

CHAPITRE XII

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU PHÉNOMÈNE DE DÉTONATION

1. RÉGIME DE DÉTONATION - AMORÇAGE

Une substance explosive est un corps composé, ou un mélange de composés, dans lequel des réactions chimiques exothermiques peuvent se propager de façon autonome, c'est-à-dire sans l'appoint d'éléments chimiques extérieurs. L'énergie nécessaire à la propagation est fournie par les réactions au sein même de la substance.

Berthelot et Vieille (1881) ont démontré expérimentalement qu'il existait deux régimes stables de propagation des réactions chimiques :

– un régime à faible vitesse (quelques dm/s ou quelques m/s) appelé *déflagration*. C'est une onde de détente, et les produits de la réaction s'écoulent en sens inverse de la propagation. Ce régime est celui du fonctionnement normal des charges des canons à poudre et des fusées.

– un régime à vitesse élevée (plusieurs milliers de m/s) appelé *détonation*. C'est une onde de choc, qui accélère les produits de la réaction dans le même sens que l'onde.

Il existe des substances pour lesquelles le seul régime possible est la détonation. Ce sont des molécules qui, sous l'effet d'une faible excitation, se décomposent totalement en leurs éléments simples, par exemple le fulminate de mercure, l'azoture de plomb... Ces substances sont appelées *explosifs primaires*. Afin de rendre leur emploi moins dangereux, on ne les utilise pas pures, mais enrobées dans un liant inerte.

Les autres substances explosives, soit la majorité, sont des *explosifs secondaires*. Elles sont capables des deux régimes de propagation.

Le régime de déflagration s'établit si l'excitation est peu énergétique, en général d'origine thermique.

Le régime de détonation n'est obtenu que si l'explosif est soumis à un choc fort, de pression supérieure à un certain seuil, dit *seuil d'amorçage*. Pour les explosifs gazeux, comme le mélange oxygène-hydrogène, l'onde de choc créée par une décharge électrique convient. Pour les explosifs en phase condensée, on utilise des dispositifs pyrotechniques appelés *détonateurs*. Ce sont de petits tubes chargés avec un explosif dit sensible, qui peut détoner, lui, à partir d'un seuil beaucoup plus bas. La pression développée par l'explosion du détonateur est suffisante pour amorcer la détonation de l'explosif principal. C'est la nécessité de cet explosif-relais qui a conduit à la dénomination d'« explosifs secondaires ».

Les détonateurs sont constitués soit d'un explosif primaire (par exemple de l'azoture de plomb enrobé de graphite) excité par l'effet Joule d'un filament, soit d'un explosif secondaire à seuil bas, comme de la penthrite fine, que l'on amorce par l'explosion d'un fil métallique (10 à 20 microns) dans lequel on décharge un condensateur. Ce dispositif, appelé *détonateur à fil explosé*, est employé dans les expériences de détonique où une grande précision temporelle est exigée, car sa dispersion de fonctionnement est très faible, de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes.

Un autre procédé d'amorçage est l'*impact d'un projectile*, de forme convenable et de vitesse suffisante. Le seuil d'amorçage est alors bien défini par la valeur de la vitesse d'impact qui garantit l'amorçage de la détonation. Cette valeur-seuil varie selon les explosifs. Dans le cas où le projectile est une plaque d'un matériau dense, comme le cuivre ou l'acier, elle est de l'ordre de 1 000 à 1 800 m/s. Ce procédé est surtout utilisé si l'on veut amorcer la détonation simultanément en tous les points d'une surface donnée : c'est la base de la technique des *conformateurs d'onde*.

Nous avons dit que les deux régimes de propagation, déflagration et détonation, étaient stables dans les explosifs secondaires, et que l'établissement de l'un ou de l'autre ne dépendait que des conditions d'amorçage. En fait, on observe des transitions spontanées d'un régime vers l'autre, dans les deux sens. Ces transitions apparaissent en général lorsqu'il y a de fortes discontinuités dans la géométrie et le confinement de l'échantillon, ou bien s'il apparaît de forts gradients de température. Toutefois, parmi les substances explosives, les unes sont faites normalement pour détoner, et on leur réserve le nom d'*explosif* proprement dit. Les autres sont faites pour déflagrer, et on les désigne sous le nom de *poudres*. Ainsi la poudre B est destinée à déflagrer, mais peut éven-

tuelle
fabric
brûler

L
soniq
s'exe

L
d'une
dégag
ainsi
dime

D
natio
de la
réact

Il
mais
sible

E
mêm
diam
que t
sans
simp

I
déto
-
d'ér
mer

ni c
exp

tuellement détoner. De même la tolite (TNT), l'hexogène, etc... sont fabriqués en vue de la détonation, mais peuvent aussi déflagrer, ou même brûler à l'air libre.

*
* *

Le phénomène de détonation est donc la propagation à vitesse supersonique de réactions chimiques dans une substance explosive. Elle s'exerce sous la forme d'une onde que l'on appelle *onde de détonation*.

L'onde de détonation est essentiellement une onde de choc suivie d'une zone où se développent des réactions exothermiques. L'énergie dégagée par ces réactions assure l'*autonomie* de la propagation, qui peut ainsi s'étendre à toutes les parties de l'échantillon quels que soient ses dimensions ou ses contournements.

Dans la majorité des cas, la vitesse de propagation de l'onde de détonation est *pratiquement constante*, et prend une valeur caractéristique de la substance explosive, liée directement à la chaleur fournie par les réactions.

Il existe d'autres cas où la vitesse prend des valeurs supérieures, mais elle varie alors au cours de la propagation, parfois de façon sensible.

Enfin il y a tout de même des cas où la détonation s'arrête d'elle-même : lorsque l'onde doit se propager dans une zone de trop faible diamètre (de l'ordre du mm). Il y a *extinction* de la détonation en tant que telle, l'onde poursuit sa course comme une onde de choc ordinaire, sans provoquer de réactions chimiques, et tend rapidement vers une simple onde de compression sonique compte-tenu des détente.

2. FORMULES EXPLOSIVES

Pour que les réactions chimiques puissent entretenir un régime de détonation, elles doivent répondre à deux conditions :

- d'abord être fortement *exothermiques*, de façon à libérer beaucoup d'énergie par unité de masse.
- ensuite être *autonomes*, c'est-à-dire ne faire appel à aucun élément extérieur.

Nous ne parlerons pas de la décomposition des explosifs primaires, ni de la détonation des explosifs gazeux, mais uniquement de celle des explosifs secondaires en phase condensée.

Ceux-ci, pour la plupart, font appel aux *réactions de combustion du carbone et de combustion de l'hydrogène*, réactions fortement exothermiques.

L'oxygène doit être fixé dans la molécule explosive, mais comme l'énergie que l'on compte libérer est celle fournie par la formation des molécules CO_2 et H_2O , il faut le fixer ailleurs que sur les atomes C et H, et éviter dans la mesure du possible toute liaison du type C - O ou H - O. On fait alors appel à l'azote, qui fixe l'oxygène sous forme de groupements NO_2 . D'où la famille des *explosifs dits CHON*.

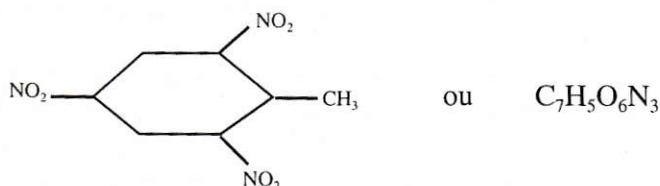
On distingue plusieurs classes :

a) les dérivés nitrés : - C - NO_2 . Exemples :

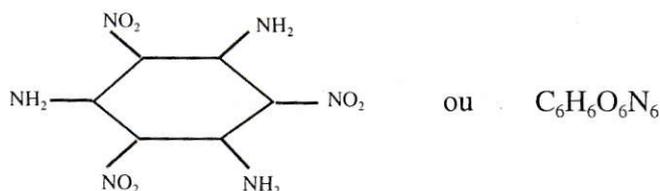
- nitrométhane : liquide - $\rho_0 = 1,133$ - $M_0 = 61$ g ($M_0 =$ masse molaire),



- tolite ou TNT : solide - $\rho_0 = 1,65$ - $M_0 = 227$ g,



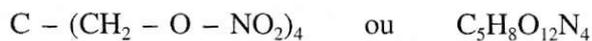
- triaminotrinitrobenzène ou TATB : solide - $\rho_0 = 1,93$ - $M_0 = 258$ g,



- et aussi : mélinite (acide picrique), etc...

b) les esters nitriques : - O - NO_2 . Exemples :

- penthrite ou PETN : solide - $\rho_0 = 1,77$ - $M_0 = 252$ g,



- et aussi : nitroglycérine, nitrocellulose (coton-poudre), etc...

c) les n

- he

- oct

- et

etc...

D'aut
(cheddite)

Ces m

sont enro

plastifier.

une nom

fications

lité au ch

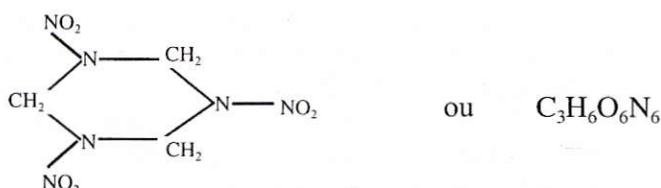
rieure à l

donnée à

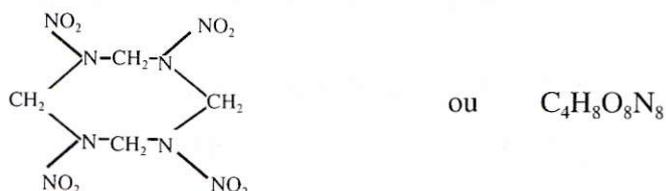
une certa

c) les nitramines : - N - NO₂. Exemples :

- hexogène ou RDX : solide - $\rho_0 = 1,82$ - $M_0 = 222$ g,



- octogène ou HMX : solide - $\rho_0 = 1,91$ - $M_0 = 296$ g,



- et aussi : tétryl (trinitrophénylméthylnitramine), nitroguanidine, etc...

D'autres explosifs emploient un second comburant, comme le chlore (cheddites), ou un autre combustible, comme l'aluminium.

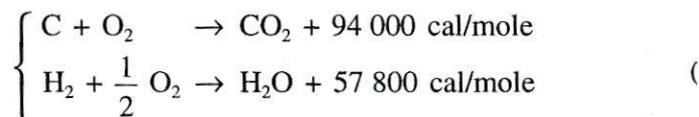
Ces molécules ne sont pas employées pures. Les cristaux d'explosif sont enrobés dans un *liant* qui a pour but de les flegmatiser ou de les plastifier. On obtient ainsi des *compositions explosives* connues selon une nomenclature propre à chaque pays, et qui répondent à des spécifications techniques précises (qualités mécaniques, thermiques, sensibilité au choc, etc...). La *densité* ρ_0 du produit final est en général inférieure à la densité du cristal donnée ci-dessus. En agissant sur la force donnée à la presse lors du moulage, on peut régler la densité ρ_0 avec une certaine marge.

3. RÉACTIONS CHIMIQUES

Examinons maintenant les réactions elles-mêmes et leur évolution.

La première réaction est une *dissociation*. Le front de détonation est une onde de choc qui porte le milieu à une pression et à une température suffisamment élevées pour briser certaines liaisons de la molécule explosive et la dissocier en radicaux et atomes libres, avec apparition probable d'électrons libres. La constante de temps de cette dissociation est très faible devant la durée des réactions qui vont suivre. La stabilité chimique de la molécule est ainsi détruite, et le milieu au front est fort déséquilibré chimiquement.

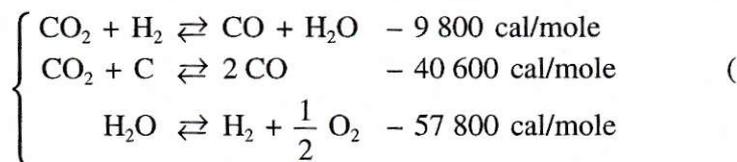
Immédiatement derrière le front démarrent les *réactions de combustion* entre les atomes C, H et O, que ceux-ci soient libres ou liés dans des radicaux. Ce sont des réactions qui produisent de la chaleur, de façon irréversible :



La plupart des explosifs (sauf la pentrite) sont sous-oxygénés, c'est-à-dire que leur composition stoechiométrique est telle qu'il n'y a pas assez d'oxygène pour brûler tout le carbone et tout l'hydrogène. L'hydrogène brûle en priorité, et il y a un résidu de carbone, dont la présence se manifeste clairement par les fumées noires qui accompagnent une explosion.

Compte-tenu de la température et de la concentration des réactants, ces deux combustions ont une vitesse élevée, mais non infinie. Elles poursuivent tant que la totalité de l'oxygène n'a pas été utilisée.

Au fur et à mesure qu'apparaissent CO_2 et H_2O , interviennent les *réactions d'équilibre* dont les plus importantes sont :



Cette dernière réaction (dissociation de la vapeur d'eau) a toutefois un taux très faible, et c'est surtout H_2O qui est présent dans la composition finale.

D'autres réactions moins importantes conduisent à la formation de petites quantités de NO , NH_3 , CH_4 et du radical OH^\cdot .

Une fois l'oxygène disparu, les réactions réversibles (2) tendent vers un état d'équilibre, en absorbant une partie de la chaleur dégagée par les réactions (1). Le bilan énergétique est fortement positif, et à l'état d'équilibre, une certaine quantité d'énergie a été libérée sous forme de chaleur.

La composition des *produits de détonation* est alors la suivante :

- *en majeure partie* : CO_2 , H_2O , N_2 , CO , C (graphite).
- *en très faible proportion* : H_2 , O_2 , OH^- , NO , NH_3 , CH_4 ,

soit 11 composants, dont 5 principaux.

Les produits de détonation forment une phase gazeuse avec du graphite en suspension, à haute pression (plusieurs dizaines ou centaines de Kbars selon les explosifs) et à haute température (2 000 à 5 000°).

4. STRUCTURE DE L'ONDE DE DÉTONATION

L'onde de détonation a une structure complexe, et comprend successivement, de l'avant vers l'arrière :

a) Le front de détonation.

C'est une onde de choc, de vitesse D normale au front. Outre les discontinuités habituelles des grandeurs d'état (p , v , $T...$) et de la vitesse matérielle, elle crée dans l'explosif une *discontinuité de structure chimique et physique* :

- *chimique* : la molécule initiale est dissociée en radicaux et atomes libres.

- *physique* : la structure de l'état initial solide ou liquide est détruite, et le milieu passe en phase gazeuse.

Nous désignons par F le milieu au front de détonation. Compte-tenu des transformations ci-dessus, le milieu F jouit d'une équation d'état qui lui est propre, celle d'un milieu gazeux de densité quasi-métallique, donc fortement imparfait.

C'est à lui (et à lui seul *a priori*) que s'appliquent les relations de conservation du choc et la relation d'Hugoniot. La vitesse D pouvant prendre une certaine plage de valeurs, le lieu de l'état F est l'adiabatique dynamique (H_F), qui est un arc de courbe limité inférieurement par le point relatif à la vitesse minimum de D (vitesse en-dessous de laquelle la détonation cesse de se propager). Ce point est en général à une ou plusieurs centaines de Kbars.

Comme derrière toutes les ondes de choc, l'écoulement en F est subsonique :

$$(u + c)_F > D$$

De ce fait, l'angle sonique du milieu F, $\sigma_F^*(D)$, est toujours inférieur à $\frac{\pi}{2}$. Cette propriété a des conséquences majeures sur le comportement de l'onde de détonation dans les problèmes de réfraction ou d'interaction oblique.

Nota important : puisque le milieu subit au front un changement de phase, l'arc (H_F) n'est pas *a priori* dans le prolongement analytique de l'adiabatique dynamique (H_i), dite de « l'explosif inerte ». Cette dernière correspond en effet à des chocs faibles dans l'explosif, qui conservent la phase solide ou liquide initiale, qui ne détruisent pas la structure de la molécule et n'amorcent pas la détonation (d'où le nom d'« inerte »). L'adiabatique dynamique (H_i) est en général limitée, supérieurement cette fois-ci, à une cinquantaine de Kbars. La zone séparant le point supérieur de (H_i) et le point inférieur de (H_F) n'est pas vide d'états de choc possibles : ce sont les chocs dits *réactifs*, phénomènes qui ont été observés, mais sont encore mal connus.

b) La zone de réaction.

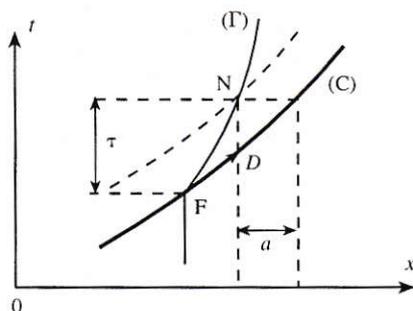


FIG. XII-1.

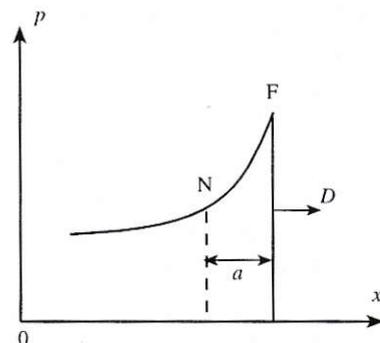


FIG. XII-2.

Soit un axe $x'x$ normal au front. Dans le plan (x, t) , un élément explosif atteint en F par le front de détonation (C) suit la trajectoire (Γ) (fig. XII-1). Le long de celle-ci, les réactions (1) se développent jusqu'à épuisement de l'oxygène. La chaleur dégagée par les réactions (1) est en partie absorbée pour équilibrer les réactions (2). Corrélativement, l'état thermodynamique (p, v, T) varie le long de (Γ).

Entre les instants t et $(t + dt)$, la chaleur libérée est, par gramme :

$$dQ = \text{chaleur dégagée par (1)} - \text{chaleur absorbée par (2)} \quad (3)$$

$Q(t)$ croît avec t et tend vers une valeur maximum Q_0 , qui est la chaleur totale libérée lorsque l'équilibre est atteint. Q_0 s'appelle la *chaleur de détonation*. On peut définir sans ambiguïté le *taux de réaction* par :

$$\lambda(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} \quad (4)$$

de sorte que :

$$\frac{dQ}{dt} = Q_0 \frac{d\lambda}{dt}$$

Au point F, $\lambda = 0$. La « fin des réactions » correspond à $\lambda = 1$, et est représenté par le point N de la fig. XII-1. Elle est déterminée par le fait que les réactions (1) ne dégagent plus de chaleur, donc sont terminées, et que les réactions (2) n'en absorbent plus, donc sont en équilibre. On a alors $dQ = 0$, d'où $d\lambda = 0$. La *vitesse de réaction* $d\lambda/dt$ tend donc vers 0.

c) L'état de détonation.

C'est l'état au point N, ou *état N*. Dans cet état, le mélange des produits de détonation est en *équilibre thermodynamique* :

- les réactions (1) sont terminées.
- la composition chimique et les valeurs de (p, v, T) sont telles que les réactions (2) soient en équilibre.

D'où :

$$\lambda_N = 1, \quad \left(\frac{d\lambda}{dt} \right)_N = 0 \quad (5)$$

Les vitesses des réactions (1) et (2) n'étant pas infinies, la durée de réaction τ est finie et non nulle. Il en est de même de la *largeur de la zone de réaction* a . Celle-ci vaut de 0,1 à 2 mm selon les explosifs, et τ vaut de 20 à 500 ns. Il s'agit d'ordres de grandeur, car aucune expérience n'a encore réussi à donner de valeurs décisives.

La pression en N s'appelle la *pression de détonation*. Selon les explosifs, elle vaut de 50 à 400 Kbars. On démontre qu'il est nécessaire que la zone de réaction soit le siège d'une détente, soit :

$$p_N < p_F, \quad u_N < u_F$$

Le profil de l'onde de détonation est donné schématiquement sur la fig. XII-2.

d) Détente isentropique.

Au-delà du point N, l'élément est parcouru par les ondes de détente issues des faces arrière et latérales de l'échantillon. Celles-ci provoquent un refroidissement du milieu, d'où une évolution de la composition chimique, les équilibres (2) étant déplacés. Mais cette évolution se fait de façon *réversible*, donc *isentropique*.

L'onde de détonation proprement dite, limitée à l'arc FN, est indissociable de cette onde de détente qui la suit immédiatement. Le profil de celle-ci est fonction des conditions extérieures.

5. TRANSITION CHOC-DÉTONATION

Revenons sur la notion de seuil d'amorçage, évoqué plus haut, lié à la vitesse d'impact d'un projectile métallique sur un bloc d'explosif. En fait, le processus d'impact peut revêtir plusieurs aspects.

Supposons le projectile plan, animé d'une vitesse V . Trois cas peuvent se présenter :

- si V est inférieure à un premier seuil V_1 , le choc créé dans l'explosif ne provoque aucune modification de structure de celui-ci. Il se propage comme dans un matériau chimiquement inerte, en ralentissant en fonction des détentes présentes. C'est le *choc inerte*.

- si V est supérieure à V_1 , mais inférieure à un second seuil V_2 , l'expérience montre que le choc s'accélère. Lorsque sa vitesse a atteint une certaine valeur critique D^* , celle-ci passe brusquement à une valeur beaucoup plus élevée, voisine de la vitesse de détonation finale : la détonation a été *amorcée*. C'est le phénomène de *transition choc-détonation*. Le choc créé à l'impact du projectile est appelé *choc réactif*, parce que l'on admet qu'il provoque dans l'explosif un début de réaction, ne dégageant toutefois qu'une chaleur très inférieure à la chaleur de détonation Q_0 ; cette chaleur dégagée entraîne l'accélération de l'onde, d'où une chaleur plus grande, etc... jusqu'au basculement vers le régime de détonation. L'abscisse du plan où apparaît la transition s'appelle la *profondeur d'amorçage*. Elle est d'autant plus faible que V est voisine de V_2 .

- enfin si V est supérieure à V_2 , la détonation apparaît quasi-instantanément (profondeur d'amorçage quasi-nulle). V_2 est le *seuil d'amorçage*.