

La sécurité pyrotechnique : fait scientifique ou réglementaire ?

Marc Comet, Fabien Schnell, Vincent Pichot, Benny Siegert et Denis Spitzer

Résumé

La manipulation de substances énergétiques combustibles ou explosives en laboratoire requiert des connaissances et des précautions particulières, de manière à limiter les risques liés à cette activité. Pour assurer la sécurité en pyrotechnie, il existe deux approches complémentaires, l'une scientifique et l'autre réglementaire, la seconde devant être subordonnée à la première. Les contraintes réglementaires conçues pour l'industrie se sont multipliées sans vraiment tenir compte des besoins de la recherche scientifique. Il en résulte une érosion du savoir en pyrotechnie et un affaiblissement des capacités d'innovation qui asphyxient la recherche et portent incidemment préjudice à l'industrie de la pyrotechnie. Afin de remédier à ce problème, il convient de rendre à la science la première place en développant à l'échelle européenne une législation visant à encadrer spécifiquement la recherche fondamentale en pyrotechnie. Cette législation doit s'attacher à responsabiliser les chercheurs pyrotechniciens en leur offrant un cadre réglementaire plus souple, en adéquation avec les exigences de la recherche d'aujourd'hui et à venir.

Mots-clés

Explosifs, pyrotechnie, recherche, science, réglementation.

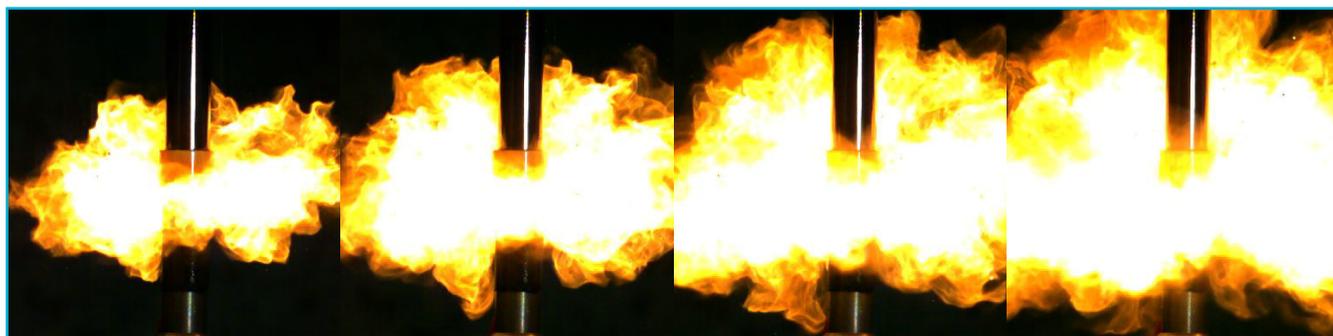
Abstract

The security in pyrotechnics: scientific fact or regulation?

The handling of combustible or explosive energetic substances at laboratory scale requires specific knowledge and safe practices in order to limit the risks inherent to this activity. The pyrotechnical security results from two complementary approaches: the first one is based on science; the second one – which is subordinated to the former – is the regulation. This order has often been reversed: a plethora of regulations specifically designed for industrial production have been applied to research without really taking into account the scientific fact, leading to a decay of the research in pyrotechnics. This problem could be solved by implementing a European legislation that would put science first. This legislation would provide a flexible regulatory framework to the research in pyrotechnics by giving more responsibilities to scientists.

Keywords

Explosives, pyrotechnics, research, science, regulation.



Combustion d'une nanothermite génératrice de gaz à base de trioxyde de tungstène et d'aluminium (ISL, DR).

L'histoire des sciences fourmille d'exemples nous montrant que le progrès de la connaissance et le développement d'applications technologiques utiles au plus grand nombre s'accompagnent souvent de risques importants. Les notions de risque et de progrès sont tellement indissociables qu'annuler le risque reviendrait tout simplement à ne pas permettre le progrès. Les scientifiques qui nous ont précédés l'avaient bien compris, et c'est aux risques qu'ils ont acceptés de prendre en leur temps que nous devons la qualité de vie que nous connaissons actuellement. Pour continuer à progresser, nous devons suivre leur exemple, en encourageant toutefois un risque minimisé, indispensable au progrès scientifique et technique.

Pour minimiser le risque, il convient d'abord de le connaître, donc de l'étudier. Le pyrotechnicien, dont la mission consiste à découvrir et caractériser les propriétés de matériaux énergétiques nouveaux, prend un risque. Mais la connaissance expérimentale qu'il développe doit lui permettre d'évaluer ce risque à sa juste mesure et de prendre toutes les précautions nécessaires pour s'en prémunir de manière efficace.

À l'inverse, la réglementation se propose de faire tendre le risque pyrotechnique vers zéro, en fixant un cadre rigide auquel le chercheur est censé se conformer. Cette approche trouve son origine dans une application inappropriée du principe de précaution. La réduction du degré de liberté se traduit

par une érosion inexorable de la connaissance, qui a pour triple effet d'accroître le risque expérimental, d'entraver le progrès scientifique, et de faire perdre à la pyrotechnie européenne son excellence historique et sa compétitivité. Le présent article se propose d'analyser cet état de fait et d'apporter quelques pistes de réflexions et d'actions pour que la recherche en pyrotechnie soit régie par une réglementation plus appropriée, fondée principalement sur le fait scientifique.

Le risque pyrotechnique

Le risque pyrotechnique est associé à la libération rapide d'énergie et de gaz lors de la décomposition d'une substance énergétique. Il doit être considéré comme extrêmement élevé pour une substance détonante, très élevé pour une substance déflagrante, et relativement faible pour une substance combustible. Le risque dépend également de la sensibilité de la substance étudiée à diverses formes de sollicitations, autrement dit de la probabilité de la mettre en réaction sous l'effet d'une activation donnée. Le risque est généralement accru en présence d'un confinement qui favorise l'élévation de la pression, facilite la transition de la déflagration vers la détonation et peut être à l'origine de la formation d'éclats vulnérants.

De manière générale, tout pyrotechnicien doit connaître expérimentalement le comportement réactif d'une substance énergétique quelconque, afin de mesurer le risque réel encouru lors de sa mise en œuvre. Pour cela, la connaissance purement réglementaire ne suffit pas.

Prenons, par exemple, le cas de deux explosifs primaires bien connus, tels que l'azoture de plomb et le triperoxyde de tricycloacétone (TATP). Si l'on se fonde sur le logigramme défini par la circulaire interministérielle du 20 avril 2007 permettant de catégoriser les matières explosibles [1], ces deux substances appartiennent à la classe 1.1 A, correspondant aux explosifs primaires en vrac. Dans la pratique, les comportements réactifs de ces deux substances sont très différents. L'azoture de plomb possède une sensibilité thermique beaucoup moins élevée que le TATP. Sous l'effet d'un échauffement brutal et en l'absence de confinement, une petite fraction de TATP (10 mg) se décomposera à la manière d'un mélange fuel/air en proportions non stœchiométriques, alors que la même quantité d'azoture produira une petite détonation. Dans ces conditions, le risque encouru par l'opérateur n'est donc pas le même pour les deux substances. Le fait de les regrouper dans la même catégorie réglementaire constitue une déformation de la réalité, préjudiciable à la véritable sécurité expérimentale.

Considérons maintenant le cas de deux explosifs secondaires : la pentrite (PETN)⁽¹⁾ et le nitrate d'ammonium (NH₄NO₃). L'application de la même réglementation conduit à classifier ces substances de la même manière (classe 1.1 D). Pourtant, elles ne sont pas du tout comparables. La pentrite possède un diamètre critique⁽²⁾ d'un millimètre seulement ; elle peut détoner sous l'effet d'une étincelle électrique d'énergie suffisante. À l'inverse, le diamètre critique du nitrate d'ammonium pur est proche de 100 mm. La mise en détonation de ce sel, en l'absence d'agent réducteur ou sensibilisant, est très difficile. En tout état de cause, le nitrate d'ammonium seul, en faibles quantités, ne se décomposera jamais par détonation. À la lumière de ces faits, est-il possible d'affirmer que ces substances sont comparables ?

Ces deux exemples illustrent bien la différence existant entre le risque tel qu'il est défini réglementairement et le risque réel, fondé sur l'observation et l'étude expérimentales.

La sécurité pyrotechnique au laboratoire

En pyrotechnie, la sécurité consiste à prendre les mesures nécessaires pour prévenir la matérialisation du risque et pour protéger l'opérateur en cas d'incident. La définition et l'application de règles strictes et précises encadrant la production industrielle de matériaux énergétiques ont permis d'accroître très significativement la sécurité des personnes et des biens. Il n'en demeure pas moins que le plus haut niveau de sécurité est atteint lorsque le pyrotechnicien possède la connaissance expérimentale approfondie des propriétés de la substance qu'il étudie. Contrairement à l'opérateur pyrotechnique chargé d'une simple étape de production, l'homme de l'art possède cette connaissance que les études qu'il conduit lui donnent l'occasion de développer continuellement. Il est d'ailleurs intéressant d'observer qu'aucun des cas d'accidents/incidents reportés dans les dernières *Lettres de l'Inspecteur des Poudres et Explosifs* (IPE) ne concerne un laboratoire de recherche [2] et qu'historiquement, ces cas sont extrêmement rares. Cette constatation conduit à s'interroger sur le bien-fondé de l'encadrement des travaux de recherche en pyrotechnie par la réglementation telle qu'elle existe actuellement.

L'analyse scientifique du risque pyrotechnique

Avant d'entreprendre toute recherche sur une substance énergétique nouvelle – explosif intrinsèque ou composition énergétique –, le pyrotechnicien doit examiner la nature des groupements explosophores mis en jeu. Ces groupements fonctionnels confèrent à la substance énergétique son aptitude à détoner [3] et dictent sa sensibilité. De manière générale, les substances contenant des groupements azoture, peroxyde ou halogénure d'azote sont beaucoup plus sensibles que celles renfermant des groupements nitro- ou des nitramine. La sensibilité des azotures est liée à la transformation du groupe -N₃ en azote gazeux. Celle-ci se produit par transfert d'un électron de l'azoture vers l'entité – cation métallique ou squelette carboné – à laquelle ce dernier est lié. L'énergie associée est très importante ; elle favorise la propagation brutale du phénomène. En ce qui concerne les peroxydes, l'oxygène est à son degré d'oxydation le moins stable (-I). Sous l'effet d'une sollicitation suffisante, des espèces radicalaires se forment, qui sont à l'origine de la propagation rapide de la décomposition des peroxydes. La fragilité des liaisons covalentes formées entre l'azote et les halogènes explique la sensibilité des structures moléculaires contenant des halogénures d'azote. Il est à noter que certaines substances énergétiques combustibles ou déflagrantes, telles que les thermites [4], ne contiennent pas de groupements explosophores. Le calcul de la balance en oxygène (BO) donne généralement une indication utile, les substances énergétiques étant d'autant plus performantes et sensibles qu'elles possèdent un bilan en oxygène proche de l'équilibre.

La première des précautions à respecter lorsqu'une substance énergétique inconnue est élaborée pour la première fois consiste à se limiter à une quantité très réduite de matière, typiquement inférieure à une centaine de milligrammes. À ce stade, la substance doit systématiquement être regardée comme un explosif primaire. Sa manipulation doit être effectuée par déversement, afin d'éviter toute contrainte par friction lors de prélèvements d'échantillons.

Plusieurs tests élémentaires permettent alors d'apprendre à connaître les propriétés de ce nouveau matériau. Le premier d'entre eux consiste à exposer une fraction de la nouvelle substance (1 à 10 mg) à l'**action directe d'une flamme**. Le produit (non confiné) doit être déposé sur une spatule métallique ayant une longueur suffisante pour que la substance testée soit séparée de la main de l'expérimentateur par une distance d'au moins 30 cm. L'expérimentation doit être conduite derrière un écran protecteur en plexiglas, par un opérateur équipé de gants en Kevlar® et des équipements de protection individuels (EPI) classiquement utilisés en laboratoire. Plusieurs cas de figure se présentent alors :

- La substance détone : c'est le cas des azotures métalliques (Pb, Ag), de l'acétylure d'argent ou d'une nanothermite $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$. La plus grande prudence s'impose, y compris pour les tests préliminaires destinés à déterminer le niveau de sensibilité.

- La substance brûle à la manière d'un gaz : c'est le comportement typique des peroxydes, du tétrazène, des fibres de nitrocellulose ou des compositions à base de chlorate et de phosphore rouge. Une telle substance peut aisément transiter de la déflagration vers la détonation en présence d'un confinement externe, voire d'un autoconfinement (masse critique) ou sous l'influence d'une sollicitation mécanique de choc ou de friction.

- La substance se consume lentement sans qu'il se forme une quantité significative de résidus : cela caractérise des substances possédant un bilan en oxygène proche de l'équilibre, telles que, par exemple, l'hexogène, l'octogène ou la pentrite. Ces substances sont en général assez sensibles, mais le risque associé à leur manipulation normale, en l'absence de confinement et en quantités limitées à quelques grammes, est peu élevé. Une décomposition accidentelle provoquée par une élévation de température se traduirait par une combustion auto-entretenue de faible vivacité.

- La substance se décompose en abandonnant des résidus charbonneux : si le produit est sec, la présence de résidus carbonés caractérise des composés fortement sous-oxygénés tels que les nitro-aromatiques – trinitrotoluène (TNT), hexanitrostilbène (HNS) etc. Les substances présentant ce mode de décomposition sont généralement assez peu sensibles. La raison de cette relative insensibilité est l'excès de carbone, substance dont l'oxydation massive se produit lentement. Dans le cas des composés nitro-aromatiques, il est probable que les produits carbonés solides de la combustion forment une barrière rendant plus difficile la propagation de la décomposition dans la masse de l'explosif.

- La substance se décompose en produisant d'abondants résidus minéraux et/ou des fumées assez denses : cela caractérise une composition énergétique contenant un sel métallique oxydant ou une thermitite. Selon leur nature, de telles compositions peuvent présenter des vitesses de combustion et des niveaux de sensibilité extrêmement variables. De manière générale, la quantité de gaz produite est plus faible que dans les cas précédents. En ce qui concerne les thermites, les formulations se décomposant par propagation d'incandescence sont généralement beaucoup moins sensibles à la friction et à la décharge électrostatique (DES) que celles dont la décomposition s'accompagne d'un effet sonore lié à la création d'une surpression thermique [5].

La seconde étape consiste à déterminer les seuils de sensibilité de la nouvelle substance énergétique à différents types de sollicitations, comme par exemple l'échauffement progressif, le choc, la friction ou la décharge électrostatique.

L'étude du comportement d'une substance énergétique sous l'effet d'un **échauffement progressif** est effectuée par calorimétrie différentielle à balayage (« differential scanning calorimetry », DSC) [6]. L'analyse est généralement faite sur des échantillons de 1 à 3 mg soumis à des lois de chauffe de 1 à 20 K/min. Cette technique permet de mettre en évidence les transformations physiques et chimiques affectant le matériau testé au cours de l'élévation de température : transition allotropique, fusion, évaporation, thermolyse, combustion, etc. En outre, la DSC donne de précieuses indications sur la compatibilité de substances, notamment dans le cadre de l'étude de compositions pyrotechniques. En revanche, elle ne doit jamais être utilisée pour prédire le comportement réel à l'échelle macroscopique d'une substance énergétique, soumise à l'influence d'une sollicitation réaliste telle qu'une flamme.

La **sensibilité au choc** est déterminée en soumettant la substance énergétique contenue dans une cellule d'acier aux effets de la chute d'un marteau. Le niveau d'énergie est défini par la masse et la hauteur de chute du marteau. Cette épreuve permet seulement de situer la sensibilité d'une substance énergétique inconnue par rapport à celles d'explosifs connus. Elle n'est en aucun cas une mesure du risque inhérent à la chute au sol accidentelle d'une substance énergétique.

La **sensibilité à la friction** est déterminée en soumettant la substance énergétique au frottement exercé par un crayon de céramique sur une plaque rugueuse. L'intensité de la force appliquée (4,9 à 353,2 N) est définie au moyen de poids dont la masse et la position sont variables.

La **sensibilité à la décharge électrostatique** est déterminée en soumettant le matériau énergétique à l'effet d'une étincelle électrique produite entre deux électrodes. L'énergie mise en jeu est calculée à partir de la capacité et de la tension utilisées pour produire la décharge. Il paraît intéressant de remarquer que la quantité maximale d'énergie électrostatique emmagasinée par un corps humain est proche de 150 mJ et que bon nombre de matériaux énergétiques possèdent un seuil de sensibilité inférieur...

À l'heure actuelle, il n'existe aucune règle générale permettant de prédire les niveaux de sensibilité d'un matériau énergétique nouveau aux diverses formes de sollicitations. Qui plus est, il n'existe pas de corrélations évidentes entre les différents seuils de sensibilité d'un même matériau. Ainsi, la nitroglycérine liquide est extrêmement sensible au choc (0,2 J), mais ne l'est pas du tout à la friction (> 353,2 N). Les compositions préparées à partir de nanoparticules d'oxyde de cuivre(II) et de phosphore rouge sont peu sensibles au choc (27-39 J), mais s'enflamment sous l'action d'une friction minime (< 5-8 N) [7]. Les nanothermites formulées à partir de nanoparticules d'oxyde de chrome(III) et d'aluminium sont pratiquement insensibles au choc (49 J) et à la friction (> 360 N), mais se décomposent sous l'effet d'une décharge électrostatique d'énergie inférieure à 0,42 mJ [8]. Ces exemples illustrent bien le fait qu'en pyrotechnie, le terme de sensibilité recouvre des réalités très diverses. Pour cette raison, il semble plus approprié de parler des *sensibilités* d'un matériau énergétique.

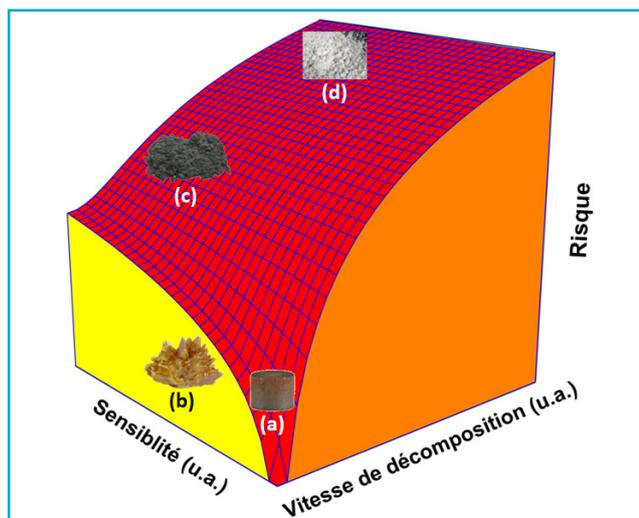
Le risque lié à la manipulation d'une substance énergétique ne dépend pas seulement de ses sensibilités, mais aussi de son *mode de décomposition*. Il va de soi que le risque associé à une simple propagation d'incandescence est faible en comparaison de celui qui est encouru en cas de survenue d'une détonation en masse. Pour mémoire, la *brissance* d'un explosif, qui caractérise son aptitude à fragmenter le milieu

environnant, est proportionnelle au carré de sa vitesse de détonation. Formellement, le risque peut donc être exprimé comme le produit de la sensibilité par la vitesse de décomposition élevée au carré :

$$\text{Risque} \propto \text{Sensibilité} \times [\text{Vitesse de décomposition}]^2$$

Afin d'évaluer objectivement le niveau de *risque réel* lié à la manipulation d'une substance énergétique donnée (voir *figure*), il convient de connaître parfaitement ces deux facteurs. Une substance sera considérée comme relativement sensible – et devra donc être manipulée avec précautions – si l'un au moins de ses seuils de sensibilités se situe au-dessous de 2 J pour le choc, 80 N pour la friction et 150 mJ pour la décharge électrostatique. Toutefois, le fait que l'un (ou les) seuil(s) de sensibilité d'une substance énergétique nouvelle se situent au-dessous de ces valeurs n'est pas une raison suffisante pour s'interdire d'étudier ses propriétés. La *vitesse de combustion/détonation* est mesurée en recourant à un mode d'amorçage reflétant la sollicitation à laquelle la substance manipulée peut être accidentellement exposée. Un explosif secondaire tel que le RDX (hexogène) se décompose à 8 750 m/s lorsqu'il est amorcé par un explosif primaire, mais à seulement 0,02 m/s lors d'un test de combustion en gouttière... En outre, la substance éprouvée doit se trouver dans l'état physique et de confinement dans lesquels elle est effectivement manipulée. À l'heure actuelle, le classement réglementaire des produits explosifs se fonde sur le mode de décomposition le plus brutal du produit, ce qui revient à maximiser le risque. D'un point de vue pratique, les conditions requises pour provoquer ce mode de décomposition ne se trouvent jamais réunies lors d'expérimentations normales de synthèse ou de caractérisation en laboratoire. Par exemple, l'étude par diffraction de rayons X d'une quantité d'un demi-gramme de RDX ou la mesure de l'aire spécifique de plusieurs grammes de ce même explosif ne conduiront jamais à une détonation.

La différence existant entre le *risque maximisé* et le *risque réel* peut être précisée dans une étude de sécurité



Représentation schématique de l'évolution du risque en fonction de la sensibilité et de la vitesse de décomposition. Illustration par quelques exemples pratiques : sous l'action d'une flamme et en l'absence de confinement, une nanothermite $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}$ se décompose par propagation d'incandescence (a), l'hexanitrostilbène (HNS) brûle lentement avec formation de résidus charbonneux (b), une nanothermite WO_3/Al déflagre (c), l'azoture de plomb $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ détone (d).

pyrotechnique (ESP). Cependant, comme l'ESP s'inscrit nécessairement dans le cadre de la réglementation et doit même aller au-delà de la simple conformité réglementaire [9], elle ne constitue pas en elle-même un moyen d'assouplir la réglementation.

La prévention du risque fondée sur le fait scientifique

L'analyse scientifique du risque expérimental découlant de la manipulation de substances pyrotechniques au laboratoire conduit à définir les règles suivantes :

1. Ne pas confiner une substance énergétique lorsqu'on la manipule et porter une attention toute particulière à ne jamais tenir à pleine main un récipient contenant de la matière énergétique.
2. Ne jamais rapprocher, manipuler ou conserver une substance énergétique sensible à proximité d'une autre substance énergétique.
3. Fractionner la matière énergétique, en veillant à toujours travailler sur la quantité minimum qu'exige la bonne qualité scientifique de l'expérience. Les quantités à utiliser dépendent de la caractérisation effectuée. Elles sont typiquement de quelques microgrammes pour une observation au microscope électronique, de quelques milligrammes pour une expérience de DSC, de quelques centaines de milligrammes pour une caractérisation par diffraction de rayons X, et peuvent atteindre plusieurs grammes pour une mesure d'aire spécifique par adsorption d'azote ou une détermination de densité par pycnométrie à l'hélium. Le principe du fractionnement s'applique également à la collecte d'un échantillon synthétisé dans un ballon.
4. Les substances sensibles au choc doivent être préférentiellement manipulées sous forme pulvérulente plutôt que sous forme d'objets massifs.
5. Les substances très sensibles à la friction ne doivent pas être grattées mécaniquement. Une substance adhérant aux parois d'un ballon de synthèse peut souvent en être décollée par l'effet mécanique d'ultrasons générés dans un bain d'eau. Elle est ensuite collectée au moyen d'un pinceau.
6. Les substances sensibles à la décharge électrostatique sont manipulées par un expérimentateur relié à la masse grâce à une tresse métallique munie d'un bracelet. Elles sont conservées dans des sébiles dont les parois sont en matière conductrice. L'opérateur doit éviter de porter des gants susceptibles d'accumuler des charges électrostatiques et s'assurer que tous les éléments qu'il manipule sont et demeurent au même potentiel.

De manière plus générale, le développement des connaissances par la recherche permet d'identifier les risques, puis de développer des stratégies appropriées pour s'en prémunir. L'ingénierie des nanomatériaux ouvre ainsi des perspectives insoupçonnées pour contrôler les niveaux de sensibilité des substances énergétiques [10-11]. Elle met à la disposition du pyrotechnicien une véritable « boîte à outils » lui permettant par exemple de transformer un explosif primaire en explosif secondaire ou de modifier le diamètre critique d'un explosif, et bouleverse du même coup bon nombre de notions sur lesquelles était construite la pyrotechnie traditionnelle.

La sécurité fondée sur le fait réglementaire

Le décret de sécurité pyrotechnique n° 79-846 du 28 septembre 1979 publié le 2 octobre 1979 au *Journal*

Officiel de la République Française [1] constitue le fondement de la réglementation actuelle en matière de pyrotechnie. Ce décret a été conçu dans l'intention explicite d'encadrer les activités industrielles de fabrication, transformation, conditionnement et d'utilisation des explosifs. En l'absence de législation plus spécifique, ce décret a également été appliqué à la recherche. Il paraît intéressant de remarquer que ce texte a été rédigé sous l'égide des ministres de la Défense et du Travail, mais sans le concours du secrétaire d'État à la Recherche. En outre, la Commission des substances explosives, qui avait été chargée de fournir l'avis technique sur lequel est principalement fondé le décret, était constituée très majoritairement de personnalités n'appartenant pas au milieu de la recherche scientifique. De la même manière, l'arrêté du 20 avril 2007, qui se propose de fixer « les règles relatives à l'évaluation des risques et à la prévention des accidents dans les établissements pyrotechniques » [1], a été élaboré sans l'implication d'un représentant du Ministère de la Recherche. C'est la raison pour laquelle le cadre réglementaire qu'imposent ces textes prend très peu en compte les besoins de la recherche fondamentale et ne semble pas compatible avec le développement durable de la connaissance en pyrotechnie.

Dans la pratique, l'objectif explicite des personnes actuellement chargées d'encadrer les recherches pyrotechniques n'est pas la découverte scientifique et son lot d'applications, mais la minimisation systématique du risque qui doit tendre vers zéro. Le danger n'est pas toujours connu, mais on le suppose systématiquement maximum, sécurité oblige. On édicte alors une règle fondée sur une hypothèse plutôt que sur le fait scientifique, règle que tous seront tenus d'accepter et d'appliquer. Dans ces conditions, le savoir de l'homme de l'art s'amenuise et finit par se perdre. La réduction de la connaissance qu'implique l'application systématique des contraintes réglementaires sera à l'origine de règles de plus en plus contraignantes et éloignées du réel.

Dans cette situation, **comment sauver la recherche en pyrotechnie ?** En premier lieu, il faut investir dans la formation des étudiants chimistes que cette matière intéresse, car il n'existe à ce jour en France aucun cours académique dans ce domaine. À plus court terme, il conviendrait de former les cadres – managers et décideurs – aux spécificités de la pyrotechnie afin d'exorciser leurs craintes, souvent exagérées et parfois même infondées.

De manière plus générale, la recherche pyrotechnique ne doit pas être bridée par des prescriptions dépourvues de sens. Le chercheur doit conserver sa liberté de penser, d'imaginer et de découvrir de nouveaux matériaux énergétiques – fussent-ils sensibles ! Le nivellement de la science par la norme n'est pas acceptable, parce que la réalité scientifique prévaudra toujours sur le fait réglementaire. La multiplication des règles est non seulement préjudiciable à la qualité de la recherche, mais peut aussi porter gravement atteinte à la véritable sécurité pyrotechnique. Celle-ci doit être fondée sur le savoir du pyrotechnicien et l'étude expérimentale du risque plutôt que sur l'application systématique de consignes, en considérant que **ne pas étudier un risque revient à prendre un risque encore plus important**.

Pour remédier à cette situation, il conviendrait que la réglementation actuelle soit modifiée, en établissant une **distinction claire entre les travaux industriels et les activités de recherche en laboratoire**. La liberté de rechercher sans entraves inutiles est la condition *sine qua non* du progrès scientifique et la garantie du développement d'applications innovantes qui permettront aux industries pyrotechniques

française et européenne de conserver leur compétitivité face à la concurrence de plus en plus rude des pays émergents. Il est à noter que les accidents pyrotechniques les plus graves survenant dans les pays précités sont décrits de manière circonstanciée dans les lettres de l'IFE et concernent presque toujours des installations industrielles de stockage, de manutention et de démantèlement d'engins pyrotechniques.

Afin de garantir aux pyrotechniciens la liberté dont jouissent tous les chercheurs dans les autres champs du savoir, il est nécessaire de développer une législation plus adaptée et plus souple qui tende à donner plus d'autonomie et de responsabilité aux pyrotechniciens dans leurs démarches expérimentales. L'ouverture d'un débat national au sein de la communauté des pyrotechniciens et la constitution d'une commission chargée de proposer au législateur une modernisation de la réglementation permettraient d'offrir un cadre adapté à la pyrotechnie en laboratoire de recherche.

L'extension de ce débat à l'échelle internationale permettrait de **créer une réglementation européenne** visant à encadrer les recherches fondamentales en pyrotechnie. Une telle réglementation offrirait l'espace de liberté nécessaire pour relever le défi de la compétition scientifique internationale dans ce secteur, notamment avec la Russie et la Chine. Afin d'être dès l'origine adaptée aux exigences spécifiques de ce domaine, une telle réglementation doit être développée par des pyrotechniciens des institutions civiles et militaires jouissant d'une reconnaissance académique indiscutable. Son développement pourrait s'inspirer du règlement européen REACH [12] qui prévoit d'exempter des obligations d'enregistrement, d'autorisation et de restrictions, les substances chimiques utilisées en quantités limitées (< 1 t/an) à des fins de recherches.

La future réglementation européenne en matière de pyrotechnie devra s'inspirer de ce modèle, afin d'aménager un espace spécifique aux recherches dans ce domaine. L'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL) dispose du savoir-faire, des infrastructures et des moyens d'essai lui permettant de jouer un rôle constructif dans la modernisation de la législation. Une telle entreprise pourrait être menée à bien dans le cadre d'un consortium dans lequel l'ISL aurait un rôle d'expertise et s'appuierait sur l'Inspection de l'armement pour les poudres et explosifs (IPE) et la Direction générale du travail (DGT). Le financement des travaux correspondants pourrait être assuré conjointement par le programme européen de recherche Horizon 2020 et l'Agence européenne de la défense (AED).

Conclusion

L'une des causes de l'érosion du savoir en pyrotechnie réside dans l'application à la recherche dans ce domaine d'une réglementation conçue pour l'industrie. La dissociation de l'aspect réglementaire du fait scientifique représente une menace sérieuse pour l'avenir de la recherche en pyrotechnie et compromet la véritable sécurité expérimentale, dans la mesure où le risque est inversement proportionnel aux connaissances pratiques du pyrotechnicien. En outre, le frein à l'innovation que constitue une contrainte réglementaire inappropriée provoque le ralentissement et l'affaiblissement de l'industrie pyrotechnique en France et en Europe. Les recherches originales conduisant à des ruptures technologiques et à des applications industrielles innovantes [13-14] supposent la prise d'un risque minimisé, connu et assumé. Si en son temps, Alfred Nobel avait considéré que

la nitroglycérine était une substance trop sensible pour mériter d'être étudiée, les dynamites et les poudres propulsives à double base n'auraient jamais vu le jour [15]... Les pyrotechniciens sont actuellement confrontés à une tragique alternative : soit accepter la contrainte réglementaire souvent aveugle, et c'est la mort programmée de la pyrotechnie, soit relever les défis scientifiques qui s'offrent à eux et rendre ainsi à la pyrotechnie ses lettres de noblesse. Ce constat n'est pas anodin : en l'absence d'une évolution de la réglementation favorable à la recherche, l'avenir de l'industrie de la pyrotechnie en France et en Europe paraît fortement compromis. La disparition d'un pan de notre industrie aurait évidemment des conséquences économiques qui ne doivent pas être sous-estimées.

Notes et références

- (1) *PETN* : pentaérythritol tétranitrate, explosif de la famille des esters nitriques, connu sous le nom de pentrite.
 (2) *Diamètre critique* : diamètre minimum du tube contenant un explosif pour obtenir sa mise en détonation stable. Il dépend notamment de la nature, de la granulométrie et de la densité de l'explosif.
- [1] *Sécurité pyrotechnique*, Les éditions des Journaux Officiels, *Brochure 1196*, 2010.
 [2] *La Lettre de l'IPPE*, n° 24, janv. 2010 et n° 25, juill. 2010.
 [3] Comet M., Fuzellier H., Étude synoptique des explosifs, *L'Act. Chim.*, juil. 2000, 233, p. 4.
 [4] Comet M., Spitzer D., Des thermites classiques aux composites interstitiels métastables, *L'Act. Chim.*, 2006, 299, p. 20.
 [5] Comet M., Pichot V., Siegert B., Schnell F., Cizek F., Spitzer D., Phosphorus based nanothermites: a new generation of energetic materials, *J. Phys. Chem. Solids*, 2010, 71(2), p. 64.
 [6] Saillard J., Caractérisation des matériaux explosifs par analyse thermique, *L'Act. Chim.*, 2009, 334, p. 11.
 [7] Comet M., Siegert B., Schnell F., Pichot V., Cizek F., Spitzer D., Phosphorus-based nanothermites: A new generation of Pyrotechnics illustrated by the example of n-CuO/red P mixtures, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2010, 35(3), p. 220.
 [8] Comet M., Pichot V., Siegert B., Fousson E., Mory J., Moitrier F., Spitzer D., Preparation of Cr₂O₃ nanoparticles for superthermites by the detonation of an explosive nanocomposite material, *J. Nanopart. Res.*, 2010, 13(5), p. 1961.
 [9] www.defense.gouv.fr/dga/liens/poudres-et-explosifs/activites-de-l-ipe-et-conseils/les-etudes-de-securite-pyrotechnique

- [10] Siegert B., Comet M., Spitzer D., Safer energetic materials by a nanotechnological approach, *Nanoscale*, 2011, 3(9), p. 3534.
 [11] Spitzer D., Comet M., Baras C., Pichot V., Piazzon N., Energetic nano-materials: Opportunities for enhanced performances, *J. Phys. Chem. Solids*, 2010, 71(2), p. 100.
 [12] Règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), *Journal Officiel*, 2006, 396, p. 1.
 [13] Christe K.O., Recent advances in the chemistry of N⁵⁺N⁵⁻ and high-oxygen compounds, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2007, 32(3), p. 194.
 [14] Klapötke T.M., Sabate C.M., Stierstorfer J., Neutral 5-nitrotetrazoles: easy initiation with low pollution, *New Journal of Chemistry*, 2009, 33(1), p. 136.
 [15] Nobel A., Improved Explosive Compound, *US Letters Patent* 78,317, 1868.



M. Comet



V. Pichot



F. Schnell



B. Siegert



D. Spitzer

Marc Comet (auteur correspondant) et Vincent Pichot sont chercheurs, Fabien Schnell, assistant ingénieur CNRS, et Benny Siegert a été post-doctorant au CNRS, à l'UMR 3208 ISL/CNRS Nanomatériaux pour les Systèmes Sous Sollicitations Extrêmes (NS3E)*, dont Denis Spitzer est le directeur.

* IUMR 3208 ISL/CNRS Nanomatériaux pour les Systèmes Sous Sollicitations Extrêmes, Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis, 5 rue du Général Cassagnou, BP 70034, F-68301 Saint-Louis Cedex.
 Courriels : marc.comet@isl.eu, fabien.schnell@isl.eu, vincent.pichot@isl.eu, bsiegert@gmail.com, denis.spitzer@isl.eu



102 avenue Georges Clemenceau - 94700 MAISONS ALFORT

Tél. : 01 43 53 64 00 - Fax : 01 43 53 48 00

edition@edif.fr - www.edif.fr