

$\Delta = 0,9$  (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  $180^\circ$  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

consécutifs. Donc, l'explosion d'une masse solide ou liquide peut se développer suivant une infinité de lois différentes, dont chacune est déterminée par l'impulsion originelle.

c) Dissociation.

Les phénomènes de dissociation paraissent exercer la plus grande influence sur le développement successif des pressions produites par les diverses substances explosives.

D'une manière générale, la dissociation tend à diminuer la pression maximum des gaz pendant la première période de l'explosion, en les faisant passer d'un état composé à un état plus simple avec absorption de chaleur; elle tend, au contraire, pendant la période de détente, à ralentir et à uniformiser la chute de pression, en provoquant une série de recombinaisons qui restituent aux gaz, au fur et à mesure de l'accroissement de volume, une portion de la chaleur perdue. Par exemple, si l'on considère une transformation adiabatique sous pression constante et sans production de travail extérieur, 25 volumes d'acide carbonique donneront, par dissociation, 1 volume d'oxyde de carbone et 1/2 volume d'oxygène (période de l'explosion), tandis que 1 volume d'hydrogène et 1/2 volume d'oxygène donneront, par recombinaison, 20 volumes de vapeur d'eau (période de la détente). Au surplus, les phénomènes de dissociation relatifs à la première période doivent avoir, comme l'a montré Berthelot, une influence de moins en moins sensible à proportion que s'élève la température de la masse; pendant la période de la détente, au contraire, la dissociation devient prépondérante au fur et à mesure du refroidissement.

Ces effets, d'ailleurs extrêmement variables, dépendent essentiellement de la forme de la réaction spéciale à chaque substance explosive. Si, en effet, les produits de la décomposition sont assez complexes et, par suite, susceptibles d'être dissociés, la marche des pressions s'effectuera d'une manière successive et graduelle, ralentie pendant la première période de l'explosion, renforcée pendant la détente: le mécanisme de la dissociation joue ainsi le rôle d'une sorte de volant, destiné à régulariser le fonctionnement de la machine thermique. Si, au contraire, la réaction donne naissance à des gaz simples, non susceptibles de dissociation, la pression atteindra instantanément son maximum pour retomber presque aussitôt à son point de départ. Les poudres à base de nitrate de

potasse ou de soude rentrent évidemment dans le premier cas: elles sont donc, sous ce rapport, parfaitement appropriées au tir des projectiles dans les bouches à feu. Il n'en est pas de même des poudres au chlorate de potasse: les produits de la décomposition sont, en effet, des composés binaires, les plus simples de tous et les plus stables (chlorure de potassium, oxyde de carbone, acide sulfureux), qui doivent éprouver les phénomènes de dissociation à une température plus haute et d'une manière moins marquée que les combinaisons moins stables et plus complexes; ces poudres sont donc brisantes. Mais le type des substances brisantes est le chlorure d'azote qui, avec une force théorique sensiblement égale à celle de la poudre ordinaire (p. 497), produit des effets de destruction incomparablement plus grands: ce résultat est dû à ce que cette substance donne immédiatement naissance à deux corps élémentaires (azote et chlore) qui n'ont aucune tendance à se recombinaison, quelles que soient la température et la pression. Quant à la nitroglycérine, quoique brisante, elle fracture les roches, sans les écraser, en menus fragments: les composés formés sont, en effet, plus simples que ceux de la poudre ordinaire, mais n'en sont pas moins en partie susceptibles de dissociation (eau et acide carbonique). Le coton-poudre est encore moins brisant, pour des raisons analogues. L'acide picrique et les picrates donnent lieu à des observations semblables.

II. LOI DES PRESSIONS EN VASE CLOS.

a) Expériences de Rumford (1797).

Les premières expériences précises sur les pressions développées par les gaz de la poudre sont dues à Rumford.

L'appareil employé, qui sera décrit plus loin (p. 562), consistait essentiellement en une sorte de petit canon placé verticalement, dans lequel on enfermait la poudre et dont le couvercle était surmonté de poids qu'on pouvait faire varier à volonté. La poudre sur laquelle on opérait était une poudre de chasse, surdosée en soufre, qui se rapprocherait plutôt de la poudre de mine actuelle. Rumford se donnait, dans chaque expérience, la charge de poudre, et déterminait par tâtonnement les poids nécessaires pour que le couvercle fût seulement soulevé. Il s'est ainsi proposé d'établir la relation qui

existe entre la pression développée par les gaz et la densité de chargement correspondante (p. 499).

Rumford a exécuté une première série d'expériences dans lesquelles la charge a varié de 1 à 18 grains d'Allemagne, valant chacun 0<sup>gr</sup>,0618. Il a ainsi obtenu des pressions croissant de 77<sup>atm</sup>,86 à 10977<sup>atm</sup> pour des densités de chargement variant de 0,042 à 0,756 (Pl. VII, fig. 1):

CHARGE de poudre.	DENSITÉ de chargement $\Delta = \frac{\sigma}{C}$ .	PRESSION.	CHARGE de poudre.	DENSITÉ de chargement $\Delta = \frac{\sigma}{C}$ .	PRESSION.
grains 1	0,042	atm. 77,86	grains 10	0,420	atm. 1884,30
2	0,084	182,30	11	0,462	2219,00
3	0,126	228,20	12	0,504	2573,70
4	0,168	382,40	13	0,546	3283,30
5	0,210	561,20	14	0,588	4008,00
6	0,252	685,60	15	0,630	4722,50
7	0,294	811,70	16	0,672	7090,00
8	0,336	1164,80	18	0,756	10977,00
9	0,378	1551,30			

Rumford conclut, en outre, de ses expériences que la pression développée par la poudre brûlant dans son propre volume devait s'élever à 55 004 atmosphères au moins, résultat qu'il avait déduit de l'éclatement d'une éprouvette survenu dans le tir à chambre pleine: d'après Piobert, ce chiffre, obtenu par un mode de calcul défectueux, doit être abaissé à 23 000 et peut-être même à 12 000 atmosphères. — Rumford fit également exécuter une seconde série d'expériences analogues, qui mérite moins de confiance et sur laquelle nous n'insisterons pas.

Rumford a cherché à représenter les pressions observées dans la première série d'expériences que nous avons décrite par des expressions de la forme :

$$p = a\Delta, \quad p = a\Delta^{1+b\Delta},$$

dans lesquelles  $a$  et  $b$  sont deux constantes numériques,  $p$  la pression et  $\Delta$  la densité de chargement. De ces deux expressions, la pre-

mière était très-défectueuse, ce qui prouvait que les pressions ne suivaient pas la loi de Mariotte; quant à la seconde, dès la septième expérience, elle indiquait 927<sup>atm</sup>,353 au lieu de 811<sup>atm</sup>,70, et l'écart moyen absolu était de 34<sup>atm</sup>.

Si l'on admet que la pression est proportionnelle à une puissance de la densité, on aura :

$$p = c\Delta^n.$$

Tant que  $\Delta$  reste compris entre 0,042 et 0,294, on prendra :

$$n = \frac{5}{4}, \quad c = 39,6,$$

et l'on aura les pressions avec un écart moyen absolu de 21<sup>atm</sup> et un écart moyen relatif de 1/20. Si  $\Delta$  varie de 0,294 à 0,630, on prendra :

$$n = \frac{7}{3}, \quad c = 146,9,$$

l'écart moyen absolu étant de 88<sup>atm</sup> et l'écart moyen relatif de 1/25.

On peut enfin employer une formule déduite d'une loi autrefois formulée par Lombard, et d'après laquelle la pression croît comme le carré de la densité. On a alors, pour les valeurs de  $\Delta$  comprises entre 0,252 et 0,546 :

$$p = 110,2 \Delta^2,$$

avec un écart moyen relatif de 1/27.

Les résultats de Rumford paraissent donc se prêter difficilement à une représentation exacte à l'aide d'une seule formule empirique: Sarrau a démontré qu'ils ne peuvent pas être représentés par une fonction continue. Si l'on forme, en effet, les différences premières des pressions successivement obtenues, on constate l'existence de 4 groupes distincts de ces différences, dont les moyennes, respectivement égales à 70, 143, 351 et 716<sup>atm</sup>, sont entre elles à peu près comme 1, 2, 5 et 10: on est ainsi conduit à admettre l'existence de 4 fonctions continues qui se substituent l'une à l'autre. Cette hypothèse se trouve confirmée si l'on cherche à représenter graphiquement les pressions, en prenant pour abscisse l'inverse de la racine cubique de la densité qui, dans tout système homogène, mesure l'intervalle moléculaire moyen. On obtient alors 4 droites parfaitement distinctes dont les équations, calculées par la méthode

des moindres carrés, représentent les résultats de Rumford avec un écart moyen absolu de 1<sup>mm</sup>,3 à 36<sup>mm</sup> et un écart moyen relatif de 0,0025 à 0,0106.

Ces discontinuités de la courbe représentative des pressions, qui n'ont pu être reproduites par aucun observateur depuis Rumford, sont dues sans doute au mode d'expérimentation adopté. Peut-être aussi faut-il, avec Sarrau, en chercher l'origine dans des phénomènes complexes de dissociation moléculaire ou atomique qui conduiraient à admettre, pour chaque substance, l'existence d'une sorte d'échelle des pressions dont les degrés, successivement atteints par la variation progressive des circonstances de la combustion, doivent correspondre à autant de variations brusques de la loi des tensions.

Expériences de Noble et Abel (1874).

Les expériences de Rumford ont été reprises tout récemment par Noble et Abel dans des conditions sensiblement différentes. Les appareils employés ont été déjà décrits (p. 474); la mesure des pressions s'effectuait au moyen d'appareils crushers (p. 569) munis de cylindres en cuivre ou en étain.

Noble et Abel se sont proposé de déterminer comment varient les pressions avec la densité moyenne des produits de l'explosion. Ils ont opéré sur les poudres pebble, RLG et FG, en faisant varier la densité moyenne de 0,094 à 0,930; une série de 64 déterminations leur a permis de former le tableau des pressions correspondant à des densités moyennes variant par 0,05 de 0,05 à 1,00. Nous en donnerons l'extrait suivant, en réunissant dans une même colonne les pressions relatives aux poudres pebble et RLG, qui ont donné des résultats presque identiques (Pl. VII, fig. 4):

DENSITÉ moyenne des produits.	PRESSION PAR CENT. CARRÉ.		DENSITÉ moyenne des produits.	PRESSION PAR CENT. CARRÉ.	
	Pebble et RLG.	FG.		Pebble et RLG.	FG.
0,1	231 <sup>5</sup> ,5	231 <sup>5</sup> ,5	0,6	2266 <sup>3</sup> ,3	2208 <sup>0</sup> ,0
0,2	513 <sup>4</sup> ,4	513 <sup>4</sup> ,4	0,7	3006 <sup>5</sup> ,5	2883 <sup>6</sup> ,6
0,3	839 <sup>4</sup> ,4	839 <sup>4</sup> ,4	0,8	3942 <sup>0</sup> ,0	3734 <sup>1</sup> ,1
0,4	1220 <sup>5</sup> ,5	1219 <sup>0</sup> ,0	0,9	5112 <sup>1</sup> ,1	4786 <sup>1</sup> ,1
0,5	1683 <sup>6</sup> ,6	1667 <sup>8</sup> ,8	1,0	6567 <sup>3</sup> ,3	6066 <sup>5</sup> ,5

Ces résultats peuvent être représentés avec une grande approximation par une formule unique, si l'on admet l'existence de produits solides ou liquides à l'instant de la pression maximum.

En effet, de la formule (5) de la force, établie dans cette hypothèse (p. 499), on tire la valeur suivante de la pression  $p$ :

$$p = \frac{f\Delta}{1-\alpha\Delta}$$

$\alpha$  représentant le volume, mesuré à la température de l'explosion  $T_0$ , des produits liquides ou solides résultant de la combustion de 1<sup>g</sup> de poudre. Si l'on applique cette formule aux résultats de Noble et Abel relatifs aux poudres pebble et RLG, en admettant pour  $\alpha$  et pour  $f$  les valeurs suivantes, déduites de l'ensemble des observations (p. 506):

$$\alpha = 0,6833, \quad f = 219300,$$

(les unités étant le décimètre et le kilogramme), on obtient pour les pressions une série de valeurs qui ne diffèrent pas sensiblement des résultats observés, comme le montre le tableau ci-dessous:

DENSITÉ de charge- ment.	PRESSION PAR CENTIM. CARRÉ.		DIFFÉ- RENCES.	DENSITÉ de charge- ment.	PRESSION PAR CENTIM. CARRÉ.		DIFFÉ- RENCES.
	Mesurée.	Calculée.			Mesurée.	Calculée.	
0,1	kil. 231	kil. 235	kil. - 4	0,6	kil. 2266	kil. 2230	kil. + 36
0,2	513	508	+ 5	0,7	3006	2943	+ 63
0,3	839	828	+ 11	0,8	3942	3869	+ 73
0,4	1220	1207	+ 13	0,9	5112	5127	- 15
0,5	1684	1666	+ 18	1,0	6567	6926	- 359

On est donc autorisé à admettre comme très-plausible l'hypothèse suivant laquelle les produits de la combustion de la poudre seraient, à l'instant du maximum, en partie liquides et en partie gazeux, la pression observée étant due aux seuls gaz permanents et pouvant se calculer par la loi de Mariotte, en tenant compte du volume occupé par les résidus liquides: conclusion absolument opposée aux résultats de Rumford.