pression développée par l'unité de poids de la substance détonant dans l'unité de volume, et a pour expression, en vertu des lois de Mariotte et de Gay-Lussac :

$$(1) \quad f = \frac{p_0 v_0 T_0}{273},$$

si l'on désigne par p_0 la pression atmosphérique, par v_0 le volume spécifique des produits gazéifiés (volume de l'unité de poids des gaz ramené à 0° et à 0^m,760) et par T_0 la température absolue au moment de la pression maximum.

Des considérations de thermo-dynamique ont conduit Sarrau à mettre cette expression sous la forme suivante :

$$(2) \quad f = \frac{2}{5} EQ\epsilon,$$

où E représente l'équivalent mécanique de la chaleur, Q la chaleur absolue de combustion et ϵ le poids des gaz permanents fournis par la combustion de 1^r de la substance. On peut ainsi calculer la valeur absolue de la force.

Cette dernière formule offre une analogie remarquable avec l'hypothèse de Berthelot, d'après laquelle la force d'une substance explosive serait proportionnelle au produit de la quantité de chaleur dégagée par le volume des gaz permanents produits, ces deux éléments étant calculés d'après les équations théoriques qu'il a établies (p. 486 et 488).

Nous réunissons dans le tableau ci-dessous les valeurs relatives de la force de diverses substances, déduites de la formule de Sarrau et de l'hypothèse de Berthelot, et nous en rapprochons les valeurs correspondantes déterminées par l'expérience (p. 495):

SUBSTANCE EXPLOSIVE.	FORCE RELATIVE		
	CALCULÉE		OBSERVÉE (Roux et Sarrau).
	Par la formule $f = \frac{2}{5} EQ\epsilon$.	D'après l'hypothèse de Berthelot.	
Poudres au nitrate de potasse. . .	1,00	1,00	1,00
Chlorure d'azote.	1,08	0,90	"
Nitroglycérine.	4,55	7,40	4,80
Coton-poudre.	3,06	3,90	3,00
Picrate de potasse.	1,98	2,70	1,82

b) Hypothèse des résidus solides ou liquides.

Si, d'après les expériences de Noble et Abel (p. 507), on admet l'existence de produits liquides ou solides à l'instant de la pression maximum, la définition de la force reprendra toute sa généralité (p. 492).

Première détermination. — Désignons par w_0 le volume, réduit à 0° et à 0^m,760, des gaz permanents qui résultent de la combustion de 1^r de la substance; on aura :

$$(3) \quad f = \frac{p_0 w_0 T_0}{273}.$$

Le problème est ainsi ramené à la recherche de w_0 et de T_0 .

Le volume w_0 peut être déterminé, pour les diverses substances explosives, de la manière suivante. Si l'on désigne par :

- C** la capacité intérieure du vase où l'on produit la détonation ;
- ω le poids de la charge ;
- α le volume, mesuré à la température de l'explosion T_0 , des produits liquides ou solides résultant de la combustion de 1^{re} de la substance ;
- p_1, T_1 la pression observée dans une expérience et la température absolue correspondante ;
- p, T_0 la pression maximum et la température absolue de combustion ;

on a, en vertu des lois de Mariotte et de Gay-Lussac :

$$(4) \quad \frac{p(C - \alpha\omega)}{T_0} = \frac{p_0\omega}{273},$$

d'où l'on tire, en supposant le volume α négligeable par rapport à la capacité C :

$$w_0 = 273 \frac{C}{p_0\omega} \frac{p}{T_0},$$

et en général :

$$w_0 = 273 \frac{C}{p_0\omega} \frac{p_1}{T_1} \dots$$

Il suffira donc, pour obtenir w_0 , de faire détoner un poids connu de poudre dans une capacité connue, supposée assez grande pour qu'on puisse négliger α par rapport à C, et de mesurer, après refroidissement, la pression des gaz p_1 et la température absolue correspondante T_1 . Pour effectuer cette détermination, Roux et Sarrau se sont servis d'un manomètre différentiel constitué par un piston à deux bases dont les surfaces sont dans le rapport de 1 à 100 : sur la petite base est disposée une éprouvette en fer forgé où l'on produit la détonation, et l'on fait équilibre à la pression des gaz par celle qu'exerce sur la grande base une colonne de mercure dont on évalue la hauteur au dixième de millimètre.

Pour la température T_0 , on adoptera les valeurs théoriques déduites de la formule (p. 482) :

$$T_0 = \frac{Q}{c},$$

en prenant pour Q les valeurs expérimentales (p. 479) et pour c la valeur 0,185 (p. 483).

On forme ainsi, d'après Sarrau, le tableau suivant de la force ab-

solue des différentes poudres, c'est-à-dire de la pression exercée par les gaz permanents produits par 1^{re} de la substance occupant 1 litre à la température de combustion :

SUBSTANCE EXPLOSIVE.	w_0 .	T_0 .	FORCE ABSOLUE.	
			En atmosphères par centim. carré.	En kilogrammes par décimètre carré.
Poudre de chasse fine.	litres. 234	degrés. 4 652	atm. 3 989	kil. 412 000
Poudre à canon.	261	4 360	4 168	431 000
Poudre à fusil, dite B.	280	4 231	4 339	448 000
Poudre de commerce extérieur. . .	281	4 042	4 160	430 000
Poudre de mine ordinaire.	316	3 372	3 792	392 000

Seconde détermination. — Les valeurs précédentes de la force absolue des diverses poudres sont probablement très-supérieures à celles qui se trouvent réalisées dans les conditions de la pratique : cette divergence paraît devoir être attribuée à l'influence du refroidissement par les parois, lequel, nous l'avons déjà dit (p. 485), peut correspondre à un abaissement de température de près de 2 000°. Ce résultat est mis en évidence par le calcul suivant, appliqué aux poudres pebble et RLG qui, dans les expériences de Noble et Abel, se sont comportées sensiblement de la même manière.

Si l'on tient compte des relations :

$$f = \frac{p_0 w_0 T_0}{273}, \quad \Delta = \frac{\omega}{C},$$

Δ désignant la densité de chargement, la formule (4) pourra s'écrire :

$$(5) \quad f = p \left(\frac{1}{\Delta} - \alpha \right).$$

Or, après avoir remarqué que les formules théoriques représentent convenablement les expériences avec $\alpha = 0,65$, Noble et Abel proposent comme plus plausible la valeur $\alpha = 0,6$, en raison de l'influence prépondérante du refroidissement dans le tir aux petites charges. Si donc on porte dans l'expression (5) la valeur $\alpha = 0,6$, et que l'on remplace p et Δ par deux valeurs correspondantes tirées des résultats mêmes de Noble et Abel (p. 506), par exemple, $p = 511 210$ pour

$\Delta = 0,9$ (les unités étant le décimètre et le kilogramme), on aura :

$$f = 261\,000.$$

On peut adopter cette valeur de la force pour les poudres à gros grains de provenance française, qui présentent, au point de vue du dosage et du procédé général de fabrication, une grande analogie avec les poudres anglaises.

§ V.

PRESSION DES GAZ.

L'étude de la force des substances explosives n'est qu'un cas particulier de l'étude générale des pressions exercées à l'intérieur des bouches à feu ou des récipients fermés dans lesquels se produit l'explosion. Nous décrirons plus loin les divers appareils successivement imaginés pour la mesure de ces pressions et la détermination de la loi suivant laquelle elles varient dans les différents cas. Nous nous bornerons ici à exposer quelques considérations se rapportant aux principales circonstances qui paraissent influencer sur leur développement, et à discuter les résultats acquis jusqu'à ce jour relativement aux pressions exercées par les gaz de la poudre en vase clos.

I. GÉNÉRALITÉS.

La loi suivant laquelle varient les pressions développées par les produits gazeux de la combustion d'une substance explosive dépend, d'après Berthelot, de trois éléments principaux : la durée des réactions moléculaires, la propagation successive de la transformation dans toute la masse, et les phénomènes de dissociation se produisant pendant la durée entière de la réaction.

a) Durée des réactions.

Toutes choses égales d'ailleurs (chaleur dégagée, refroidissement par les parois, effets de détente et de dissociation, etc.), les pressions initiales seront d'autant moindres que la transformation d'un

poids donné de matière explosive durera plus longtemps, et l'on peut prévoir, au contraire, la production des pressions les plus considérables dans le cas d'une transformation très-rapide de toute la masse, au sein d'un vase fermé, jointe à l'absence des phénomènes de dissociation (p. 502).

On s'explique ainsi l'intensité de la détonation du chlorure d'azote en présence de corps liquides ou même gazeux, et les effets de destruction produits par la nitroglycérine ou le coton-poudre comprimé, appliqués sans bourrage dans des trous librement ouverts ou même à la surface des rochers et des morceaux de fer.

b) Propagation successive de la transformation.

Pour propager la transformation dans une masse qui détone et qui n'est pas soumise aux mêmes actions dans toutes ses parties, il faut que les mêmes conditions physiques de température, de pression, etc., qui ont provoqué le phénomène sur un point, se reproduisent successivement, et couche par couche, dans toutes les portions de la masse. Or, ce mode de propagation dépend essentiellement des circonstances mêmes de l'inflammation. Considérons, par exemple, l'explosion de la nitroglycérine produite par la chute d'un poids tombant d'une hauteur déterminée. Les pressions qui résultent du choc exercé à la surface de la matière étant trop subites pour se répartir uniformément dans toute la masse, la transformation de la force vive en chaleur a lieu surtout dans les premières couches atteintes par le choc, qui pourront être portées à 180° et dégager une grande quantité de gaz. Cette production de gaz est, à son tour, si brusque que le corps choquant n'a pas le temps de se déplacer et que la détente soudaine des gaz de l'explosion produit un nouveau choc, plus violent sans doute que le premier, sur les couches situées au-dessous. Et ainsi de suite de proche en proche.

La propagation de la déflagration a lieu ainsi avec une vitesse incomparablement plus grande que celle d'une simple inflammation provoquée par le contact d'un corps en ignition et opérée dans des conditions où les gaz se détendent librement au fur et à mesure de leur production. En outre, la vitesse de propagation de la réaction dépend de l'intensité du premier choc, puisque la force vive de celui-ci, transformée en chaleur, détermine l'intensité de la première explosion et, par suite, celle de la série entière des effets