

La sécurité pyrotechnique des explosifs

Caractérisation réactive

Robert Belmas et Franck Delmaire-Sizes

Résumé	L'analyse de la sécurité pyrotechnique est un élément essentiel du cycle de vie d'un explosif. Elle intervient dès la synthèse des premiers milligrammes de matière, puis lors de toutes les phases de fabrication, manutention, transport, stockage, expérimentation et intégration dans des structures pyrotechniques. L'objet des études de sécurité, systématiquement effectuées, est ainsi de garantir la sécurité des personnes et des installations, et celle de ces structures particulières.
Mots-clés	Explosif, sécurité pyrotechnique, caractérisation.
Abstract	The pyrotechnic safety of explosive: reactive characterization The pyrotechnic safety analysis represents an important part of an explosive life cycle. It starts with the synthesis of the first milligrams of material, then continues during all the phases of manufacturing, handling, storage, shipping, testing and integration into pyrotechnic devices. The purpose of the different safety studies carried out is to guarantee the safety of the workers, of the facilities and of these particular devices.
Keywords	Explosive, pyrotechnic safety, characterization.

La sécurité pyrotechnique est une préoccupation majeure au CEA. En effet, de par leur capacité à dégager brutalement une importante quantité d'énergie (plusieurs mégajoules par kilogramme de produit), sous l'effet de sollicitations appropriées, les explosifs constituent des matériaux dangereux qu'il convient de caractériser, gérer et manipuler selon des règles bien précises. C'est l'application rigoureuse de ces règles qui garantit la sécurité. Toutefois, la sécurité des explosifs est un problème complexe et son approche nécessite beaucoup de soin. L'expérience acquise depuis de nombreuses années montre en effet que l'initiation d'une réaction dépend beaucoup de l'environnement dans lequel se trouve l'explosif. Les analyses de la sécurité pyrotechnique ont pour but de gérer les situations potentiellement dangereuses liées aux explosifs et aux structures qui en contiennent, et notamment de répondre aux trois questions suivantes, lorsqu'une agression peut affecter de tels objets :

- Y a-t-il un risque de réaction ?
- Si oui, quelles seraient la nature et l'amplitude de ce phénomène ?
- Enfin, quelles seraient les mesures à mettre en œuvre pour éviter cet événement dangereux ou inhiber ses effets ?

Dans ce contexte, l'intérêt d'une démarche prédictive fondée notamment sur la modélisation et la simulation numérique est évident. Par ailleurs, dans les approches expérimentales, trois types d'essais sont pratiqués :

- les *essais dits standards*, qui permettent de comparer la sensibilité des explosifs mais ne donnent que très peu d'informations sur les phénomènes réactifs développés par ces matériaux ;
- les *essais analytiques*, fortement instrumentés, dont l'objectif à l'inverse est de comprendre et de quantifier les mécanismes réactifs dans un but de modélisation ;

- les *essais représentatifs*, réalisés sur des structures explosives complètes ou des éléments de ces dernières pour simuler des scénarios accidentels.

Les agressions à prendre en compte sont très nombreuses. Il peut s'agir :

- de chauffages rapides tels que résultant de l'exposition d'un objet pyrotechnique à un incendie ;
- d'élévations lentes de température, dans le cas où un objet explosif se trouve dans un local ou un moyen de transport progressivement chauffé à distance par un incendie ;
- d'ondes de choc produites par des impacts à grandes vitesses ou par la réaction d'autres explosifs à proximité immédiate ;
- de chutes, d'écrasements, d'impacts à basses vitesses... qui engendrent des champs de contraintes et de déformations importants et un endommagement élevé du matériau énergétique ;
- d'incompatibilités chimiques entre l'explosif et un matériau placé à son contact, pouvant conduire à des échauffements et à une évolution du produit ;
- de sollicitations électriques par des décharges électrostatiques, les courants du secteur, la foudre ;
- d'agressions combinées, potentiellement très nombreuses, qui associent deux sollicitations précédentes (ou plus) selon différentes séquences.

Les résultats de ces multiples sollicitations peuvent être :

- des *combustions* qui se propagent à faible vitesse par conduction thermique (typiquement de quelques millimètres par minute à quelques centimètres par seconde, à la pression ambiante) ;

- des *déflagrations*, dont la vitesse de propagation peut atteindre quelques centaines de mètres par seconde, qui peuvent conduire à des surpressions dangereuses et à la

propulsion d'éclats lourds à des vitesses modérées (quelques dizaines de mètres par seconde) ;

- des *détonations* qui se propagent à plusieurs kilomètres par seconde sous l'effet d'ondes de choc, créant de fortes surpressions dans l'environnement et pouvant propulser des mitrailles d'éclats de métal à des vitesses proches de 2 000 m/s.

La distinction entre ces trois régimes, fondée sur les effets produits par ces réactions, est très courante en sécurité pyrotechnique.

Des possibilités de transition existent entre ces différents modes de décomposition. Ainsi une combustion peut évoluer en déflagration qui, elle-même, peut conduire à une détonation (phénomène de transition déflagration-détonation ou TDD). Enfin, différents mécanismes peuvent produire une détonation : la transition choc-détonation (TCD), qui exige une onde de choc d'intensité et de durée suffisantes, et la TDD, qui peut se manifester sous certaines conditions dans le cas d'agressions thermiques ou mécaniques.

Les résultats finals des agressions (combustions, transitions vers la détonation...) dépendent : de la sensibilité de l'explosif, de son confinement et de la nature et la violence de l'agression.

Ce dernier point, en particulier, implique qu'il est nécessaire d'évaluer séparément les risques induits par les différents types de sollicitations possibles.

Agressions thermiques

Trois phénomènes doivent être étudiés [1] : l'allumage thermique, la propagation de la combustion et la possibilité de transition vers la détonation.

Allumage thermique

C'est le phénomène qui se produit lors de la décomposition d'un explosif, lorsqu'une combustion autonome débute dans le milieu. Il est étudié à l'aide d'essais qui, tels l'ODTX (« one dimensional time to explosion », développé aux États-Unis) et la presse aux limites (mise au point au CEA Le Ripault, voir *figure 1*), consistent à chauffer en milieu confiné des échantillons d'explosif sur leur périphérie. Pour différentes températures ainsi appliquées à

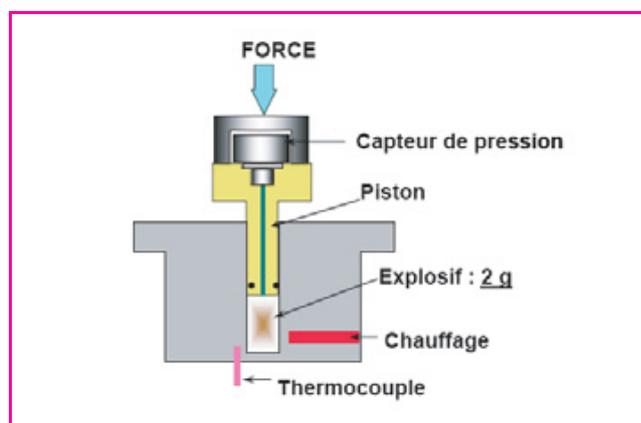


Figure 1 - Presse aux limites mise au point au CEA Le Ripault.

Un échantillon de 2 g d'explosif est introduit dans le trou borgne central, qui est ensuite fermé par le piston sur lequel on exerce la pression voulue. On élève ensuite la température de l'ensemble de façon à appliquer, selon l'essai, un plateau ou une rampe de température à la périphérie de l'échantillon. De nombreux diagnostics peuvent être implantés sur ce montage.

ces échantillons, on relève l'instant de réaction que l'on assimile, en première approximation, à l'instant d'allumage.

Le tracé du temps d'allumage en fonction de la température conduit à la courbe d'allumage qui permet de déterminer les paramètres des cinétiques multi-étagées destinées à décrire ce phénomène (*figure 2*). Implantées dans un code de calculs thermiques, ces cinétiques permettent de prédire l'instant et le lieu de l'allumage dans une structure pyrotechnique quelconque soumise à une agression thermique donnée.

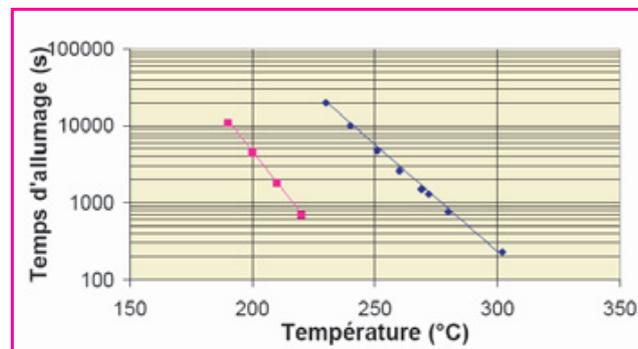


Figure 2 - Courbes d'allumage pour deux explosifs à base d'octogène (1,3,5,7-tétrinitro-1,3,5,7-tétraza-cyclooctane) (en rose) et de TATB (triamino-trinitrobenzène) (en bleu).

Ces courbes font apparaître l'importante thermostabilité du TATB et montrent aussi que l'allumage est le résultat d'un couple temps-température et donc d'un phénomène cinétique.

Toutefois, ces cinétiques ne reproduisent pas les schémas réels détaillés de la décomposition des explosifs considérés. Ces schémas réactionnels sont en effet extrêmement complexes et hors de portée de la modélisation. Les cinétiques, parfois qualifiées d'« enveloppes », ne prennent en compte que les principales étapes de la décomposition, ce qui se révèle cependant suffisant pour les applications.

Notons par ailleurs que la *figure 2* montre que l'allumage n'est pas le résultat du simple franchissement d'un seuil de température, mais bien celui de l'application d'un chauffage donné, pendant une durée bien déterminée : c'est donc un phénomène thermocinétique.

Combustion

Elle peut se produire à l'ambiante ou sous pression.

Combustion à l'ambiante

Des essais simples (combustions de cylindres d'explosifs instrumentés de thermocouples) donnent accès à des relevés de température au passage du front de combustion. Ces mesures permettent de développer des modélisations simples mais très efficaces (*figure 3*). En particulier, l'allumage, les phénomènes transitoires, les températures atteintes, la chronométrie des phénomènes, la combustion partielle, l'extinction et le réallumage sont bien restitués par ces modèles, implantés dans des codes de calculs thermiques aux éléments finis. Ces outils de calcul sont validés par des comparaisons calculs/expériences à l'échelle 1. Ils sont applicables à la simulation de la combustion des explosifs dans les structures pyrotechniques et permettent de calculer la propagation du front de décomposition ainsi que les élévations de température qui en résultent, dans les matériaux voisins.

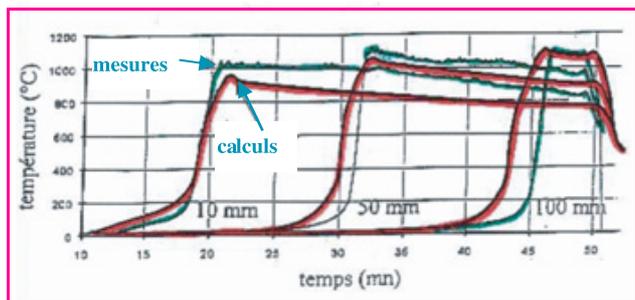


Figure 3 - Courbes de température calculées et mesurées à différentes profondeurs dans un explosif au TATB en combustion. La température maximale est de 1 100 °C, la vitesse est faible, de l'ordre de 3 mm/min (pour un explosif à l'octogène, on aurait 1 800 °C et 20 mm/min). On note la mise en régime progressive du phénomène (la température maximale et la vitesse du front tendent vers des valeurs asymptotiques) et la bonne restitution par le calcul des profils thermiques, en termes d'amplitude et de chronométrie.

Combustion sous pression

Les essais consistent à faire brûler des échantillons d'explosif dans des enceintes à pression interne constante (« strand burner ») ou pour lesquelles la pression s'élève de manière dynamique du fait de la production de gaz de combustion (bombe manométrique).

Les essais au strand burner donnent accès à l'évolution de la vitesse de combustion V_c en fonction de la pression P (figure 4). On constate que pour les différents explosifs testés, ces vitesses suivent une loi bien connue, dite loi de Vieille ou de Saint-Robert : $V_c = a \cdot P^n$. Notons que ces vitesses de combustion sont très faibles par rapport à celles des ondes de choc et des ondes de détonation qui peuvent approcher les 10 km/s.

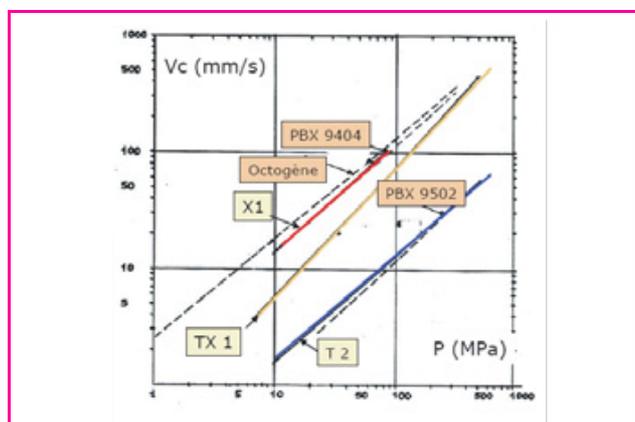


Figure 4 - Le tracé logarithmique de la vitesse de combustion en fonction de la pression fait apparaître une évolution régie par la loi de Vieille.

L'explosif au TATB (T2) brûle beaucoup moins vite que celui à l'octogène (X1). Un explosif mixte, TX1, contenant approximativement 50 % d'octogène et de TATB, a un comportement intermédiaire.

Les essais en bombe manométrique sont principalement destinés à observer le développement dynamique de la combustion et, en particulier, à détecter les phénomènes d'emballement (figure 5). Dans le cas d'une combustion régulière, l'explosif brûle en couches parallèles et l'échantillon en combustion, consommé sur sa périphérie, régresse de manière homothétique (il conserve sa forme initiale mais devient de plus en plus petit). Au contraire, dans le cas d'un emballement, l'échantillon se fissure et se disloque, passé une certaine pression dite « critique ». Ce

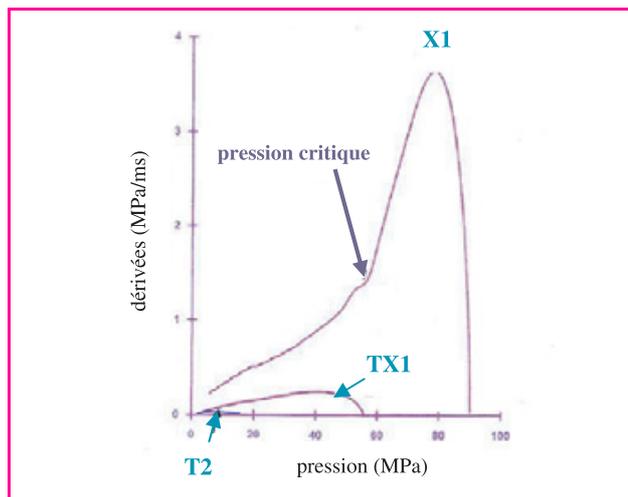


Figure 5 - Les essais en bombe manométrique permettent de détecter les phénomènes d'emballement.

Les explosifs au TATB (T2) et mixte (TX1) brûlent de façon régulière (laminaire). Un phénomène d'emballement de la combustion (augmentation très rapide de la vitesse en fonction de la pression) est par contre détecté pour l'explosif à l'octogène (X1) à partir d'une pression critique de l'ordre de 50 MPa.

phénomène qualifié de « combustion anormale » est dû à l'accroissement de la surface en combustion qui résulte elle-même de la fissuration et de la fracturation. Son origine se trouve dans la pénétration des gaz chauds et des flammes dans les microfissures de l'explosif.

Transition déflagration-détonation (TDD)

La TDD peut se manifester pour les explosifs relativement sensibles comme l'octogène (1,3,5,7-tétranitro-1,3,5,7-tétraza-cyclooctane), brûlant en milieu confiné. Elle n'a jamais été observée pour le TATB (triamino-trinitrobenzène), quelles que soient les conditions expérimentales, du fait de la lenteur de la cinétique de décomposition de cet explosif.

Cette transition est due à l'emballement de la combustion, au-delà de la pression critique. En effet, si les volumes morts sont très réduits (ce qui est généralement le cas dans une structure pyrotechnique), l'emballement se révèle très rapide et violent : il produit des ondes de compression mécanique qui, par rattrapage mutuel, conduisent à un choc. Cette onde de choc peut alors produire une transition choc-détonation (TCD, voir plus loin la nature de ce phénomène). Ce mécanisme complexe, résumé sur la figure 6, a été mis en évidence expérimentalement.

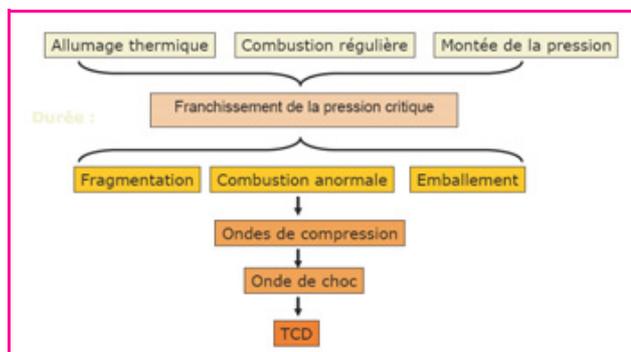


Figure 6 - Mécanisme de transition déflagration-détonation (TDD) sous l'effet d'une agression thermique.

La modélisation complète de la TDD apparaît aujourd'hui difficile. La stratégie actuelle consiste donc :

- à modéliser la combustion régulière sous pression,
- à mesurer l'éventuelle pression critique,
- à admettre qu'une transition va se développer si la pression excède la valeur critique au cours de la combustion, en un point donné de la structure.

Dans le cas présent, notons l'influence négative du confinement éventuel de l'explosif qui permet à la pression d'atteindre la valeur critique.

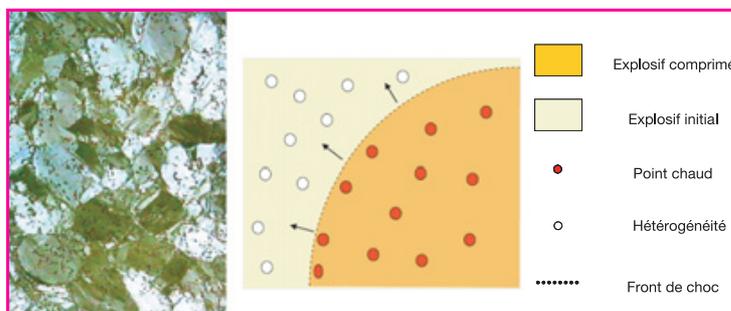


Figure 7 - Formation des points chauds.

La vue de gauche fait apparaître les nombreux défauts présents dans la microstructure des explosifs hétérogènes. On note en particulier une fine porosité (points noirs) répartie aléatoirement dans les cristaux d'explosifs (grains). Le dessin de droite représente le passage d'une onde de choc sur une telle microstructure : les défauts se transforment en points chauds. Le mécanisme admis est l'implosion des pores et les déformations locales de l'explosif qu'elle implique.

« Slow cook off »

Dans le cas de chauffages très lents, un semi-équilibre thermique peut s'établir dans l'explosif. Si la température atteinte est suffisante, une décomposition homogène se développe, qui induit des transformations chimiques et un affaiblissement de la résistance mécanique du matériau. D'autre part, la chaleur dégagée au cœur du matériau s'évacue plus difficilement que celle libérée en périphérie. De ce fait, la température interne augmente et la décomposition associée également. On parvient donc, par amplification de ce phénomène, à un allumage au cœur de l'explosif et non à sa surface. La réaction se développe alors de l'intérieur vers l'extérieur du matériau énergétique dont une masse plus grande que dans le cas d'un allumage périphérique (tel que résultant d'un chauffage rapide) se trouve affectée. Sous l'effet de la pression interne des gaz de décomposition, l'explosif se fissure et des flammes fusent dans ces interstices, ce qui contribue à l'accélération, voire à l'emballement de la décomposition. La réaction est donc souvent plus violente dans le cas d'un chauffage lent et le risque de TDD est accru, notamment pour les pièces volumineuses et/ou confinées, l'explosif pouvant jouer lui-même le rôle de confinement dans cette configuration.

Agressions par ondes de choc

Les ondes de choc sont produites par l'impact de projectiles véloces ou par la détonation de matériaux énergétiques placés soit directement au contact de l'explosif agressé, soit derrière une barrière intermédiaire. Le phénomène redouté dans le cadre de la sécurité pyrotechnique (mais recherché pour l'amorçage nominal des charges) est la transition choc-détonation (TCD).

La TCD résulte de deux phénomènes [2] : la formation et l'allumage de points chauds, et la combustion granulaire.

Les points chauds

Leur réalité a été établie expérimentalement. Il est admis qu'ils résultent de l'interaction entre l'onde de choc et les nombreux défauts de la microstructure des explosifs hétérogènes (figure 7). En particulier, une théorie aujourd'hui admise suppose que les déformations viscoplastiques de l'explosif au voisinage des pores en cours de fermeture (sous l'effet de la pression du choc) conduisent à des échauffements très localisés mais intenses, qui produisent des allumages locaux. Outre les caractéristiques mécaniques de l'explosif, de nombreux paramètres interviennent dans le développement de ce phénomène : l'intensité du choc, la taille des pores, les propriétés thermiques et la cinétique de décomposition du matériau énergétique.

La combustion granulaire

Si la température des points chauds s'élève suffisamment, les grains d'explosif s'enflamment et une combustion se développe. Elle se produit sous pression, au cœur de la microstructure, et est très rapide car le nombre de points chauds, lié à celui des défauts granulaires, est généralement très élevé. La rapidité de la combustion est de plus liée à la morphologie des grains comme le montre la figure 8.

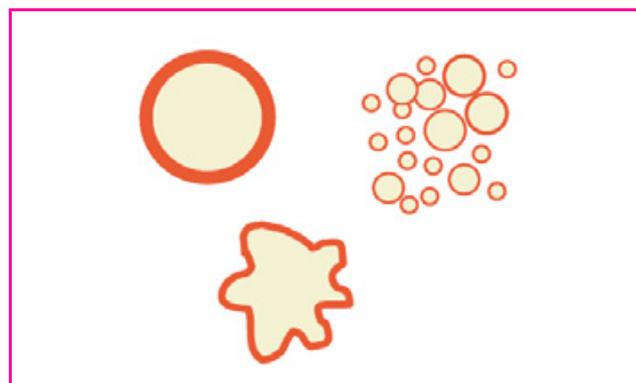


Figure 8 - Combustion granulaire et forme des grains.

À masse d'explosif égale, un grain massif (en haut, à gauche) brûle plus lentement qu'un grain déformé (au milieu) qui, lui-même, se consume plus lentement qu'un ensemble de petits grains (à droite) qui offrent une plus grande surface à la combustion.

Transition choc-détonation (TCD)

Le mécanisme de la TCD est présenté schématiquement sur la figure 9 : le choc initiateur forme des points chauds autour desquels s'étend la combustion. Sur les profils de pression au cœur de l'explosif, on note, derrière le choc initial, une montée de pression due à la libération des gaz de décomposition : une onde réactive se forme sous l'effet de la combustion granulaire. Cette onde se développe et accélère au fur et à mesure que le choc progresse dans l'explosif, puis finit par le rattraper et l'absorber. Le profil de pression prend la forme d'un pic. On est alors très proche du phénomène de détonation.

Ce scénario, résumé sur la figure 9, montre que la détonation dans les explosifs hétérogènes n'apparaît pas au niveau de la face d'impact où le choc initiateur prend naissance, mais à une certaine distance dans l'explosif,

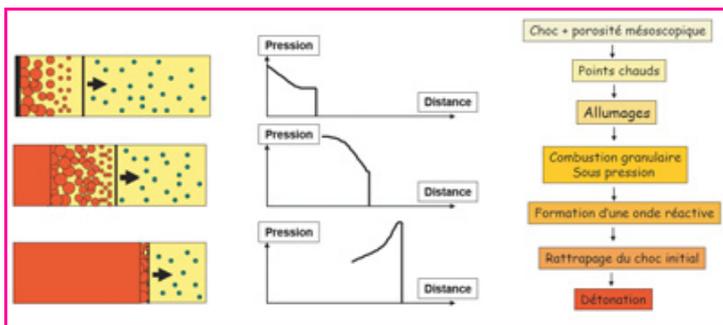


Figure 9 - La transition choc-détonation (TCD) : représentation schématique (à gauche) et scénario de TCD dans les explosifs hétérogènes.

appelée profondeur d'amorçage. Cette profondeur dépend de plusieurs paramètres tels :

- la sensibilité de l'explosif et, plus généralement, ses propriétés physiques et chimiques ;
- les caractéristiques de sa microstructure (distribution des tailles de pores, morphologie granulaire) ;
- la pression du choc initiateur ;
- la température initiale et, plus généralement, l'état de l'explosif avant le choc.

Ces influences, aujourd'hui bien comprises, sont à l'origine de nombreux phénomènes, parfois paradoxaux, tels que la désensibilisation par double choc et l'inversion de sensibilité, que les modèles les plus évolués parviennent à restituer.

La figure 10 montre la décroissance de la profondeur d'amorçage en fonction de la pression et l'influence de la sensibilité de l'explosif.

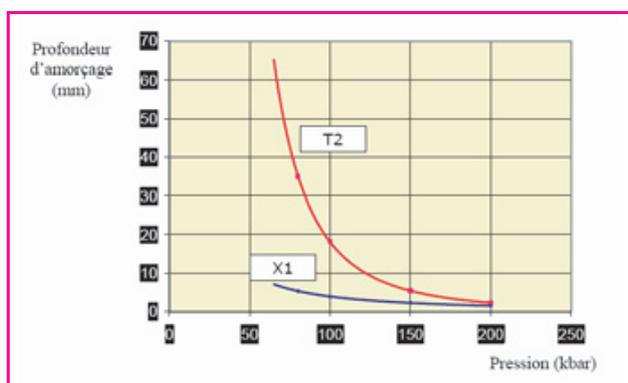


Figure 10 - Courbes de profondeur d'amorçage. La distance d'apparition de la détonation décroît selon une loi puissance en fonction de la pression du choc initial. On note la différence de sensibilité aux chocs entre l'octogène (X1) et le TATB (T2) : à pression égale, la profondeur d'amorçage est nettement plus faible pour X1 que pour T2.

Expériences de TCD

De nombreux essais peuvent être effectués pour étudier la transition choc-détonation : chocs soutenus (produits par des impacts de plaques épaisses) avec observations extérieures et/ou mesures de pression et de vitesse matérielle *in situ*, chocs brefs (générés par des impacts de plaques minces) se rapprochant des conditions d'amorçage nominal, chocs bidimensionnels (engendrés par des impacts de barreaux) simulant des agressions par des éclats.

La figure 11 présente les courbes critiques de TCD obtenues pour des impacts de barreaux d'acier de différents diamètres sur des explosifs à l'octogène et au TATB, nus ou protégés par une plaque de métal de 3 mm.

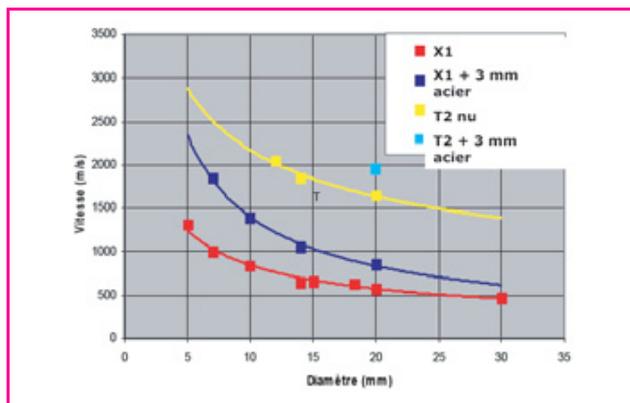


Figure 11 - Courbes critiques de TCD dans le plan vitesse/diamètre (dites « courbes V(d) ») pour des impacts de cylindres d'acier à bout plat.

On note la décroissance de la vitesse seuil de TCD quand le diamètre augmente (et réciproquement), le gain de sécurité important apporté par le TATB (T2) par rapport à l'octogène (X1), et l'influence bénéfique de la protection métallique dans laquelle le choc initial diverge et s'atténue avant de pénétrer dans l'explosif.

Les configurations d'impact situées au-dessus de ces courbes conduisent toutes à des TCD car la pression du choc (liée à la vitesse d'impact) et sa durée (conditionnée par l'action des détonations latérales et donc par le diamètre du barreau) sont suffisantes pour que cette transition se développe. Au-dessous de ces courbes, la pression et/ou la durée d'application du choc étant trop faibles, la TCD ne peut pas se produire, ce qui ne signifie pas forcément que les impacts considérés n'engendrent pas d'autres types de réactions (voir plus loin le chapitre sur les agressions mécaniques d'énergie modérées).

On peut noter que les courbes relatives aux protections métalliques sont situées au-dessus de celles correspondant à l'explosif nu. Ce résultat est dû à l'atténuation du choc bidimensionnel initial, par divergence dans l'épaisseur de la plaque de métal : le choc qui pénètre alors dans l'explosif est plus faible que pour l'explosif nu. Dans le cas du risque de TCD, le confinement a donc un effet bénéfique du point de vue de la sécurité.

Modélisations

Il existe plusieurs outils de modélisation de la TCD :

Les cinétiques implantées dans des codes d'hydrodynamique

- On identifie trois générations de cinétiques :
- La première (cinétique « forest fire »...) est totalement empirique, d'utilisation facile, mais ne restitue pas tous les phénomènes avec fidélité.
- La deuxième (cinétiques « ignition and growth », « empirical hot spot model »...) prend en compte les points chauds et la combustion des grains, mais les équations demeurent empiriques, le nombre de paramètres de calage est très élevé et, là non plus, tous les phénomènes ne sont pas correctement restitués.
- La troisième repose sur une modélisation physique des points chauds et de la combustion. Elle restitue tous les phénomènes connus (au moins semi-quantitativement), mais nécessite de nombreuses données physiques, parfois difficiles d'accès.

Les modèles d'ingénieur implantés dans des logiciels de sécurité pyrotechnique

Très simples d'utilisation, programmés dans des logiciels conviviaux, ils permettent généralement de calculer des courbes critiques (V(d)...) et de débroussailler très rapidement les analyses de sûreté.

Le choix de la modélisation se fait en fonction de l'application et du résultat recherché.

Agressions mécaniques d'énergie modérée

Il s'agit des chutes, écrasements, impacts à basse vitesse, etc., qui n'induisent pas d'ondes de choc d'amplitudes suffisantes pour initier l'explosif par TCD mais conduisent à de grandes déformations, à des champs de cisaillement et à des frottements importants (sous pression) entre les grains d'explosif et entre les lèvres des fissures à l'intérieur de ces grains.

Dans ce cas, comme pour les agressions thermiques, le confinement joue un rôle négatif en permettant à la combustion d'accélérer et de s'emballer. Comme précédemment, ce confinement peut être un autoconfinement dû à l'explosif lui-même. Ces phénomènes peuvent créer des points chauds (d'une nature différente de ceux de la TCD car ici, ce n'est pas le passage de l'onde de choc qui est à leur origine mais plutôt les frottements intergranulaires) et donc conduire à des allumages locaux. La combustion qui se développe alors progresse dans un milieu endommagé, fissuré et fragmenté (voire pulvérisé) dont la surface spécifique est très supérieure à celle de l'explosif sain. Il y a donc un risque d'emballerment et de transition déflagration-détonation pour les explosifs relativement sensibles comme l'octogène. Le scénario de la TDD dans le cas des agressions mécaniques ressemble beaucoup à celui établi pour les agressions thermiques (figure 12). Ici toutefois, le franchissement d'une pression critique n'est pas nécessaire car la fragmentation de l'explosif est produite par l'agression elle-même.

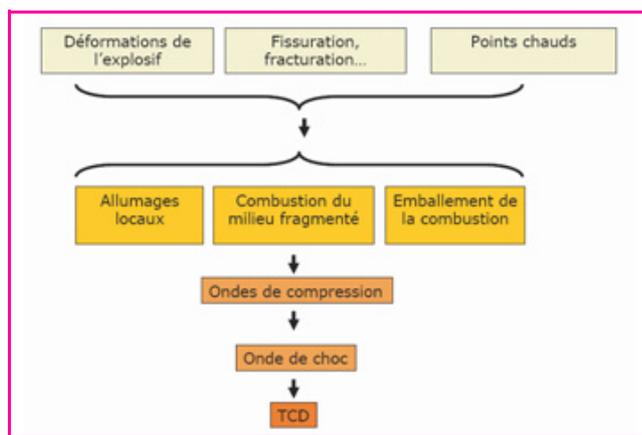


Figure 12 - Scénario de la transition déflagration-détonation (TDD) pour les agressions mécaniques d'énergie modérée.

Une illustration de TDD est donnée sur la figure 13 qui rassemble des résultats d'impacts de barreaux d'acier de 30 mm de diamètre et de 200 mm de longueur, sur une cible d'explosif à l'octogène. Les impacts à des vitesses supérieures à 470 m/s entraînent systématiquement des transitions choc-détonation. Au-dessous de cette limite, la violence de la réaction décroît avec la vitesse du projectile : de fortes déflagrations sont observées jusque vers 200 m/s et de

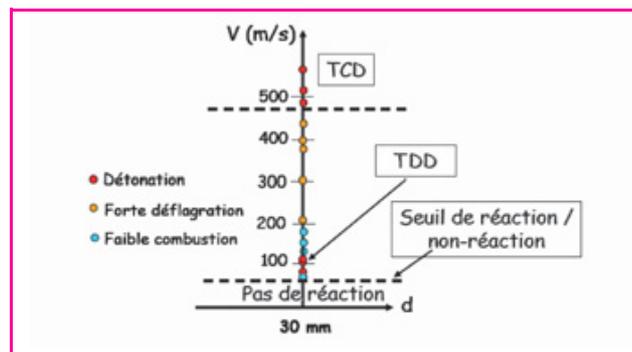


Figure 13 - Impact de barreaux d'acier de 30 mm de diamètre (200 mm de long) sur un explosif nu à l'octogène. Un phénomène de TDD est mis en évidence pour des vitesses d'impact de l'ordre de 100 m/s.

simples combustions pour les valeurs inférieures. Toutefois, vers 100 m/s, des détonations réapparaissent par suite d'une TDD. En fait, à cette vitesse, l'impact est encore suffisamment énergétique pour provoquer l'allumage de nombreux points chauds dans l'explosif, mais il n'est pas intense au point de disperser très rapidement les fragments de la cible. Ainsi, le confinement des réactions naissantes par l'explosif lui-même est maintenu suffisamment longtemps (quelques centaines de microsecondes) pour que la TDD se développe jusqu'à son terme. Aux vitesses plus faibles encore, on retrouve de simples combustions, puis vers 70 m/s, on franchit un seuil dit de réaction/non-réaction en dessous duquel plus aucun phénomène réactif n'est détecté.

La modélisation de ces phénomènes est très complexe. Il n'est pas réaliste, au moins dans un premier temps, de se lancer dans l'élaboration d'un modèle complet de ce type de TDD. Il est alors préférable de se restreindre à la prédiction du seuil de réaction/non-réaction, notion fondamentale en termes d'analyses de sûreté. Un outil de calcul prototype est aujourd'hui opérationnel : il est fondé sur une description élaborée du comportement thermomécanique des explosifs sous hautes pressions et grandes vitesses de déformation, associé à un modèle d'allumage [3-5]. Les travaux de recherche actuels visent à développer un outil prédictif optimisé prenant en compte une physique plus fine. La figure 14 donne un exemple de simulation d'impact à basse vitesse.

En l'absence de tels outils, les études de sécurité du passé se sont fondées sur des essais globaux simulant des configurations accidentelles. De nombreux tests visant

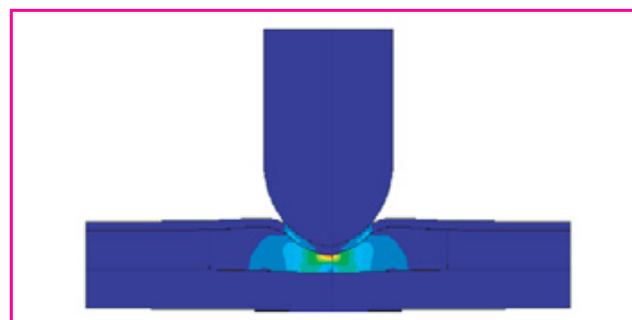


Figure 14 - Impact à basse vitesse (inférieure à 100 m/s) sur une cible explosive.

Les différentes couleurs représentent les niveaux des déformations plastiques équivalentes dans les matériaux. On note les importantes déformations de l'explosif ainsi que les zones de fortes contraintes sous le projectile (en rouge).

à produire des sollicitations par frottement, cisaillement, poinçonnement, etc. ont été pratiqués (« Susan test », essais de poinçonnement et d'écrasement, impacts de balles, écrasements au mouton de choc, etc.) et ont conduit à une base de données importante.

Nota : les impacts de balles, malgré leur vitesse élevée, sont classés ici dans la catégorie des agressions mécaniques d'énergie modérée car, du fait de leur forme, ces projectiles n'induisent pas d'ondes de choc soutenues.

L'ensemble des résultats d'agressions mécaniques d'énergie modérée se résume de la manière suivante :

- Les explosifs au TATB sont très peu sensibles à ces sollicitations : soumis à de telles agressions, ils produisent au pire des combustions, même sous fort confinement.
- En fonction du confinement, de la géométrie de la cible, de la nature et de la violence de l'agression, les explosifs à l'octogène peuvent réagir sous forme de combustions, de déflagrations, voire de détonations (par suite de TDD).

Conclusion

L'étude de la sécurité pyrotechnique se situe à un carrefour de disciplines et constitue un domaine vaste et complexe, du fait :

- de la multiplicité des agressions potentielles,
- des trois régimes réactifs fondamentaux que peuvent produire ces agressions,
- des transitions possibles entre ces régimes,
- des différents mécanismes qui peuvent conduire à la détonation (TCD, TDD d'origine thermique ou mécanique).

Le confinement de l'explosif est un paramètre important. Il est bénéfique dans le cas des agressions par ondes de choc (risque de TCD), mais accroît fortement le risque de TDD. L'autoconfinement dû à l'explosif lui-même ne doit pas être négligé.

Les méthodes d'approche expérimentale incluent des essais représentatifs (à l'échelle 1), des essais globaux de comparaison des explosifs et des essais analytiques qui donnent accès à la physique des phénomènes et permettent de développer des modèles. Sur ce dernier point, il est bien clair que les approches prédictives par simulation

numérique, déjà largement utilisées, constituent la voie d'avenir des études de sécurité pyrotechnique.

Des modélisations efficaces de l'allumage thermique, de la combustion et de la TCD sont disponibles dans nos laboratoires. Un outil de calcul prototype de la TDD d'origine mécanique (impacts à basse vitesse) est en cours de test. Des modélisations plus simples (modèles d'ingénieur, critères) sont également utilisées pour la TCD et la TDD d'origine thermique.

L'ensemble de ces approches et de ces modèles fait l'objet de visites et d'améliorations régulières, en fonction du progrès des connaissances et des techniques dans les domaines considérés.

Références

- [1] Castille C., Bainville D., Reynier P., Belmas R., Experimental study and numerical modeling of thermal initiation and combustion of high heterogeneous explosives, *Proc. 9th International detonation symposium*, Portland, **1989**, p. 1070.
- [2] Belmas R., La transition choc-détonation dans les explosifs solides hétérogènes, CEA-Direction des technologies de l'information, *Rapport CEA-R-6021*, **2003**.
- [3] Delmaire-Sizes F., Belmas R., Picart D., Trumel H., Low-velocity impact tests on an HMX-based explosive, *Proc. 34th International pyrotechnics seminar*, Association Française de Pyrotechnie, EUROPYRO 2007, Beaune, **2007**, p. 1005.
- [4] Delmaire-Sizes F., Belmas R., Picart D., Gruau C., Trumel H., Ignition of an HMX-based explosive under low-velocity impact, *3rd International symposium on energetic materials and their applications*, Tokyo, **2008**, p. 103.
- [5] Gruau C., Picart D., Belmas R., Bouton E., Delmaire-Sizes F., Sabatier J., Trumel H., Ignition prediction of a confined high explosive under low-velocity impact, *International Journal of Impact Engineering*, **2009**, 36, p. 537.



R. Belmas

Robert Belmas est directeur de recherche au CEA Le Ripault*.

* CEA Le Ripault, BP 16, 37260 Monts.
Courriel : robert.belmas@cea.fr



www.lactualitechimique.org

Connaissez-vous bien le site de l'AC ?

Vous y trouverez :

- le sommaire et l'éditorial du dernier numéro
- des actualités
- un moteur de recherche

Et aussi :

- les articles en ligne (certains accessibles gratuitement, d'autres au prix de 4€)
- les archives des numéros thématiques (depuis 1999) ou à rubriques (depuis 2000)

Sans oublier que vous pouvez également :

- acheter un numéro en pdf
- vous abonner à la version électronique

Alors vite, à votre souris !

