

HISTORIQUE DE LA DECOUVERTE DE L'ONDE DE DETONATION

N. MANSON

*École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique,
Rue Guillaume VII, 86034 Poitiers, France*

"L'étude des matières explosives a quelque chose qui séduit l'imagination, et cela à un double point de vue: en raison de la puissance qu'elle met entre les mains de l'homme, et en raison des notions plus profondes qu'elle nous permet d'acquérir sur le jeu des forces naturelles, amenées à leur plus haut degré d'intensité".

M. BERTHELOT - Sur la Force des Matières explosives d'après la Thermochimie 1883).

RESUME

L'historique concerne essentiellement les travaux dont les résultats ont été publiés entre 1869 et 1900.

Après avoir indiqué dans l'Avant Propos les raisons du choix de ces dates, on précise dans la première partie (qui en comporte quatre) quelles étaient les substances explosives connues et les dispositifs d'amorçage des charges explosives usuelles disponibles, lorsque la mise au point, (vers 1860-1868) des procédés de fabrication industrielle de la nitroglycérine (NG), du coton poudre (CP) (découverts en 1846-47) et l'invention, par A. NOBEL en 1867, de la dynamite kieselguhr (DyK) ont permis la réalisation d'explosions reproductibles et leur étude expérimentale plus systématique qu'auparavant.

Dans la seconde partie, on passe en revue celles de ces études, qui ont conduit entre 1869 et 1885 à la découverte de l'onde de détonation: d'abord en distinguant (essentiellement selon les conditions d'amorçage et de confinement des charges de NG, de CP, de DyK et de celles, alors usuelles de poudre noire, selon les effets sur le milieu connexe de l'explosion de ces charges), les 2 modes types ("ordres") d'explosions: la détonation et les déflagrations; puis, en mesurant (avec une excellente précision) la célérité de propagation de la détonation dans les explosifs condensés (F.A. ABEL en 1873-1874; M. BERTHELOT et coll. en 1879-1885) ainsi que dans les mélanges explosifs gazeux (M. BERTHELOT et P. VIEILLE en 1880-1883), et enfin, en mettant en évidence dans le cas de ces derniers mélanges, le phénomène de transition déflagration - détonation (E. MALLARD et H. LE CHATELIER en 1878-1883).

Un examen succinct des travaux expérimentaux, qui ont plus immédiatement suivi les précédents, fait l'objet de la troisième partie.

On y rappelle plus spécialement, les efforts de M. BERTHELOT (en 1891) en vue de préciser davantage la célérité de l'onde de détonation dans les explosifs liquides, et en ce qui concerne les explosifs gazeux, l'observation par A. von OTTINGEN et A. von GUERNET (en 1887) d'ondes de choc lors de la détonation de mélanges stricts d'hydrogène et d'oxygène, ainsi que, et surtout, les expériences de H. DIXON (en 1893) qui ont apporté de nombreuses confirmations et précisions nouvelles.

Enfin dans la quatrième partie on résume les premières théories avancées, pour expliquer le mécanisme de propagation des détonations, respectivement par F.A. ABEL

et M. BERTHELOT, ainsi que les considérations théoriques de E. MALLARD et H. LE CHATELIER d'une part, et de A. SCHUSTER et H. DIXON d'autre part. Notant que ces derniers ont été les premiers avec V.A. MICHELSON à tenter de décrire l'onde de détonation en tant que onde d'amplitude finie, on termine le présent historique par des remarques sur les travaux de D.L. CHAPMAN d'une part et ceux de P. VIEILLE d'autre part dont certaines conséquences n'ont pas été à notre avis suffisamment soulignées.

AVANT-PROPOS

1. Nous avons choisi de limiter le présent historique aux travaux dont les résultats furent publiés entre 1869 et 1900, pour les raisons suivantes :

La première de ces dates est celle de la publication par F.A. ABEL (cf. Bibliographie ref. /1d/) de la description des expériences qui l'ont conduit à la conclusion qu'en règle générale, un explosif est capable de "détoner" ou de "brûler" (déflagrer) selon les moyens mis en oeuvre pour amorcer son "explosion" (c'est-à-dire initier sa transformation vive, en un mélange essentiellement gazeux à haute température). L'année 1869 est donc celle du début de la discrimination scientifique du phénomène de détonation.

Quant à la seconde des dates citées, c'est celle de la publication par P. VIEILLE /67b,c,d,e/ de la formulation claire du mécanisme de propagation de proche en proche de l'onde de détonation en tant qu'une onde de choc (au sens de HUGONOT /30/) entretenue par la réaction chimique qu'elle amorce, complétant ainsi la théorie qui permet le calcul "a priori" des principales caractéristiques de l'onde de détonation, que venait de publier (1899) D.L. CHAPMAN /15/.

L'année 1900 est donc celle à partir de laquelle les recherches sur l'onde de détonation seront progressivement orientées par la théorie des ondes de choc et de combustion, rapidement très largement admise et dont les lacunes ne commenceront à émerger plus spécialement que 20-25 ans plus tard notamment à la suite des travaux de C. CAMPBELL et coll. /10/, /11/ (cf. par exemple, /31/, /35/, /40a/, /60/, /68/, /71/).

Cependant ni la publication de F.A. ABEL /1d/ ni celles de D.L. CHAPMAN /15/ et de P. VIEILLE /67/ de ne sauraient être isolées de celles qui les ont respectivement précédées et suivies. Aussi commencerons-nous par un bref aperçu de ce que l'on savait des explosions et des explosifs juste avant que F.A. ABEL entreprenne les expériences citées ci-dessus.

Mais, par contre, nous ne donnerons que très peu d'indications sur les travaux qui ont plus immédiatement suivi ceux de D.L. CHAPMAN et de P. VIEILLE, en général bien connus, et qui feront l'objet d'une suite au présent historique.

Ainsi notre exposé comportera (outre le présent AVANT-PROPOS) quatre parties dont le contenu est indiqué dans le RESUME ci-dessus.

2. Soulignons toutefois encore que parmi les travaux que nous passerons en revue, plusieurs sont très bien connus. Ils sont en effet souvent cités et leurs conclusions discutées dans les historiques des ouvrages et articles, non seulement sur la détonation, mais aussi sur la combustion en général (cf. notamment /25/, /31/, /35/, /43/, /62/, /68/).

Mais il en est d'autres, à notre avis tout aussi importants, qui peu à peu sont tombés dans l'oubli, pour des raisons que nous n'avons pu d'ailleurs élucider. Nous en avons déjà signalé récemment certains (cf. /40b/). Mais nous les rappellerons encore ici avec plus de détails, car nous pensons que certains d'entre eux sont particulièrement instructifs.

En outre, chaque fois que cela nous sera possible, nous nous efforcerons de signaler quelles étaient (ou auraient, selon nous, pu être) les motivations qui ont conduit les auteurs des publications à entreprendre ou orienter de telle ou autre façon leurs travaux.

3. Afin de ne pas alourdir le texte qui suit, certains des détails mentionnés ci-dessus, ainsi que ceux relatifs à d'autres travaux, et aussi quelques remarques, feront l'objet de Notes Complémentaires (/N1/, /N2/ ...) placées en annexe. Parmi

ces Notes certaines comporteront des références bibliographiques. Celles-ci figureront dans la Bibliographie de l'ensemble des publications citées par nous ici.

I. AVANT LA DECOUVERTE

I.1 - "La technique précède la Science et l'Art" (W. GOETHE).

La découverte de l'onde détonation, et tout d'abord, la mise en évidence de la possibilité de distinguer deux modes types ("ordres") d'explosion : la détonation (ou explosion de 1er ordre selon la terminologie de l'époque) et la déflagration (explosion de "deuxième ordre") se propageant de "proche en proche", n'a manifestement pu être faite qu'à la suite de la mise au point :

1) de procédés de production industrielle de nouveaux explosifs plus puissants que la poudre noire : le coton poudre (CP), la nitroglycérine (NG) et la dynamite kieselguhr (DyK) ;

2) de moyens d'amorçage fiables de leur explosion.

Ces mises au point ont en effet permis l'utilisation pratique de ces explosifs et en même temps rendu nécessaire une expérimentation plus systématique à la fois en vue de l'amélioration des conditions de sécurité de leur emploi et de l'extension du champ de leur application.

Certes auparavant de très nombreux efforts ont été faits dans des buts identiques. Mais aussi importantes que furent les conclusions des "essais" faits, leur portée était en fait limitée car il ne concernaient alors qu'une seule substance, alors pratiquement disponible : la poudre noire (PN).

L'historique de ces efforts a fait l'objet de nombreux ouvrages, dont celui très documenté de ROMOCKI /55/, et d'autres plus succincts, parmi lesquels nous citerons ceux de UPPMAN et MAYER /65/, de BERTHELOT /2a/, GUTTMAN /28a, b/ et de MARSHALL /41/.

Nous nous bornerons donc ici à quelques remarques destinées à souligner ce qui, concernant d'une part, les explosifs et d'autre part, les moyens d'amorçage, nous paraît être instructif pour l'historique de la découverte de l'onde de détonation.

Nous indiquons, cependant, dans la Note Complémentaire N1, la chronologie des découvertes, jusqu'en 1875, des substances explosives, laquelle pensons-nous, fait apparaître l'importance de certaines de ces dernières.

I.2 - Les explosifs

I.2.1 - Concernant la période qui a précédé la découverte par H. BRACONNOT en 1833 /7/ de la nitrocellulose (NC) - découverte considérée souvent (cf. /66b/), en matière d'explosifs, comme ayant marqué le début d'une nouvelle époque, nous noterons que :

1° si les efforts faits pour améliorer la poudre noire (PN) par des additifs n'ont pas été couronnés de succès et cela même lorsque ces efforts ont pris en 1780 un caractère nettement plus méthodique avec les tentatives de BERTHOLLET, en ce qui concerne les procédés de fabrication et les modalités d'emploi de celles-ci en génie militaire et génie civil, les progrès ont été par contre constants et notables ;

2° dès la découverte des fulminates d'or au XVIIe siècle, puis d'argent et de mercure au début du XVIIIe siècle, (cf. N1), il avait été noté que l'explosion de ces substances se différençait très nettement par sa vivacité et ses effets sur le milieu connexe de celle (en quantité comparable) de la poudre noire.

Selon S.J. von ROMOCKI /55/ la dénomination "explosifs brisant" ainsi que "détonation", "déflagration" dateraient de la fin du XVIIIe siècle. Mais pour autant que l'on peut le juger, d'après ce que disent ceux qui ont examiné les écrits de l'époque (ROMOCKI /55/, GUTTMANN /28/ en particulier), la qualification des explosions, de "détonante" et de "déflagrante" ne repose pas sur des faits scientifiquement établis.

I.2.2 - Pour ce qui est des travaux que M. BRACONNOT /7/ et de ceux qui ont plus immédiatement suivi ceux-ci, nous rappellerons que :

1° la nitrocellulose, préparée en 1833 par BRACONNOT en étudiant l'action de l'acide nitrique sur les substances végétales (et qu'il appelait "xyloïdine"), n'avait qu'un taux d'azote inférieur à 5-6 % ;

2° BRACONNOT avait certes précisé qu'elle s'enflammait très facilement, mais il n'avait été alors nullement question de son emploi en tant que poudre (cf. /55/, /66b/). C'est en étendant les recherches de BRACONNOT à d'autres substances et en mettant en oeuvre des mélanges d'acides que furent découverts en 1846-47, à quelques mois d'intervalle, par C.F. SCHONBEIN /61/, le premier CP (le fulmicoton) et par A. SOBRERO /59/, la nitroglycérine.

I.2.3 - Concernant cette dernière (NG) nous noterons que :

1° celle-ci a été tout d'abord utilisée (et l'est encore) comme médicament dans certaines maladies cardiaques ;

2° sa fabrication en tant que explosif a été tentée par Emmanuel NOBEL, après son séjour en Russie pendant la guerre de Crimée (1856), mais une première mise au point d'un procédé industriel n'a été achevée qu'en 1863 par son fils Alfred Bernhard NOBEL (cf. /28/, /46/, /47/) ;

Par la suite, plusieurs accidents, (dont celui en 1864 au cours duquel le plus jeune des frères d'Alfred a été tué avec 4 autres personnes) sont venus interrompre la fabrication du NG avant que ne fussent trouvés des procédures jugées suffisamment sûres (quoique en la seule année 1870, six fabriques furent encore détruites par des explosions dont les causes sont demeurées inconnues /28/, /65/) ;

3° son utilisation s'est accélérée très rapidement après que A. NOBEL a inventé successivement (cf. /49/) : en 1864, un premier détonateur (inflammateur à poudre noire avec du fulminate de mercure) puis en 1866-67, la dynamite kieselguhr et le détonateur à fulminate de mercure et enfin en 1875, la dynamite-gomme (cf. /52/ ainsi que par exemple /28/, /52/).

I.2.4 - L'utilisation pratique du CP s'est heurtée à des difficultés plus grandes que celles de la NG. Entre la découverte par SCHONBEIN et les expériences de F.A. ABEL précisant les conditions d'emploi du CP en tant qu'explosif (1869), se sont écoulés 23 ans contre les 16 ans et 20 ans séparant la découverte de la NG par SOBRERO, respectivement des premières tentatives d'utilisation pratique par NOBEL père et fils (1862), et de l'invention de la DyK par A. NOBEL (1866). De plus pendant de longues années, on a surtout envisagé l'emploi du CP dans les armes à feu à la place de la PN et ce n'est qu'en 1884-85, après invention par P. VIEILLE de la "poudre B" et par DUTTENHOFER (cf. par exemple /28/, /66b/) de "la poudre sans fumée" que fut semble-t-il irrévocablement abandonnée toute idée en vue d'un tel emploi.

Enfin et surtout il y eut dans les fabriques du CP entre 1846 et 1869 un bien plus grand nombre d'accidents particulièrement graves, (notamment en 1847 à la suite d'explosions à Vincennes et au Bouchet en France, à Taversham en Grande-Bretagne) suivis d'interdictions de fabrication plus ou moins longues et même quasiment définitives en 1865 en Autriche à la suite de l'explosion d'une usine près de Wiener Neustadt (cf. /28/, /29/, /55/, /66b/).

Comme on le sait maintenant ces explosions étaient imputables à l'instabilité du CP due à l'utilisation de matières premières contenant des impuretés mal définies et imparfaitement éliminées au cours de la fabrication.

Les premiers progrès dans l'élimination de ces défauts ont été obtenus par LENK von WOLFSBURG entre 1845 et 1853 à qui l'on doit une première étude systématique des différentes phases de la fabrication et l'élaboration d'une technique opératoire, qui dans un premier temps a été jugée sûre. Cependant, plusieurs nouvelles explosions (et surtout de celle en 1865 déjà citée de l'usine à Wiener Neustadt) ont montré qu'en fait ce n'était pas encore le cas. Certes, la technique opératoire préconisée par LENK von WOLFSBURG était, comme l'a constaté par la suite F.A. ABEL, dans l'ensemble correcte /1a/. Mais c'est grâce à ce dernier que furent levés tous les obstacles rencontrés auparavant dans la fabrication du C.P. En particulier, F.A. ABEL a mis au point une technique de purification du produit obtenu /1b/, inventa une épreuve de stabilité de de dernier /1c/ dite "épreuve d'Abel" (qui s'est d'ailleurs avérée être, par la suite, de très grande utilité dans les recherches sur les nitrates organiques) et enfin démontra l'intérêt de stocker le CP à l'état humide (avec 20 % d'eau) (cf. /1d/).

I.3 - Amorces, détonateurs

I.3.1 - Avant l'invention en 1831 par W. BICKFORD /6/ de sa mèche de sûreté, la mise à feu de charges de PN était en général opérée en inflammaant une traînée de poudre, un brin de paille rempli de PN ou encore des bouts de corde imprégnés de cette dernière (étoupilles). Par ailleurs, avant 1830, plusieurs tentatives de réalisation d'amorces furent faites (cf. /29/, /32b/ ainsi que /12/, /17/, /28b/, /65/, /66b/) dont en particulier, celles de :

a) FORSYTH qui, en 1805, a fabriqué un allumeur à percussion sous forme de capsule en cuivre remplie de chlorate de potassium. Mais, bien que ce dernier ait été mélangé à de la cire d'abeille, sa sensibilité au frottement était encore trop grande pour permettre un emploi de l'allumeur en toute sécurité ;

b) BALLOT et EGG, qui ont expérimenté vers 1815, sans succès véritable, d'autres mélanges parmi lesquels ceux à base de fulminate de mercure ;

c) E. G. WRIGHT /70/ qui a utilisé en 1823, ce fulminate pour la confection des amorces cette fois-ci semble-t-il avec succès.

I.3.2 - L'allumage électrique de la PN expérimenté déjà au XVIII^e siècle (décharges de bouteille de Leyde) semble avoir été essayé en diverses circonstances entre 1812 et 1822 à l'aide de piles de VOLTA et de DANIEL (cf. /14/, /17/, /29/, /65/).

Par la suite on a utilisé pour amorcer les charges de PN lors de divers travaux

a) le fil chaud (notamment, aux Etats-Unis vers 1855-60) ;

b) les étincelles HF produites par les bobines de RUHMKORFF et celles

fournies par des magnetos (en France, respectivement en 1853 et 1856) ;

et, en 1875, il existait déjà plusieurs types d'exploseurs électriques dont le "coup de poing" de BREGUET (cf. /14/, /65/).

I.3.3 - Dès les premiers essais vers 1848-50 de l'utilisation du CP à la place de la PN, il a été constaté que les charges de même poids de celui-ci amorcées par les mêmes procédés pouvaient produire un effet sur le milieu connexe environ 10 fois supérieur à celles de la PN.

Mais malheureusement cette supériorité n'était pas systématiquement reproductible, d'une part, comme nous savons maintenant, en raison des impuretés contenues dans le CP alors disponible, et d'autre part, du fait des moyens d'amorçage mis alors en oeuvre. Comme nous le verrons ci-dessous il faudra attendre pour éclaircir ces faits, outre la mise au point par F.A. ABEL de la fabrication du CP stable exempt d'impureté, l'invention, par A.B. NOBEL des "détonateurs". Ce dernier savait en effet, depuis au moins 1859-61 /47/, /57/ qu'à condition d'amorcer l'explosion de la NG au moyen d'un choc, c'est-à-dire d'une "explosion primaire", il n'était pas nécessaire de la confiner (comme cela se faisait pour la PN) pour que son "explosion" soit violente. Et, après quelques essais pour produire cette "explosion primaire" (d'abord au moyen de charges de PN confinées, ensuite au moyen de celles formées uniquement de nitrate de potassium, puis avec celles constituées de la PN (2/3) mélangée à de la NG (1/3)), il mit au point (cf. /49/) :

a) en 1863 son premier "Inflamateur de NOBEL" (Nobel Lighter" selon /46/) en associant la PN et le fulminate de mercure ;

b) en 1864, son "Détonateur" (cf. par exemple /52/, /65/) constitué par une capsule en cuivre dans laquelle était introduite pratiquement jusqu'au fond une mèche de sûreté de BICKFORD et qui contenait une charge de fulminate de mercure. Plongé dans la NG ce détonateur en assurait à coup sûr l'explosion, ainsi que celle de charges de la DyK et comme nous le savons maintenant de bien d'autres explosifs que l'on appelle depuis "secondaires".

I.3.4 - Dans l'Avant-Propos nous avons indiqué que nous avons choisi 1869 comme année le début de notre historique, parce que c'était celle de la publication par F.A. ABEL de ses travaux au cours desquels il avait abouti à une discrimination rationnelle entre la détonation et la déflagration.

En fait, nous aurions pu aussi choisir l'année 1864 (voire même 1860) puisque manifestement A. NOBEL savait déjà alors comment obtenir des explosions différentes,

en vivacité et en violence, de la NG, en utilisant une élévation localisée de la température (inflammation à l'aide d'une mèche) ou un choc (une explosion primaire).

Mais non seulement F.A. ABEL a expérimenté plusieurs explosifs (dont NG, CP et DyK) mais en outre, et surtout, il a mis en évidence, en ce qui concerne l'amorçage de la détonation, l'importance d'un "effet mécanique".

II. LA DECOUVERTE DE L'ONDE DE DETONATION

Comme nous l'avons indiqué (cf. § I.2.1) on avait déjà bien noté depuis au moins la fin du XVII^e siècle que la vivacité de l'explosion et les effets de celle-ci étaient très différents de celle de charges équivalentes de la PN. Nous avons en outre souligné que ces faits ne furent considérés d'une manière vraiment systématique qu'après la découverte du CP et de la NG.

Les conclusions de cette approche furent obtenus en trois temps se recouvrant en partie.

Le premier de ces temps est celui pendant lequel, entre 1869 et 1873, F.A. ABEL /1d,e/ puis L.P. ROUX et E. SARRAU /56/ ont constaté que les effets différents des explosions, produites au sein d'un même milieu connexe, n'étaient pas uniquement dus au poids et à la composition des charges mais aussi à la façon dont celles-ci étaient amorcées et, dans certains cas également, à leur confinement : convenablement amorcées, les charges de certains explosifs explosaient d'une façon particulièrement vive et violente : c'est-à-dire détonaient.

Le second temps est celui des mesures en Angleterre, en 1873-74, par F.A. ABEL /1f/, et à partir de 1879 en France, par les membres de la Commission des Substances Explosives présidée par M. BERTHELOT /3g/ de la célérité de propagation de la détonation dans des charges de CP de DyK et de la NG en général tubulaires de grande longueur.

Enfin le troisième temps est celui des expériences de M. BERTHELOT et P. VIEILLE /2d/, et /4/ et de E. MALLARD et M. LE CHATELIER /39/ sur la propagation des explosions dans des mélanges gazeux.

II.1 - Premier temps : Discrimination des explosions en détonations et déflagrations

II.1.1 - Soulignons d'abord que de la lecture des premiers paragraphes du mémoire de F.A. ABEL /1d/ et de ceux de la Note de L.P. ROUX et E. SARRAU /56/, il ressort clairement que leurs expériences avaient un but nettement pratique.

Manifestement pour F.A. ABEL il s'agissait de préciser les conditions dans lesquelles l'emploi du CP (dont il venait, comme nous l'avons rappelé, de parfaire le procédé de fabrication industrielle), en tant qu'explosifs était avantageux, notamment du fait que sa manipulation était désormais moins dangereuse que celle de la NG.

Quant à L.P. ROUX et E. SARRAU, qui participaient à l'exécution d'un programme de travaux visant à "apprécier la force relative de divers milieux explosifs", ils avaient pour mission la comparaison des explosions des charges (à l'air libre, et dans des bombes d'épreuves spécialement agencées) de la PN avec celles des DyK, ayant une teneur en NG bien définie (de 30 à 90 %).

II.1.2 - Dans ses expériences, F.A. ABEL a utilisé non seulement le CP, mais aussi la NG, la PN, le fulminate de mercure, le chlorure et l'iodure d'azote. Il en faisait exploser les charges à l'air libre, dans l'eau et dans des enceintes plus ou moins hermétiques, en les amorçant au moyen de "sources de chaleur" (flames, résistances électriques...), d'amorces au fulminate de mercure (additionné ou non de PN) et d'une "détonation primaire", obtenue, en faisant exploser (détoner) une charge auxiliaire formée par l'explosif étudié ou par un autre, ceci afin d'observer les conséquences d'un amorçage au moyen d'une plus ou moins forte "percussion".

Malheureusement dans son mémoire F.A. ABEL /1d/ ne donne que très peu d'indications sur la forme, la taille, le poids des constituants des charges expérimentées par lui. En outre, presque toutes ses conclusions sont qualitatives.

Pour notre part nous avons surtout noté qu'il insiste en particulier sur les faits suivants :

1° c'est son assistant E.O. BROWN qui a eu l'idée d'observer si le CP se comporte à l'air libre comme la NG, c'est-à-dire explose le plus violemment (détoné) sous l'action d'un détonateur mais brûle lorsqu'il est simplement enflammée ;

2° l'explosion d'une charge de CP à l'air libre, amorcée au moyen d'une détonation, produit des effets destructifs plus importants que si cette charge est confinée en vase clos et enflammée par simple action de la chaleur ;

3° l'amorçage de la détonation du CP nécessite des détonateurs au fulminate de mercure, au fulminate d'argent et au chlorure d'azote, nettement plus puissants (c'est-à-dire plus importants) que ceux nécessaires à l'amorçage de la détonation de la NG ;

4° une charge de la NG (et aussi l'iodure d'azote), même importante, est incapable de faire détoner le CP, lequel par contre amorce facilement sa détonation.

Il conclut enfin plus spécialement que :

1° la cause des explosions les plus violentes du CP et de la NG à l'air libre, est l'action mécanique produite lors de l'amorçage, par le détonateur, "sans que l'action directe de la chaleur développée par l'amorce, n'entre en rien dans la violence et les effets destructifs des explosions ainsi amorcées de ces substances";

2° pour expliquer les différences dans le comportement des différents explosifs, lors de l'amorçage de leurs explosions, il semble que l'on puisse se référer aux vibrations que produit l'explosion.

Ce dernier point concerne ce qui a été appelé par la suite la théorie (ou hypothèse) des "vibrations synchrones" de F.A. ABEL que ce dernier a proposé pour expliquer l'amorçage à distance des charges explosives. Nous reviendrons sur ce point à propos des premières théories (cf. §IV.1) et signalerons alors quelques expériences que P. CHAMPION et M. PELLET (cf. /N4/) ont effectué spécialement en vue d'étayer la théorie de F.A. ABEL.

II.1.3 - Dès 1871, les essais de A. NOBEL et les constatations faites par F.A. ABEL conduisaient M. BERTHELOT à insister dans la 1ère édition de son ouvrage "Sur la Force des Matières Explosives" /3a/, /3b/, sur "la grande diversité entre les conditions de déflagration du CP et de la NG suivant la manière de les faire détoner" et sur le rôle des "chocs".

Mais il semble que ce n'est qu'à la suite des essais particulièrement méthodiques effectués en 1872 par L.P. ROUX et E. SARRAU /56/ que la discrimination des explosions en détonation et déflagration ait été définitivement acceptée.

En effet, en faisant exploser des charges bien définies (de 1 à 16 gr) de PN et de DyK à 30, 50 et même 90 % de NG au moyen d'"exploseurs" formés de quantités connues de fulminate de mercure seul, ou avec de la PN, à l'air libre et en bombe d'épreuve spéciale, ils ont pu résumer les conclusions de leurs essais en précisant la quantité (en gr) de PN qui produit le même effet (éclatement de la bombe d'épreuve prévue pour se rompre à une pression donnée) que la détonation de 1 gr de NG, dans telle ou autre des dynamites expérimentées, amorcées par tel ou autre explosif, et écrire :

"Nous concluons donc que la dynamite peut, suivant les circonstances, produire des explosions d'ordre complètement différent. La percussion seule nous a paru jusqu'ici susceptible de produire l'explosion de premier ordre ou détonation. La pression et la température auxquelles est soumise la matière ne changent pas les conditions du phénomène".

II.2 - Deuxième temps : Célérité de propagation dans la détonation dans les explosifs condensés

II.2.1 - Mesures de F.A. ABEL

Comme nous l'avons déjà suggéré ailleurs (cf. /40b/), le fait que les toutes premières mesures de F.A. ABEL de la célérité de l'onde de détonation ne sont plus

mentionnées dans les publications parues depuis 50 ans est peut être dû à ce qu'il ne leur consacre qu'une partie relativement réduite de son mémoire /1f/.

En effet, dans ce dernier, sont décrites en détail surtout les expériences faites afin, d'une part de préciser les conditions dans lesquelles le CP peut être stocké et manipulé avec le maximum de sécurité en présence de charges explosant à proximité et, d'autre part pour expliquer, à l'aide de la théorie de "vibrations synchrones", le phénomène de transmission de la détonation à distance.

Ces expériences ont en effet concerné l'amorçage de la détonation du CP en fonction :

1° de son état : sec, humide, comprimé, gelé, additionné de nitrate de potassium ;

2° de la disposition et de la forme des charges : à l'air libre, immergées dans l'eau, dans des tubes ayant une surface interne plus ou moins rugueuse ;

3° de leur température : charges préchauffées ;

4° des caractéristiques des charges initiatrices ("donneurs") ;

et, à sa comparaison avec d'autres explosifs (NG, DyK, fulminate de mercure notamment).

Mais à peine la cinquième partie de ce mémoire était consacrée par F.A. ABEL la détermination de la célérité de propagation au sein des charges mêmes.

Pour effectuer cette dernière, ABEL a utilisé un chronographe (fig. 1) construit par Andrew NOBLE /50/ aux fins de mesure de la vitesse des projectiles dans les canons (cf. N2).

Lors d'une première série d'expériences, ABEL disposait de disques de CP, de 75 mm de diamètre et de 22,5 mm d'épaisseur, bord à bord formant une charge ("rangée") de section non uniforme longue de 12,76 m en général et parfois de 9,12 m seulement. Dans une autre série d'expériences, les disques de CP de 3,1 cm de diamètre et de 3,8 cm d'épaisseur, étaient disposés de façon à former un bloc cylindrique.

Enfin quelques mesures de la célérité ont été faites en aménageant dans ces blocs, un canal axial de 6 mm de diamètre.

La détonation était amorcée à une des extrémités de la "rangée" ou du bloc au moyen d'un détonateur "ordinaire".

Des fils fins de cuivre dont la rupture assurait celle de chacun des circuits primaires des bobines d'induction B du chronographe, (cf. fig. 1 et N2) étaient intercalés entre les disques (formant les rangées ou blocs) environ tous les 1,2 m ou 1,8 m de sorte que lors de chaque expérience la célérité était mesurée sur 6 bases au moins.

ABEL a ainsi constaté que la célérité de propagation de la détonation était "remarquablement uniforme" (à environ ± 15 à ± 17 m/sec près) tout au long des charges.

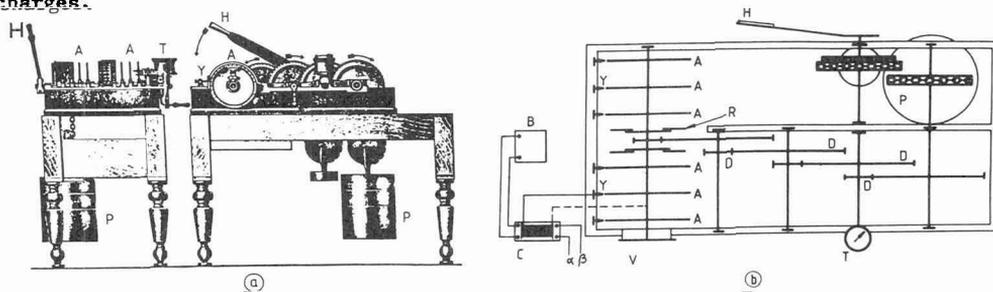


Fig. 1 - Chronographe de A. NOBLE

a - vues de face et latérales (d'après /50/) ; b schéma de principe
A - disques métalliques avec sur les bords des bandes de papier recouvertes de noir de fumée

H - manivelle
T - compte-tours
R - régulateur
D - roues dentées
Y - étincelle

P - poids
B - batterie
C - bobine
V - vernier (au millième)
α β - bornes du circuit primaire de C

En particulier, elle était :

1° de 5136 ± 17 m/sec dans les "rangées" des disques disposés de bord à bord longues de 12,76 m et de 5545 ± 15 m/s dans celles de 9,12 m de longueur ;

2° à 5769 ± 15 m/sec dans les blocs formés de disques de CP de 3,1 cm de diamètre, non perforés, et, sensiblement plus grande lorsque les blocs étaient perforés ;

3° accrue, si le CP était comprimé ou était humide, atteignant, dans le cas de "rangées" de disques de 75 mm de diamètre de CP saturé d'eau (+30% en poids) : 5900 m/s.

Par contre, les expériences avec des "rangées" de disques (de 78 mm de diamètre) de CP "nitré" (c'est-à-dire contenant environ 38 % en poids de nitrate de potassium, ajouté afin de compenser la teneur déficitaire du CP en oxygène) ont révélé une diminution sensible (de 600 m/s environ) de la célérité.

La DyK expérimentée par ABEL était celle n° 1 de NOBEL (c'est-à-dire à 73 % de NG). Les charges longues de 9,12 m et de 12,76 m étant obtenues en pressant l'une contre l'autre des cartouches de 13 mm de diamètre et de 78 mm de longueur.

Les fils de cuivre commandant les étincelles du chronographe Noble étaient espacés soit de 1,21 m soit 1,81 m et la détonation amorcée (à une des extrémités de la charge) au moyen d'un détonateur ordinaire. La célérité moyenne de propagation de la détonation observée le long de ces charges était nettement supérieure à celle dans le CP : également constante, elle variait toutefois d'une expérience à l'autre entre 5938 et 6564 m/s.

Par contre, dans la NG, elle était nettement plus faible (de 1612 à 1822 m/s). Celle-ci était contenue dans une auge métallique en forme de V longue de 4,3 m et haute de 50 mm, mais qui n'était remplie en général qu'au tiers de sa hauteur (quelquefois à moitié). Les fils de cuivre des primaires des bobines du chronographe étaient disposés à 0,7 m l'un de l'autre.

Signalons enfin que :

1° F.A. ABEL a également mesuré la célérité avec laquelle s'effectue la transmission de la détonation lorsque des charges cylindriques de CP et de la DyK sont placées à une certaine distance l'une de l'autre (de 13 mm par exemple) soit à l'air libre, soit dans des tubes métalliques.

Dans tous les cas les célérités observées étaient moindres que dans le cas de charges continues, et la diminution de la célérité était plus importante dans le cas de DyK (de près de 4000 m/sec) que dans celui du CP (au plus de quelques centaines de m/s). En outre, lorsque la distance entre les charges était accrue, la célérité de propagation n'était plus constante.

2° il est souligné en 1873 dans la revue Nature /1h/ à propos de tout premiers résultats d'ABEL, , qu'étant données les valeurs connues de la vitesse du son dans l'air (335 m/s), celles usuelles de balles de fusil (427 m/s) et celles de la célérité que vient d'observer F.A. ABEL: "la détonation dans le CP se déplace plus rapidement que n'importe quel autre milieu excepté la lumière et l'électricité".

II.2.2 - Mesures de la Commission des Substances explosives

Signalons d'abord que la Commission des Substances Explosives a été instituée par décret en juin 1878 et placée sous la présidence de M. BERTHELOT, "dans le but de permettre à l'Administration de la Guerre de s'éclairer sur les besoins des divers services intéressés..." et en vue "d'approfondir l'étude des questions qui peuvent lui être soumises".

Les mesures de la célérité de propagation décrites par M. BERTHELOT /2g/ faisaient ainsi partie d'un programme de travaux de mise au point de cordons détonants, dont étaient, à partir de 1878, plus spécialement chargés P. VIELLE et H. SEBERT /57/.

Ces travaux concernaient en conséquence des charges explosives formées de tubes en plomb, en étain, en métal anglais, de petit diamètre intérieur (1 à 6 mm) et de grande longueur.

Les chronographes utilisés étaient d'abord celui de SCHULZE-DEPREZ, dérivé de celui mis au point par SCHULZE en 1864, et du velocimètre construit par DEPREZ, (cf. /65/), puis celui de LE BOULANGE (cf. N3).

Dans les deux cas, le passage de la détonation en une section de la charge était repéré par la rupture d'une bande mince, (ou fil fin) métallique faisant

partie du circuit d'alimentation d'un électro-aimant. Ce dernier commandait :

a) dans le cas du chronographe SEBERT-DEPREZ, le déplacement d'un stylet, inscrivant sur la surface recouverte de noir de fumée d'un tambour enregistreur DEPREZ (Fig. 2), un trait fin et,

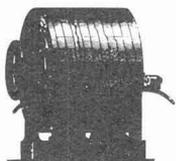


Fig. 2 - Chronographe SCHULZE
-DEPREZ d'après réf /65/

b) dans celui de LE BOULANGE, la chute, soit de la tige chronomètre, T, soit, de celle de commande T' (cf. Fig. 3 et N3).

Compte tenu de la vitesse de rotation du tambour DEPREZ (sur lequel entre les signaux marquant le passage de la détonation, on enregistrerait également le mouvement d'un diapason de fréquence $f = 500$), un déplacement de 1 mm de sa surface périphérique, équivalait à environ 4 millisecondes. En conséquence, des célérités de 6000 m/s mesurées sur des distances de 100 m pouvaient être considérées comme connues à environ 6 à 8 % près.

Avec le chronographe LE BOULANGE la précision de telles mesures était un peu meilleure (\pm à 5 %) et était en tous les cas fort remarquable pour l'époque, surtout

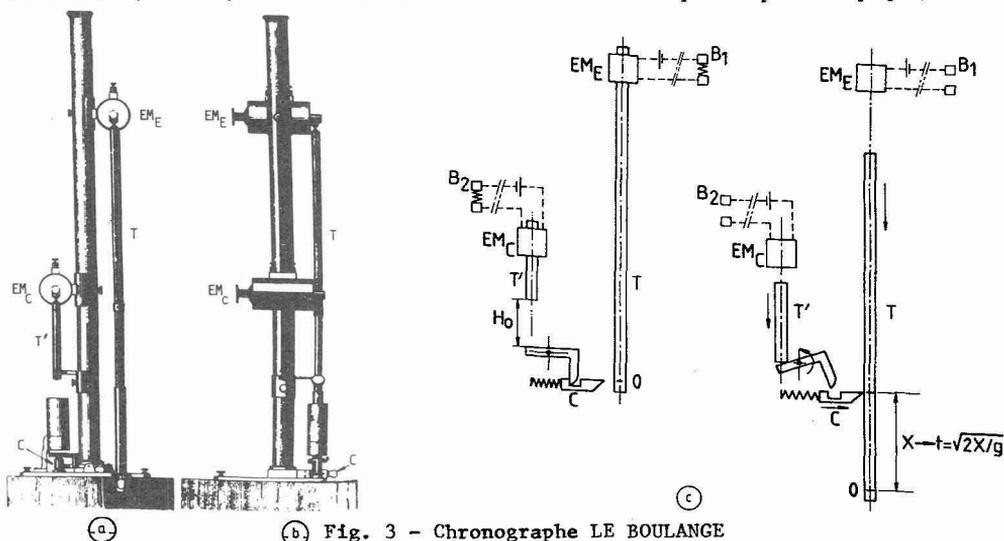


Fig. 3 - Chronographe LE BOULANGE

a b - vues de face et de profil d'après une gravure de l'époque (1875);
c - schéma de principe ;

B₁, B₂ - bandes interrupteurs
T¹ - tige chronographe
C - couteau marqueur

EM_E, EM_C - électro-aimants
T¹ - tige de commande
 $D = L/\tau$; $\tau = \sqrt{2X/g} - \sqrt{2H_0/g}$

si l'on tient compte de l'incertitude sur l'uniformité des charges expérimentées longues de 100 m.

Ces dernières étaient formées par du CP (pulvérulent, plus ou moins comprimé, à hydro-cellulose granulée) ayant une densité de 0,6 à 1,4 selon les cas, de la NG (à la température de 12 à 20°C), par de la nitromanite pulvérulente comprimée à la densité $\Delta = 1,5$, par de la dynamite (n° 1 de Vonges à 75 % de NG), par des planclastites (à l'essence minérale ou au sulfure de carbone mélangés à l'acide hypo-azotique en volumes égaux).

Comme le souligne BERTHELOT /2g/ les résultats de toutes les mesures effectuées entre 1878 et 1885 "étendent et complètent ceux que M. ABEL et les Officiers du

Génie Autrichien avaient déjà obtenus dans la même direction".

Il note en outre plus spécialement que dans :

1° le CP, la célérité augmente avec la densité de chargement ("du moins dans les limites très étroites" des expériences décrites) ;

2° la NG, contenue dans les tubes de métal anglais de 3 mm de diamètre intérieur, la célérité varie, d'une expérience à l'autre, de 1078 à 1286 m/s ; dans ceux de 6 mm de diamètre intérieur, elle est en moyenne de 1386 m/s. Ceci à condition que sa température soit supérieure à 14°C, car à 12-13°C la NG ne détone pas (notamment dans les tubes de diamètre inférieur à 3 mm) ;

3° la nitromanite ($C_6H_8(NO_3)_6$ - hexanitrate de manitol) la célérité (6908 à 7137 m/s) est beaucoup plus grande que dans les charges de CP comprimé (4818 à 6238 m/s) et d'amidon-poudre (5512 m/s) contenus sous des densités de chargement voisines (environ 1,5) dans des tubes en plomb de même diamètre (4mm) ;

4° les célérités observées dans les charges de dynamite, de 3 mm et de 6 mm de diamètre (tubes en métal anglais), sont respectivement de 2333 à 2753 m/s et de 2668 m/s (en moyenne) c'est-à-dire nettement inférieures à celles (5428 à 6566 m/s) mesurées par ABEL, "sans doute à cause de la grande différence entre les diamètres des cylindres explosifs" (30 mm dans le cas de ceux de F. A. ABEL) ;

5° la célérité est sensiblement la même dans un tube de 200 m de long qu'il soit rectiligne ou très sinueux et qu'elle "paraît augmenter avec la résistance de l'enveloppe".

Pour notre part nous noterons que :

1° les célérités observées dans la NG étaient, comme nous le savons maintenant, et comme cela avait été déjà le cas lors des expériences de F.A. ABEL, celles d'une détonation à "basse vitesse",

2° nous ne sommes pas parvenus à découvrir les publications des "Officiers du Génie Autrichien" cités par BERTHELOT (cf. /40b/).

II.3 - Troisième temps - Onde de détonation dans les mélanges gazeux

II.3.1 - Remarquons tout d'abord que :

1° il est très généralement indiqué (cf. par exemple /19a/, /31/, /35/, /69/) que la découverte de l'onde de détonation a été faite (en l'appelant "onde explosive") en 1881 par M. BERTHELOT /2d/ et par MALLARD et LE CHATELIER /39a/, qui étudiaient alors (le premier en collaboration avec P. VIEILLE) respectivement la propagation des explosions et celle des flammes dans les mélanges gazeux. Par contre, on ne souligne que très exceptionnellement que cette "onde explosive" et certaines des flammes observées par MALLARD et LE CHATELIER ont été d'emblée rapprochées par BERTHELOT (cf. /2d/) aux "deux ordres d'explosion" des matières explosives solides c'est-à-dire respectivement à la "détonation subite provoquée par une amorce au fulminate de mercure" et à la propagation "par échauffement" de proche en proche de l'inflammation.

Or ce rapprochement met à notre avis en relief toute l'importance de la découverte de BERTHELOT et VIEILLE, car elle parachève celle de F.A. ABEL, L.P. ROUX et E. SARREAU sur l'existence de deux mécanismes fondamentaux de propagation de proche en proche de réactions chimiques vives, au sein des "milieux explosifs", quel que soit leur état physique solide, liquide ou gazeux, par compression dynamique et par transfert moléculaire (par conduction seule à l'époque et, maintenant aussi par diffusion) de l'énergie ;

2° on précise également assez souvent que M. BERTHELOT et P. VIEILLE, d'une part, et E. MALLARD et H. LE CHATELIER, d'autre part, avaient entrepris leurs travaux sur les mélanges gazeux afin de rechercher les moyens de combattre les explosions de grisou dans les mines de charbon (cf. /27/, /72/).

Or il n'en est effectivement ainsi qu'en ce qui concerne MALLARD et LE CHATELIER. Tous les deux sont alors professeurs à l'Ecole des Mines de Paris (ainsi que respectivement, Inspecteur Général et Ingénieur des Mines). En outre, E. MALLARD avait déjà étudié la propagation des flammes et publié en 1875 la toute première théorie de leur célérité de propagation /38/. Enfin depuis mai 1878, ils sont chargés par la Commission du Grisou (instituée, en mars 1877 par une loi votée sur l'initiative de Paul BERT, Professeur de Physiologie à la Sorbonne et Député de l'Yonne, à la suite de plusieurs catastrophes minières particulièrement meurtrières

/72/) "d'entreprendre des recherches expérimentales sur l'inflammation et la combustion de mélanges explosifs gazeux".

Par contre, les motivations de M. BERTHELOT, Professeur au Collège de France et de P. VIEILLE (alors jeune ingénieur des Poudres "autorisé à seconder les travaux scientifiques de BERTHELOT en dehors de ses travaux à la Commission des Substances Explosives") ne sont pas tout à fait les mêmes. Certes ils sont concernés par la lutte contre les "coups de grisou" car la Commission des Substances Explosives est aussi chargée "de rechercher des explosifs convenant le mieux pour les travaux dans les mines de charbon". Mais compte-tenu, d'une part, de la façon dont sont mentionnés leurs travaux dans le "Bulletin des Expériences pour l'année 1878" de cette Commission et dans la rubrique "Comptes rendus des travaux personnels des Membres de la Commission" (cf. /73/), et d'autre part, de leur connaissance de l'existence dans les explosifs condensés, de deux modes de propagation des explosions, nous pensons que d'emblée ils se sont proposés de rechercher si et dans quelles conditions on peut observer une détonation des explosifs gazeux.

II.3.2 - Les modalités et les résultats de leurs expériences effectuées entre 1878 et 1883 sont décrits par eux dans les Notes /4a/, /4b/, /4c/, et l'article /4d/.

Ces expériences ont porté sur la propagation de la détonation dans environ cinquante mélanges explosifs, formés à partir de sept gaz combustibles (H_2 , CO, C_2N_2 , C_2H_2 , C_2H_4 , CH_4 , C_2H_6) de trois gaz comburants (O_2 , N_2O et N_2O_4) éventuellement plus ou moins dilués avec de l'azote. Parmi ces mélanges, environ 15 étaient des mélanges isomères, c'est-à-dire ayant les mêmes produits de détonation mais dont la chaleur de réaction variait du simple au double. Tous les gaz utilisés ont été préparés sur place au laboratoire apparemment par des méthodes que BERTHELOT avait déjà utilisées dans ses travaux antérieurs de thermochimie (cf. /2b/, /2e/, /2h/).

Lors des toutes premières expériences /2d/, les mélanges (H_2/O_2 et CO/O_2 stricts) étaient contenus dans des tubes en fer longs de 5 m et de 8 mm de diamètre intérieur. Ils étaient enflammés à l'une des extrémités de ces tubes par une étincelle électrique. Le passage de la détonation était enregistré à l'aide de chronographe SCHULZE-DEPREZ (cf. § II.2.2) en disposant dans le tube, (respectivement à quelques mm des électrodes d'allumage, près d'une extrémité au milieu et à l'extrémité opposée) trois bandes de papier sur lesquelles étaient fixées des bandes d'étain faisant partie des circuits des électro-aimants de l'enregistreur DEPREZ. Ces circuits étaient rompus par l'onde qui amorçait la détonation d'un très petit grain de fulminate de mercure ou de nitrate de potassium fixé sur ces bandes. L'instant de rupture était ainsi enregistré sur le tambour du chronographe, mais seuls des ordres de grandeur de la célérité (2500 m/s) ont pu être ainsi mesurés.

Par la suite, les mesures ont été faites avec le chronographe LE BOULENGE en général à $\pm 3\%$ (mais parfois et en fait exceptionnellement à $\pm 7\%$ près) dans des tubes de 40 - 45 m de long, en plomb, en caoutchouc, en verre, respectivement de 5 et 15 mm, de 5 et de 1,5 mm de diamètre intérieur, soigneusement nettoyés avant chaque expérience.

Des expériences spécialement agencées ayant montré que des résultats étaient identiques, que les tubes soient droits ou coudés, ces derniers ont été fixés sur un cadre de bois /4d/ (cf. aussi /40b/) et équipés de trois détecteurs de passage de l'onde (identiques à ceux utilisés dans la première série d'expériences) dont la rupture commandait les électro-aimants du chronographe (cf. Fig. 3).

BERTHELOT et VIEILLE ont ainsi établi que :

1° comme dans les explosifs condensés, après un amorçage adéquat, une "onde explosive" tend à s'établir et se propage ensuite à travers toute la charge avec une célérité constante supérieure à 1 km/s ;

2° cette célérité D est fonction de la composition du mélange et, lorsque celui-ci n'est ni trop riche ni trop pauvre (c'est-à-dire que la proportion du combustible est comprise entre deux "limites de détonation") varie comme la racine carrée de la chaleur de combustion Q du mélange ;

3° le diamètre du tube n'influe pas sur la valeur de la célérité D sauf lorsque le tube est capillaire ;

4° la nature de la matière du tube et le fait que ses extrémités soient ouvertes ou fermées, sont également sans influence sur la valeur de la célérité D dans un mélange donné ;

5° cette valeur ne change pas non plus avec la pression tout au moins lorsque celle-ci est comprise entre 0,7 et 2,1 atm.

Notons que :

1° la proportionnalité entre D et \sqrt{Q} est soulignée par BERTHELOT et VIEILLE car, comme nous le précisons encore (cf. § IV.2), selon BERTHELOT, D dépend de la racine carrée de la température des produits de détonation, proportionnelle à \sqrt{Q} ;

2° ils insistent sur l'existence de limites (en composition) de détonation différentes de celles de combustion.

II.3.3 - Pour MALLARD et Le CHATELIER /39b/, la découverte de l'onde de détonation dans les mélanges gazeux est due à BERTHELOT et VIEILLE. Ils soulignent en effet que les appareils d'observation mis en oeuvre par eux (manographes, sondes d'ionisation, chronophotographe) ne leur permettaient pas de mesurer la célérité de propagation de l'onde explosive et donc de s'assurer si elle devient constante et est spécifique du mélange explosif (p. 315 et 335-336, réf. /39b/).

Par contre, ils précisent qu'ils on pu étudier "le mode de production de l'onde explosive".

Pour notre part, il nous paraît utile de noter que, dans leur mémoire, MALLARD et Le CHATELIER ne consacrent à la détonation total que 8 pages sur les quelques 300 que comporte ce mémoire et où ils traitent surtout de la température d'inflammation des mélanges (1ère partie), des chaleurs spécifiques et de la température maximale (température de combustion) des produits (3ème partie). Mais, leur étude de la propagation des flammes (2ème partie du mémoire) est à juste raison considérée comme capitale, par ses conclusions quant à l'existence de la variété des régimes de propagation de la combustion (accélérée, uniforme vibratoire... par onde explosive) selon la composition des mélanges, les dimensions des tubes, le mode d'allumage, et aussi du fait de l'utilisation de la méthode d'enregistrement chronophotographique dans l'étude de la propagation des flammes.

Celle-ci consistait, rappelons-le, à placer un tube en verre horizontal, long de 3 à 4 m (formé de tronçons, ayant chacun 1 m de longueur et un diamètre intérieur de 3 à 30 mm, réunis par des anneaux de caoutchouc) devant un objectif à large ouverture, qui projette l'image du tube sur une feuille de papier sensible au gélatino-bromure, enroulée sur le cylindre enregistreur DEPREZ entraîné par un moteur électrique tournant d'un mouvement uniforme à la vitesse périphérique de 10 cm/sec. (à $\pm 0,10$ % près).

L'échelle des temps était obtenue, par des éclipses produites dans la lumière d'un fil de magnésium par un diapason de fréquence 10 Hz. Celle des longueurs était déterminée par les interruptions de l'image du tube dues aux raccords entre les tronçons longs environ de 1m.

Les enregistrements photographiques (tels que fig. 4) n'ont pu être obtenus qu'avec les mélanges de sulfure de carbone avec de l'oxygène ou de bioxyde d'azote

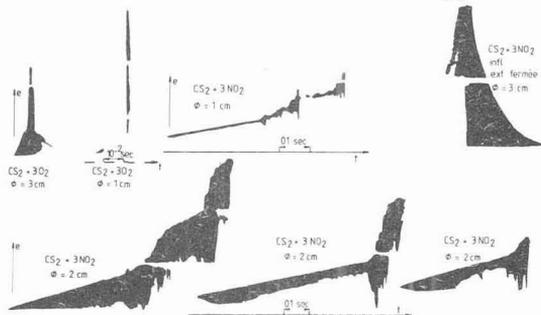


Fig. 4 - Exemples des chronophotographies de MALLARD et LE CHATELIER (d'après réf. /39b/)
(Mélanges $CS_2 + 3 O_2$ et $CS_2 + 3 NO_2$; tubes en verre $\phi = 1$; 2 et 3 cm)

(NO₂). Par contre des mesures de la célérité (en repérant le passage de la flamme au moyen de sondes d'ionisation commandant la fermeture de petites bobines d'induction ou des électro-aimants de l'enregistreur DEPPEZ) ont pu être faites avec des mélanges de H₂, CO, C₂H₄, CH₄ avec O₂, l'air et NO₂ ainsi que de C₂H₂ avec H₂ préparés par eux sur place.

Nous reviendrons dans le § IV.3 sur les conclusions de MALLARD et LE CHATELIER quant au mécanisme de propagation de l'onde de détonation. Notons ici leurs remarques concernant l'onde explosive :

1° la formation de celle-ci "n'est pas progressive, mais toujours instantanée";
 2° "le point de départ de l'onde est toujours celui de grandes vibrations dans le cas de mélange CS₂/NO₂" ; par contre, dans le cas de mélanges CS₂/O₂, l'onde explosive succède à la période du mouvement uniforme ;

3° le passage de l'onde explosive est accompagné du "développement de pressions instantanées énormes" ;

4° son éclat est beaucoup plus considérable que celui de la flamme mais le refroidissement des gaz brûlés derrière l'onde explosive est plus rapide que dans le cas de la "combustion normale".

III. CONFIRMATIONS, COMPLEMENTS

III.1 - Les travaux sur la détonation qui furent publiés plus immédiatement à la suite de ceux que nous venons d'examiner peuvent être classés en deux groupes, à savoir : d'une part, ceux, où il est question de la détonation en rapport avec l'emploi pratique des explosifs condensés et de mélanges explosifs gazeux et, d'autre part, ceux à caractère plus fondamental, complétant et précisant les propriétés de l'onde de détonation, comportent, pour une part tout au moins, des développements théoriques que nous examinerons plus loin.

Les travaux que nous classons dans le premier groupe sont très nombreux. Ils concernent la sécurité d'emploi des explosifs condensés dans les mines ainsi que celle de certains gaz, dont l'usage industriel s'est alors étendu de façon particulièrement rapide. C'est notamment le cas de l'acétylène, lequel a préoccupé BERTHELOT, VIELLE et LE CHATELIER, (cf. /3/, /4e/, /34a,b/ ainsi que /43/).

Nous n'en parlerons pas ici et nous limiterons notre examen aux travaux du second groupe (plus immédiatement en rapport avec l'objectif du présent historique) en considérant séparément le cas des explosifs condensés et celui des mélanges gazeux.

III.2 - Explosifs condensés

En concluant son exposé des expériences faites par la Commission des Substances Explosives, M. BERTHELOT /2g/ notait que "pour pousser plus avant, il faudrait opérer avec des tubes d'un calibre plus régulier et susceptible de résister à l'explosion", et expérimenter "d'autres explosifs liquides plus fluides que la NG".

En conséquence, il a fait procéder à des mesures (à l'aide du chronographe LE BOULENGE) de la célérité de l'onde de détonation dans le nitrate de méthyle, contenu dans des tubes dont "la matière a été choisie de façon à faire varier la constitution physique et la résistance dans les conditions les plus étendues", à savoir : en caoutchouc entoilé, en verre, en métal anglais, en acier étiré et recuit. Ces tubes avaient un diamètre intérieur de 3 et parfois de 5 mm (tubes en caoutchouc et en verre) et un diamètre extérieur de 12 voire de 15 mm. De "grande longueur, ils étaient formés de tronçons (de 5 m dans le cas de tubes en acier) mis bout à bout et agencés comme lors des expériences antérieures (cf. § II.2.2).

Les résultats publiés par BERTHELOT en 1891 /2i/ paraissent l'avoir surpris. Les célérités observées (1890 à 2482 m/sec) ne correspondaient pas selon lui à celles observées dans les explosifs solides pulvérulents ayant une "chaleur d'explosion" comparable. En outre, la destruction complète des tubes les plus résistants semble lui avoir fait découvrir l'énormité des pressions atteintes, dépassant celles p que pourrait expliquer la relation $p = f\Delta / (1 - \alpha\Delta)$ entre la force f, la densité de chargement Δ de l'explosif et le covolume α ($\sim 0,87$ l/kg) des produits. Il a ainsi conclu finalement que :

"l'onde explosive n'existe avec ses caractères simples et ses lois définies que dans la détonation des gaz, ces lois et ces caractères ne subsistent qu'en partie dans la détonation des liquides et des solides, tout en demeurant assujetties aux mêmes notions générales de dynamique physico-chimique".

Cette conclusion et la nécessité d'utiliser des charges de très grande longueur pour pouvoir réaliser plus aisément des mesures précises expliquent à notre avis, tout au moins en partie, l'absence en France, pendant plus d'une décennie, d'études à caractère spécifiquement fondamental sur l'onde de détonation dans les explosifs condensés.

Leur reprise se fera après l'invention en 1906 par H. DAUTRICHE /18/ de sa technique de mesure de la célérité.

Mais entre temps grâce à des améliorations notables du chronographe SCHULZE-DESPREZ par H. METTEGANG /44/, il a été possible à C.E. BICHEL /5/ et par la suite également à H. KAST /32a/ de préciser davantage les valeurs de la célérité de l'onde de détonation dans de très nombreux explosifs (cf. /8/, /41/, /62/).

III.3 - Explosifs gazeux

III.3.1 - Avant de rappeler les travaux de H. DIXON /19a/, lesquels, comme cela a été maintes fois souligné (cf. par exemple /31/, /35/), ont confirmé et complété de façon importante les constatations de BERTHELOT et VIEILLE et de MALLARD et LE CHATELIER, il nous paraît indispensable de signaler auparavant un travail, publié en 1888, de A. von OTTINGEN et A. von GUERNET /51/.

Cherchant à étayer une théorie de R. BUNSEN (que nous rappellerons dans la Note complémentaire N5), ces derniers ont réalisé des expériences originales sur l'explosion de mélanges stricts H_2/O_2 . Ils ont pu ainsi observer (cf. N5), le mouvement de fronts divers, dont celui des "ondes de choc". Mais, comme l'a montré en 1903 H. DIXON /19b/, leur interprétation de leurs enregistrements était erronée.

Malgré cela, le travail de OTTINGEN et GUERNET présente à notre avis un intérêt historique certain, car ces expérimentateurs ont été les premiers à mettre en oeuvre, pour étudier la détonation, une caméra à miroir tournant et à établir des diagrammes de marche des ondes dont, comme ils le soulignent, certaines sont des ondes de choc.

III.3.2 - Notons d'abord que H. DIXON a entrepris ses recherches (à l'Université de Manchester) à peu près à la même époque que BERTHELOT et VIEILLE et MALLARD et LE CHATELIER. Mais ses motivations étaient alors assez différentes.

DIXON était en effet intéressé principalement par les réactions chimiques intervenant dans le processus de fabrication du gaz à partir de la houille et, en particulier, par le rôle de la vapeur d'eau dans les réactions lors de l'inflammation et de la propagation de la flamme dans les mélanges CO/O_2 .

Mais par la suite, l'explosion particulièrement dévastatrice d'une canalisation de gaz de ville, Tottenham Road à Londres en 1880 et, la découverte par BERTHELOT et VIEILLE (qui selon lui "opened a new era in the theory of explosions") de l'onde explosive, l'ont conduit à s'intéresser à la détonation.

Une première série de ses expériences qu'il décrit dans le mémoire /19a/, publiée en 1894, concerne les mélanges formés à partir de H_2 , de CO , du gaz de marais (CH_4), de C_2H_4 , de C_2H_2 et de C_2N_2 avec O_2 , N_2O et N_2 , ainsi que ceux de chlore et d'hydrogène.

La détonation de ces mélanges, à des pressions initiales de 200 à 1500 mm de Hg, était observée en général dans un tube en plomb de 9 mm de diamètre intérieur, long de 100 m, enroulé sur un tambour-cadre de 61 cm de diamètre (fig. 5). Celui-ci pouvait être placé dans un bac contenant de l'eau dont la température pouvait être portée jusqu'à 100°C.

Lors de certaines de ces expériences, DIXON a utilisé aussi des tubes en plomb de 5, de 6,5 et de 13 mm, de diamètre intérieur, longs de 55 et 100 m et, dans le cas de mélanges Cl_2/H_2 , des tubes en verre.

Signalons enfin qu'il a pris un soin particulier pour connaître la longueur exacte de ces tubes et surtout celle de la distance entre les emplacements (ménagés dans ces tubes) des "ponts" (B_1 , B_2 , B_3 - Fig. 5) dont la rupture par l'onde de détonation permettait la mesure de sa célérité au moyen d'un chronographe à pendule.

Les "ponts" au nombre de trois (le premier à environ 1,2 m de l'extrémité fermée par un robinet, près duquel se trouvaient les électrodes de l'étincelle d'allumage ; le second au milieu du tube et le dernier, près du robinet fermant celui-ci) étaient constitués chacun d'une bande fine en argent dont la rupture activait l'électro-aimant de stylets-marqueurs (construit par F.J. SMITH /58/) fixés sur le pendule.

Les déplacements de ces stylets ainsi que de deux autres commandés respectivement par l'étincelle d'allumage et un diapason 100 Hz, étaient inscrits sur une plaque de verre recouverte de noir de fumée.

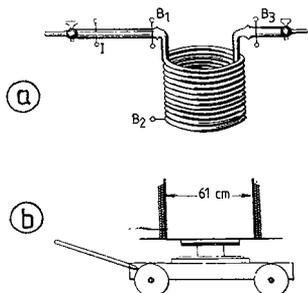


Fig. 5 - Tube de détonations H. DIXON (1893)

a - Schéma du tube en plomb (longueur 55 et 100 m ; diamètre : 5 mm, 6,5 mm, 9 mm et 13 mm).

I - électrodes de l'étincelle d'allumage

B₁, B₂, B₃ - emplacement des "ponts"

b - Chariot avec le tambour cadre.

L'ensemble avait été réglé de manière à ce que :

1° l'étincelle d'allumage jaillisse lorsque le pendule était près de son point bas ;

2° les marques faites par les stylets correspondent bien au même instant lorsque les trois "ponts" B₁, B₂ et B₃ sont rompus simultanément.

Selon DIXON, les valeurs de la célérité de l'onde de détonation mesurées par lui sont en bon accord avec celles publiées par BERTHELOT et VIEILLE. Elles sont bien indépendantes du diamètre du tube lorsque ce dernier est supérieur à une certaine valeur limite et diminuent, lorsque la teneur en gaz inertes est accrue, d'autant plus que la densité de ces gaz inertes est grande.

Par contre, d'après DIXON, la célérité croît avec la pression initiale au lieu de rester constante, comme l'avaient indiqué (il est vrai, avec réserve) BERTHELOT et VIEILLE.

En outre, DIXON précise que :

1° il existe une pression initiale limite en dessous de laquelle l'onde de détonation ne peut pas s'établir ;

2° la célérité de l'onde ne devient en général constante qu'après un parcours plus ou moins long selon le mélange ;

3° les mélanges de CO et O₂ sont d'autant plus difficiles à faire détoner que leur teneur en vapeur d'eau (et) ou en H₂ est faible et que la célérité de l'onde de détonation dans ces mélanges dépend de cette teneur.

Enfin, il discute et critique la théorie de BERTHELOT de l'onde de détonation et émet de son côté quelques hypothèses, que nous rappellerons dans un prochain paragraphe (IV.5).

Auparavant, précisons encore que dans son second mémoire /19b/ publié en 1903, DIXON expose les résultats des expériences faites par lui et ses collaborateurs à partir de 1895 à l'aide d'une caméra chronophotographique dont le tambour (de 31,8

cm de diamètre à axe horizontal) assure aisément le déplacement du film (ou du papier photographique) fixé sur sa périphérie, à des vitesses de 25 à 50 m/s.

Les enregistrements obtenus par lui (sans qu'il eut besoin de "colorer" les fronts de combustion) sont classiques. Sur certains d'entre-eux, DIXON a, en particulier, noté la présence de "stries" dont il n'a pas pu expliquer alors la cause. Ces dernières ont été par la suite en 1926-28 redécouvertes par CAMPBELL et ses collaborateurs /11/, /12/ et ont fait l'objet d'un grand nombre d'études (cf. par exemple /31/, /35/) avant d'être expliquées en 1946 (cf. /40a/, /68/) puis être à l'origine de travaux (cf. par exemple /25/, /60/) ayant conduit à une révision profonde des idées sur la structure de l'onde de détonation dans les mélanges gazeux.

IV. - PREMIERES THEORIES

IV.1 - Comme nous l'avons déjà signalé ci-dessus, tous les expérimentateurs, dont plus particulièrement F.A. ABEL et M. BERTHELOT, ont souligné la nécessité pour assurer l'amorçage d'une onde de détonation d'une "action mécanique" et le fait qu'une fois établie cette onde se propage avec une célérité constante et élevée.

Nous allons maintenant préciser davantage leurs tentatives d'explication de ces faits ainsi que les idées exprimées à ce sujet par MALLARD et LE CHATELIER, par H. DIXON et A. SCHUSTER (cf. /19a/).

Puis nous rappellerons la théorie de V.A. MICHELSON /45/ et ferons quelques remarques sur le travail de D.L. CHAPMAN /15/, où il expose sa théorie devenue et classique (cf. par exemple /25/, /40a/; /68/ et /69/) et dont l'essentiel et l'application aux explosifs condensés sont rappelés dans le présent fascicule par M.C. FAUQUIGNON.

Nous terminerons enfin le présent historique en soulignant l'importance de la théorie de P. VIEILLE /67c,d,e/ qui a semblé avoir largement inspiré E. JOUGUET, mais qui n'a été vraiment développée que quelques années plus tard par J.B. ZELDOVITCH /71/.

IV.2 - Théorie de F.A. ABEL (1869-1874)

Après avoir mis en évidence qu'un choc mécanique violent et bref (percussion) est nécessaire pour assurer l'amorçage de la détonation, la difficulté d'amorcer dans certains cas celle du C.P. (cf. § II.1.1) conduit F.A. ABEL à supposer que :

- 1° une explosion serait toujours accompagnée de vibrations ;
- 2° s'il y "synchronisme" entre les vibrations que des explosifs produisent en détonant, ils seront réciproquement sensibles à ces vibrations, de sorte qu'en faisant détoner un de ces explosifs (donneur) placé à proximité d'un autre (récepteur) on fera détoner aisément ce dernier ;
- 3° si au contraire la vibration produite par la détonation du donneur est "d'un caractère différent, la force mécanique due à l'explosion du premier corps ne trouve dans le second (récepteur) qu'un auxiliaire faible ou inerte ; on est obligé alors pour provoquer l'explosion de ce dernier... d'assurer de prime abord une détonation beaucoup plus puissante".

Faisant état, dans son autre mémoire /1f/ des expériences de P. CHAMPION et H. PELLET /13/ (cf. N4), il affirme que ces expérimentateurs "ont certainement démontré que les explosions des explosifs différents, amorcés dans des mêmes conditions, peuvent être différentes quant au caractère des vibrations produites". Tout en notant que les expériences présentent certaines insuffisances (charges trop petites, stabilité et composition des explosifs utilisés discutables) en ce qui concerne les problèmes pratiques qu'il se propose d'étudier, il considère sa théorie comme étant bien fondée.

Or dès 1871, M. BERTHELOT /2a/ avait noté que l'impossibilité d'amorcer la détonation du CP avec certains autres explosifs était due au fait que celui-ci n'était pas compact, les effets de la "percussion" produite par l'amorce étaient rapidement atténués.

Par la suite (en 1885), E. MACH et J. WENTZEL /37/ répétant les expériences de CHAMPION et PELLET /13/ avec des charges placées aux foyers des deux miroirs paraboliques ont montré que la détonation d'une des charges est amorcée par l'onde

de choc (dont l'existence n'était pas connue par CHAMPION et PELLET) produite par l'explosion de l'autre charge.

Ils ont en outre souligné que les fréquences des ondes acoustiques enregistrées lors des explosions sont très différentes des sous-produits par les instruments à cordes utilisés par CHAMPION et PELLET.

Enfin, la théorie de ABEL a été encore rediscutée peu après (1886) par R. THRELFALL /64/ qui, en particulier, a souligné qu'une vibration ne peut avoir d'effet sur une substance que si la fréquence de cette vibration est comparable à celle propre des molécules - ce qui n'est pas, selon lui, le cas.

Par ailleurs THRELFALL a émis l'hypothèse que la propagation de la détonation pourrait être expliquée par la projection de produits de décomposition sous forme d'un anneau tourbillon ("vortex-ring motion"). Comme nous le verrons encore cette hypothèse sera avancée sous une forme différente par A. SCHUSTER et H. DIXON (cf § IV.4.2).

Notons enfin que les idées de ABEL ont été encore évoquées en 1974 par W. TAYLOR et A. WEALE /63/, en envisageant toutefois que la fréquence des vibrations sympathiques à considérer serait, peut-être, celle du domaine Infrarouge.

IV.3 - Idées et Théorie de M. BERTHELOT (1871-1891)

Dès 1871, s'appuyant sur les constatations faites par A. NOBEL, F.A. ABEL ainsi que par Ch. GIRARD, A. MILLOT et G. VOGT /26/ et par lui-même, M. BERTHELOT considère que le développement d'une détonation est dû à une succession de "chocs" dont la rapidité est infiniment plus grande que celle "d'une simple inflammation au contact d'un corps en ignition" parce que les gaz produits ne peuvent pas se détendre librement. Il insiste en outre sur le fait que selon la nature de l'explosif le "choc initial" pourrait créer des pressions différentes, "une même substance pourra donner lieu à des effets divers selon le procédé d'inflammation" (cf. /2a/ page 257 et /2h/ page 350).

C'est alors que faute de pouvoir connaître ces pressions, BERTHELOT avait proposé /2a,b,c/ de caractériser les explosifs par leur "force" f , définie par lui comme le produit de la chaleur de réaction Q de l'explosif, par le volume V_0 des gaz produits (ramenés à 0°C et à 760 mm de Hg) et cette caractéristique $f = QV_0$ a été largement adoptée et utilisée pendant au moins un demi-siècle.

Par la suite, dès la découverte en 1881 de l'onde explosive dans les mélanges gazeux, Berthelot /2f/ a comparé la célérité D de celle-ci à la vitesse \bar{c} de translation moyenne des molécules formant les produits et à celle, proche de la précédente, du son dans ces derniers (mais semble-t-il sans en tirer des conséquences concernant la stabilité et la stationnarité du phénomène). Ayant évalué la première, au moyen de l'expression de Clausius :

$$\bar{c} = 29,35 \sqrt{\frac{T}{\rho^*}}$$

où ρ^* est la densité des produits par rapport à l'air et T leur température dont BERTHELOT calcule les valeurs en admettant que leur nombre de moles n et leur chaleur spécifique à pression constante (de 6,8 cal/mole.degré) sont constants : $T = Q/6,8 n$.

Il a justifié avec P. VIEILLE /4d / son interprétation du mécanisme de propagation de proche en proche de l'onde en notant que, en général, \bar{c} n'est que 5 à 12 % supérieur à D , et conclu finalement que "la vitesse de translation des molécules gazeuses, conservant la totalité de la force vive qui répond à la chaleur dégagée par la réaction, peut-être regardée comme une limite représentant la vitesse maximum de propagation de l'onde explosive".

Notons cependant que :

1° selon H. DIXON /19a/, BERTHELOT commettait une erreur en considérant que la température T dont dépendait la vitesse \bar{c} , était celle de combustion à pression constante et non à volume constant (comme il l'avait d'ailleurs supposé en 1871 /2a/) et qu'en conséquence, l'écart entre les valeurs de \bar{c} et D était sensiblement plus grand.

2° en 1893, à la suite de ses expériences avec le nitrate de méthyle /21/, BERTHELOT lui-même était conduit à limiter la portée de sa théorie aux seuls mélanges explosifs gazeux (cf. § III.2).

IV.4 - "Considérations théoriques" de MALLARD et LE CHATELIER (1883)

Selon MALLARD et LE CHATELIER /39b/, l'amorçage et la propagation de proche en proche de l'onde de détonation sont déterminés par la dilatation des gaz brûlés, provoquant la compression de tranches d'explosif frais.

Cette expansion des gaz brûlés a lieu dès l'inflammation et engendre une onde de pression laquelle ne cessera de se renforcer au fur et à mesure que la flamme progresse. Elle pourra devenir ainsi assez forte (notamment, lors de la réflexion sur un fond fermé du tube opposé à celui où a eu lieu l'inflammation, ou lors de la phase du mouvement vibratoire) pour porter une couche d'explosif frais à sa température d'inflammation et en provoquer ainsi l'explosion.

La célérité de propagation de cette onde de compression serait celle du son ("comme celle de toute onde"), mais "dans des conditions de température extrêmement différentes de celles dans lesquelles la célérité du son est (habituellement) mesurée" (cf. p. 360 de /39b/).

Enfin, du fait de la "précompression" de l'explosif frais par cette onde, la célérité de propagation de l'inflammation sera bien plus élevée que lorsque l'échauffement du mélange explosif frais est dû uniquement au phénomène de conduction de la chaleur.

IV.5 - Remarques de A. SCHUSTER et de H. DIXON (1894)

Pour H. DIXON /19/ la célérité de l'onde de détonation dans les mélanges explosifs gazeux serait également à comparer à celle du son, mais en tenant compte :

a) de ce que la combustion s'opère à volume constant ;

b) du mouvement des gaz brûlés ainsi que de celui des gaz frais lesquels ne sont plus au repos lorsque s'amorce en leur sein la réaction chimique.

Mais la remarque de H. DIXON la plus intéressante, surtout compte-tenu de l'époque où elle a été faite, et qui semble-t-il n'a jamais été soulignée, est celle consécutive à la Note de A. SCHUSTER (cf. p. 152-156 de la référence /19/) et qui concerne la structure et le régime de propagation de l'onde de détonation.

Discutant de la possibilité d'utiliser la théorie des ondes de pressions d'amplitude finie de RIEMANN /54/ pour analyser le mouvement de l'onde de détonation (propageant, avec la célérité D , une pression p dans un milieu à la pression p_0 ; ρ et ρ_0 étant les masses volumiques immédiatement de part et d'autre du front de l'onde) A. SCHUSTER écrit :

"... I have not discussed the question whether a steady wave is really possible, but assuming it to be steady, I believe that the equation

$$D = \left[\frac{p - p_0}{\rho - \rho_0} \frac{\rho}{\rho_0} \right]^{1/2}$$

holds. In the strict sense of the work, I do not think the explosion-wave can be steady, because if the motion is, as assumed linear, compression must precede the explosion....

... But it seems possible to me that the motion may not strictly be a linear one, and that yet taking the average velocities over a cross-section of the tube the ordinary equations would apply. It seems probable that jets of hot gases are projected bodily forward from that part of the wave in which the combination takes place, and these jets, which would correspond to the spray of a breaking wave really fire the mixture".

Ce qui amène H. DIXON à conclure à son tour que :

"...it may that the wave does not advance perfectly regulary, but breaks like a water wave is brocken by quicker movement of the crest. In breaking, jets of heated gas may be projected in front of the wave into the unburnt gas - such jets becomings

the centres of fresh disturbances which coalesce to reform a wave. If the jets were produced in sufficient number their average effect would be uniform".

Cette conclusion est à notre avis, à rapprocher des idées formulées au cours des dernières décennies sur le mécanisme de propagation (notamment dans les explosifs condensés) et de façon plus générale sur une certaine instationnarité des ondes de détonation.

Elle explique peut-être aussi pourquoi, dans son mémoire publié en 1903, H. DIXON /19b/ ne fait que mentionner la théorie de D.L. CHAPMANN /15/ (dont il avait encouragé l'élaboration), se bornant à signaler que cette théorie concerne une détonation stationnaire et peut aider à la détermination des valeurs de chaleur spécifique des gaz à haute température.

IV.6 - Théorie de V.A. MICHELSON (1894)

Dans sa thèse (principalement consacrée aux flammes stationnaires), soutenue en 1894 et rééditée en 1930 /45/ (cf. N6), V.A. MICHELSON précise que sa théorie de l'onde explosive s'appuie sur celle des "chocs acoustiques" de W.J. RANKINE /53/ ainsi que de celles des ondes planes d'amplitude finie de B. RIEMANN /54/ et de S. EARNSHAW /22/. Il note que H. HUGONOT /30/ a généralisé la théorie de RIEMANN, mais il considère qu'aucune de ces théories, ainsi que celle de RANKINE ne peuvent être directement appliquées aux ondes de détonations dont la célérité est constante. Ceci parce que toutes ces théories supposent que la pression est une fonction continue $p(v)$ du volume massique v et qu'en conséquence elles décrivent des ondes dont la célérité ne peut être constante, sauf peut-être dans des conditions très particulières, spécifiées par RANKINE.

Admettant cependant que la réaction chimique peut précisément réaliser ces conditions particulières de RANKINE /53/, V.A. MICHELSON, considère la propagation de l'onde de détonation plane, dans un mélange explosif de gaz parfaits et suppose que les produits forment également un mélange de gaz parfaits de même molarité.

Ne considérant que l'équation de conservation de la matière et celle de la quantité de mouvement, il examine les états possibles des produits de détonation. Représentant dans le plan $p - v$ (fig. 6) les isothermes, et les isentropiques de ces derniers, il compare les états correspondants à ceux définis par la droite AB (que nous appelons maintenant en général la droite RAYLEIGH-MICHELSON) qui représente les états des produits définis par les deux équations de conservation. Il met ainsi en évidence l'état de température maximale (défini dans le plan $p - v$ par le point où la droite AB est tangente à une isentrope) ce qui le conduit à critiquer l'évaluation faite par A. SCHUSTER /19/ de la pression maximale des produits de la détonation.

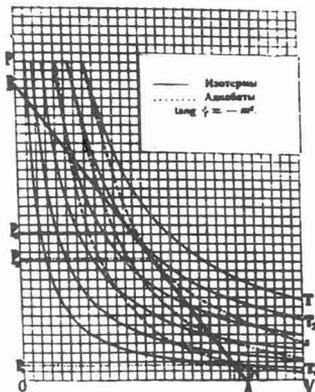


Fig. 6 - Isothermes et isentropiques de produit MICHELSON /45/

Mais c'est surtout, en considérant l'état d'entropie maximale (qui correspond au point où la droite AB est tangente à une isentrope) qu'il obtient le résultat le plus remarquable. En effet, pour MICHELSON, cet état est, conformément au second

principe de la thermodynamique, l'état limite le plus probable et, comme cela sera démontré par la suite maintes fois, il définit en fait l'état que nous appelons maintenant l'état CJ (Chapman - Jouguet).

Finalement MICHELSON aboutit ainsi aux relations qui deviendront par la suite classiques :

$$v_b/v_f \approx \frac{\gamma}{\gamma+1}$$

$$p_b = \frac{D^2}{(\gamma+1)v_f}$$

qui lient les caractéristiques v_b , p_b des produits derrière le front de l'onde de détonation au volume massique v_f de l'explosif frais, à la célérité D de l'onde et au rapport $\gamma = C_{pb}/C_{vb}$ des chaleurs massiques C_{pb} , C_{vb} (supposés constants) à pression C_{pb} et à volume C_{vb} constant des produits.

Notons aussi que si MICHELSON n'a pas relié la célérité D à la chaleur Q libérée par la réaction. Il a cependant écrit également les relations :

$$D = \frac{\gamma+1}{\gamma} a_b \quad T_b = \frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{D^2}{c_v(\gamma^2-1)}$$

entre D , la célérité du son a_b dans les produits d'une part et leur température T_b d'autre part, dont on déduit aisément la relation classique :

$$D \approx \sqrt{2(\gamma^2-1)Q}$$

IV.7 - Remarque sur le travail de D.L. CHAPMAN (1899) -

Comme nous l'avons suggéré dans l'Avant-Propos avec le travail de D.L. CHAPMAN /15/ débute une nouvelle phase de recherches sur l'onde de détonation. Bien que la théorie qu'il y développe soit bien connue il nous semble utile de souligner ici, que dans son mémoire :

1° après avoir indiqué clairement que son but est d'établir des formules qui permettent de calculer la célérité de propagation de l'onde de détonation et la pression maximale dans les produits, il en montre l'intérêt pratique en s'en servant pour préciser la variation avec la température des chaleurs spécifiques des gaz (la vapeur d'eau plus spécialement) à son avis imparfaitement connue.

Il est ainsi à notre connaissance le premier, non seulement, à établir les équations de la théorie permettant de calculer a priori les principales caractéristiques (célérité, etc) de l'onde de détonation, mais aussi à utiliser en détonique la "méthode inverse" qui consiste à déduire (ou à vérifier) des valeurs mesurées de la célérité de détonation des propriétés thermodynamiques des gaz à haute température comme l'avaient fait auparavant BERTHELOT et VIEILLE et MALLARD et LE CHATELIER à partir des valeurs mesurées des pressions explosion maximales atteintes lors de la combustion à volume constant ;

2° il ne cherche pas, à justifier son hypothèse fondamentale selon laquelle l'onde de détonation stationnaire est celle dont la célérité est minimale. Il précise seulement que cette hypothèse lui paraît être raisonnable (plausible). Selon lui, le régime de propagation à célérité constante une fois établi, il n'y a aucune raison pour qu'il change, d'autant plus que la célérité de propagation du front de l'onde par rapport aux produits derrière ce front étant égale à celle du son dans ceux-ci, ce régime ne peut pas être affecté par une perturbation du mouvement de ces produits ;

3° il semble avoir ignoré les travaux de HUGONIOT /30/ mais connaissait certainement les idées de W.J. RANKINE /53/, de H. DIXON et de A. SCHUSTER (cf. §

IV.5). Cependant comme il ne parle pas de ces derniers, on peut penser qu'en utilisant explicitement l'équation de conservation de l'énergie, il ne les trouvait pas justifiées.

IV.8 - Remarque sur les travaux de P. VIEILLE (1891-1900) -

1. Dès 1891, discutant les résultats des expériences de M. BERTHELOT sur le nitrate de méthyle /39/ (cf. § III.2) P. VIEILLE a noté que selon lui dans l'explication du mécanisme de propagation de l'onde de détonation, la propagation des compressions brusques (appelées à l'époque aussi "condensations", "ébranlements" mais pas encore "ondes de choc") devaient jouer un rôle important. Il s'est d'ailleurs référé à ce propos aux travaux de H. HUGONIOT /30/ et il nous paraît probable que c'est alors qu'il lui a paru utile d'entreprendre une vérification expérimentale des lois de propagation des "discontinuités" établies par ce dernier.

2. Comme nous l'avons rappelé ailleurs (cf. /40b/) après avoir mis au point le premier tube à choc et vérifié, au moyen de celui-ci les lois en question /67b,e/, P. VIEILLE s'est appuyé sur ce résultat pour donner l'explication du mécanisme de propagation de l'onde de détonation, qu'il résume en disant que cette onde est "une discontinuité entretenue à l'état de régime par la réaction chimique" laquelle est induite par l'élévation de la température due à la compression adiabatique. Cette réaction peut d'ailleurs comporter un certain retard par rapport au passage de l'onde mécanique et "son rôle se borne à entretenir la valeur élevée de la condensation propagée par l'onde".

Cette explication approfondit en fait celle résumée ci-dessus (§ IV.3) de MALLARD et LE CHATELIER. De plus, P. VIEILLE calcule la pression qui règne immédiatement derrière le front de l'onde de choc, c'est-à-dire dans les gaz où s'amorce la réaction chimique vive.

Il est ainsi le premier à avoir précisé cette pression caractéristique de la structure de l'onde de détonation telle qu'elle sera décrite plus en détail en 1940 par J.B. ZELDOVITCH /71/ (et de façon plus sommaire par W. DORING /20/ et J. von NEUMANN /48/).

Parmi les publications citées, nombreuses sont celles dont je n'ai pu prendre connaissance que grâce au concours amical de mes collègues A.A. BORISSOV (Inst. de Chimie Physique de l'Acad. des Sciences d'U.R.S.S.), G. CHERET (Ecole Polytechnique, Saclay), D.H. EDWARDS (Univ. Collège of Wales, G.B.), de A.K. OPPENHEIM (Univ. of California, Berkeley, E.U.), R. SCHALL (Inst. Ernst Mach, Freiburg), R.I. SOLOUKHINE (Inst. de Transfert de Chaleur et de Masse de l'Acad. des Sciences de Biélorussie), P. van TIGGELEN (Univ. Catholique, Louvain) H. Gg WAGNER (Univ. de Göttingen, R.F.A.), ainsi que celui de D. DEVYNCK (Ingénieur E.N.S.M.A.), des Services de Documentation de la Dynamit Akt. Ges. (Troisdorf R.F.A.) et de la S.N.P.E. (Le Bouchet).

A eux tous je suis profondément reconnaissant.

Je remercie également le Secrétariat et le Bureau d'Etudes du Laboratoire d'Energétique et de Détonique de l'E.N.S.M.A. (U.A. 193 au C.N.R.S.), ainsi que mon ami R. THOMASSIN, Professeur Honoraire de l'Université de Poitiers, pour l'aide qu'ils m'ont apportée dans la mise en forme de mon manuscrit.

Poitiers le 30 Juin 1987.

NOTES COMPLEMENTAIRES

NI

CHRONOLOGIE DE LA DECOUVERTE DES SUBSTANCES EXPLOSIVES

1. Nous avons limité la chronologie ci-après à l'année 1875, qui est celle de l'invention par A. NOBEL de la dynamite gomme et aux alentours de laquelle il y a eu un accroissement notable de la prise de brevets (cf. par exemple /28b/ /65/) sur les explosifs.

En outre, nous ne citons ici que pour mémoire, la poudre noire dont le lieu et la date d'invention sont controversés : en Chine au 1er siècle ? Au Moyen-Orient au VII^e ou au XIV^e siècle ? En Allemagne par le Moine BERTHOLD dit der SCHWARZE etc (cf. /28b/, /41/, /55/ ? Notons toutefois que :

1° il est bien admis que le premier emploi civil de la PN date de 1627 et a eu lieu dans une mine à charbon hongroise à l'initiative de Gaspard WEINDL dit, par la suite, "der Sprenger" /58/ /29b/ ;

2° son emploi s'est développé par la suite, notamment lors des travaux de construction et(ou) d'aménagement de canaux (celui de Languedoc en 1679) et des routes alpines (BRENER en 1696 et 1772 ; ARLBERG en 1797, etc...) ;

3° l'emploi de la PN a totalement cessé dans le Génie militaire et pratiquement dans le Génie civil vers 1885 /28b/ /55/.

2. Explosifs solides

- XV^e siècle Or explosif : découvert par l'alchimiste Blasius VALENTIUS lors de la préparation d'un sudatif (cf. /28b/, /55/). A noter que a) l'existence de B. VALENTIUS est contestée /24/ ; b) l'or explosif a été redécouvert au XVII^e siècle par C. VAN DREBBEL.
- 1630 Le fulminate d'argent et fulminate de mercure : préparés par ce dernier, puis à leur tour redécouverts en 1690 par Johan KUNKEL von LOWENSTEIN. La méthode de préparation du fulminate de mercure a été par la suite définie par E. HOWARD en 1799 ce qui a permis le développement de son emploi dans les amorces et les détonateurs (cf. /12/, /28/, /29/, /55/).
- 1659 Nitrate d'ammonium et chlorate de potassium : découverts par Johan Rudolf GLAUBER.
Le nitrate ne sera utilisé comme explosif, d'abord en 1867 avec la nitroglycérine sous forme d'une dynamite, par OHLSSON et NORBIN puis, en 1884, par FAVIER avec le mono, et trinaphalène (cf. /12/, /17/).
Le chlorate de potassium sera redécouvert en 1788 ainsi que le perchlorate de d'ammonium par C.L. BERTHOLLET lequel tente de l'utiliser, mais sans succès, à la place du salpêtre (nitrate de soude), pour améliorer les PN (cf. /2h/ /12/ /28/ /55/ /65/).
- 1771 Acide picrique : découvert par WOULF, et utilisé comme colorant, avant qu'en 1871 H. SPREGEL ne démontre que c'est un explosif et qu'en 1885 TURPIN ne crée la mélinite (cf. /12/ /17/ /41/ /55/).
- 1778 Nitrure d'argent ($N_3 Ag$) et nitrure de plomb ($N_6 Pb$) : découverts par C.L. BERTHOLLET (cf. /17/ /41/ /55/).
- 1813 Iodure d'azote $I_3 N$ et Chlorure d'azote $Cl_3 N$: découverts respectivement par B. COURTOIS /16/ et P.L. DULONG /21/.
- 1833 Nitrocellulose (NC) par H. BRACONNOT /7/.
- 1846 Coton poudre (CP) par Ch. SCHONBEIN /61/ /65/.
- 1863 T.N.T. par WILBRANDT (cf. /28/ /55/)
- 1867 et 1875 Dynamite kieselguhr (DyK) et la Dynamite gomme (DyK) : inventés par A. NOBEL /49/ /52/.

3. Explosifs liquides

1847	Nitroglycérine (NG) : par A. SOBRERO (/59/ /17/ /28/)
1862	Nitrate de Méthyle : par C. LEA /33/
1872	Nitrométhane : par V. MEYER et O. STUBER /42/.

N2

CHRONOGAPHE DE A. NOBLE

Le chronographe, conçu par A. NOBLE /50/ en 1870-71 pour la mesure de la vitesse des obus, comporte une série de huit disques minces A (Fig. 1) de 291 mm de diamètre alignés sur un arbre horizontal. Cet arbre comporte également un régulateur de la vitesse de rotation et est entraîné par un système de roues dentées D par la descente, à vitesse constante, d'un lourd poids P.

La remontée de ce dernier s'effectue à l'aide de la manivelle H. Un compte tours T indique la vitesse de rotation des roues dentées ce qui permet de connaître à tout instant celle de la périphérie des disques A. Lorsque cette dernière est de 1200 inches/sec. (soit 25,4 m/s) une milliseconde correspond à un déplacement du bord des disques de 2,54 cm.

Sur chacun de ces bords on fixe une bande recouverte de noir de carbone, que percera une étincelle Y fournie par le secondaire d'une bobine à induction B lorsque le primaire est rompu par le phénomène (obus, onde) dont on veut connaître la vitesse.

Lors de ses expériences F.A. ABEL disposait dans les charges d'explosif étudiés des fils fins de cuivre (isolés électriquement par un enroulement en soie) et faisant chacun partie du circuit primaire d'une bobine d'induction. Il vérifiait l'identité de l'ensemble des circuits de ces bobines, en faisant rompre simultanément ces circuits (au moyen d'une charge de fulminate de mercure) et en s'assurant que les impacts des étincelles sur les bandes étaient bien alignés lorsque les disques tournent à la vitesse voulue. Grâce à la lecture de la position respective des points d'impact des étincelles, avec un vernier au millième, il estimait pouvoir connaître les intervalles de temps à la microseconde près.

N3

CHRONOGAPHE LE BOULANGE

Le chronographe conçu en 1867 par un ingénieur belge LE BOULANGE (cf. /65/) était encore utilisé en France vers 1950.

Il se compose d'une colonne verticale sur laquelle sont fixés à des hauteurs différentes 2 électro-aimants EM_E et EM_C (fig.3). Le premier de ces électro-aimants EM_E maintient une tige longue T (environ 40-50 cm) et le second EM_C une tige courte T' (10-15 cm). En coupant l'alimentation de l'électro-aimant EM_C , on libère la tige T' qui en heurtant une détente libère à son tour un couteau C, lequel en frappant la tige T (recouverte préalablement de noir de fumée et dite "tige chronographe") y marque un trait.

Préalablement à toute expérience on marque sur cette tige T maintenue par l'électro aimant EM_E un premier trait O (en coupant le circuit de EM_C de manière à laisser tomber la tige T' sur le couteau C. Ce trait constitue l'origine à partir de laquelle sera mesurée la hauteur de chute X de la "tige chrono" T.

La mesure du temps de transit τ de la détonation entre deux sections de la charge distantes de L où sont placés les 2 interrupteurs B_1 et B_2 (constitués par des fils fins ou bandes minces d'étain) des circuits des électro-aimants EM_E et de EM_C , se fait en notant que ce temps τ est la différence entre le temps t mesuré par la distance X sur la tige T et le temps τ séparant l'instant où B_2 est coupé et l'instant où la tige T' heurte la détente du couteau C. Ces temps t et τ étant respectivement $t = \sqrt{2X/g}$ et $\tau = \sqrt{2H/g}$, on choisit la hauteur H de chute de la tige T' de manière à ce que $\tau^0 = t - \tau$ soit positif, et X le plus grand possible (afin de pouvoir être mesuré avec la meilleure précision). En outre on cherche à

réduire au minimum les constantes de temps des électro-aimants et les temps de rupture de leurs circuits en B_1 et B_2 .

N4

EXPERIENCES DE P. CHAMPION ET H. PELLET

Afin de démontrer que "l'explosion développée par l'amorce et le choc des gaz ne peuvent suffire à produire le changement moléculaire nécessaire à la décomposition instantanée" laquelle aurait lieu, selon F.A. ABEL, sous l'effet d'"une action mécanique d'une espèce particulière", P. CHAMPION et H. PELLET /13/ ont réalisé plusieurs expériences.

Lors d'une première série de ces expériences, ils disposaient une petite charge d'iodure d'azote :

- 1° successivement, sur diverses cordes, d'une contrebasse, d'un violon, d'un alto et dans chaque cas ils attaquaient, avec l'archet, les autres cordes ;
- 2° sur un tam-tam chinois, ou une plaque métallique.

Dans le premier cas l'explosion de la petite charge d'iodure ne se produisait que si la corde attaquée par l'archet émettait un son plus grave que la corde sur laquelle était placée la charge.

Dans le second cas l'explosion avait lieu si l'on faisait vibrer un second tam-tam ou une autre plaque métallique, émettant également un son plus grave que le tam-tam ou la plaque supportant la charge d'iodure d'azote.

Dans une autre série d'expériences, de petites charges explosives étaient placées aux foyers de deux miroirs paraboliques, disposés face à face à 2,5 m de distance l'un de l'autre, avec entre les 2 une feuille de papier témoin.

La détonation d'une de ces 2 charges (laquelle n'était pas nécessairement toujours de l'iodure, mais par exemple une goutte de NG) provoquait inmanquablement celle de l'autre charge d'iodure d'azote sans que soit décelé un déplacement du papier témoin.

Selon CHAMPION et PELLET, on peut déduire de ces expériences : "que l'explosion des composés détonants, doit être attribuée à un mouvement vibratoire particulier, qui varie avec leur constitution et leurs propriétés, et qui peut agir indépendamment de la chaleur et du choc des gaz produits par l'explosion de l'amorce".

N5

THEORIE DES EXPLOSIONS PARTIELLES DE BUNSEN
ET EXPERIENCES DE A. von ÖTTINGEN ET A. von GUERNET

Une des premières tentatives, sinon la première, de détermination de la température de combustion de mélanges gazeux est due à R. BUNSEN. Dans ce but ce dernier a déterminé la pression maximale atteinte dans un vase clos lorsqu'on y enflamme le mélange étudié (cf. /9a/), puis, moyennant des hypothèses sur la composition des produits, il en a déduit la température cherchée /9b/.

Toutefois la valeur ainsi obtenue de celle-ci s'étant avérée être incompatible avec celle évaluée à partir des chaleurs de réaction et des chaleurs massiques alors connues, BUNSEN a émis l'hypothèse que dans un premier temps la combustion s'arrête avant d'être complète et qu'elle reprend ensuite dans un second (et éventuellement encore, dans un troisième) temps, après un court délai, pendant lequel la température des gaz présents diminue, par suite de l'effet refroidissant des parois, jusqu'à devenir inférieure à une certaine valeur.

Ainsi selon lui (cf. /51/) il y aurait d'abord combustion d'environ un tiers de la masse du mélange combustible présent à l'origine, puis de la moitié de la masse restante etc... jusqu'à consommation complète d'un des réactifs..

Cette théorie a été vivement critiquée par BERTHELOT et VIEILLE /2c/ et par MALLARD et LE CHATELIER /39/ selon lesquels le désaccord entre la température déduite des mesures de la pression d'explosion et celle calculée avec les valeurs des chaleurs de réaction et celles des chaleurs massiques alors connues, s'explique

par l'accroissement des dernières avec la température.

Mais contestant ce dernier point de vue, A von OTTINGEN et A. von GUERNET /51/ ont cherché à étayer l'hypothèse de BUNSEN en photographiant à l'aide d'une caméra à miroir tournant, l'explosion dans un eudiomètre du mélange strict H_2/O_2 .

Le miroir (80 x 100 mm) était mû à la vitesse de 6-7 tours/sec. par la chute d'un poids de 20 kg. L'eudiomètre (un tube épais de 20 mm et de 40 mm de diamètre intérieur et extérieur) comportait à ses deux extrémités des robinets entre lesquels étaient disposés face à face dans la paroi (près d'un des robinets, au quart et au milieu du tube) 3 paires d'électrodes dont une était utilisée pour l'allumage au moyen d'une étincelle électrique.

Bien qu'ayant "coloré" la flamme en ajoutant divers chlorures (de Cu, de Mg etc) ou oxydes et utilisé des plaques et papiers les plus sensibles OTTINGEN et GUERNET n'ont pas pu visualiser les fronts de combustion, mais seulement ceux des ondes qui naissent lors de la réflexion de celui-ci sur les fonds de l'eudiomètre.

D'après eux certaines de ces ondes qu'ils appellent "secondaires" seraient la manifestation de la combustion discontinue ("eine diskontinuïrlche gleichsam stufenweise erfolgende Verbrennung") imaginée par BUNSEN. D'autres seraient d'après eux des ondes de choc qu'ils ont été ainsi, les premiers après E. MACH et ses collaborateurs /36/ /37/ à visualiser lors des explosions.

Ayant établi d'après leurs enregistrements les diagrammes de marche de toutes ces ondes, ils ont pu évaluer la célérité de celle, qu'ils ont appelé "onde de BERTHELOT" (et qui serait issue de l'étincelle), à 2530-2560 m/s c'est-à-dire proche de la célérité 2800 m/s de l'onde de détonation dans le même mélange mesurée par BERTHELOT et VIEILLE.

Toutefois, ayant répété certaines de ces expériences H. DIXON a montré en 1903 /19b/ que :

1° les ondes de choc photographiées par OTTINGEN et GUERNET sont en fait engendrées par la réflexion d'une onde de choc qui précède le front de combustion (visible sur les enregistrements obtenus par DIXON) ;

2° les "ondes secondaires" sont en fait des ondes engendrées lors de l'interaction de l'onde de choc réfléchi sur le fond de l'eudiomètre et du front de combustion ;

et il a conclu que "there is no need to involve any "successive partial explosions" to account for them" (i.e secondary waves).

N6

REMARQUE SUR LE MEMOIRE DE V.A. MICHELSON

Le mémoire de V.A. MICHELSON /45/, que nous avons pu examiner, est une réédition de sa thèse soutenue en 1894. Dans ce mémoire il est clairement indiqué (par une note de l'éditeur) que MICHELSON a corrigé et complété en 1920, le texte original de son travail.

Cela est en particulier précisé page 115 de la réf. /45/ en ce qui concerne la fin du chapitre II (p. 112-125), consacré à l'"Onde explosive", et apparaît bien à la lecture, par exemple page 121 où sont cités les travaux de G. FALK sur la température d'inflammation publiés en 1906-07 /23/.

Mais malheureusement, il n'en est pas toujours ainsi et en particulier, nous nous sommes demandés si les lignes que consacre M.A. MICHELSON (p. 118-119) aux travaux de H. DIXON et de A. SCHUSTER publiés en 1893 /19/ ne font pas précisément partie des additifs datant de 1920 au mémoire original de de sa thèse, ce qui constituerait du point de vue historique (chronologique) un problème.

BIBLIOGRAPHIE

/1/ ABEL F.A.

a - On some phenomena exhibited by gun-cotton and gun-powder under special conditions. Proc. Roy. Soc. London 13 (1864), pp. 204-217.

- b - Researches on gun-cotton : on the manufacture and composition of gun-cotton. Philos. Trans. 156 (1866), pp. 268-308 ; Philos. Mag. 32 (1866), pp. 145-148.
- c - Researches on gun-cotton. Second Memoir : on the stability of gun-cotton. Phil. Trans. 157 (1867), pp. 181-253 ; Phil. Mag. 33 (1867), pp. 554-549.
- d - Contribution to the history of explosive agents. Phil. Trans. 159 (1869), pp. 489-516 ; Nature 2 aug. 18 (1870), pp. 326-327 ; C.R. Ac. des Sc. 69 (1869), pp. 105-121 ; Ann. de Chim. et de Phys. 4^e ser. 21 (1870), pp. 97-150.
- e - Recent contributions to the history of detonating agents (Résumé d'une conférence faite le 21 mars 1870). Nature 20 (1870) mai 1, 8, 25, pp. 19-21, 42-45, 68-69.
- f - Contribution to the history of explosive agents : Second memoir Phil. Trans. 164 (1874), pp. 337-395 ; Proc. Roy. Soc. 22 (1874), pp. 160-171 ; C.R. Ac. des Sc. 78 (1874), p. 1227, 1301, 1362, 1432-1436 ; Le Moniteur Scient. 16 (1874), pp. 595-603 ; Dinglers Polyt. Journ. 5^e ser. 213 (1874), pp. 428-430.
- g - The rapidity of detonation, Nature 8, oct. 23 (1873), p. 534.
- /2/ BERTHELOT M.
- a - Sur la force de la poudre et des matières explosives. Brochure in 4°, 40 pages, Ed. Gauthier Villars (1871) et Ann. de Chim. et de Phys. 4^e ser. 23 (1871), pp. 223-273.
- b - Sur la force des mélanges gazeux détonants. C.R. Ac. des Sc. 72 (1871), pp. 165-168.
- c - Sur les températures de combustion. Ann. de Chimie et de Physique 5^e Sc. 12 (1877), pp. 302-310.
- d - Sur la vitesse de propagation des phénomènes explosifs dans les gaz. C.R. Ac. des Sc. 93 (1881), pp. 18-22.
- e - Détonation de l'acétylène, du cyanogène et des combinaisons endothermiques en général. C.R. Ac. des Sc. 93 (1881), pp. 613-619.
- f - Sur l'onde explosive. C.R. Ac. des Sc. 94 (1882), pp. 149-152.
- g - Sur la vitesse de propagation de la détonation dans les matières explosives solides et liquides. C.R. Ac. des Sc. 100 (1885), pp. 314-320 ; Ann. de Chim. et de Phys. 6^e ser. 6 (1885), pp. 556-573.
- h - Sur la force des Matières Explosives, d'après la thermochimie. 2 vol. in 8° - 3^e éd. Gauthier Villars 1883.
- i - Sur l'onde explosive, sur les données caractéristiques de la détonation et sa vitesse de propagation dans les corps solides et liquides, et spécialement dans le nitrate de méthyle. C.R. Ac. des Sc. 112 (1891), pp. 16-27 ; Mem. des Poudres et Salpêtre 4 (1891), pp. 7-19.
- /3/ BERTHELOT M. et LE CHATELIER H., Sur la vitesse de détonation de l'acétylène. C.R. Ac. des Sc. 129 (1899), pp. 427-434 et Ann. de Chim. et de Phys., 7^e ser. 20 (1900), pp. 15-26.
- /4/ BERTHELOT M. et VIEILLE P.
- a - Sur la vitesse de propagation des phénomènes explosifs dans les gaz. C.R. Ac. des Sc., t. 94 (1882), p. 101 et p. 802.
- b - Nouvelles recherches sur la propagation des phénomènes explosifs dans les gaz. C.R. Ac. des Sc., t. 95 (1882), p. 150.
- c - Sur la période d'état variable qui précède le régime de détonation et sur les conditions d'établissement de l'onde explosive. C.R. Ac. des Sc., t. 95 (1882), p. 199.
- d - L'onde explosive. Ann. de Chimie et de Physique, 5^e série, 28 (1883), p. 289.
- e - Sur quelques conditions de propagation de la décomposition de l'acétylène. C.R. Ac. des Sc. 124 (1887), p. 1000.
- /5/ BICHEL C.E.
- a - Untersuchungsmethoden für Sprengstoffe. Zs f. Berg u Hütten u. Salinenwesen in Preuss. State (1902), pp. 669-689.
- b - Über Zündung von Schlagwettern durch detonierende Sprengstoffe - Glückauf 40 (1904), pp. 1040-1048.

- /6/ BICKFORD W., Brev. Brit. 6159 (1831).
- /7/ BRACONNOT H., De la transformation de plusieurs substances végétales en un principe nouveau. Ann. de Chimie et de Phys., 52 (1833), p. 290. Ann. der Chemie, 7 (1833), p. 249-293.
- /8/ BRUNSWIG H., Explosivstoffe, X de Handbuch der Angew. Phys. Chem. de Georg Bredig, 1e ed. (1909). 2e ed. (1922), J.A. Barth, Leipzig.
- /9/ BUNSEN R.
a - Gasometrische Methoden. Ed F. Vieweg Braunschweig 1857. Méthodes gazométriques. Trad. de Th. Schneider, Ed. V. Masson, Paris 1858.
b - Über die Temperatur der Flammen Kohlenoxyds u. Wasser stoffes. Ann. der Phys. u. Chemie (Poggendorf Ann.), 131 (1867), pp. 161-179.
- /10/ CAMPBELL C. and WOODHEAD D.W., The ignition of gases by an explosion wave. J. Chem. Soc. (1926), p. 3010-3021 et (1927), p. 1572-1578.
- /11/ CAMPBELL C. and FINCH A.C., Striated photographic records of explosion waves. J. Chem. Soc. (1928), p. 2094-2106.
- /12/ CHALON P.F., Les Explosifs Modernes. Ed. Beranger, Paris (1911).
- /13/ CHAMPION P. et PELLET H., Sur la théorie de l'explosion de composés détonants. C.R. Ac. des Sc., 75 (1872), pp. 210-214.
- /14/ CHAMPION P., PELLET H. et GREUNIER M., Application de l'électricité à l'inflammation des fournaux de mine torpille etc... à l'industrie minière : Application et Amorces électriques. Ann. de Chimie et de Phys. 5è ser. 5 (1875), pp. 28-113.
- /15/ CHAPMAN D.L., On the rate of explosion in gases. Philos Mag. 47 (1889), p. 90-104.
- /16/ COURTOIS B., Découverte d'une substance nouvelle dans le varech. Ann. de Chimie, 88 (1810), pp. 304-329.
- /17/ DANIEL J., Dictionnaire des Substances Explosives. Ed. Dunod, Paris (1902).
- /18/ DAUTRICHE H., Sur la vitesse de détonation des explosifs. C.R. Ac. des Sc. 143 (1906), pp. 641-664 ; 144 (1907), pp. 1030-1032.
- /19/ DIXON H.
a - The rate of explosion in gases. Phil. Trans. A, 184 (1893), pp. 97-188.
b - On the movement of the flame in the explosion of gases. Phil. Trans. A, 200 (1903), pp. 315-351.
- /20/ DORING W., Detonationvorgänge in Gasen. Ann. de Phys. 43 (1943), p. 421-436.
- /21/ DULONG P.L., Rapport sur un mémoire de P.L. Dulong sur une nouvelle substance explosive de MM. Thenard et Ch.L. Bertholet. Ann. de Chimie, 1è ser. 86 (1813), pp. 37-45.
- /22/ EARNSHAW S., On the mathematical theory of sound. Philos. Trans. of the Roy. Soc. London 150 (1860), pp. 133-148.
- /23/ FALK K.G.
a - The ignition temperatures of hydrogen-oxygen mixtures. The J. of the Am. Chem. Soc. 28 (1906), pp. 1517-1534.
b - Die Entzündungstemperaturen von Gasgemischen. Ann. de Phys., 4 Folge (1907), pp. 450-480.
- /24/ FELDHAUS, Über Knallgold und Knallquecksilber, Zs f. Ges. Schiess u. Sprengstoffwesen 4 (1909), p. 258.
- /25/ FICKETT W. and DAVIS W.C., Detonation. Ed. Univ. of Cal. Press Berkeley, Los Angeles, London (1979).
- /26/ GIRARD Ch., MILLOT A. et VOGT G., Sur la nitroglycérine et les diverses dynamites. C.R. Ac. des Sc., 71 (1870), pp. 688-692.
- /27/ GOUPILLIERE Hatton de la., Rapport présenté au nom de la Commission d'Etudes des Moyens propres à prévenir les explosions du grisou. Ann. des Mines, 7è ser. 18 (1880), pp. 193-415.
- /28/ GUTTMANN O.
a - Die Industrie der Explosivstoffe. Ed. F. Vieweg u. Sohn Braunschweig (1885).
b - Handbuch der Sprengarbeit. Ed. F. Vieweg u. Sohn Braunschweig (1891).
- /29/ HEISE F., Sprengstoffe und Zündung des Sprengschuss. Ed. J. Springer, Berlin (1904).
- /30/ HUGONIOT H., Propagation des mouvements dans les corps et spécialement dans les gaz parfaits. Journ. de l'Ecole Polytechnique, Cahiers 57 et 58 (1887-1889).

- /31/ JOST W., Explosions u. Verbrennungsvorgänge in Gasen. Ed. Jul. Springer Berlin, 1939, Traduction anglaise par Kroft, Ed. Mc Graw Hill, N.Y. (1946).
- /32/ KAST H.
 a - Die Brisanzbestimmung und die Messung der Detonationsgeschwindigkeit von Sprengstoffen. Zs. f. das Gesamte Schiess u. Sprengstoffwesen, n°4, 9 (fév. - mai 1913).
 b - Spreng und Zundstoffe. Ed. F. Vieweg u. Sohn Braungschweig (1921).
- /33/ LEA C., Jahresbericht für Chemie (1862), p. 382. (Cité par G. Desseigne. Préparation du nitrate de Méthyle. Mem. des Poudres et Salpêtres, 30 (1948), pp. 59-60).
- /34/ LE CHATELIER H.
 a - Sur le développement et la propagation de l'onde explosive. C.R. Ac. des Sc., 130 (1900), p. 1755.
 b - Sur la propagation des ondes condensées dans les gaz chauds. C.R. Ac. des Sc., 131 (1900), p. 30.
- /35/ LEWIS B. and ELBE G. von., Combustion, Flames and Explosions in gases. 1è Ed. Cambridge Univ. Press (1938), 2è Ed. Acad. Press. Inc. N.Y. (1951).
- /36/ MACH E. et SOMMER J., Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Explosionschallwellen. Sitz. Ber. Akad. Wiss. Wien, 75 (1877), pp. 101-130.
- /37/ MACH E. und WENZEL J., Ein Beitrag zur Mechanik der Explosionen. Sitz. Ber. Akad. Wien 92 (1885), pp. 625-664.
- /38/ MALLARD E., De la vitesse avec laquelle se propage l'inflammation dans un mélange d'air et de grisou et la théorie des lampes de sûreté. Ann. des Mines 7 Ser. 8 (1875) pp. 355-381 (cf. N. Manson : Some Notes on the first theories of the flame velocity in gaseous mixtures. Combustion and Flame, 1987, sous presse).
- /39/ MALLARD E. et LE CHATELIER H.
 a - Sur les vitesses de propagation de l'inflammation dans les mélanges gazeux explosifs. C.R. Ac. des Sc., 93 (1881), pp. 145-148.
 b - Recherches sur la combustion des mélanges gazeux explosifs. Ann. des Mines, 8è Série, 4 (1883), p. 274.
- /40/ MANSON N.,
 a - Sur la structure des ondes explosives dites "héliçoïdales" dans les mélanges gazeux. C.R. Ac. des Sc., 222 (1946) p. 46-48 ; Propagation des détonations et des déflagrations dans les mélanges gazeux. Ed. ONERA et IFP Paris 1946.
 b - Contribution de Paul VIEILLE à la connaissance des détonations et des ondes de choc, Scien. et Techn. de l'Armement, 60, n°232 (1986), pp. 26-59.
- /41/ MARSHALL A., Explosives (en 2 volumes), Ed. J. and A. Churchill, London (1917).
- /42/ MAYER V. et STUBER O., Sur les combinaisons nitrogénées de la Série grasse. Ann. de Chim. et de Phys., 4è ser., 28 (1873), pp. 140-146.
- /43/ MEDARD L., Les explosifs occasionnels. (2 vol.) Ed. Technique et Document, Paris (1978).
- /44/ METTEGANG H., Messung der Detonationsgeschwindigkeit von Sprengstoffen. Vth Int. Congr. für Angewandte Chem., 2, p. 322, Berlin (1904).
- /45/ MICHELSON V.A., Sur la vitesse normale d'inflammation des mélanges gazeux explosifs. (En russe), Thèse soutenue à l'Université de Moscou en 1894, rééditée dans les "Oeuvres Complètes" en 1930 par Novi Agronom. Moscou.
- /46/ MILLES F.D., A History of Research in the Nobel division of ICI, Ed. ICI (1955).
- /47/ MOSENTHAL H. de, The life-work of Alfred Nobel. The J. of the Soc. Chem. Ind, 18 (31 mai 1899), pp. 443-451.
- /48/ NEUMANN J. von., Theory of Stationary detonation waves, O.S.R.D. Rept., n°549 (1942). Selected Works, t. 6, Ed. Mac Millan N.Y.
- /49/ NOBEL A.B., Détonateurs. Brevets britan., 2359 (1863) ; 1813 (1864). Dynamite kieselguhr, Brev. brit. 1345 (1867). Dynamite gomme, Brev. brit. 4179 (1875).
- /50/ NOBLE A., Artillery and Explosives. Ed. John Ringway, London (1906).
- /51/ ÖTTINGER A von. und GUERNET A von., Über Knallgasexplosionen. Ann. der Phys. u. Chemie, 5th Folge, 33 (1888), pp. 586-609 (avec 2 planches).

- /52/ PEPIN-LEHALLEUR J. , *Traité des Poudres, Explosifs et Artifices*. Ed. Ballières et fils, Paris (1935).
- /53/ RANKINE W.J., On the thermodynamic theory of finite longitudinal disturbance. *Philos. Trans.*, 160 (1870), p. 277-288.
- /54/ RIEMANN B., *Über die Fortpflanzung ebener Luftwellen von endlicher Schwingungsweite*. Abhandl. Ges. Wissensch. Göttingen, Math. Phys. Classe 8 (1860), p. 43. Traduction française des oeuvres de RIEMANN par L. Laugel, Ed. Gauthier-Villars, Paris (1898).
- /55/ ROMOCKI S.J. von., *Geschichte der Explosivstoffe*, Tome I : *Geschichte der Sprengstoffchemie, der Sprengtechnik und des Torpedowesen* ; Tome II : *Die rauchschwachen Pulver in ihrer Entwicklung*. Ed. R. Oppenheim (Gustav Schmidt), Berlin (1895-1896).
- /56/ ROUX L.P. et SARRAU E., *Expériences sur les effets de la dynamite*. C.R. Ac. des Sc., 76 (1873), pp. 1089-1092.
- /57/ SEBERT H. et coll., *Compte Rendu des Travaux de la Comm. des Substances Explosives pour 1878-1886*. Mem. des Poudres et Salpêtres, a - 1 (1882-1883) : p. 434, 435, 441, 451, 452, 464, 465, 481, b - 2 (1884-1886) : p. 36, 53, 54, 100.
- /58/ SMITH F.J., A new form of electric chronograph. *Phil. Mag.*, 4 (1890), pp. 377-383.
- /59/ SOBRERO A., *Sur plusieurs composés détonants produits avec l'acide nitrique et le sucre, la dextrine, la lactine, la marnite et la glycérine*, C.R. Ac. des Sc., 25 (1847), p. 247-248.
- /60/ SOLOUKHINE R.I., *Ondes de choc et détonation dans les gaz*. (En russe), Ed. d'Etat, Moscou (1963). (Traduciton angl., Ed. Mono Book Corp., Baltimore, 1966).
- /61/ SCHÖNBEIN C.F., *Brev. brit. (au nom de J. Tayler), 11407 Brev. U.S. 4674 - 1846* (cf. *Sitz. Ber naturforscher Ges. Basel* 7 (1846) p. 26).
- /62/ TAYLOR J., *Detonation in condensed explosives*. Ed. Clarendon Press, Oxford (1952).
- /63/ TAYLOR W. and WEALE A., *The mechanism of the initiation and propagation of detonation in solid explosion*. *Proc. Roy. Soc. A* 138 (1932), pp. 92-116.
- /64/ THRELFALL R., *On the theory of Explosions*. *Phil. Mag.* 21 (1886), pp. 166-179.
- /65/ UPMANN J. et MAYER E. von., *Traité sur la poudre, les Corps explosifs et la Pyrotechnie*. En allemand, Ed. Vieweg u. Sohn, Braunschweig (1874). Traduction française par E. Desortiaux, Ed. Dunod (1878).
- /66/ URBANSKI T.
a - *Chemistry and Technology of explosives*. (en 3 volumes), Pergamon Press, Oxford (1964).
b - *Le centenaire de la nitro-cellulose*. Mem. de l'Art. Franc., 13 (1934), pp. 885-842.
- /67/ VIEILLE P.
a - *De l'influence du covolume de gaz sur la vitesse de propagation des phénomènes explosifs*. Mem. Poudres et Salpêtres, 4 (1891), pp. 20-22.
b - *Sur les discontinuités produites par la détente brusque de gaz comprimés*. C.R. Ac. des Sc., 129 (1899), pp. 1228-1230.
c - *Rôle des discontinuités dans la propagation des phénomènes explosifs*. C.R. Ac. des Sc. 130 (1900), pp. 413-416.
d - *Sur le rôle des discontinuités dans les phénomènes de propagation*. Mém. des Poudres et Salpêtres, 10 (1899-1900), pp. 177-260.
e - *Etudes sur le rôle des discontinuités dans les phénomènes de propagation*. J. de Phys. Theor. et Appl., 3è Série, 9 (1900), pp. 621-644.
- /68/ WAGNER H.G., *Gaseous detonations and the structure of detonation zone*. *Fundamental Data from Shock Tube Experiments*. AGARDOGRAPH 41, Ed. A. Ferri, Pergamon Press (1961).
- /69/ WILLIAMS F., *Combustion Theory*. Ed. The Benjamin Cummings Publ. Co. Inc. Menlo Park Cal. (1985).
- /70/ WRIGHT E.G., *On the firing of gun powder by fulminating mercury*, *Phil. Mag.* 62 (1823) pp. 203-204.

- /71/ ZELDOVITCH Ja. B.
a - Sur la théorie de la propagation de la détonation dans des systèmes gazeux. *Zs. Teor. i Exp. Fiz. (en Russe)*, 10, n°5 (1940), p. 543.
b - Théorie de la combustion et de la détonation des gaz. Ed. de l'Ac. des Sc. d'URSS, Moscou (1944).
- /72/ Analyse synoptique des rapports officiels sur les accidents de grisou en France de 1817 à 1881. *Ann. des Mines* 1882 : 1, p. 293 ; 2, p. 393 ; 1883, 2, p. 67 ; 1884, 2, p. 73. ; 1885, 2, p. 195. ; 1886, 1, p. 31, 10, p. 11.
- /73/ Bul. des Expériences de la Commission des Substances Explosives. *Mem. des Poudres et Salpêtres* 1 (1878-1882), pp. 434-441 ; 464, 481 et **4.

Questions - M. BARRERE

Pourquoi les chercheurs soviétiques font-ils très souvent état des travaux français de TAFFANEL ?

- P.J. Van TIGGELEN

TAFFANEL n'est-il surtout pas connu par les soviétiques pour ses travaux sur les critères d'explosivité ?

Réponse -

A ma connaissance c'est surtout ZELDOVITCH et ses collaborateurs qui apprécient les travaux de TAFFANEL et LE FLOCH sur la température d'inflammation.

Ils ignorent totalement les travaux que TAFFANEL a menés entre 1908 et 1912 sur le développement de la combustion des poussières de charbon dans les galeries des mines et au cours desquels il a découvert que la flamme "chasse" devant elle les gaz et accroît aussi la teneur en poussières de ces derniers.