

## **Maîtrise des explosions et nouvelles technologies \***

par Christian BROCHET,

Directeur de Recherche au C.N.R.S.  
Laboratoire d'Énergétique et de Détonique.

---

### **1. INTRODUCTION.**

C'est seulement dans la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle que des études scientifiques des flammes et des explosions ont réellement été entreprises à la suite de nombreux accidents dus aux « coups de grisou » dans les mines de charbon. A ces travaux sont associés les noms de Marcellin Berthelot, Paul Vieille, Ernest Mallard et Henri Le Chatellier.

Le feu : c'est l'une des premières mutations technologiques dans l'histoire de l'homme et l'un des critères d'humanité que l'utilisation du feu il y a quelque 700 000 ans. Ce n'est que 3 000 ans avant notre ère que le contrôle du feu dans une fusée, œuvre du mandarin chinois Vangou — qui, selon la légende, périt brûlé dans l'incendie accidentel de son cerf-volant équipé de 47 fusées à poudre — constituait une des premières contributions à la maîtrise de la conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique.

Pendant les vingt derniers siècles, l'utilisation du feu à des fins militaires prit le pas sur la domestication pour la production d'énergie. L'apparition des techniques, comme la machine à vapeur ou le moteur à explosion, a précédé la connaissance scientifique de la flamme et de l'explosion, formes diverses d'un même phénomène dont la compréhension totale est encore inachevée. Pour donner une première définition du phénomène en question, nous dirons qu'il s'agit de la transformation chimique irréversible et plus ou moins rapide d'un corps composé ou d'un mélange, réagissant avec production de chaleur et formation de gaz, en général incandescents.

Encore de nos jours, il reste beaucoup à faire pour dominer complètement ces phénomènes afin de contrôler les diverses

---

(\*) Cet article reprend le texte d'une conférence prononcée aux Journées de l'Union des Physiciens, à Poitiers, en novembre 1985.

situations liées aux flammes et aux explosions et qui s'enchaînent parfois d'une manière complexe, voire catastrophique. La civilisation industrielle présente est amenée à fabriquer, transporter et mettre en œuvre des quantités croissantes de matières combustibles ou explosives, dans le même temps où la société est soucieuse de plus de sécurité vis-à-vis de l'environnement industriel. Il y a donc lieu de continuer à progresser dans la connaissance de ces phénomènes afin de rester maître de nos propres techniques.

Dans ce qui suit, on s'est efforcé de clarifier les concepts de flamme et d'explosion, d'apporter quelques notions de base dont on peut déduire des outils d'études de certaines questions posées.

Que savons-nous prévoir et calculer d'un mélange combustible ? Jusqu'où prévoir les conséquences d'une explosion ?

Ce que les recherches ont apporté au cours des dernières années a permis d'inventer de nouvelles techniques, parfois très sophistiquées. Nous en donnerons quelques exemples pour montrer que si, dans ce domaine, les technologies ont longtemps précédé la science, aujourd'hui les progrès de celle-ci ont conduit à renverser la tendance et à créer de nouvelles technologies dans les domaines les plus divers.

## 2. VOCABULAIRE.

Nous avons parlé, dans ce qui précède, de feu et d'explosion, pour définir le sujet que nous traiterons. Le feu est rarement synonyme d'explosion et l'explosion peut survenir sans feu et sans flamme. Pour être plus précis, associer feu et explosion, c'est sous-entendre d'autres mots qui sont : combustion vive, déflagration, onde de choc, détonation. Nous verrons comment donner un contenu technique et scientifique à ces mots, pourquoi et dans quelles conditions une flamme peut se transformer en détonation.

L'enseignement secondaire ne fait qu'une faible place à ces notions qui relèvent de plusieurs domaines des sciences physiques et chimiques (mécanique des fluides, thermodynamique, cinétique chimique). Selon le cas on évoquera dans les manuels, certains des aspects associés à des manifestations phénoménologiques et à propos de vitesses de réactions chimiques, on parlera des réactions explosives.

Le tableau suivant donne un exemple de ce qui est présenté dans un manuel du secondaire à propos du sujet.

Avancement de la réaction	Type de réaction	Dénomination cinétique
Se fait en un temps trop court pour nos sens	Réaction excessivement rapide avec inflammation et qui dans des conditions stoechiométriques peut devenir explosive	Réaction explosive
	Réaction très rapide qui semble instantanée pour nos sens. Se fait avec inflammation	Réaction instantanée

A la description cinétique doit être associée la description physique et mécanique pour mieux comprendre les phénomènes.

Ainsi la flamme est-elle un phénomène de transfert de masse et d'énergie au sein d'un écoulement en réaction chimique.

La flamme existe aussi bien dans un mélange associant intimement combustible et comburant que dans un milieu où ces derniers sont séparés. Dans ce dernier cas, les réactions chimiques s'effectuent à l'interface des deux milieux combustibles et comburant avec échanges de chaleur et de masse qui limiteront nécessairement les vitesses de réaction. On parle alors de flamme de diffusion.

Dans le cas de prémélanges (ou d'un seul constituant se décomposant avec production de chaleur), la zone réactive sépare le mélange frais des gaz brûlés (produits de la réaction). Cette zone consomme le prémélange avec une vitesse plus ou moins grande, c'est-à-dire, se déplace par rapport au prémélange, soit avec une vitesse supersonique : c'est une détonation, soit avec une vitesse subsonique : c'est alors une déflagration.

Pour la détonation, on parlera fréquemment d'onde de choc, dans la mesure où la détonation est, en quelque sorte, une onde de choc réactive qui, aux frontières du prémélange, transférera une onde de choc dans le milieu connexe.

### 3. PROPAGATION D'UNE FLAMME OU D'UNE DETONATION DANS UN MILIEU HOMOGENE : NOTIONS DE BASE.

Il n'est pas dans le propos d'entrer dans le détail des mécanismes élémentaires qui permettent de développer un modèle rendant compte de l'ensemble des phénomènes allant de la flamme à la détonation d'un mélange explosif gazeux ou condensé

mais de donner quelques points de repère pour éclairer la méthode d'analyse de ces phénomènes. On renverra pour une étude plus complète aux ouvrages cités en référence [1], [2], [3], [4].

Pour traiter un tel problème, on s'appuie sur les classes d'équations suivantes :

- les équations de bilans locaux pour la matière, chacune des espèces chimiques, la quantité de mouvement et l'énergie,
- les équations thermodynamiques : état thermique et énergétique du milieu,
- les équations phénoménologiques : elles traduisent les processus de production des espèces et ceux de transport (diffusion de matière, conduction de la chaleur).

Dans chaque phénomène de combustion, la dynamique de l'écoulement de la matière commande la production des espèces chimiques avec libération d'énergie thermique qui influe en retour sur la dynamique. Le couplage entre les phénomènes mécaniques, chimiques et thermiques détermine la complexité des phénomènes de combustion.

Pour préciser la forme des équations de bilans locaux, nous rappellerons qu'elles s'établissent en considérant une grandeur extensive  $G$ , un volume de contrôle  $\Omega$  de surface  $\Sigma$ . La structure d'une équation de bilan est comme suit :

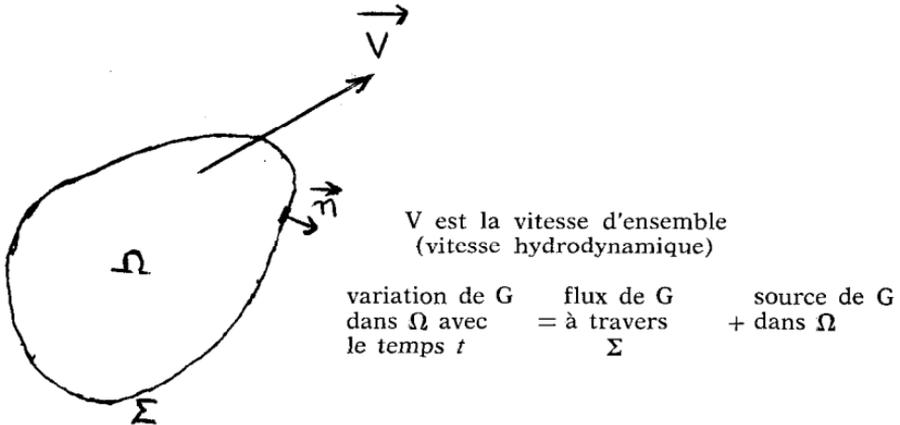


Fig. 1

G peut être la masse M, une espèce chimique, l'énergie, la quantité de mouvement.

Soit  $g = G/M$  la grandeur massique associée à G, et  $\rho$  la masse volumique, l'équation de bilan s'écrit classiquement :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho g d\Omega = - \int_{\Sigma} \rho_G \vec{n} d\Sigma + \int_{\Omega} \rho \dot{g} d\Omega$$

$\dot{g}$  étant la production de G dans ( $\Omega$ ),  $\rho_G$  le flux de G à travers un élément  $d\Sigma$ .

Dans de nombreux problèmes, ces équations sont complexes mais elles se simplifient considérablement lorsque l'écoulement est stationnaire et monodimensionnel.

Par exemple, si G est la masse M, l'équation de bilan exprime la conservation de la matière qui, dans un écoulement stationnaire,  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ , et monodimensionnel, s'exprimera par la relation :

$$\frac{d}{dx} (\rho V) = 0$$

où V est la vitesse de la matière par rapport à  $\Sigma$ .

Les équations thermodynamiques sont plus familières et beaucoup plus simples. Elles expriment par exemple l'état thermique global de la matière comme par exemple l'équation des gaz parfaits, relation entre la pression, la masse volumique et la température du milieu. L'état énergétique se traduit par une relation de la forme : Energie interne = fonction de la température.

Les équations phénoménologiques sont nécessaires pour fermer le système des équations de bilan. Une forme simplifiée des équations phénoménologiques est celle, classique, de Fourier qui exprime la diffusion de la chaleur dans un milieu de diffusivité thermique  $D_{th}$ . Si T est la température et t le temps, rappelons que cette équation est de la forme :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_{th} \nabla^2 T$$

où  $\nabla^2 T$  représente le laplacien de T.

Il est intéressant de noter qu'une équation analogue régissant la diffusion d'une espèce chimique (*i*) de concentration  $Y_i$  peut être déduite sous certaines conditions simplificatrices (milieu inerte) avec le coefficient de diffusion de l'espèce (*i*),  $D_i$  :

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = D_i \nabla^2 Y_i.$$

Ces équations phénoménologiques prennent, par exemple, toute leur importance dans la description du mécanisme de propagation d'une flamme où le couplage :

- de la diffusion des espèces chimiques pilotant la réaction qui va conduire à la libération de chaleur (réaction exothermique),
- et de la diffusion de la chaleur qui accompagne le front de flamme,

est essentiel pour comprendre comment se propage une flamme dans un milieu combustible. Un tel système d'équation devra prendre en compte la production des espèces chimiques via l'introduction d'un modèle cinétique plus ou moins élaboré. C'est sur ces principes que sont établis les modèles de flamme. Nous n'entrerons pas dans le détail de la théorie des flammes et renverrons le lecteur aux références [1] et [5].

Il arrive parfois que les phénomènes de production et de transport peuvent être négligés dans la mise en équation de certains phénomènes de combustion vive où il n'est pas nécessaire d'entrer dans le détail de la zone de réaction chimique pour comprendre les lois macroscopiques de la propagation. Il en est ainsi du phénomène de détonation où les équations essentielles sont celles de bilan, qui se ramènent aux équations classiques de conservation (masse, énergie, quantité de mouvement) et aux équations thermodynamiques.

a) Conservation de la masse :  $\rho_1 V_1 = \rho_2 V_2 = \dot{m}$ .

b) Conservation de la quantité de mouvement :

$$P_1 + \dot{m} V_1 = P_2 + \dot{m} V_2.$$

c) Conservation de l'énergie :  $H_1 + \frac{V_1^2}{2} = H_2 + \frac{V_2^2}{2}$ .

d) Equations d'état :  $P_1 = \rho_1 N_1 R T_1$      $P_2 = \rho_2 N_2 R T_2$ .

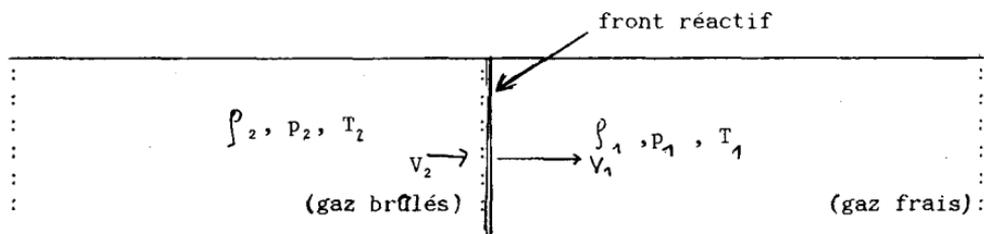


Tableau 1

---

H	=	enthalpie des gaz dans l'état 1, 2.
N	=	nombre de moles de gaz par unité de masse dans 1, 2.
T	=	température des gaz dans l'état 1, 2.
V	=	vitesse du front réactif par rapport aux milieux 1, 2 (si le milieu 1 est au repos, $V_1$ est la célérité du front).
p	=	pression des gaz dans l'état 1, 2.

---

Hypothèse Chapman-Jouguet :  $V_2 = a_2$ .

$a_2$  = célérité du son dans les gaz brûlés.

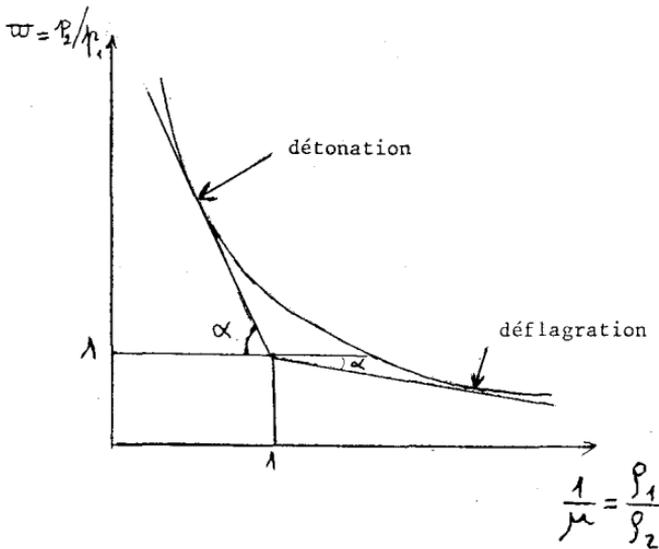


Fig. 2

La théorie de Chapman-Jouguet qui suppose l'écoulement stationnaire et monodimensionnel est d'une grande simplicité pour décrire les propriétés essentielles de la détonation.

Le système des équations  $a, b, c, d$  conduit à un ensemble de solutions représentées, dans l'espace pression-masse volumique (fig. 2) par l'adiabatique dynamique si une fonction explicite ou numérique de l'équation énergétique est connue.

L'hypothèse Chapman-Jouguet détermine deux solutions particulières conformes à l'hypothèse de base de stationnarité en stipulant que la célérité de l'onde par rapport à la vitesse des gaz brûlés est égale à la vitesse locale du son dans ces mêmes

gaz. Ces deux points sont aussi les points de tangence de l'adiabatique et des droites d'équation :

$$\frac{\bar{\omega} - 1}{1 - 1/\mu} = \frac{\dot{m}^2}{p_1 q_1}$$

avec :

$$\bar{\omega} = p_2/p_1$$

$$\mu = q_2/q_1^2$$

elles-mêmes solution du système d'équation *a* et *b*.

Aux points fléchés ( $\bar{\omega}_{det}$ ,  $\mu_{det}$ ), ( $\bar{\omega}_{def}$ ,  $\mu_{def}$ ) (fig. 2), on a :  $V_1^2 = p_1/q_1 \text{ tg } \alpha$ .

La solution qui correspond à un accroissement de pression représente l'état d'une détonation, celle relative à un accroissement du volume spécifique représente l'état d'une déflagration stationnaire (cône bleu d'une flamme accrochée sur un bec Bunsen).

La théorie de la détonation de Chapman-Jouguet permet ainsi de prévoir quantitativement les principales grandeurs thermomécaniques (célérité de propagation et pression du front d'onde notamment) qui sont observées expérimentalement (tableau 2). Notons également que la célérité d'une détonation est

Tableau 2

Mélange explosif	$V_A$	$P_2/P_A$	$T_2$	Références Observations
	$\tau_h$ $V_A$ exp m/s	$\tau_h$ $P_2/P_A$ exp	$T_2$ exp, K	
$C_3 H_8 + 5 O_2$ 1 bar, 290 k	2362 2370	36 36,5	3800 3750	7, 8, 9
$H_2 + \text{air}$ stoechiométrique 1 bar, 290 k	1960 1970	15		
Nitrométhane $C H_3 NO_2$ liquide 290 k	6300 * 6350 * 6300	123 $10^3$ 124 $10^3$ 127 $10^3$	3000 * 3800 * 3400	10, 11 * selon équations d'état
"Hexogène" cyclotriméthylène trinitramine $C_3 H_6 N_3 (NO_2)_3$ solide	8750	347 $10^3$		

essentiellement supersonique (de 5 à 8 fois la vitesse du son dans le mélange explosif initial soit une célérité de 1500 à 8000 m/s selon les mélanges gazeux ou condensés) tandis que la déflagration est subsonique (célérité  $\sim$  0,01 à 10 m/s).

On entrevoit ainsi les raisons pour lesquelles un état de détonation est caractérisé par des grandeurs constantes, l'état initial n'étant pas perturbé alors qu'un état de déflagration, s'il se propage, modifie sans cesse le champ dynamique du milieu des gaz frais. Les perturbations de la zone de transformation chimique se développent à la célérité locale du son, le front de flamme agissant à la manière d'un piston semi-perméable.

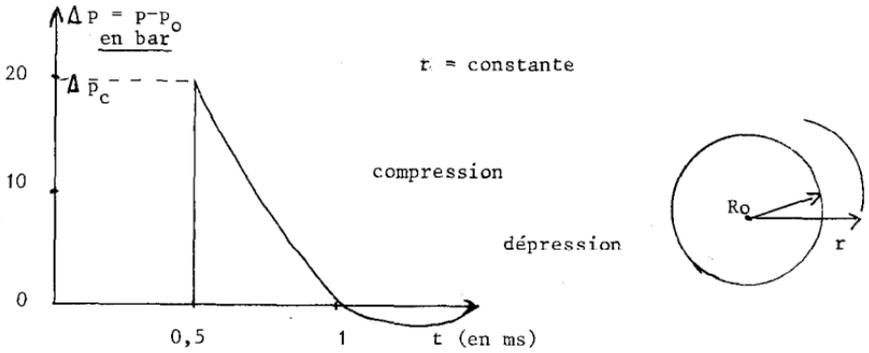
Pour ces raisons, l'état créé par la propagation d'une détonation est assez bien connu lorsque le front de détonation arrive à l'interface avec un milieu connexe inerte dans lequel les effets thermomécaniques vont se propager. Par contre, la situation créée par une déflagration en cours de propagation est beaucoup plus difficile à déterminer et les effets dans un milieu connexe seront d'une manière générale plus difficilement prévisibles [réf. 6].

#### 4. EFFET D'UNE DEFLAGRATION ET D'UNE DETONATION SUR LE MILIEU ENVIRONNANT.

Ce qui se passe dans un milieu combustible lorsque localement sont créées les conditions d'allumage, consiste essentiellement en effets thermiques et mécaniques qui, suivant l'intensité de la source d'inflammation, la nature du milieu réactif, ses dimensions, son confinement, vont se traduire par la propagation d'une déflation ou d'une détonation. Lorsque, à la limite du mélange explosif, cesse de se produire la libération de l'énergie chimique, le milieu connexe inerte transmet une onde de choc, laquelle met le milieu en mouvement et s'amortit avec la distance de propagation. La forme de cette onde de choc, appelée encore onde de souffle, est représentée (fig. 3) dans le cas où elle a été engendrée par une détonation (fig. 3a) ou une déflagration (fig. 3b).

On voit ainsi que le milieu environnant subit les effets d'une compression - dépression qui crée une impulsion et génère des forces d'entraînement.

La différence de célérités de propagation entre la détonation et la déflagration joue directement sur les amplitudes et les temps d'application des variations de pression. C'est ainsi par exemple que si on considère un volume sphérique d'un mélange d'hydrocarbure et d'air, la surpression maximale sera de l'ordre de 15 à 20 fois la pression atmosphérique alors que, pour une onde de souffle due à une déflagration, la surpression sera  $10^2$  à



$p_0$  = pression dans le milieu environnant,  
 $p$  = pression du choc ( $\Delta p_c \simeq 15 \text{ à } 20 p_0$ ).

Fig. 3 a. — Profil d'une onde de choc produite par une détonation à une distance  $r$  de la surface de la charge explosive de rayon  $R_0 \sim 5$  m. La pression et le temps sont des ordres de grandeur.

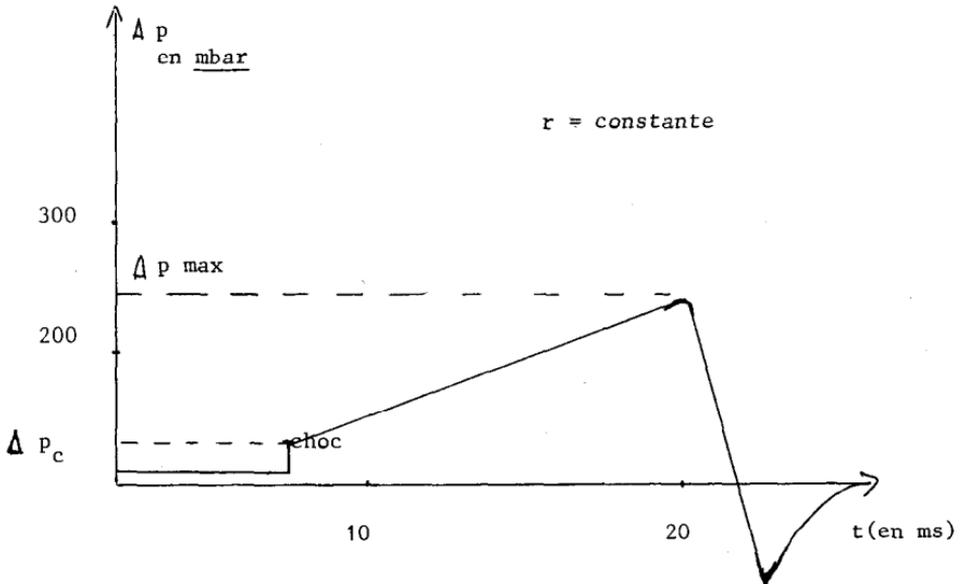


Fig. 3 b. — Profil de la pression induite par une déflagration à une distance  $r$  fixée de la charge de rayon  $R_0 \sim 5$  m en fonction du temps. La pression donnée en abscisse est un ordre de grandeur pour une célérité du front de flamme de l'ordre de 200 m/s.

$10^3$  fois plus faible. Il en est de même pour le temps caractéristique de l'accroissement de pression qui est de l'ordre de la micro-

seconde dans le premier cas et de la milliseconde ou plus pour un effet dû à une déflagration.

Lorsque les ondes de souffle s'éloignent de leur point d'origine, la loi d'amortissement de la variation temporelle de la pression avec la distance  $r$  à l'interface est en  $r^{-n}$  ( $n < 3$ ) pour une détonation et en  $r^{-1}$  pour une déflagration.

Les effets d'une onde de souffle sur le milieu environnant dépendent de la pression et du temps d'application par ce qui représente l'impulsion.

Ainsi par exemple les effets physiologiques d'une onde de souffle sur l'organisme humain sont résumés sur la fig. 4 où

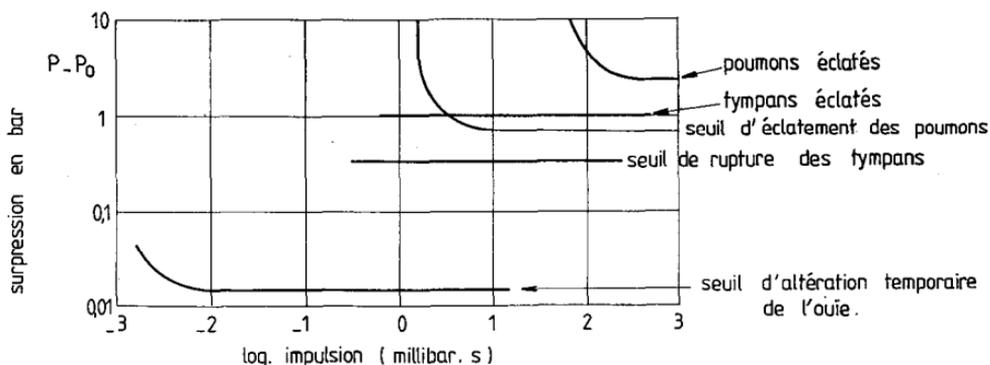


Fig. 4. — Effet d'une explosion sur l'homme.

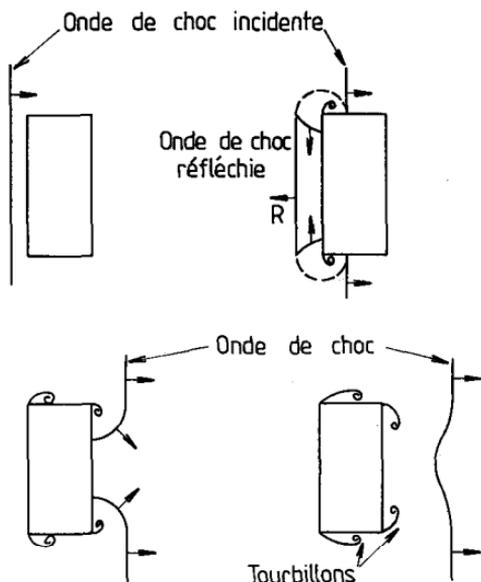


Fig. 5. — Effets induits par une onde de choc rencontrant un bâtiment.

on peut se rendre compte qu'une surpression forte de courte durée pourra être mieux supportée qu'une surpression plus faible mais appliquée pendant une durée prolongée.

Nous avons représenté schématiquement comment une onde de souffle crée des effets d'entraînement sur un obstacle (fig. 5) pour rappeler qu'au-delà des effets d'impulsion, les écoulements turbulents induits viennent compliquer la description physique des forces mécaniques mises en jeu. Pour donner un aperçu des seuils de résistance des principaux éléments d'un bâtiment, les bris de vitres seront observés pour une surpression de l'ordre de quelques dizaines de millibars alors que les structures en béton pourront résister à quelques centaines de millibars.

##### 5. QUELQUES EXEMPLES D'ACCIDENTS DUS A DES DETONATIONS.

Plusieurs graves accidents ont été le fait de la détonation d'explosifs condensés. C'est ainsi qu'en 1921 à Oppau en Allemagne, une usine de nitrate d'ammonium explosait, tuant 1 100 personnes et produisant un cratère de 130 m de diamètre et 40 m de profondeur (fig. 6).



Fig. 6. — Photo de cratère produit par l'explosion d'une usine de nitrate d'ammonium à Oppau en 1921.

En 1947 dans le port de Texas City, un bateau contenant du nitrate d'ammonium explosait après un incendie à bord, tuant 500 personnes. Dans ces deux cas, la détonation de charges importantes de nitrate était à l'origine des catastrophes. A Texas City le confinement du matériau explosif et la quantité incriminée ont été déterminant pour expliquer la transition en détonation.

La détonation accidentelle de mélanges gazeux est d'autant plus probable que le mélange est confiné et en grande quantité. C'est ainsi par exemple le cas :

- de pétroliers en fin de déchargement où les vapeurs d'hydrocarbure mélangés à l'air peuvent constituer un mélange détonant (accident du Sax-Saena) à Los Angelès dans les années 70),
- d'entrée accidentelle d'air dans un gazoduc,
- de fuite d'hydrocarbure dans un immeuble.

Dans tous ces cas pour lesquels les exemples concrets sont nombreux, on note l'importance de l'effet d'échelle, du confinement de la nature du combustible. C'est ainsi que la transition en détonation est d'autant plus probable que le rapport entre la longueur et le diamètre de la charge constituée est grand. A Louisville, Kentucky, en 1981 une fuite d'hexane se répandit d'une usine dans les égouts de la ville. L'effondrement de plusieurs kilomètres d'égouts était consécutif, d'après les experts, à la détonation du mélange d'air et d'hexane.

Les fuites accidentelles d'hydrocarbure se volatilisant dans un milieu aérien ouvert ont été à l'origine de nombreux accidents mais dans ce cas l'inflammation du mélange conduit à une déflagration qui, en général, ne se transforme pas en détonation. Les effets sur l'environnement sont néanmoins parfois très graves tant à l'intérieur du nuage combustible (Los Alfaques, Feyzin) où les effets thermiques prennent une grande importance, qu'à l'extérieur où les impulsions sont de longue durée.

## 6. LES EXPLOSIONS DE POUSSIÈRES.

Plus complexes mais aussi plus fréquentes, les explosions de poussières dans les mines et surtout dans les industries agro-alimentaires sont constatées dans le monde entier. Les farines, les poussières de céréales, d'écorce, de coton, le lait en poudre, le sucre, etc. en suspension dans l'air, peuvent être le support d'une combustion vive de type déflagration. Dans les silos à grain de grande dimension, l'accélération de la déflagration conduit fréquemment à des niveaux de pression comparables à ceux d'une détonation.

Les poussières dont il est question sont en général, soit de charbon, soit des sous-produits de l'industrie agro-alimentaire, et comportent essentiellement une partie organique susceptible de brûler dans l'air. Sous l'effet de la chaleur, la matière libère des espèces volatiles par pyrolyse. Hydrogène, méthane, hydrocarbures sont parmi ces substances volatiles, celles qui, avec l'oxygène de l'air, vont fournir le mélange inflammable. Suivant la température (la pyrolyse commence vers 100 à 150 °C), le dégagement des espèces volatiles sera plus ou moins important et s'accélèrera avec la température. Autour de chaque particule, une gaine gazeuse combustible va brûler avec l'air ambiant et le dégagement de chaleur associé à la combustion échauffera les particules voisines qui à leur tour pourront s'enflammer. La combustion de poussières en suspension se fait d'abord grâce à ce mécanisme de dévolatilisation; ensuite le résidu carboné solide pourra réagir en phase hétérogène. Le transfert de chaleur vers les particules non brûlées permet la propagation du front de flamme qui sera dans la plupart des cas une déflagration. Les effets aérodynamiques de chasse préalable d'une telle onde assurent en outre la mise en suspension des poussières déposées. Ce mécanisme explique que, même si les poussières ne sont pas initialement en suspension, la propagation d'une déflagration va « soulever » le nuage combustible de poussières en avant du front de la déflagration. Ainsi peut se propager un tel phénomène sur de grandes longueurs comme cela se produit dans les silos à grains.

## 7. LES APPLICATIONS TECHNOLOGIQUES DES EXPLOSIFS.

Depuis très longtemps, en dehors des applications militaires, on utilise les explosifs, généralement en phase condensée (liquide, solide, gel...) pour des travaux de génie civil - travaux publics, carrières, etc. Les progrès accomplis dans la connaissance des propriétés fondamentales ont conduit à utiliser les explosifs dans des technologies de plus en plus sophistiquées. Il en est ainsi des applications dans le domaine balistique et spatial de ce qu'on appelle la pyrotechnie qui se définit comme la technique utilisant la déflagration et la détonation. Pour de multiples fonctions intervenant lors d'un lancement spatial — allumage de fusée, séparation d'étages, éjection, déverrouillage... destruction de sauvegarde — les systèmes hydrauliques pneumatiques ou mécaniques sont inadéquats pour de multiples raisons (poids, encombrement, temps de réponse...). Les chaînes pyrotechniques offrent l'avantage d'une masse très réduite, d'une puissance spécifique emmagasinée dans le système considérable, de possibilités de télécommande souple et nécessitant de faibles besoins en énergie de déclenchement, et aussi un contrôle du temps de réponse qui peut varier, selon les besoins, de quelques microsecondes à plusieurs secondes.

Une grande sûreté de fonctionnement dans des conditions environnantes difficiles (vibrations, accélération, vide, température, etc.), la multiplicité des applications et l'expérience acquise dans les expériences spatiales ont d'ailleurs favorisé leur transposition à des applications industrielles et dans le domaine de la sécurité. Pour ne citer qu'un chiffre pour l'opération « Apollo », c'est environ 500 dispositifs pyrotechniques qui sont mis en œuvre. Les composants pyrotechniques sont des plus divers :

- boulons et écrous explosifs, cordeaux détonant de découpe, chaînes logiques dont le principe repose sur un fonctionnement à la vitesse constante de la détonation — quelques km/s (échelle de temps : la microseconde),
- vannes et vérins, moteurs tournants pyrotechniques basés sur l'utilisation de la déflagration et utilisant en général l'effet de la pression des gaz brûlés s'exerçant pendant un temps de quelques secondes.

Ces dispositifs sont d'une grande fiabilité mais ne peuvent servir qu'une seule fois. Aussi doit-on s'appuyer sur des principes bien établis de reproductibilité des phénomènes fondamentaux et de qualité des réalisations techniques. Le cordeau détonant découpeur, par exemple, est constitué d'une gaine métallique dont la section droite a la forme d'un V et dont l'âme est garnie d'explosif (fig. 7).

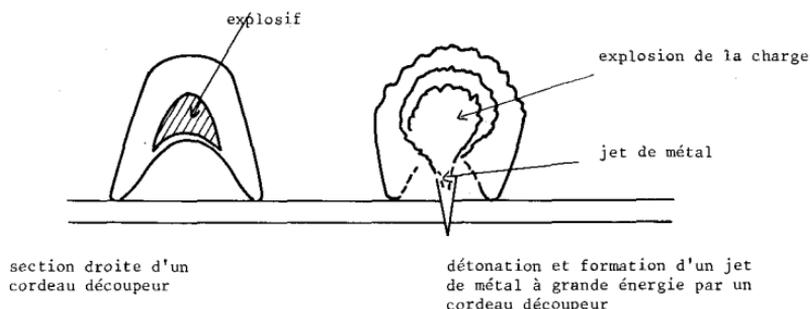


Fig. 7

La détonation se propage dans l'explosif perpendiculairement au plan de la section droite et crée la mise en vitesse de la gaine sous forme d'un jet de particules métalliques convergent vers l'élément à découper. Ce mécanisme de jet de métal à grande énergie (phénomène de charge creuse), découpe le métal avec une précision d'autant plus grande que sont soignées l'homogénéité de la charge explosive et la régularité de la forme de la gaine. Ces exemples montrent que les technologies pyrotechniques

bien maîtrisées sont largement utilisées dans un domaine où la complexité des missions va en croissant.

D'autres applications concernent la métallurgie et la fabrication des matériaux. La synthèse de diamant à partir du graphite, la production de nitrure de bore dans le système cubique est réalisée par onde de choc produite par explosif. Le soudage et le placage par explosif sont des techniques qui permettent de souder des plaques, qui peuvent être de grande dimension, de métaux qui ne sont pas associables par d'autres technologies. Sous l'effet de la détonation d'un explosif en feuille, disposé sur une plaque métallique projetée à grande vitesse sur une plaque réceptrice (fig. 8), on obtient une liaison métal-métal dont l'interface peut être organisée et structurée en vague.

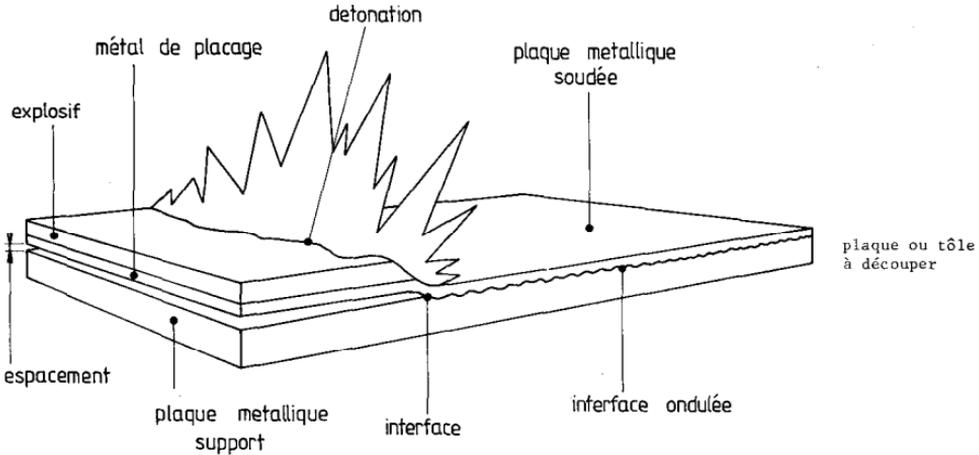


Fig. 8. — Technique de placage par explosion (principe).

La fig. 9 montre cette interface entre le cuivre et le fer pour lequel le métal projeté sous l'effet de l'onde de choc de la détonation et ayant alors un état quasi fluide, a « déferlé » en vagues successives sur le métal receveur.

Des effets de la détonation appliqués à la déformation permanente d'une surface métallique, on a tiré la technique de formage par explosif.

Compte tenu de sa puissance spécifique, un explosif peut, même en faible quantité, être utilisé pour produire des effets mécaniques très localisés et instantanés. Une application très spéciale en a été faite en chirurgie urologique au Japon où une faible quantité d'explosif  $\approx 10$  mg, contenue dans un catheter spécial va soit directement, soit par l'intermédiaire d'un piston, produire une onde de choc. Au contact avec un calcul de la vessie, l'onde de choc provoquera la rupture du calcul en

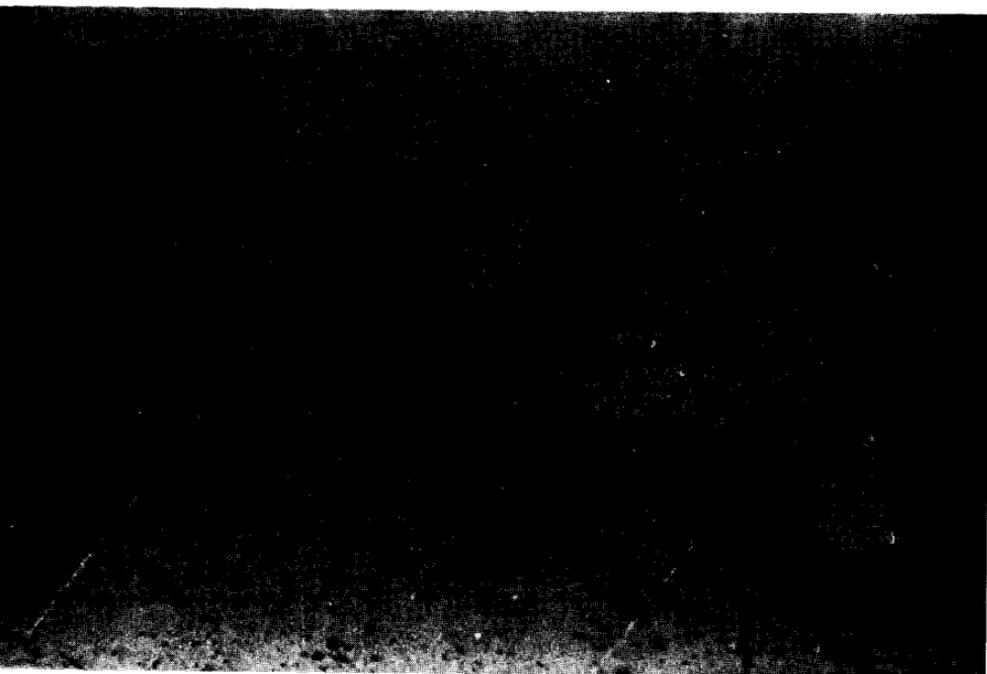
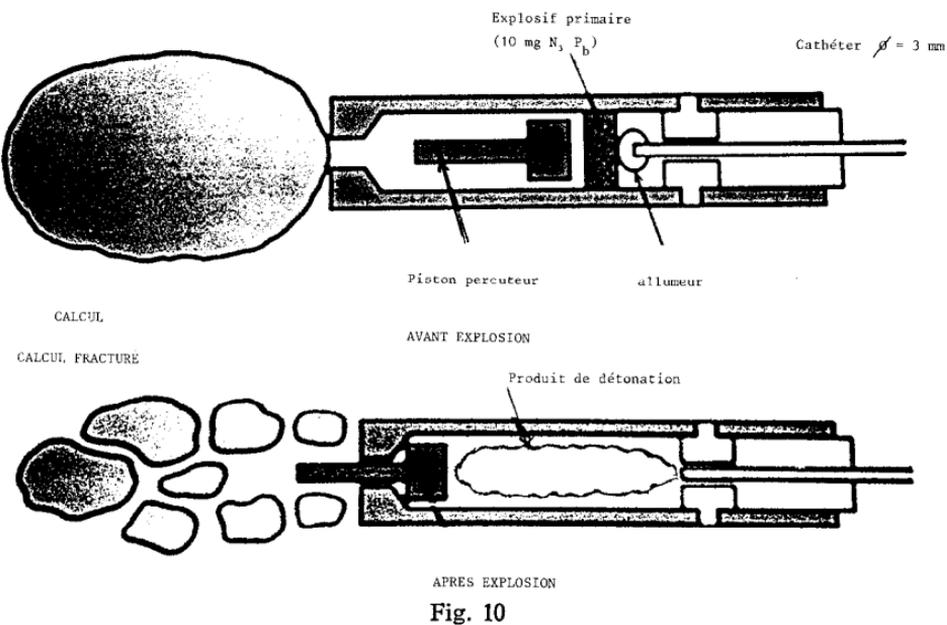


Fig. 9. — Micrographie de l'interface d'une soudure cuivre-acier réalisée par explosion.



petits fragments de dimension voisine de celle de l'urètre (fig. 10). Les effets de l'onde de choc autour du calcul sont très rapidement amortis dans le milieu, compte tenu d'un profil d'onde parfaitement calibré à cet effet [12].

---

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] F.-A. WILLIAMS, *Combustion Theory Reading Mass.* Addison Wesley. 1965.
  - [2] B. LEWIS et G. VON ELBE, *Combustion, Flames and Explosions in gases*, New York Academic Press. 1961.
  - [3] R. STREHLOW, *Fundamentals of Combustion*, International Textbook Company, Scranton, Pensylv. U.S.A. 1968.
  - [4] W. FICKETT et W.-C. DAVIS, *Detonation*, University of California Press, Berkeley. 1979.
  - [5] G. JOULIN, *Existence, stabilité et structuration des flammes pré-mélangées*. Thèse, Poitiers. 1979.
  - [6] J.-C. LEYER, *Revue Générale de Thermique*, n° 243. 1982.
  - [7] C. BROCHET, C. GUERRAUD, N. MANSON, Y. PUJOL, *C.R. Ac. Sc.*, pp. 1190-1192, t. 255. 1962.
  - [8] C. BROCHET, C. GUERRAUD, N. MANSON, M. VEYSSIÈRE, *C.R. Ac. Sc.*, pp. 856-859, t. 268. 1969.
  - [9] M. VEYSSIÈRE, C. BROCHET, *C.R. Ac. Sc.*, pp. 924-927, t. 267. 1968.
  - [10] C. BROCHET, F. FISSON, *Explosifs*, nos 3, 4. 1969.
  - [11] Y. KATO, C. BROCHET, *Symposium International sur le comportement des milieux denses sous haute pression dynamique*, Edition du C.E.A., Paris, p. 439. 1979.
  - [12] Y. TANAKA, S. OINUMA, K. CHIINO, M. IIDA, N. ISHIKAWA, *A surgical blaster with a pin hammer*, Chemistry and Technology Institute XIIth report, 80, n° 3, pp. 113-119. 1985.
-