



La lettre de l'IPE

Expert de la sécurité pyrotechnique

Janvier 2023 – N°50

Editorial

Depuis 25 ans, l'IPE édite sa lettre tous les 6 mois « pour être à l'heure de la sécurité pyrotechnique ». Nous nous réjouissons de l'assiduité des lecteurs qui ne s'est pas affaiblie durant toutes ces années et nous espérons que vous apprécierez le contenu de cette cinquantième lettre. Pour l'occasion, nous avons voulu rendre ce numéro exceptionnel avec quelques innovations.

Une courte rétrospective de ces 25 ans de lettres IPE et l'histoire de la genèse de la première lettre par son promoteur de l'époque rappelleront sans doute des souvenirs à nombre d'entre vous. Nous avons également fait un point sur notre vision de la raison d'être de l'IPE, dans le contexte actuel, qui précise l'article sur le positionnement de l'IPE paru dans la lettre n°45.

Des contributeurs inédits ont été invités à participer à la rédaction d'articles : le service de santé des armées, qui produira plusieurs articles dans les lettres à suivre, sur les conséquences des effets pyrotechniques vu du côté médical, la DGA qui fait un point sur les écrans et protections diverses pour les opérateurs dans le but de diffuser des bonnes pratiques. Un expert de la DGA et le CEA DAM ont contribué à des articles intéressants le domaine de la dépollution pyrotechnique. Enfin le SGDSN vous présente l'actualité de CYNODEX dans un encart spécifique.

L'IPE s'est associée à plusieurs organismes compétents du ministère des armées pour réfléchir sur la problématique des incendies en site pyrotechnique. Le premier volet des travaux consacré à la détection incendie s'est achevé. Nous partageons avec la communauté un logigramme d'aide à la décision pour l'installation de capteurs de détection incendie. La seconde étape des travaux du groupe va prochainement s'engager sur la gestion d'une alerte ou d'un incendie dans une zone pyrotechnique.

Le point d'actualité international est consacré au référentiel OTAN des AASTP-1 à -5 relatifs à la sécurité pyrotechnique, à l'occasion du lancement de la ratification de l'édition C prévue pour 2023. A propos de ce référentiel, l'IPE organisera en 2023 une série de séminaires de sensibilisation aux règles techniques OTAN de l'AASTP1 et à l'évaluation quantitative du risque, objet de l'AASTP-4 ainsi que du code de calcul associé MQDCAT, développé par le MSIAC. Le premier séminaire, prévu le 18 janvier, est destiné aux entités du ministère des armées. Des places sont encore disponibles. Si vous êtes intéressés, envoyez-nous un message sur la boîte fonctionnelle dga-insp.ipe.fct@intradef.gouv.fr.

Le 5 avril, un séminaire destiné aux administrations civiles et établissements publics sera organisé à Paris. Enfin, une troisième date sera proposée ultérieurement pour présentation aux industriels du domaine. N'hésitez pas à nous contacter sur la boîte fonctionnelle si vous êtes intéressés pour participer à ces séminaires ce qui nous permettra de vous adresser en retour les informations nécessaires lorsqu'elles seront disponibles.

Cette lettre est enfin l'occasion de rappeler quelques principes du processus de délivrance par l'IPE des certificats de classement au transport.

Bonne lecture et que l'année 2023 vous apporte toute satisfaction dans vos activités et projets pyrotechniques.

Françoise LEVEQUE

*Inspectrice de l'armement
pour les poudres et explosifs*

Sommaire

- Lettre de l'IPE**
25 ans d'information sur la sécurité pyrotechnique
page 2
- Genèse de la lettre de l'IPE**
page 3
- Raison d'être de l'IPE :**
expert technique de la sécurité pyrotechnique
page 4
- Blessures**
liées aux explosions
page 5
- Innovations au service de**
la sécurité des travailleurs
page 9
- Zones d'effets des munitions**
chargées en poudre noire
page 12
- Transmission de**
la détonation par le sol
page 15
- Accompagnement des unités**
de cyno-détection d'explosifs
(CYNODEX)
page 18
- Détection incendie dans**
les locaux pyrotechniques
page 19
- Approche OTAN en**
sécurité pyrotechnique :
les dernières évolutions
page 22
- La politique MURAT**
à l'aune du conflit en Ukraine
page 25
- L'IPE et les certificats**
de classement au transport
page 26
- Incidents / accidents**
pyrotechniques
page 26
- Sites internet utiles**
page 30
- Manifestations annoncées**
page 31
- Nous contacter**
page 32



La lettre de l'IPE numéro 50 25 ans d'information sur la sécurité pyrotechnique

Ce cinquantième numéro de la Lettre de l'IPE marque 25 ans d'information de la communauté pyrotechnique par l'IPE et offre l'occasion de faire une rétrospective de cette lettre qui rappellera des souvenirs à nombre d'entre vous.

En juillet 1998, l'IPE Jean-Pierre Moreau, lance le premier numéro de la lettre de l'IPE. Six directeurs de publication se succéderont : Philippe Aliotti, Yves de Longueville, Jean-Paul Hufschmitt, Jean-Luc Fauquembergue, puis Pierre Lusseyran jusqu'en 2019. Cette lettre prend la suite d'un bulletin de l'IPE et d'une note périodique sur les accidents pyrotechniques qui pouvait être diffusée à la demande.

Patrick Kernén nous raconte dans l'article suivant la genèse de cette lettre avec le soutien des deux autres adjoints de l'IPE qui contribuent à l'édition d'articles « pour être à l'heure de la sécurité pyrotechnique », première devise inscrite dans l'en-tête du document. Avec l'élargissement des missions de l'IPE, le nombre de rédacteurs augmentera progressivement. Si leur nom apparaissait depuis l'origine, dans chaque lettre, le choix a été fait, à partir de la lettre n°46 de janvier 2021, de ne plus les mentionner systématiquement, dans un but de réduction de l'exposition médiatique des personnes travaillant au sein du ministère des armées.

Concernant la présentation de la lettre de l'IPE, celle-ci était initialement très simple. Elle avait été jugée un peu austère et dès la lettre n°11 de juillet 2003, elle devient plus colorée et une devise apparaît en première page ainsi qu'un aphorisme. Le premier aphorisme publié m'interpelle particulièrement car il rappelle que la conformité n'est pas l'objectif ultime mais que c'est bien la sécurité : « si la réglementation admet et encadre l'exposition des personnes aux risques pyrotechniques, elle vise surtout à ce qu'il en soit exposé le moins possible ». Les tirages de la lettre de l'IPE atteignent 850 exemplaires avant d'être distribuée progressivement puis exclusivement par voie numérique à partir de la lettre n°37 de juillet 2016. A partir de 2004, la lettre de l'IPE est traduite en allemand par des personnels de l'Institut franco-allemand de Saint-Louis. Un numéro ISSN (acronyme anglais de l'identifiant international des publications en série) est attribué courant 2009 et apparaît pour la première fois sur la lettre n°23 de juillet 2009. Enfin, un nouveau visuel plus actuel est présenté dans la lettre n°46 de janvier 2021. L'aphorisme dont la pratique s'essouffait un peu est supprimé. Un logo établi à partir du nouvel insigne homologué de l'IPE illustre la première page.

La communauté pyrotechnique était appelée à proposer des articles dès les premiers numéros. Des rédacteurs externes à l'IPE ont contribué aux premières lettres. Certains liront peut-être cette rétrospective et se reconnaîtront. Dans la lettre n°7 de juillet 2001, un sondage est proposé et envoyé à 400 destinataires. Les 18 réponses

en retour proposent de pérenniser l'ouverture vers les industriels au travers d'une rubrique « parole aux lecteurs ». Finalement, ce dispositif ne perdurera pas. Le SFEPa a contribué à la lettre n°41 de juillet 2018. La DGT a disposé d'encarts dans les dernières lettres émises. Le sujet de l'ouverture de la lettre de l'IPE est un sujet qui est débattu de façon récurrente. Actuellement, la proposition de contribution a été faite aux organismes étatiques et publics. S'agissant d'une publication portée par une administration, il nous a semblé que l'ouverture vers le secteur non public pouvait être de nature à porter atteinte à un devoir de réserve ainsi qu'une équité de traitement d'acteurs privés au regard de la concurrence. Dans ce cinquantième numéro, nous proposons aux lecteurs de nous faire part des sujets qu'ils aimeraient voir aborder et les invitons à réagir sur nos articles.

Quant au contenu de la lettre, depuis l'origine, il est essentiellement axé sur 3 types d'informations : le bilan semestriel des accidents/incidents pyrotechniques en France et dans le monde, l'information sur la réglementation de sécurité pyrotechnique ainsi que ses évolutions et sa mise en application, notamment pour la rédaction des EST. Enfin, quelques articles plus techniques apparaissent généralement en réaction à des situations observées en inspection ou dans les EST. Dans les dernières lettres, nous avons également décidé d'apporter des informations sur les travaux internationaux, notamment de l'OTAN et de présenter des intercomparaisons avec la réglementation d'autres pays. Enfin, dans un contexte d'évolution potentielle de la réglementation en matière pyrotechnique, nous publions des propositions encourageant la communauté pyrotechnique à réfléchir sur ces évolutions possibles.

Si la diffusion numérique permet difficilement d'estimer le nombre de lecteurs assidus de la lettre de l'IPE, les échanges avec la communauté pyrotechnique montrent que la lettre de l'IPE continue à être consultée largement et nous espérons qu'elle continuera à répondre aux attentes des lecteurs.

Cet anniversaire valait bien un gâteau... délicieusement explosif.





Pour aller plus loin - Recette des bâtonnets explosifs... **au chocolat**

Il y a beaucoup de points communs entre la cuisine et la fabrication de matériaux énergétiques. La qualité d'un gâteau dépend des ingrédients que l'on va utiliser, de la qualité du

matériel qui sera utilisé (four, fouet...) et de la compétence du cuisinier. Changez un seul de ces paramètres et avec une même recette de cuisine, vous obtiendrez un gâteau différent... comme en pyrotechnie.

Afin de fêter dignement notre 50ème lettre de l'IFE, nous avons testé une recette de bâtonnets explosifs au chocolat qui a été approuvée par toute l'équipe. Avant de commencer, n'oubliez pas vos EPI et... à vos fourneaux !

Ingrédients (pour 4 bâtonnets) :

- 100 g de chocolat noir et 100 g de chocolat au lait
- 50 g de noisettes concassées (si possible grillées)
- 50 g de noix de pécan concassées (si possible grillées)
- 50 g de cacahuètes concassées (si possibles grillées)
- 25 g de coco en poudre
- 50 g d'oranges confites en cube
- 50 g de riz soufflé
- 10 g de sucre pétillant ou poudre pétillante

Selon les goûts de chacun, certains ingrédients peuvent être remplacés par d'autres (raisins secs, noix, maïs soufflé, écorce de citron, pralinés...).

Mode opératoire :

1. Casser séparément les chocolats noir et au lait en morceaux dans deux bols et faire fondre au bain-marie.
2. Ajouter ensuite la moitié du reste des ingrédients dans le **chocolat au lait fondu et l'autre moitié dans le chocolat noir fondu** (sauf le sucre pétillant) et bien remuer.
3. Etaler la préparation au chocolat en forme de bâtonnets sur une feuille de papier sulfurisé (ou dans de petits moules en silicone rectangulaire).
4. Laisser refroidir puis saupoudrer de sucre pétillant (le **sucre pétillant risque d'agir s'il est versé sur du chocolat encore chaud**) puis mettre au réfrigérateur pendant une heure (la préparation doit être entièrement solide).
5. Démouler les bâtonnets.
6. Déguster ! Vous devez sentir le pétilllement en bouche...

Et qu'est-ce que le sucre pétillant ?

Il s'agit d'un mélange de sucre avec du glucose, du lactose et du dioxyde de carbone (CO₂) qui donne des cristaux de sucre qui éclatent en bouche et font pétiller les papilles. Le CO₂ est enfermé dans les cristaux de sucre par un procédé alliant cuisson, refroidissement et mise sous pression. Au contact de la salive, le sucre fond et le gaz contenu dans le sucre est libéré, ce qui va créer un crépitement. Ce sucre est donc très sensible à la chaleur et à l'humidité.

Genèse de la lettre de l'IFE

Cet article a été rédigé par Patrick Kernen, ancien adjoint de l'IFE de 1997 à 2003.

Affecté au NIMIC¹ pendant 5 ans, je prends conscience de l'importance de la « Lettre du NIMIC » qui a permis d'embarquer dans cette aventure internationale de partage d'information et d'analyse sur les MURAT des décideurs et des scientifiques, à l'origine peu séduits par ce petit groupe d'ingénieurs réunis à Bruxelles au siège de l'OTAN. Aux cinq pays fondateurs se joindront vite cinq autres pays pendant mes 5 ans d'affectation. La Lettre du NIMIC et les divers ateliers scientifiques promus n'y sont pas étrangers. A l'époque, tout était envoyé par la poste... Cette lettre existe toujours.

De retour en France, me voici à l'IFE en juillet 1997 sous les ordres de l'inspecteur de l'armement pour les poudres et explosifs, l'IGA François Chappuis, qui m'a vu œuvrer dans l'aquarium international comme « Nimicien ». Je rejoins deux collègues polytechniciens, Jean-Pierre Chevallier et Jean-Paul Hufschmitt. Je m'étonne qu'un tel service, chargé de promouvoir la sécurité pyrotechnique auprès des entreprises et de certaines administrations, ne dispose pas encore d'un tel outil moderne d'information et ne tarde pas à le proposer à mon chef. Tant qu'à faire, je lui propose en même temps une augmentation du nombre annuel d'inspections des établissements. Il est heureux de réveiller

la Belle endormie.

Me voilà donc rédacteur en chef. Jean-Paul et Jean-Pierre sont finalement très heureux de contribuer en faisant partager leur large expérience industrielle passée et leur capacité d'analyse scientifique aux premiers lecteurs, essentiellement les entreprises dont l'IFE analyse les dossiers du point de vue de la sécurité pyrotechnique selon le décret 79-846 et la sécurité au transport.

La première Lettre de l'IFE paraît pour les fêtes de fin d'année 1997. Le pliage fastidieux et la mise sous enveloppe n'enchantera pas les secrétaires.

La nécessaire mise à jour de ce décret, l'information sur les plus graves accidents pyrotechniques en France et à l'étranger et l'analyse de cas emblématiques seront les rubriques intéressantes le plus les lecteurs pendant les premières années.

Je ne pouvais me douter que mon « bébé » serait si bien couvé par tant d'acteurs, atteindrait le quart de siècle et aurait un avatar dématérialisé.

¹ NATO Insensitive Munitions Information Center (Centre d'information de l'OTAN sur les munitions insensibles) projet pilote qui a conduit à la création du MSIAC en 2004



Raison d'être de l'IFE : expert technique de la sécurité pyrotechnique

Si le concept émergent de «raison d'être» est principalement associé aux entreprises, il n'est pas inintéressant de le décliner également pour d'autres formes d'organisation. En effet, donner du sens à l'action et une vision pour l'avenir fondée sur l'ADN de l'organisation est une démarche porteuse de cohésion interne et de communication plus riche avec toutes les parties prenantes.

Dans la lettre n°45, le positionnement de l'IFE avait été questionné en référence à la qualification retenue par la mission interministérielle de 2019 sur la sûreté des explosifs «d'expert technique pyrotechnique de l'Etat». Une réflexion interne a été menée pour préciser ce positionnement et les implications associées. Cette réflexion conduit à refonder en partie le sens de l'action de l'IFE dans un environnement qui a fortement évolué mais aussi à se projeter sur son rôle dans l'avenir.

Des réflexions de l'IFE sur l'encadrement de la sécurité pyrotechnique ont été partagées avec la communauté pyrotechnique, notamment au travers de La Lettre de l'IFE dans des articles qu'on pourrait qualifier d'articles d'opinion. Ces prises de position ont indubitablement surpris certains qui ont toujours considéré l'IFE comme le gardien du dogme de la conformité réglementaire. Pour mieux comprendre la démarche, revenons à quelques considérations historiques justifiant en quoi une évolution du positionnement historique de l'IFE paraît inéluctable.

L'encadrement étroit de la sécurité pyrotechnique trouve son origine dans les suites données à l'explosion de la poudrerie de Grenelle en 1794, qui fut la première catastrophe industrielle en France et reste la plus importante du pays. La réglementation qui se met en place dans les toutes premières années du XIXème siècle va s'accompagner de la surveillance stricte des fabrications de poudre. En 1875, pour la fabrication des dynamites et explosifs civils à base de nitroglycérine, la surveillance est affectée à un ingénieur des mines auquel est adjoind un inspecteur des poudres et salpêtres. En 1972, une inspection technique de l'armement pour les poudres et explosifs (ITAPE) est mise en place au sein de la Délégation Ministérielle pour l'Armement (ancienne appellation de la Direction Générale de l'Armement). L'ITAPE est chargée d'une mission permanente d'inspection des établissements et s'assure que l'organisation de la sécurité y est conforme aux textes réglementaires et instructions ministérielles en vigueur. Le rôle des inspecteurs des poudres de l'époque est donc exclusivement orienté sur le contrôle de la réglementation au sein des sites de fabrication qui sont rattachés au ministère des armées.

Avec l'aménagement du monopole de l'Etat sur la production d'explosifs et la création de la Société Nationale des Poudres et Explosifs (SNPE), la position de l'ITAPE puis de l'IFE va nécessairement évoluer de nature

tout en gardant son appellation «d'inspection». Ses missions vont s'élargir avec une vocation interministérielle de contrôle et de conseil auprès des différents ministères et administrations territoriales concernés par la prévention des risques pyrotechniques. Dans les années 2000, les préoccupations sur la prévention des risques pour les travailleurs et la sécurité environnementale deviennent beaucoup plus prégnantes et investissent tous les domaines à risque avec un renforcement important des autorités de contrôle que sont les inspections du travail et les inspections des installations classées. L'abrogation en 2013 du décret 79-846 dont l'IFE avait été le promoteur et restait le garant, lors de la codification de la prévention du risque pyrotechnique dans le code du travail, marque certainement une rupture dans le rôle de l'IFE même si celle-ci n'a pas été perçue immédiatement.

D'une mission de «police administrative» historique puis de contrôle et de conseil, le rôle de l'IFE dans les textes et dans les faits a évolué vers un rôle de conseil pour les administrations du fait de sa compétence technique. C'est bien cette position qui a été perçue et retenue par les inspecteurs ayant conduit en 2019 la mission interministérielle de sûreté des explosifs. Une telle fonction, même si elle est inscrite dans des textes réglementaires, ne se «décrète» pas. Elle doit être reconnue par les «usagers» qui ne feront appel aux services de l'IFE que s'ils pensent en tirer un bénéfice pour leur mission. Il était donc fondamental de réfléchir à ces services d'expert à apporter.

L'expertise de l'IFE se fonde avant tout sur une compétence technique acquise sur le terrain et une bonne connaissance des acteurs du domaine. Elle est mise à disposition de la communauté pyrotechnique selon deux modes. Tout d'abord, l'IFE doit être en mesure de répondre au mieux aux sollicitations relatives à la sécurité pyrotechnique entendue dans une acception large comme rappelé dans un article de la lettre n°45, incluant la sécurité des travailleurs, de l'environnement mais aussi la sûreté et la fiabilité des produits explosifs. A un second stade, l'expert technique doit être capable de se projeter au-delà du seul besoin présent pour optimiser l'existant et anticiper une adaptation future aux évolutions susceptibles d'affecter son domaine. Ainsi, les connaissances de l'IFE acquises au travers de ses différentes interactions avec les parties intéressées par la sécurité pyrotechnique, l'analyse des situations et la veille technique permettent de faire des propositions d'évolution tant sur le plan des concepts d'encadrement de ces activités que sur les aspects techniques.

En tant qu'organisme étatique, l'IFE répond prioritairement aux sollicitations et aux besoins des administrations. Mais elle doit rester également pleinement à l'écoute des opérateurs pyrotechniques publics et privés et investie auprès d'eux. C'est d'autant plus important que les industriels portent une large part des compétences et



connaissances dans le domaine de la sécurité pyrotechnique qu'il est donc indispensable de partager.

Une communication des propositions de l'IFE non seulement vers les administrations mais également toutes les parties prenantes est fondamentale pour

susciter une réflexion de fond dans la communauté pyrotechnique, prenant en compte tous les aspects. Ainsi sont apparus les premiers articles d'opinion dans La Lettre de l'IFE, support privilégié de la communication avec la communauté pyrotechnique. La participation de l'IFE à soutenir une optimisation permanente de la sécurité pyrotechnique lui confère sa raison d'être : expert technique de la sécurité pyrotechnique.

Blessures liées aux explosions Partie I : Les types de lésions

Cet article a été rédigé par le médecin en chef Nicolas Prat du service de santé des armées (SSA).

Tout individu victime d'une explosion présente un tableau clinique complexe dont les lésions, immédiates ou à plus long terme, sont directement ou indirectement liées à l'onde de choc (ou onde de surpression), aux projections de fragments et à la chaleur dégagée. De la nature de l'explosif, de son conditionnement, de l'environnement dans lequel a lieu l'explosion, de la situation et de la relative protection de la victime par rapport à cette charge, vont directement dépendre les risques provenant du profil de pression caractérisant l'onde de choc générée lors de l'explosion, mais aussi les risques provenant de la boule de feu libérée par l'explosion, de la projection d'éclats et de la projection de la victime elle-même. Ces différents types de lésions sont artificiellement séparés en lésions primaires à quaternaires (figure 1).

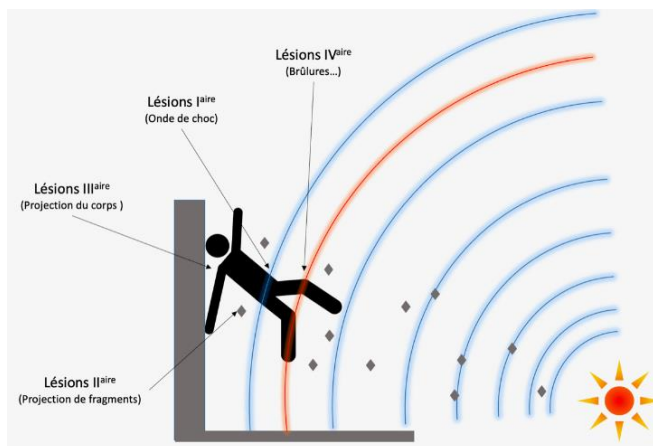


Figure 1 : Les différents types de lésion par explosion

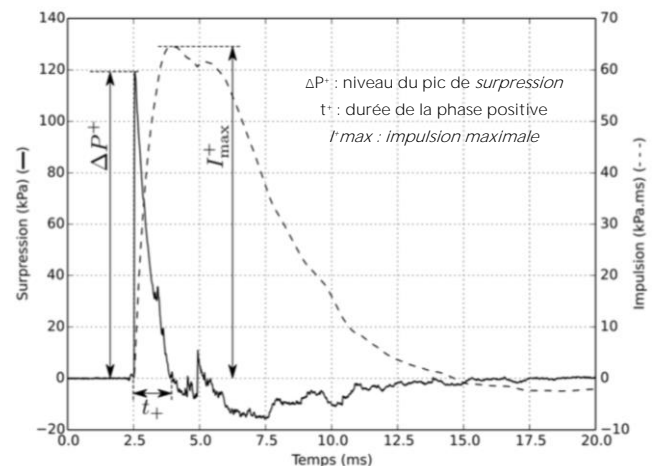
Les lésions primaires

Les lésions primaires regroupent l'ensemble des lésions créées directement par l'onde de choc produite par l'explosion. Cette onde de choc, ou onde de surpression, est constituée d'un front de surpression bref et intense, suivi d'une phase de dépression de moindre amplitude mais plus longue.

De même nature que le son, elle correspond à la propagation d'énergie sous forme de variation de pression de proche en proche au sein de la matière (gazeuse, liquide ou solide). Le front d'onde se déplace globalement à la

vitesse du son, qui dépend de la densité du milieu et donc de la distance à l'explosion (de plusieurs milliers de $m.s^{-1}$ dans le premier mètre à $400 m.s^{-1}$ à 5 m pour une charge aérienne de 2 kg en équivalent TNT). Ainsi, dans l'air, un pic de surpression de 2-3 millisecondes aura une épaisseur de l'ordre du mètre. Contrairement aux ondes sonores, cette « épaisseur » est responsable d'un déplacement net de matière après le passage de l'onde de choc^[1] (la phase de pression négative n'étant pas suffisante pour ramener l'ensemble de la matière à sa position initiale). Ce déplacement de va-et-vient de matière lors du passage de l'onde de pression peut occasionner à lui seul certains dégâts.

En champ libre, c'est-à-dire lorsque cette onde de choc ne rencontre aucun élément lui permettant de se réfléchir, sa propagation prend la forme typique de l'onde de Friedlander (figure 2). Les éléments caractéristiques de cette onde sont principalement le niveau maximal du pic de surpression ainsi que sa durée mais aussi sa pente de descente^[2]. D'autres caractéristiques de l'onde de surpression comme son impulsion sont aussi très informatives, en particulier en cas d'exposition « complexe » (milieu confiné, zones de réflexion ou diffraction de l'onde...).



En trait plein la courbe de pression
En pointillés l'impulsion de pression correspondant à l'intégration de la pression par le temps d'application (aire sous la courbe)

Figure 2 : Caractéristiques d'une onde de Friedlander



Ces caractéristiques dépendent majoritairement du type d'explosif utilisé. En effet, l'obtention d'un pic de pression important nécessite l'utilisation de matière possédant une vitesse de détonation et un pouvoir d'expansion élevés. Ainsi, certaines substances en conditions

dites « déflagrantes » comme la poudre noire ne permettent pas d'obtenir des lésions primaires. C'est également le cas lors de l'implication d'hydrocarbures (fuites de gaz, cocktails Molotov...). Par contre, les explosifs « détonants », qu'ils soient d'origine militaire (TNT, C4, Semtex...), commerciale (nitrate d'ammonium, dynamite...) ou artisanale (TATP...), possèdent une vitesse de détonation suffisante pour obtenir un pic de pression suffisamment important pour créer des lésions. Ces explosifs sont classés selon leur facteur d'efficacité relative (RE), c'est à dire le poids nécessaire pour obtenir les mêmes effets que le TNT, qui possède par convention un RE de 1. Par exemple, le C4 possède un RE de 1,34 alors que le TATP possède un RE de 0,80. Il faudra donc 750 g (1/1,34) de C4 et 1,250 kg (1/0,80) de TATP pour obtenir les mêmes effets que 1 kg de TNT. On parle ainsi généralement d'équivalent TNT en lieu et place du poids réel d'explosif utilisé.

Les effets de cette onde de surpression sur les tissus humains ont été largement étudiés et décrits dans la littérature scientifique, cependant les différents mécanismes lésionnels ne sont pas totalement élucidés aujourd'hui. Parmi ces mécanismes responsables de lésions, nous pouvons citer :

- La transmission de l'onde de choc lors de son arrivée au contact du corps humain, sous forme de différentes ondes de contrainte (ondes de tension, de déchirement...) au sein des tissus. Ces différentes ondes sont responsables de déformations tissulaires in-situ, entraînant à leur tour des lésions à type de déchirement le plus souvent. Ces ondes peuvent se réfléchir au niveau de certaines surfaces au changement de densité et se focaliser, expliquant ainsi des zones de confluence lésionnelle. Cela peut, par exemple, être le cas au niveau pulmonaire avec une réflexion des ondes sur le médiastin*.
- L'effet direct de l'onde de surpression/dépression aux interfaces air/liquide ou air/solide. La phase de surpression entraînant un effet de compression et la phase de dépression entraînant un effet de détente, les tissus à l'interface se retrouvent lésés par des mouvements de cisaillement. La particulière sensibilité

des tissus présentant une interface air/liquide-solide tend à confirmer, en tout cas partiellement cette approche.

- L'impact occasionné par l'onde de pression sur la surface du corps et la mise en mouvement de cette dernière, à très haute vitesse et relativement faible amplitude. Cette théorie, mise en avant par Zuckerman en 1940 est confortée par la découverte de « rib marking* »^[3] ou plutôt « inter-rib marking » au niveau pulmonaire de façon unilatérale. Cette mise en mouvement est la conséquence de la présence durant un court instant d'une surpression d'un seul côté de la surface, l'entraînant, comme les molécules de matière lors de son déplacement, dans un mouvement de va et vient. Ceci est à bien différencier de l'effet de souffle, qui vient appuyer contre la surface corporelle de façon beaucoup plus prolongée et moins intense.
- Un effet de compression externe du corps humain lorsque ce dernier se retrouve entièrement au sein de l'onde de surpression dont la taille est de l'ordre du mètre. Ce phénomène se manifesterait par une compression extrinsèque du thorax et de l'abdomen entraînant des lésions internes par « écrasement ». Les lésions des organes pleins (foie, reins...) en seraient la conséquence.

Sur le plan clinique, les lésions primaires observées chez les victimes d'explosion peuvent regrouper des lésions pulmonaires, abdominales, ORL (tympaniques et laryngées), oculaires et neurologiques. Dans les cas très particuliers de transmission solide de l'onde de choc (planchers de véhicules, parois, ponts de navire...), des lésions osseuses et tissulaires des extrémités ou des zones en contact peuvent en être la conséquence directe et unique. Chaque organe présente une sensibilité différente.

Les lésions pulmonaires viennent souvent au premier plan lorsque sont évoqués les effets d'une onde de surpression car elles sont cliniquement les plus parlantes, bien qu'assez rares dans l'absolu. En effet, selon les publications, l'incidence des atteintes pulmonaires chez les survivants oscille de 0,6% à 5,4%^[4-8]. L'ensemble des théories lésionnelles exposées ci-dessus peuvent s'appliquer à l'origine de ces lésions. Typiquement, ces atteintes pulmonaires sont responsables d'une contusion pulmonaire diffuse et bilatérale. Les signes cliniques ne sont pas spécifiques et peuvent associer dyspnée*, douleur thoracique, toux, hémoptysie*, polypnée* ou cyanose*. Parfois, l'onde de choc peut être responsable d'emphysème sous-cutané*, de pneumothorax* voire d'embolie gazeuse*.

* *Cyanose*: Couleur bleu sombre des téguments (peau, muqueuses...), caractéristique des états d'hypoxie grave

* *Dyspnée*: Difficulté respiratoire

* *Embolie gazeuse*: Présence d'une bulle de gaz dans un vaisseau sanguin entraînant l'arrêt de l'écoulement du sang

* *Emphysème sous-cutané*: Présence d'air sous la peau, généralement due à un traumatisme du thorax entraînant une fuite d'air au niveau des voies aériennes supérieures

* *Hémoptysie*: Rejet de sang lors d'un effort de toux

* *Médiastin*: Région de la cavité thoracique située entre les deux poumons. Il contient principalement le cœur, la trachée, les bronches souches, l'œsophage et certains gros vaisseaux sanguins.

* *Polypnée*: Augmentation de la fréquence et du volume de la respiration

* *Rib marking*: Phénomène décrit lors d'expérimentations sur le blast. Il correspond aux marques laissées par l'impact des côtes ou des espaces intercostaux sur la surface des poumons.

* *Pneumothorax*: Présence anormale d'air dans la cavité pleurale (entourant les poumons) pouvant entraîner le décès par compression des poumons et du cœur



Les lésions laryngées (pétéchies* sous muqueuses, placards ecchymotiques...) n'ont d'intérêt clinique que parce que leur seuil d'apparition est très proche de celui des lésions pulmonaires et digestives [9]. Cependant, comme pour les lésions tympaniques, leur valeur prédictive reste peu fiable.

Les lésions tympaniques ne nécessitent pas de prise en charge en urgence [10]. Parce qu'elles ont le seuil lésionnel le plus bas, elles ont longtemps représenté une sorte de « signature » d'exposition à une onde de choc. Cependant, la grande variété de lésions possibles associée à un seuil lésionnel imprévisible (dépendant largement de la position, de l'environnement, de la conformation anatomique...) n'en fait pas un indicateur fiable [8,9,11,12]. Ainsi, il est aujourd'hui entendu que la recherche de lésion tympanique lors du triage médical est inutile.

Les lésions abdominales sont également classiquement décrites lors d'exposition à des ondes de choc, et sont généralement gravissimes [9,13]. Selon les publications, on les rencontre dans 15 à 20 % des atteintes primaires. On différencie les atteintes des organes creux (tube digestif) et des organes pleins (foie, rate, reins...). Les organes creux sont particulièrement sensibles du fait d'un contenu hydro-aérique*. Les lésions peuvent aller d'un simple hématome de la paroi de l'intestin à une perforation complète d'emblée. Le colon semble plus vulnérable que l'intestin grêle. Le mésentère* peut également être touché, avec un risque d'hémorragie ou d'ischémie mésentérique*. Contrairement aux lésions pulmonaires, il existe un risque de complication secondaire important. La surveillance et la répétition des examens cliniques et d'imagerie est ici indispensable en cas de doute. Les mécanismes mis en œuvre peuvent être une variation de pression et donc de volume de l'air piégé ou des phénomènes d'accélération/décélération avec cisaillement des mésentères. Moins sensibles, les organes pleins peuvent présenter des lésions à type de contusion. Cependant la part entre des lésions d'origine primaire ou tertiaire est difficile à faire. Sur le plan clinique, on retrouve classiquement des douleurs abdominales, des nausées et vomissements, des ténesmes*, des douleurs testiculaires, des besoins impérieux, voire de véritable défense abdominale* [14].

Les lésions cérébrales dues spécifiquement à l'action de l'onde de choc sont une réalité, bien que le mécanisme lésionnel soit toujours mal appréhendé [15]. Les lésions observées vont des atteintes de la barrière hémato-méningée entraînant divers types de saignements

intracrâniens à des lésions neurologiques difficilement détectables au premier abord. Parmi les différents mécanismes participant à ces lésions nous pouvons retenir la transmission transcrânienne de l'onde de choc avec mise en mouvement et accélération de la matière cérébrale, la transmission de l'onde de choc impactant le tronc via les tissus mous ou enfin la transmission d'une onde de pression vasculaire également à partir du tronc avec atteinte focalisée au niveau de la barrière hémato-méningée. Les techniques modernes d'imagerie médicale ont notamment mis en évidence, chez certains traumatisés crâniens légers victimes d'explosion, une altération diffuse de la substance blanche* [16]. Maux de tête, troubles du sommeil, sensibilité à la lumière et au bruit sont des symptômes fréquents suite à une explosion. Des troubles cognitifs (attention, mémoire, langage) ou comportementaux (anxiété, dépression, impulsivité, troubles de l'humeur) peuvent également être observés [17]. Par ailleurs, l'exposition répétée à des ondes de supression lors d'explosions risque d'induire des effets à long terme comme des encéphalopathies post-traumatiques chroniques et des épilepsies post-traumatiques.

Les lésions oculaires peuvent être consécutives à des atteintes par éclats, mais aussi à une atteinte directe ou indirecte par l'onde de choc. L'action directe de l'onde de choc sur le globe oculaire est responsable de lésions rétinienne et du cristallin, mais le mécanisme lésionnel est mal connu. Pour ces lésions, la topographie péri-oculaire* joue un rôle dans la réflexion et la concentration de l'onde de choc [18]. Il semblerait cependant que certaines lésions rétinienne soient dues non pas à une action directe sur la rétine, mais à une agression du nerf optique [19].

Les autres lésions dues aux explosions (secondaires, tertiaires, quaternaires)

Beaucoup moins spécifiques des explosions que les lésions primaires, les autres types de lésions dues aux explosions sont cependant responsables d'une certaine gravité.

Les lésions secondaires regroupent l'ensemble des lésions issues de la projection d'éclats lors de l'explosion. Ce sont donc pour leur plus grande partie des lésions de criblage. Le type d'éclat retrouvé est très varié. Il peut s'agir soit d'éléments de l'engin explosif, soit de son environnement immédiat (sol, mobilier, vitrages...) et projetés à plusieurs centaines de m.s⁻¹ par le souffle de l'explosion. Leur gravité peut être très importante [20] mais dépend surtout de la localisation des impacts.

Les lésions tertiaires regroupent l'ensemble des lésions issues de la projection du corps de la victime par le souffle de l'explosion. Les lésions obtenues ne sont pas spécifiques des atteintes par explosion. Elles correspondent aux lésions

* *Défense abdominale* : contraction réflexe des muscles abdominaux lors de la palpation. Elle est le signe d'une irritation au niveau de la cavité abdominale.

* *Hydro-aérique* : composé de gaz et de matières liquides

* *Ischémie mésentérique* : Diminution ou arrêt de la circulation et donc de l'apport en oxygène des tissus vascularisés via le mésentère

* *Mésentère* : Partie reliant le bord de l'intestin grêle à la paroi postérieure de l'abdomen. Il contient entre autres les vaisseaux sanguins vascularisant l'intestin.

* *Pétéchies* : Petites taches de couleur rouge à violacée, dues à l'infiltration de sang sous la peau ou la muqueuse

* *Substance blanche* : partie centrale de la matière cérébrale par opposition à la substance grise, périphérique

* *Ténesmes* : Contractures spasmodiques douloureuses au niveau du périnée (anales ou vésicales)

* *Topographie péri-oculaire* : agencement des structures (tissus mous, os...) autour de l'œil



obtenues lors des chutes. Ainsi, les membres, le rachis et l'extrémité céphalique sont particulièrement exposés. Cependant, cette projection peut aussi être responsable de traumatismes fermés du tronc. Il est alors parfois difficile de faire la part entre lésions

primaires et tertiaires devant des tableaux de contusion pulmonaire, de rupture d'organes pleins intra-abdominaux ou de lésions cérébrales.

Les lésions quaternaires regroupent les lésions provenant de l'ensemble des autres phénomènes dus à l'explosion et non représentés par les lésions primaires, secondaires et tertiaires. On y regroupe essentiellement les lésions à type de brûlure, d'écrasement dues à l'effondrement des structures ainsi que toutes les contaminations directement liées à l'explosion. Peuvent également y être associés les traumatismes d'ordre psychique reliés directement à l'explosion comme l'état de stress post traumatique.

Au sein de ces lésions quaternaires, les brûlures sont relativement rares (moins de 5%^[4]) et souvent peu étendues et peu profondes. Elles sont soit directement liées à la boule de feu de l'explosion, soit dues aux phénomènes d'embrassement secondaires. Des atteintes des voies aériennes supérieures ou même du tissu pulmonaire peuvent être rencontrées suite à une inhalation de fumées. Il faut alors différencier les lésions de brûlure dues aux gaz

chauds et touchant particulièrement les voies aériennes supérieures des lésions toxiques d'irritation dues aux fumées « froides » et touchant plus particulièrement les alvéoles pulmonaires. Là encore, une certaine similitude lésionnelle avec les lésions pulmonaires ou laryngées primaires peut rendre le diagnostic étiologique* difficile.

A côté de ces brûlures thermiques, on retrouve parfois des brûlures chimiques lors de l'utilisation d'engins explosifs diffusant des produits toxiques tels que le phosphore par exemple. Ces brûlures chimiques restent très spécifiques dans leurs présentations et leurs prises en charge. Enfin, les lésions par écrasement ou « crush injuries » n'ont ici rien de spécifique mais représentent un facteur aggravant majeur^[21]. Elles sont la conséquence de l'effondrement des structures et des bâtiments.

Conclusion

En fonction du type d'engin explosif et de son environnement, les explosions peuvent engendrer un certain nombre de lésions traumatiques regroupées sous les termes de lésions primaires à quaternaires. Les lésions primaires sont spécifiques des explosions car elles sont la conséquence directe de l'onde de surpressions engendrée. Les autres types de lésions (éclats, projection, brûlures...) ne sont pas spécifiques de ce type d'accident.

L'importance et la prévalence des différents types de lésions, notamment en milieu confiné, seront abordées dans la prochaine lettre de l'IFE.

* *Diagnostic étiologique* : définition de la cause, de l'origine d'une lésion

Bibliographie

1. Ben-Dor G, Igra O, Elperin T. Handbook of Shock Waves. In: Shock wave interactions and propagation. Academic Press; 2001. page 792
2. Zhang J, Wang Z, Leng H, Yang Z. Studies on lung injuries caused by blast underpressure. The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care 1996;40(3 Suppl):S77-80
3. O'Reilly JN, Gloyne SR. Blast injury of the lungs. Lancet 1941;219-24
4. Frykberg ER, Tepas JJ. Terrorist bombings. Lessons learned from Belfast to Beirut. Ann Surg 1988;208(5):569-76
5. Hadden WA, Rutherford WH, Merrett JD. The injuries of terrorist bombing: a study of 1532 consecutive patients. Br J Surg 1978;65(8):525-31
6. Cooper GJ, Maynard RL, Cross NL, Hill JF. Casualties from terrorist bombings. The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care 1983;23(11):955-67
7. Katz E, Ofek B, Adler J, Abramowitz HB, Krausz MM. Primary blast injury after a bomb explosion in a civilian bus. Ann Surg 1989;209(4):484-8
8. Gutierrez de Ceballos JP, Turégano-Fuentes F, Perez-Diaz D, Sanz-Sanchez M, Martín-Llorente C, Guerrero-Sanz JE. Casualties treated at the closest hospital in the Madrid, March 11, terrorist bombings. Crit Care Med 2005;33(1 Suppl):S107-12
9. Cudennec YF, Buffe P, Poncet JL, Diard JP. Les blasts cervico-céphaliques - expérimentation et clinique : convergences et divergences. Médecine et armées 1989;17:245-8
10. Garth RJ. Blast injury of the ear: an overview and guide to management. Injury 1995;26(6):363-6
11. Wolf SJ, Bebarta VS, Bonnett CJ, Pons PT, Cantrill SV. Blast injuries. Lancet 2009;374(9687):405-15
12. DePalma RG, Burris DG, Champion HR, Hodgson MJ. Blast injuries. N Engl J Med 2005;352(13):1335-42
13. Bala M, Rivkind AI, Zamir G, Hadar T, Gertsenshtein I, Mintz Y, et al. Abdominal trauma after terrorist bombing attacks exhibits a unique pattern of injury. Ann Surg 2008;248(2):303-9
14. Phillips YY. Primary blast injuries. Ann Emerg Med 1986;15(12):1446-50
15. Kobeissy FH, Chen H, Constantini S, Chen Y. A Two-Model Approach to Investigate the Mechanisms Underlying Blast-Induced Traumatic Brain Injury. 2015
16. Davenport ND, Lim KO, Armstrong MT, Sponheim R. Diffuse and spatially variable white matter disruptions are associated with blast-related mild traumatic brain injury. Neuroimage 2012;59(3):2017-24
17. Okie S. Traumatic brain injury in the war zone. N Engl J Med 2005;352(20):2043-7
18. Sundaramurthy A, Unnikrishnan G, Mao H, Williams ST, Harding TH, Reifman J. Assessment of the effectiveness of eyewear against blast-induced eye injury. Amsterdam
19. Wang H-CH, Choi J-H, Greene WA, Plamper ML, Cortez HE, Chavko M, et al. Pathophysiology of blast-induced ocular trauma with apoptosis in the retina and optic nerve. Mil Med 2014;179(8 Suppl):34-40
20. Mellor SG, Cooper GJ. Analysis of 828 servicemen killed or injured by explosion in Northern Ireland 1970-84: the Hostile Action Casualty System. Br J Surg 1989;76(10):1006-10
21. Clapson P, Pasquier P, Perez JP, Debien B. Lésions pulmonaires liées aux explosions. Revue de Pneumologie clinique 2010;66(4):245-53



Innovations au service de la sécurité des travailleurs

Cet article a été rédigé par le Bureau central Maitrise des Risques et les centres d'essais de la DGA DT.

La direction technique (DT) de la DGA est reconnue pour les études, les expertises et les évaluations techniques qu'elle conduit tout au long du cycle de vie des systèmes d'armes et en particulier lors du développement et de la qualification qu'elle prononce... Ces travaux se fondent souvent sur des essais et notamment sur des essais pyrotechniques. Ses centres d'essais pyrotechniques éprouvent les systèmes pyrotechniques dans toutes les configurations possibles et aux limites des systèmes. Ces essais doivent être réalisés dans le souci premier et constant de la sécurité des équipes d'essais.

De tous temps, les pyrotechniciens d'essais de la DT sont formés¹ par une connaissance théorique approfondie des principes de la pyrotechnie et des architectures de munitions et une formation pratique des gestes emblématiques de la profession. En deux mots, on développe leur capacité de réflexion et leur esprit critique. Conséquemment, de par ces qualités, les pyrotechniciens d'essais de la DT ont développé au fil du temps des matériels et des procédures permettant de réaliser, avec une sécurité accrue, les opérations qui leur sont demandées.

Le but de cet article est de décrire quelques-unes de ces réalisations, choisies parmi beaucoup d'autres, provenant de plusieurs centres de la DT. Dans un souci permanent de sécurité, elles sont issues de la réflexion et de l'expérience des femmes et des hommes, pyrotechniciens d'essais, aujourd'hui anonymes, qui ont œuvré à la sécurité de leurs camarades et à qui nous voulons rendre hommage ici.

PEPI

Le PEPI, *Piège à Eclats Pour Initiateur*, est l'une des réalisations emblématiques de la sécurité pyrotechnique, permettant de se prémunir des effets en cas de déclenchement intempestif d'un détonateur lors de son branchement sur la ligne de mise de feu.

En effet, lors de la réalisation de ce branchement, un risque de courant résiduel dans la ligne est à craindre, portant la probabilité d'occurrence d'un accident à P3², avec des effets de souffle et de projections certes faibles, mais dangereux. Les pratiques courantes préconisent, durant

cette opération, après avoir posé le détonateur derrière soi³, d'utiliser les protections naturelles pour y placer le détonateur durant cette opération : derrière une souche, un pli de terrain...

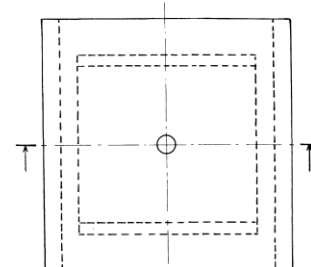
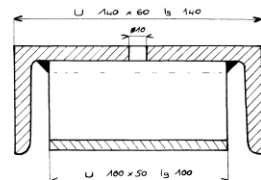
Devant l'absence possible d'obstacle naturel, en particulier sur des aires d'essais, des personnels de la DT ont inventé le PEPI : petite boîte métallique susceptible de contenir les effets de projection du détonateur⁴. Créé à Bourges, le PEPI est aujourd'hui utilisé dans plusieurs centres de la DT⁵ et même dans d'autres sites du ministère des armées.

Constitué souvent par soudage de deux morceaux d'IPN en U, il fut testé en vraie grandeur, un PV rédigé, un dossier de définition constitué, un avis favorable des préventeurs du centre acquis, avant son « industrialisation » et sa mise en application lors des amorçages.

Le PEPI est certainement le plus petit équipement de protection collective mis en œuvre à la DT.



Photo de PEPI utilisé à DGA Techniques terrestres (DGA TT) et à DGA EM site Méditerranée



Plan du PEPI

¹ Et bien formés dans les organismes spécialisés du ministère, en particulier le centre de formation de la défense (CFD) à Bourges et les écoles militaires de Bourges.

² P3 signifie que l'éventualité d'un phénomène dangereux se révèle probable (article 12 de l'arrêté modifié du 20 avril 2007).

³ Se positionner un genou au sol, à 2 mètres environ de l'emplacement de la charge, sans sortir le détonateur de son emballage de sûreté, s'assurer que le détonateur est

correctement court-circuité dérouler les conducteurs en évitant toute traction, placer le détonateur derrière soi... (extrait du manuel d'instruction de l'ESAM « Mise en œuvre des explosifs »)

⁴ Historiquement, les artificiers de Bourges utilisaient des ogives d'obus d'artillerie vides.

⁵ On le trouve décrit dans des études de sécurité de plusieurs centres d'essais.



Poste de travail de « grattage des amorces »

Lors de certaines expertises menées à DGA TT, il est nécessaire de récupérer les explosifs et compositions pyrotechniques contenus dans une amorce : cette

opération est réalisée par grattage manuel de ces produits dans les alvéoles métalliques de ces amorces. Cette opération présente un risque d'évènement pyrotechnique élevé (P4 ou P5) mais des effets dangereux limités (la masse de matière active étant faible, inférieure à 1,5 g d'explosif).

La protection des travailleurs est réalisée grâce au travail derrière un écran : seuls les bras et les mains sont exposés. Pour protéger ces derniers, le pyrotechnicien utilise des outils à pommeau : réalisés en acier, ils arrêtent les éclats et un revêtement extérieur en métal mou (cuivre ou aluminium) limite les ricochets.

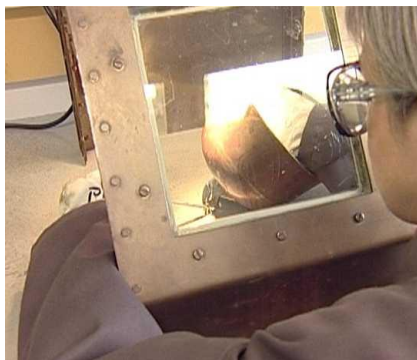


De plus, les manches de la tenue de travail de l'opérateur sont doublées de kevlar pour améliorer la protection face aux éclats.

Cette solution, validée par de nombreux essais, protège efficacement les opérateurs : aucun blessé n'a été à déplorer lors d'évènements pyrotechniques observés pendant ces opérations.



Différents outils à pommeau de protection



Vue d'ensemble du poste de travail

Continuité électrostatique lors de l'usinage

DGA Techniques Navales (DGA TN) réalise des opérations pyrotechniques d'usinage de produits explosifs afin de récupérer des échantillons pour analyses.

En particulier, lors de l'activité de tronçonnage au tour de certains blocs propulsifs qu'il est impossible de refroidir à l'eau, la découpe est refroidie à l'air comprimé, ce qui, associé à la rotation du bloc, risque de générer des charges électrostatiques et représente une source potentielle d'agression du spécimen pyrotechnique.

Afin de se prémunir de ce risque, le bloc propulsif en cours d'usinage est relié à la terre électrostatique par la machine-outil via un ruban adhésif conducteur collé sur le bloc, soit au contact de l'inhibiteur, soit directement sur le propergol lorsque cela est possible. Le ruban adhésif est positionné sur la périphérie du bloc et du tronçon, sur une largeur d'au moins 10 cm de part et d'autre de l'outil, et relié suivant deux génératrices à la bride entraînant chaque bloc.

Par ailleurs, l'hygrométrie et la température sont contrôlées.



Photo du dispositif

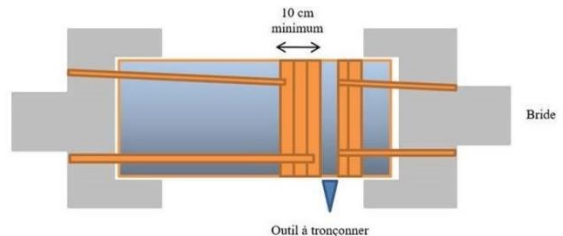


Schéma de principe

Emballages de transport

Caisse de transport 1.4S de transport de détonateurs électriques du commerce

A DGA EM site Gironde (DGA EM G), les pyrotechniciens ont mis au point une caisse navette pour le transport interne de détonateurs électriques du commerce classés en division de danger 1.1B⁶.

Lors de la détonation d'un de ces détonateurs en étui de sûreté⁷, ce dernier empêche la transmission de la

⁶ Objet contenant une matière explosible primaire et ayant moins de deux dispositifs de sécurité efficaces avec risque d'explosion en masse (une explosion en masse affecte de façon pratiquement instantanée la quasi-totalité du chargement - cf. arrêté du 20 avril 2007 modifié).

⁷ Etui de sûreté : étui individuel composé d'une alvéole métallique entourée d'un moulage de polyéthylène haute densité, d'un bouchon d'alvéole vissé et d'une cale en mousse polyuréthane.



détonation aux voisins. Cependant, cet étui est fortement endommagé et projette des éclats. Les étuis de sûreté voisins risquent d'être endommagés même si la détonation n'est pas transmise.

Une caisse de transport a donc été développée, suffisamment robuste pour contenir ces projections et interdire l'endommagement des autres étuis. L'efficacité de cette caisse a été validée par des essais, et le colis est maintenant classé 1.4S pour le transport interne des détonateurs.



Caisse avant essai



Caisse après essai

Caisse de transport de détonateurs artisanaux

DGA TT a développé une caisse de transport interne, cette fois-ci pour des détonateurs *artisanaux* avec des masses unitaires de matière active allant jusqu'à 3 g d'équivalent TNT.

Le principe de cette caisse est le suivant :

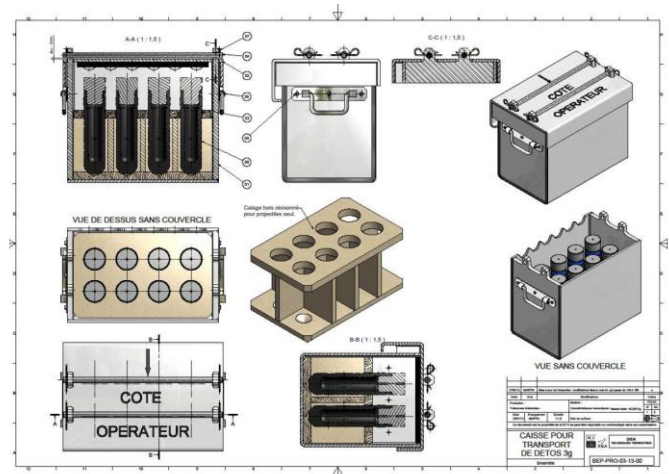
- chaque détonateur est placé dans un corps vide d'obus d'exercice de 40 mm qui est obturé par un bouchon en acier vissé. Un calage en mousse assure le maintien du détonateur ;



- Huit détonateurs, dans leur corps d'obus, sont placés dans une caisse métallique et maintenus grâce à un calage en bois (cf. photo ci-contre et plan de définition ci-après).



De la même façon que pour la caisse de DGA EM, site Gironde, des essais ont validé cette définition : la caisse en aluminium contient les effets dangereux de la détonation d'un détonateur et assure la non-transmission aux autres détonateurs.



Plan de la caisse de transport

Il n'y a pas que les outillages

Les innovations permettant d'accroître la sécurité des opérateurs ne concernent pas que les outillages. En effet, les améliorations peuvent apparaître également au travers de nouvelles procédures et d'outils informatiques.

Ainsi, à DGA TT, il y a quelques années, l'émission informatique, grâce aux outils de bureautique, des bons « modèle 14 » pour la perception de munitions au magasin pyrotechnique, a remplacé la transmission manuelle.

Cette procédure, a permis d'éviter aux personnels de traverser l'enceinte pyrotechnique plusieurs fois par jour, réduisant ainsi leur temps d'exposition aux zones d'effets de l'enceinte, tout en gagnant en qualité et en productivité.

Cette innovation reçut le « Prix initiative et progrès 2006 » de la DGA qui fut décerné à ses deux inventeurs. Elle servit également à l'élaboration d'une partie du cahier des charges de l'outil institutionnel « TOCATA Stock Pyro », mis en service depuis.

En guise de conclusion... provisoire

Ces pratiques d'innovation en matière de sécurité des personnes remettent les femmes et les hommes qui réalisent des « opérations pyrotechniques » au cœur de la sécurité des essais : qui mieux qu'un opérateur est capable de réflexion et d'amélioration des moyens et des procédures pour sa propre sécurité ?

Une idée innovante d'un personnel ou d'un groupe de personnels doit être écoutée, discutée, critiquée et ensuite validée, d'abord par ses collègues et par sa hiérarchie directe, et c'est en partie dans ce cadre que les formations continues, imposées⁸ par l'article R. 4462-28 du code du travail, prennent tout leur sens. « L'invention » doit ensuite poursuivre son chemin jusqu'à sa validation et sa mise en service : examen par les préventeurs du centre, présentation aux instances représentatives du personnel de l'organisme, validation par d'éventuels essais...

⁸ Nous sommes bien dans le cadre de ces séances : « séances de formation au cours desquelles divers sujets concernant l'amélioration de la sécurité sont traités ».



Il est nécessaire d'encourager ces démarches par tous les moyens disponibles, par exemple selon des procédures internes⁹, mais aussi, et surtout, par la valorisation de ces personnels engagés dans la

sécurité. Il existe des récompenses que l'on a la chance de pouvoir attribuer pour ce type d'innovation au ministère des armées¹⁰. Profitons-en !

⁹ Cela figurait, dans les années 2000, à DGA TT, aux objectifs individuels des cadres de niveaux N+1 et N+2 des opérateurs.
¹⁰ Par exemple, lettre de félicitations pour les personnels civils (circulaire n°63000 du 15 avril 2013), récompense pécuniaire pour invention non brevetable (instruction n°21357/DEF/DAJ/D/2/P/ORG du 31 juillet 2001 modifiant

l'instruction n°10179/DEF/DAJ/AA/2 du 19 février 1985 relative aux inventions non brevetables et travaux originaux du personnel de la défense), récompense dans le cadre de l'amélioration de la prévention (instruction n°300767/DEF/SGA/DFP/PER/5 relative aux conditions d'attribution des récompenses en espèces en matière de prévention)...

Opérations de dépollution pyrotechnique : Zones d'effets des munitions chargées en poudre noire Partie I : Configuration terrain nu et plat

Cet article a été rédigé par Pierre-François Péron (INSP/IPE) et Yanick Garcia (DGA EM)

Lors des opérations de dépollution pyrotechnique, les distances d'isolement admissibles entre installations sont cadrées par l'arrêté du 12 septembre 2011¹. Ces distances ont été définies pour des munitions de référence chargées avec des explosifs conventionnels tels que le TNT, la Composition B dont le fonctionnement produit un effet brisant et génère un grand nombre d'éclats. Elles sont toutefois majorantes pour des munitions historiques chargées en poudre noire dont le faible pouvoir brisant entraîne la formation d'un nombre d'éclats nettement inférieur. Afin de prendre en compte ce type de situation, l'arrêté dépollution prévoit que « dans le cas où la munition attendue ne figure pas dans les tableaux (annexe I-1.), les valeurs des zones d'effets retenues seront déterminées soit par calcul soit par analogie justifiée avec une munition de référence voisine ». Le présent article s'inscrit dans cette démarche et présente une méthodologie d'évaluation des zones d'effets en terrain nu et plat pour une munition chargée en poudre noire.

Munitions chargées en poudre noire

La poudre noire a été initialement utilisée pour ses propriétés propulsives en tube d'arme mais a également trouvé des applications comme chargement d'obus en raison de son comportement énergétique sous fort confinement qui l'apparente aux explosifs. Ses performances détoniques sont toutefois limitées, sa

décomposition atteignant tout au plus un régime déflagrant (célérité de l'ordre de 1000 à 1500 m/s à comparer à 6500 m/s pour le TNT). Un projectile chargé en poudre noire a ainsi un pouvoir de brisance² limité par rapport à un chargement en explosif secondaire et un mode de fragmentation s'apparentant davantage à un éclatement pneumatique (fragments en nombre sensiblement plus faible mais de masse nettement plus élevée³). A titre d'illustration⁴, un projectile d'artillerie de 75 mm chargé en poudre noire génère une vingtaine de fragments contre plusieurs centaines avec le TNT (tableau 1). Leur masse est en conséquence nettement plus élevée : majoritairement supérieure à 50 g et jusqu'à plus de 800 g contre au maximum 70 g avec le TNT. La vitesse des fragments est en revanche nettement plus faible.

Caractéristique des fragments	Chargement poudre noire	Chargement TNT
Nombre	Vingtaine	Plusieurs centaines
Masse	Essentiellement > 50 g Maximum > 800 g	Essentiellement quelques g Maximum 70 g
Vitesse	≈ 200 m.s ⁻¹	≈ 1200 m.s ⁻¹

Tableau 1: Caractéristiques de fragmentation d'un projectile d'artillerie de 75 mm chargé en poudre noire ou en TNT

¹ Arrêté du 12 septembre 2011 fixant les règles de détermination des distances d'isolement relatives aux chantiers de dépollution pyrotechnique - appelé arrêté dépollution dans la suite de l'article

² En considérant une modélisation de la brisance par une loi en $\rho_0 D_{C1}^2$ (ρ_0 densité et D_{C1} célérité de détonation)

³ Physical Effects and Consequences from Detonations and Less Violent Munition Responses – An Overview, M. Van der Voort & al., IESSE (2018)

⁴ Explosive Effects of Black Powder Filled Ordnance, M. Crull, R. Landis, DDESB Seminar (2004)



Evaluation quantitative du risque

Les opérations de dépollution se situent fréquemment dans des environnements urbanisés denses qui requièrent une évaluation des zones d'effets affinée suivant les munitions attendues. Ces

évaluations s'appuient des méthodes d'évaluation quantitative du risque (cf. lettre IPE n°46) qui prennent en compte les caractéristiques des munitions et des fragments générés (nombre, masse et vitesse) et évaluent, en fonction de ces caractéristiques, la probabilité d'atteinte et de létalité des personnels suivant leur distance par rapport à la munition.

Les principes de ces méthodes ont été mis en œuvre pour définir en 2011 les zones d'effets de l'arrêté dépollution et sont appliqués dans la suite de l'article au cas d'une munition chargée en poudre noire en terrain nu et plat.

Calcul des zones d'effets Z1 à Z4

- Zones d'effet projection

Les zones d'effet projection sont calculées en appliquant une analyse quantitative du risque dont les étapes sont les suivantes :

1. calcul de la probabilité d'atteinte pour des fragments en fonction de la distance à la munition ;
2. évaluation de l'effet létal des fragments suivant son énergie à l'impact ;
3. calcul de la probabilité de létalité en fonction de la distance en combinant, pour l'ensemble des fragments, probabilité d'atteinte et effet létal ;
4. détermination des distances pour lesquelles la probabilité de létalité est égale aux seuils définis dans l'article 4 de l'arrêté dépollution (tableau 2), ces distances correspondant aux rayons des zones d'effet projection.

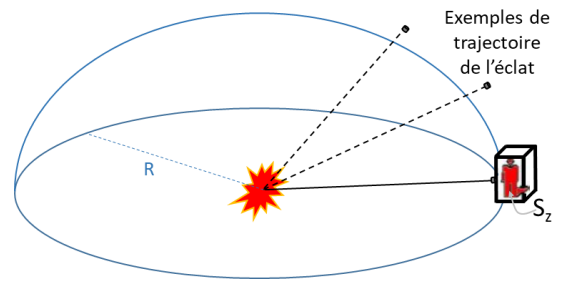
Zones d'effets	Z1	Z2	Z3	Z4	ZLP
Rayon des Zi et seuils de létalité	R1 50%	R2 5%	R3 1%	R4 0,3%	

Tableau 2: Article 4 de l'arrêté dépollution
Rayons des zones d'effets et seuils de létalité associés

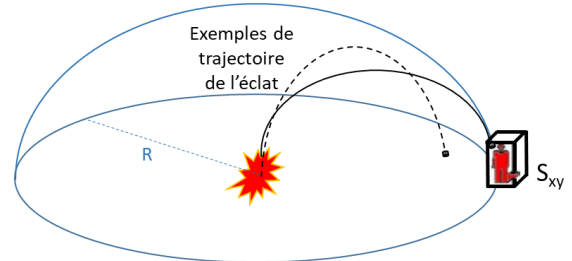
Les principes appliqués à chacune de ces étapes sont détaillés ci-après.

1. Probabilité d'atteinte :

Les situations d'atteinte sont représentées schématiquement (figure 1) par l'impact soit d'un éclat rasant (cas n°1) soit d'un éclat « retombant » (cas n°2 – trajectoire balistique).



Cas n°1: Impact direct



Cas n°2: Impact par éclat retombant

Figure 1: Situations d'atteinte par un éclat et illustration des trajectoires possibles suivant l'angle de projection

A une distance R de la munition, la probabilité d'atteinte peut être approchée par le ratio entre la surface exposée du personnel par rapport à la surface susceptible d'être traversée par les fragments suivant leur angle de projection :

- dans le cas d'un impact direct, la surface exposée d'un personnel est la surface du corps humain dans le plan vertical ($S_z = 0,56 \text{ m}^2$ - donnée AASTP-4) et la surface traversée par les fragments est la demi-sphère de rayon R
 - o soit pour un fragment, $P_{direct}(R) \approx \frac{S_z}{2\pi R^2}$
- dans le cas d'un éclat « retombant », la surface exposée d'un personnel est la surface apparente projetée du corps humain dans le plan horizontal ($S_{xy} = 0,28 \text{ m}^2$)⁵ et la surface traversée par les fragments est le disque de rayon R
 - o soit pour un fragment, $P_{balistique}(R) \approx \frac{S_{xy}}{\pi R^2} = \frac{S_z}{2\pi R^2}$

Dans le cas d'une munition positionnée horizontalement, une partie des éclats est dirigée vers le sol et pourrait être écartée. Ce principe est appliqué aux projections balistiques mais n'est pas retenu pour les projections directes afin de se prémunir d'aléas difficiles à prendre en compte dans les simulations tels que les ricochets, la variabilité de la fragmentation suivant les caractéristiques de l'enveloppe de la munition, les projections secondaires...

Ainsi pour une munition générant N fragments, on obtient

$$P_{direct}(R) \approx \frac{NS_z}{2\pi R^2} \text{ et } P_{balistique}(R) \approx \frac{NS_z}{4\pi R^2}$$

$$\text{et } P_{atteinte}(R) \approx P_{direct}(R) + P_{balistique}(R) \approx \frac{3NS_z}{4\pi R^2}$$

modèles de calcul, cette forme donnant une probabilité toujours inférieure ou égale à 1. Les deux écritures sont équivalentes quand $\frac{3NS_z}{4\pi R^2} < 1$.

⁵ En considérant un angle minimum de retombée des éclats de l'ordre de 60-65°

⁶ Cette probabilité est modélisée dans l'AASTP-4 par $P_{atteinte} = 1 - e^{-\frac{3NS_z}{4\pi R^2}}$ en raison de son implémentation dans des



2. Effet létal des fragments :

L'effet létal d'un fragment dépend de l'organe touché et de son énergie cinétique à l'impact. Différentes modélisations de cet effet ont été publiées dans la littérature et sont notamment

documentées dans l'AASTP-4. Ces modélisations prennent en compte les effets des fragments sur différentes zones vitales (tête, thorax, abdomen et membres) et les pondèrent suivant les surfaces exposées de ces organes. Dans l'exemple ci-dessous, l'effet létal est nul en-dessous de 20 J, est de 30 % pour un éclat avec une énergie de 79 J et atteint 100 % pour 400 J.

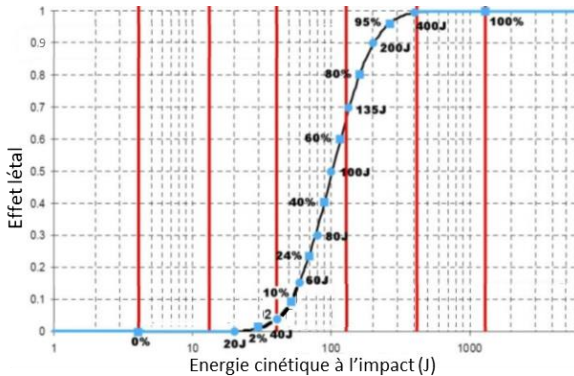


Figure 2: Effet létal d'un fragment en fonction de son énergie cinétique à l'impact

Il est à noter que la distance IBD (Inhabited Building Distance) de l'AASTP-1 est définie par une probabilité de 1 % d'être atteint par un fragment ayant une énergie supérieure à 79 J. Ceci correspond à une probabilité de létalité de $0,01 \times 0,3 = 0,003$ soit 0,3 % qui est également le seuil de létalité retenu pour définir la limite Z4 dans l'arrêté dépollution.

3. Probabilité de létalité :

Dans le cas des munitions chargées en poudre noire, la vitesse des éclats est supérieure à 100 m/s et leur masse est en général de plusieurs dizaines voire centaines de grammes. Leur énergie étant, dans ces conditions, supérieure à 400 J, il est considéré que tous les éclats de ces munitions sont létaux à courte distance. Dans ces conditions, la probabilité de létalité est égale à la probabilité d'atteinte :

$$P_{\text{létalité}}(R) \approx P_{\text{atteinte}}(R) \approx \frac{3NS_z}{4\pi R^2}$$

Où $R \approx \sqrt{\frac{3NS_z}{4\pi P_{\text{létalité}}(R)}}$ (1) avec N le nombre total d'éclats

4. Rayon des zones d'effet projection Z1 à Z4 :

L'étendue des zones d'effet projection est calculée à partir de l'équation (1) ci-dessus en considérant les seuils de

⁷ Equivalent TNT de la poudre noire de 0,5

⁸ Sauf dans le cas où le rayon minimal R3 (25m) serait enveloppe des distances obtenues

⁹ Masse du projectile hors chargement en poudre noire

¹⁰ Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shells, Gurney, R.W., Report BRL 405, (1943)

létalité définis pour ces zones dans l'arrêté dépollution (tableau 2). A titre d'exemple, dans le cas du projectile de 75 mm chargé en poudre noire (tableau 1), on obtient pour la Z3 : $R_3 \approx \sqrt{\frac{3 \times 25 \times 0,56}{4 \times \pi \times 0,01}} \approx 19 \text{ m}$ avec $N = 25$ fragments⁴ et $P_{\text{létalité}}(R3) = 0,01$

- Zones d'effets souffle et thermique

Les effets de souffle⁷ et thermique sont calculés en appliquant les formules forfaitaires de la circulaire du 20 avril 2007.

- Zones d'effets Z1 à Z4

Les distances retenues pour les zones d'effets Z1 à Z4 sont enveloppes :

- des effets de projection ;
- des effets souffle et thermique ;
- des rayons minimaux des zones d'effets définis dans l'arrêté dépollution ;

et sont arrondies à la dizaine de mètres supérieure⁸.

Calcul de la zone limite de portée (ZLP)

La zone limite de portée est définie par la distance maximale de projection des éclats. De manière générale, cette distance est calculée au moyen de codes de balistique extérieure sur la base des dimensions du fragment de masse maximale (hors culot et ogive), de sa vitesse et de ses propriétés aérodynamiques. Une attention particulière doit être apportée au choix de ces paramètres afin notamment d'être représentatif de la forme parallélépipédique de ce fragment.

Un jeu de données appliqué à l'obus de 75 mm⁴ est présenté, à titre d'exemple, dans le tableau 3. Il peut également servir de référence pour la validation des modèles de calcul de trajectoire utilisés dans le cadre des études de dépollution pyrotechnique.

Caractéristiques projectile	Diamètre = 75 mm Ratio masse projectile ⁹ / masse de poudre noire = 11,25
Caractéristiques chargement	Masse de poudre noire = 425 g Masse (en éq. TNT) = 212,5 g Vitesse de Gurney ¹⁰ $\sqrt{2E} = 700 \text{ m/s}^{11}$
Caractéristiques fragment de masse maximale	Masse = 800 g Épaisseur = 10 mm Côté ¹² = 101 mm
Données aérodynamiques	Vitesse ¹³ = 204 m/s Cx = 1,08 Facteur de densité balistique = 2,88 g.cm ⁻³
Portée calculée = 543 m pour un angle initial de 31°	

Tableau 3 : Cas de référence pour le calcul de la limite de portée des fragments (obus de 75 mm chargé en poudre noire)

¹¹ Cette vitesse de Gurney est conservative par rapport à la valeur calculée à partir des résultats d'essais de la publication de Crull⁴ mais prend en compte l'utilisation, lors de ces essais, d'un amorçage de circonstance favorisant une fuite des gaz par l'orifice de passage du détonateur.

¹² Calculé en considérant un fragment de section carrée

¹³ Calculée en appliquant la formule de Gurney



Exemple d'application

L'application de la méthodologie présentée dans cet article donne, dans le cas d'un obus de 75 mm chargé en poudre noire, les zones d'effets suivantes :

Effet	Rayon (m) des zones d'effets				
	Z1	Z2	Z3	Z4	ZLP
Projection	3	9	19	34	543
Souffle	3	5	9	14	
Thermique	2	3	4	5	
Distances minimales de l'arrêté dépollution	10	20	25	30	50
Distances retenues obus de 75 mm (poudre noire)	10	20	25	40	550
Distances arrêté dépollution obus de 75 mm (TNT)	10	30	50	70	520

Tableau 4 : Rayons des zones d'effets en terrain nu et plat d'un obus de 75 mm chargé en poudre noire (masse de matière active = 425 g) et comparaison avec un obus chargé en TNT

Les rayons des zones d'effets Z1 à Z4 sont significativement inférieurs à ceux d'un obus de même calibre chargé en TNT (tableau 4). Le rayon de la ZLP est en revanche plus grande, la relative faible vitesse des fragments étant compensée par leur masse significativement supérieure.

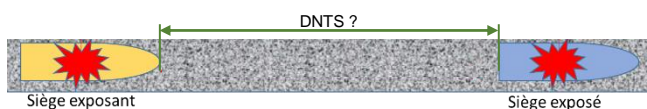
A suivre

La méthodologie présentée dans cet article s'applique au calcul des zones d'effets d'une munition historique chargée en poudre noire en terrain nu et plat. Elle sera complétée, dans une prochaine lettre de l'IPE, par les configurations d'une munition avec écran de protection ou enterrée.



Opérations de dépollution pyrotechnique : Transmission de la détonation par le sol

La lettre de l'IPE n°36 indiquait dans un article consacré à la prise en compte du risque d'une transmission de détonation lors des chantiers de dépollution pyrotechnique que les formules empiriques issues de la circulaire interministérielle du 20 avril 2007 DPPR/SEI2/IH-07-0111 relative à l'application de l'arrêté du 20 avril 2007 fixant les règles relatives à l'évaluation des risques et à la prévention des accidents dans les établissements pyrotechniques, n'était pas les plus pertinentes car souvent utilisées en dehors de leur domaine d'emploi. En effet, ces formules sont applicables en champ libre, c'est-à-dire en terrain plat et sans protection particulière. Les conditions sur les chantiers de dépollution sont multiples et ne peuvent donc pas se résumer ou être assimilées à ce seul cas.



Distance de non transmission simultanée (DNTS)

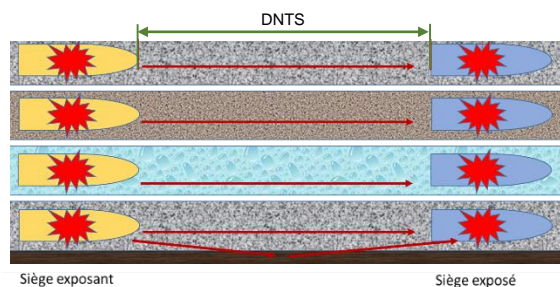
A l'occasion d'un chantier de dépollution, le CEA a réalisé une étude bibliographique¹ permettant de se réapproprier

¹ Communication personnelle CEA/DAM

les connaissances techniques nécessaires à l'éclairage de la problématique. Cette bibliographie s'appuie notamment sur des documents américains² en source ouverte.

La question de la transmission par le sol, c'est-à-dire l'interaction possible entre une munition donneuse enterrée ou non vis-à-vis d'une autre munition receveuse elle-même enterrée ou non, reste complexe et une réponse différente peut être apportée selon la configuration étudiée. Cette réponse dépend de plusieurs facteurs dont :

- la nature du milieu (sol, eau...) et sa densité (plus le sol est dense plus la propagation de l'onde de choc est rapide) :

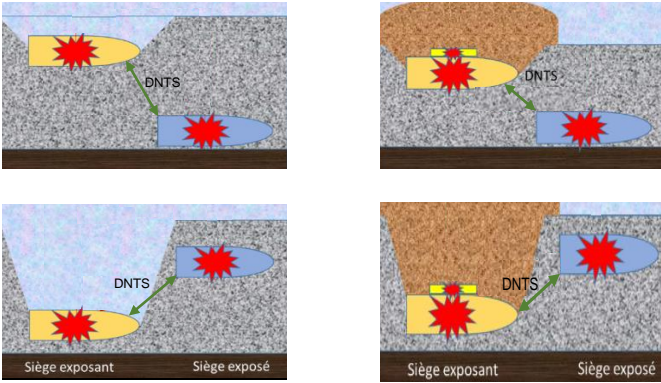


Nature du sol (sec, mouillé, fragmenté, organisé en couches induisant des réflexions...)

² DoD 6055-09 édition 2019

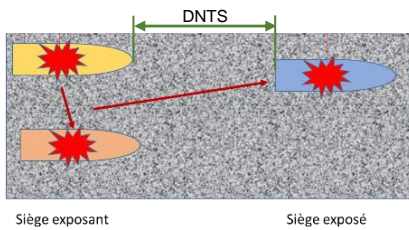


- les différentes configurations envisageables et rencontrées sur le terrain :



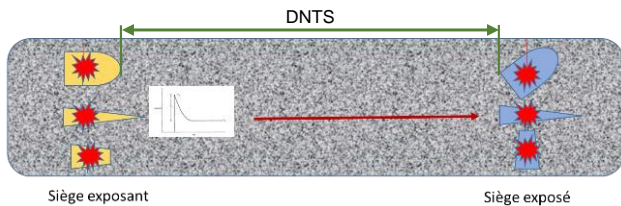
Positions relatives des sources et cibles (situations d'excavation et de pétardage)

- l'effet relais c'est-à-dire la possibilité d'un cumul potentiel d'une munition donneuse ou receveuse qui interagirait avec une munition masquée interagissant elle-même avec une des deux autres munitions :



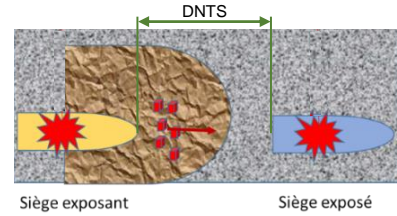
Cumul de sources (munition masquée)

- la nature des munitions, de ses constituants (matériaux pyrotechniques, type d'enveloppe, système d'amorçage...), de son état de conservation (ou de dégradation) :



Nature des munitions (types d'explosif, classes de masse...), nature des cibles (dont attitude dans l'espace), effet induisant l'initiation (éclats, réaction de la fusée...), influence du vieillissement

- les scénarii de transmission, directe ou indirecte par le sol ou à l'air libre soit par onde de choc ou par projection, ces deux éléments pouvant se cumuler ou se confondre (cas de l'écaillage de la roche à proximité du receveur dû à l'onde de choc).



Effets couplés surpression et éclats (incluant l'écaillage d'une roche...)

Il convient également de s'interroger sur la notion de champ libre et/ou de munition enterrée. Selon l'état de l'art, il est admis que les effets sont différents de ceux à l'air libre lorsque la charge est enterrée à une profondeur : $Z > 0,1Q^{1/3}$ (Q en kg et Z en m). Ainsi, pour une profondeur plus faible, il convient d'appliquer les formules champ libre.

Pour des profondeurs plus grandes, les principes suivants issus des travaux OTAN³ peuvent être appliqués pour calculer la distance de non transmission :

Extrait AASTP-1 (§ 3.3.3 de la section III – distances entre chambres - Prévenir les dommages majeurs dus aux éclats de roche) :

a. La distance de séparation entre chambres est la plus courte distante (épaisseur roche/béton) entre deux **chambres**. Lorsqu'une explosion se produit dans une chambre donneuse, une onde de choc se propage à travers la roche environnante. L'intensité du choc décroît avec la distance. Lorsque les distances de séparation entre chambres sont faibles, le choc peut être suffisamment violent pour faire éclater les parois rocheuses ou en béton des chambres receveuses.

b. Dans le cas d'une roche dure et en l'absence de tout dispositif de protection artificiel particulier, la distance entre chambres D_{cd} minimale requise pour empêcher **tout risque majeur d'endommagement à cause des éclats** dépend de la densité de chargement de la chambre (γ) :

$$D_{cd} = 1,0 \times Q^{1/3} \quad (\gamma \leq 50 \text{ kg.m}^{-3}) \quad (1)$$

et

$$D_{cd} = 2,0 \times Q^{1/3} \quad (\gamma > 50 \text{ kg.m}^{-3}) \quad (2)$$

c. Dans le cas d'une roche tendre (voir alinéa 3.3.4.3.), et quelle que soit la densité de chargement, la distance de séparation sera égale à :

$$D_{cd} = 1,4 \times Q^{1/3} \quad (3)$$

Par ailleurs, pour statuer sur le caractère simultané de la transmission, il faut que le délai entre la détonation du donneur et du receveur soit suffisamment court pour **permettre une coalescence des effets**. D'après les données bibliographiques², cette durée maximale peut être évaluée à : $t_c = 0,005 Q^{1/3}$. Ainsi, pour un temps de parcours de l'onde inférieur à t_c , la réaction est simultanée.

³ AASTP-1 Edition B Version1 chapter III-3-3 – cas des stockages souterrains



Le temps de parcours de l'onde s'écrit :

$$t = d / V \quad \text{avec}$$

V la célérité de l'onde dans le sol⁴

d la distance entre les munitions

A la limite de transmission, on a $t_{nt} = d_{nt} / V$ avec d_{nt} définie par les équations (1) à (3). Ainsi, la transmission est simultanée à condition que $t_{nt} < t_c$.

Par exemple :

- Pour une densité de charge faible dans un sol dur pour lequel la vitesse de propagation de l'onde sismique est de l'ordre de 4000 m/s alors le temps de non transmission peut être estimé à :

$$t_{nt} = d / V_{nt} \text{ soit } t_{nt} = 1 Q^{1/3} / 4000 = 0,00025 Q^{1/3} ; \text{ c'est-à-dire très inférieur à } t_c.$$

Dans ce cas, quelle que soit la charge explosive située à une distance inférieure à $1 Q^{1/3}$, il sera considéré un fonctionnement simultané.

- Pour une densité de charge élevée dans un sol dur pour lequel la vitesse de propagation de l'onde sismique est de l'ordre de 4000 m/s alors le temps de non transmission peut être estimé à :

$$t_{nt} = d / V_{nt} \text{ soit } t_{nt} = 2 Q^{1/3} / 4000 = 0,0005 Q^{1/3} ; \text{ c'est-à-dire très inférieur à } t_c.$$

Dans ce cas, quelle que soit la charge explosive située à une distance inférieure à $2 Q^{1/3}$, il sera considéré un fonctionnement simultané.

- Quelle que soit la densité de charge dans un sol peu dur pour lequel la vitesse de propagation de l'onde sismique est de l'ordre de 1400 m/s alors le temps de non transmission peut être estimé à :

$$t_{nt} = d / V_{nt} \text{ soit } t_{nt} = 1,4 Q^{1/3} / 1400 = 0,001 Q^{1/3} ; \text{ c'est-à-dire inférieur à } t_c.$$

Dans ce cas, quelle que soit la charge explosive située à une distance inférieure à $1,4 Q^{1/3}$, il sera considéré un fonctionnement simultané.

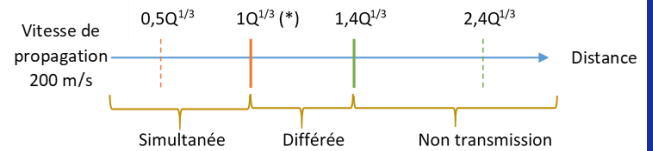
- Quelle que soit la densité de charge dans un sol peu dur pour lequel la vitesse de propagation de l'onde sismique est de l'ordre de 200 m/s alors le temps de non

transmission peut être estimé à :

$$t_{nt} = d_{nt} / V \text{ soit } t_{nt} = 1,4 Q^{1/3} / 200 = 0,007 Q^{1/3} ; \text{ c'est-à-dire supérieur à } t_c.$$

Dans ce cas, quelle que soit la charge explosive distante de $1,4 Q^{1/3}$, il ne sera pas considéré de fonctionnement simultané. La condition de coalescence est en revanche respectée pour certaines distances (d_c) inférieures à $1,4 Q^{1/3}$: $d_c = V \times t_c = 200 \times 0,005 Q^{1/3} = 1 Q^{1/3}$

Pour un sol peu dur ($V = 200$ m/s), les distances de protection et les possibilités de transmission pourraient être représentées ainsi :



(*) : $= 200 \times 0,005 Q^{1/3}$ c'est-à-dire la limite de coalescence

Distances de transmission ou non

dans le cas d'un sol peu dur ($V = 200$ m/s)

En conclusion, les formules d'évaluation de la transmission simultanée utilisées pour des munitions en champ libre ne sont pas nécessairement les plus adaptées dans le cas d'objets enterrés et les distances de transmission sont à analyser en tenant compte de la nature du sol. Par ailleurs, le caractère simultané ou non de cette transmission est à étudier sur la base de la vitesse de propagation des ondes de choc dans le sol et peut conduire à un décalage en temps entre la détonation du donneur et du receveur, résultant en une réaction différée.

Dans l'absolu, ces résultats pourraient laisser penser également que la prise en compte des seules distances en champ libre de la circulaire du 20 avril 2007 est protectrice. Toutefois, la sensibilité des objets due à la sensibilité des matériaux énergétiques les constituant et à leur état de conservation ainsi que l'incertitude du diagnostic notamment ne sont pas prises en compte ici. A ce titre, il conviendra dans les études de sécurité pyrotechnique de rester conservatif.

En revanche, ces éléments montrent qu'une analyse des risques plus fine peut être réalisée pour les dépollutions dans un environnement complexe comme par exemple des sites sur lesquels des stocks ont été enfouis ou immergés.

⁴ Exemples de vitesses de propagation des ondes (extrait de « Géophysique appliquée à l'hydrogéologie », Jean-Louis Astier, Edition Masson)

Formations	Vitesse (km/s)
Air	0,33
Eau douce	1,45
Vases	0,2-0,6
Couche superficielle meuble et sèche (weathered zone)	0,2-0,6
Alluvions sèches	0,6-1,2
Alluvions humides	1,6-2,4
Argiles	1,8-2,2
Tufs volcaniques	1,8-2,5
Marnes, Craie	2-3
Grès	2-3,5
Laves	2,5-4
Calcaires et dolomies	3-5
Schistes, micaschistes	3-4,5
Gneiss, quartzites	3,5-5
Granite	4-6



Accompagnement des unités de cyno-détection d'explosifs (CYNODEX)



Cet encart a été rédigé par le Secrétariat général de la Défense et de la Sécurité nationale (SGDSN) en lien avec le ministère de l'Intérieur et des Outre-mer.

Le code des transports permet depuis trois ans aux opérateurs de transports ferrés et guidés d'employer des unités cynotechniques privées pour la détection d'explosifs (CYNODEX). Le code de la sécurité intérieure (CSI) inscrit cette activité CYNODEX dans les missions de la sécurité privée, pour l'ensemble du territoire national (en dehors du domaine aérien au sens de l'aviation civile qui est réglementé au niveau européen). A compter du 01/01/2023 les équipages actuellement déployés dans le domaine ferroviaire devront être certifiés par l'État. Les textes CSI (encore en cours d'élaboration) devraient imposer cette obligation pour tous en 2023. Elle permettra à l'ensemble des opérateurs français (activités sensibles, événementielles, parcs d'attraction...) d'employer des unités CYNODEX aux performances certifiées dans le cadre d'un référentiel commun et unique.

Le ministre de l'Intérieur et des Outre-mer est l'autorité certificatrice responsable de l'encadrement du dispositif national. Il a confié à la *direction générale de la police nationale* (DGPN) la responsabilité d'organiser les épreuves de certification dans des environnements au plus proche de la réalité opérationnelle au sein d'un centre d'examen implanté sur le site de Biscarrosse.

Dès le 1^{er} janvier 2023, le centre national de certification CYNODEX (CN CYNODEX) s'appuiera sur des ressources interministérielles d'évaluateurs en cyno-détection des explosifs (gendarmerie, armées, administration pénitentiaire...) pour évaluer les compétences des équipages privés de sécurité CYNODEX.

Pour participer à une protection efficace, le chien d'une unité CYNODEX doit être formé et régulièrement entraîné à détecter les odeurs de « matières explosives ». La liste des odeurs d'intérêt (liste CYNODEX) est désormais disponible pour les acteurs justifiant du besoin d'en connaître auprès du *service central des armes et des explosifs* (SCAE) du *ministère de l'Intérieur et des Outre-mer* – scae-cynodex@interieur.gouv.fr.

A cet effet, en tant que fabricant et distributeur d'une ou plusieurs matières de la liste CYNODEX vous pourriez être prochainement sollicités par les centres de formation et/ou sociétés cynotechniques privées qui souhaitent acquérir des « échantillons ». Un effort de tous les professionnels sollicités est demandé pour satisfaire dans les meilleures conditions ces besoins.

Alors qu'un cadre juridique facilitant le stockage, le transport et la manipulation de ces échantillons est en cours d'examen par les services de l'Etat, leur acquisition et leur détention restent à ce stade soumises aux règles actuelles du code de la défense, du code du travail et du code de l'environnement (ICPE et TMD).

Quelques références réglementaires :

Loi n°2019-1428 du 24 décembre 2019 d'orientation des mobilités, notamment l'article L1632-3 du code des transports

Loi n°2021-646 du 25 mai 2021 du code de sécurité intérieure, notamment l'article L613-7-1A

Décret n° 2021-1590 du 7 décembre 2021 portant création d'un service à compétence nationale dénommé « centre national de certification en cyno-détection des explosifs (CYNODEX) »

Arrêté du 22 août 2022 fixant la liste des matières explosives pour les unités CYNODEX





Détection incendie dans les locaux pyrotechniques

L'analyse de l'accidentologie dans le domaine de la pyrotechnie nous indique que les incendies sont souvent une conséquence des événements pyrotechniques mais ils peuvent également être à l'origine de ceux-ci (par exemple, incendie d'un local technique qui se propage à une zone comportant des objets ou matières pyrotechniques).

Depuis plusieurs années, l'IFE constate à travers l'instruction des études de sécurité pyrotechniques du travail et les inspections menées (sites pyrotechniques étatiques et industriels...) que l'implantation de la détection incendie dans les locaux des sites pyrotechniques est variable.

L'IFE a donc estimé qu'une réflexion sur le sujet était nécessaire afin de dégager une doctrine. Elle a décidé dans un premier temps de lancer un Groupe de Travail (GT) au sein du ministère des armées.

Ce GT a été l'occasion de faire un bilan sur les différents attendus de la réglementation actuelle dans le but de proposer une aide à la décision en fonction du type de local concerné (stockage, atelier de fabrication...) et des matières/objets pyrotechniques présents.

Objectifs d'une détection incendie

L'implantation d'une détection automatique d'incendie permet de détecter utilement et au plus tôt un départ d'incendie. Cette détection doit permettre *in fine* d'alerter :

- les autres personnes présentes dans l'installation ;
- les services de secours (Equipes de première/seconde intervention, SDIS¹...) et déclencher le Plan d'Opération Interne (POI) voire le Plan Particulier d'Intervention (PPI) ;
- les riverains et les travailleurs pour évacuation ;
- et de limiter/éviter les effets dominos intra/inter installations (en déclenchant par exemple un système d'extinction automatique pour limiter la propagation de l'incendie).

Difficultés observées sur le terrain

Sur le terrain, il apparaît que les lieux de stockage de substances et objets pyrotechniques (igloos, magasins de surface, magasins souterrains, ouvrages fortifiés enterrés...), les ateliers/laboratoires, n'accueillent pas systématiquement une Détection Automatique d'Incendie (DAI) et que les doctrines d'implantation de ces DAI diffèrent selon les employeurs/chefs d'organismes.

Par ailleurs, des questions se posent sur :

- la technologie de ces DAI selon la cinétique incendie estimée (fumées, augmentation de température, détecteur ponctuel ou linéaire...) ;
- la fiabilité variable des détecteurs (problème de transmission, fausse alarme...) ;
- le report d'alarme des DAI (dans un local où la présence de personnel devrait être permanente en vue d'alerter les secours) ;
- le maintien en condition opérationnelle (MCO) des Systèmes de Détection Incendie (SDI) ;
- le coût d'installation et de MCO des SDI.

Enfin, l'implantation de détecteurs génère certaines contraintes : il est nécessaire d'intervenir dans les locaux contenant de la matière pyrotechnique lors des phases d'installation et de maintenance particulières. Par ailleurs, l'implantation d'une détection incendie constitue dans certains cas une nouvelle source de risque à considérer (alimentation électrique constituant elle-même un risque d'incendie...).

Réglementation et normes

Concernant le risque incendie affectant les locaux accueillant les substances et objets pyrotechniques, la réglementation actuelle découle du code du travail et du code de l'environnement. Cette réglementation est actuellement composée des textes suivants :

- code du travail (articles R4462-1 à 36) ;
- arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n°4210 ;
- arrêté du 29 février 2008 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées soumises à déclaration sous la rubrique n°4220 ;
- arrêté du 29 juillet 2010 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique n°4220 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement ;
- arrêté du 4 octobre 2010 relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation (modifié par l'arrêté du 28 février 2022).

¹ Service Départemental d'Incendie et de Secours



Proposition d'une méthodologie pour la détermination du besoin d'implantation de la détection incendie

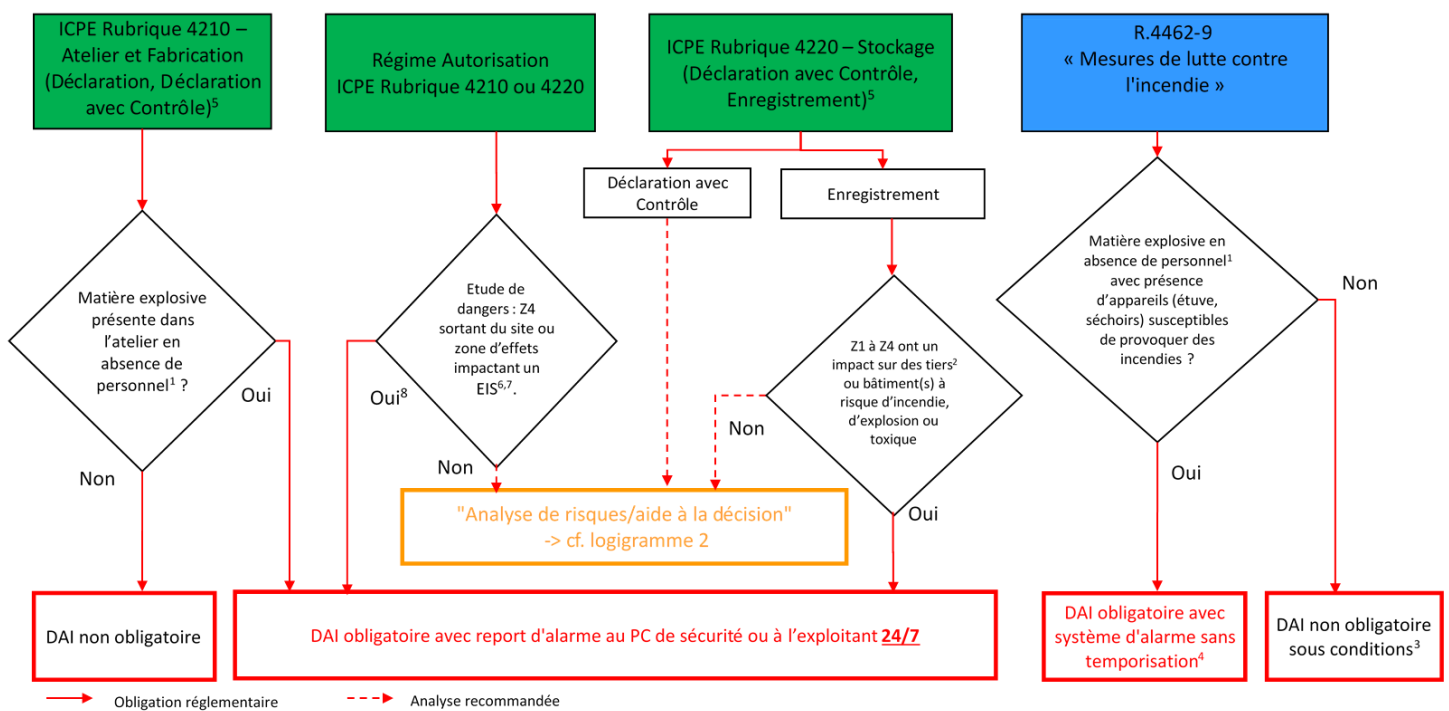
Avec les informations présentes dans la réglementation et les différents guides (Guide défense de bonnes pratiques en Pyrotechnie, guide SFEPA, OTAN...), les participants du GT incendie ont proposé la logique suivante d'implantation de la détection incendie.

Cette logique se décompose en deux logigrammes.

Le premier, présenté ci-après, est une compilation des exigences réglementaires issues du code de l'environnement (CdE) et du code du travail (CdT). Selon les caractéristiques du local pyrotechnique (ICPE² sous les rubriques n°4210 et 4220) et de la nature des activités exercées, le choix d'implanter une détection incendie dans le local concerné peut être :

- obligatoire :
 - o avec la mise en place d'un système d'alarme sans temporisation ;
 - o avec un report d'alarme au PC de sécurité ou à l'exploitant 24/7 ;
- jugé non obligatoire (et dans certains cas « sous conditions ») ;
- basé sur une analyse de risques (cf. logigramme 2).

² Installation classée pour la protection de l'environnement



¹ Privilégier la présence d'au moins 2 personnes en simultanée. Si la réponse est non, l'exploitant devrait s'engager par écrit (par exemple, prise en compte de l'exécution d'une opération dans un autre lieu, des pauses déjeuner...) : l'hypothèse est que la personne présente donne l'alarme. Pour plus de robustesse, une seconde personne pourrait assurer cette fonction.

² Tiers : personne(s) située(s) à l'extérieur de l'établissement exploité

³ DAI non exigée si l'incendie ne peut ni s'étendre à des installations voisines, ni amorcer d'événement pyrotechnique, ni provoquer de projections dangereuses ou le dégagement de quantités dangereuses de gaz ou de vapeurs toxiques

⁴ Report d'alarme au PC de sécurité ou à l'exploitant 24/7 non exigé mais fortement recommandé

⁵ ICPE n°4210 relevant du régime de la déclaration ou déclaration avec contrôle (arrêté ministériel de prescriptions générales du 12 décembre 2014) ; ICPE n°4220 relevant du régime de l'enregistrement (arrêté ministériel de prescriptions générales du 29 juillet 2010 ; ICPE n°4220 relevant du régime de la déclaration avec contrôle (arrêté ministériel de prescriptions générales du 29 février 2008)

⁶ EIS : Equipement Important pour la Sécurité

⁷ Article 55 de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié : si le dépôt de la demande d'autorisation est antérieur au 1/09/2022, les travaux de mise en conformité sont à effectuer avant le 01/01/2026.

⁸ Article 55 de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié : dans le cas des EIS (par exemple, local des alimentations de secours, local de la pomperie incendie...), le report d'alarme au PC de sécurité ou à l'exploitant 24/7 est non exigé mais fortement recommandé.

Logigramme 1 - Obligations réglementaires : CdE et CdT



Le second logigramme ci-après constitue une aide à la décision pour l'implantation de DAI basée sur une analyse de risques. Cette approche ne revêt aucunement un caractère réglementaire. Elle peut être considérée comme un outil pour l'exploitant lui

permettant d'orienter sa réflexion sur la mise en place ou non de détection automatique d'incendie (dans le cadre de rénovations, de nouvelles constructions ou dans une finalité d'améliorer la maîtrise du risque incendie). Dans ce logigramme, l'analyse doit porter en premier lieu sur l'absence potentielle de personnel dans un local contenant de la matière explosive. Cette première question a deux origines :

- il s'agit d'un critère réglementaire ;
- il est raisonnable de penser qu'une personne formée³ dans un atelier est capable de détecter un départ d'incendie et d'assurer son rôle d'alerte.

Dans la suite du déroulement de ce second logigramme, il a été identifié quatre questions importantes :

1/ En cas d'évènement pyrotechnique dans le local, existe-t-il un risque d'agression sur des bureaux, locaux à sommeil, bâtiments à étages, ou sur des installations environnantes (effets dominos), des tiers (par exemple, établissements recevant du public), ou une zone sensible d'un point de vue environnemental (par

exemple, captage d'eau destinée à la consommation humaine) ?

2/ Existe-t-il des munitions présentant un risque particulier (objets et substances dégradés, effets toxiques qui nécessitent une intervention particulière) ?

3/ Existe-t-il des sources d'ignition associées à une Densité de Charge Calorifique élevée (DCC) dans le local ?

4/ Existe-il un risque d'agression incendie caractérisé provenant de l'extérieur (local technique, végétation) ?

Il doit être pris en considération qu'aucun seuil n'a été défini compte tenu de la diversité des situations et des activités. Ces questions restent une aide à l'analyse et à une réflexion argumentées.

Dès lors qu'un « oui » est apporté à l'une des 4 questions ci-dessus, les membres du GT recommandent qu'il y ait implantation de DAI avec report d'alarme au PC de sécurité ou à l'exploitant 24 h/24 et 7 J/7.

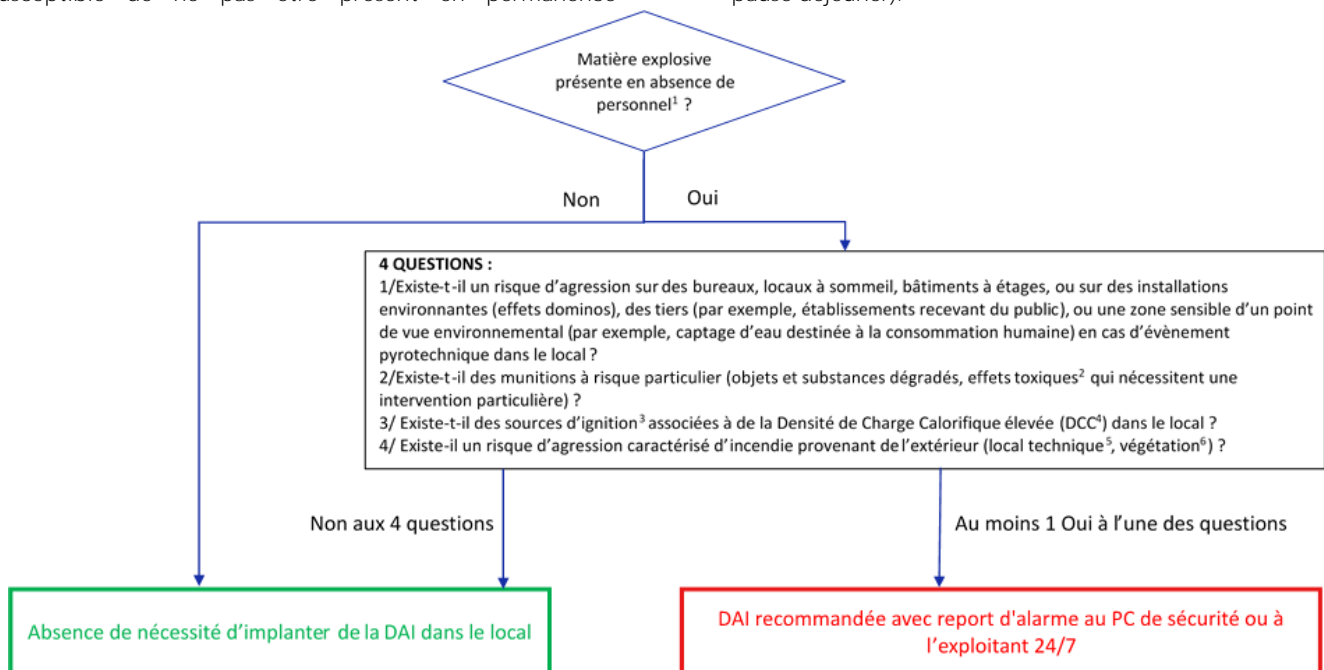
Comme précisé auparavant, cette démarche ne revêt aucunement un caractère réglementaire mais oriente **fortement l'exploitant sur la pertinence ou non d'implanter de la détection incendie dans son local.**

Perspective

La réflexion va se poursuivre sur la logique de levée de doute en cas de détection et sur la doctrine d'intervention en cas d'incendie en zone pyrotechnique.

³ La réflexion doit intégrer les situations où le personnel est susceptible de ne pas être présent en permanence

(par exemple, exécution d'une opération dans un autre lieu, pause déjeuner).



¹ Privilégier la présence d'au moins 2 personnes en simultanée : ces personnes doivent pouvoir alerter le PC ou l'exploitant en cas d'incendie. L'exploitant devrait s'engager par écrit (par exemple, prise en compte de l'exécution d'une opération dans un autre lieu, des pauses déjeuner...).

² Exemples : munitions contenant du phosphore, de l'uranium appauvri, de l'oxyde de propylène...

³ Sources d'ignition : éclairages, installations électriques BT ou HT (basse ou haute tension), câbles électriques, étuves, séchoirs... sauf si matériel ATEX/Antidéflagrant ou TBT (très basse tension)

⁴ DCC apportée par l'infrastructure et les moyens de mise en œuvre : PVC, bois, solvants, cartons, polyéthylène, nappes de câblages électriques (hors C1/CR1)...

⁵ Existe-t-il une sectorisation feu suffisante entre le local concerné (≥REI60) et le local source d'incendie ? Les éléments coupe-feu sont-ils en bon état (portes, trappes, trous non rebouchés...) ?

⁶ L'extérieur est-il débroussaillé et entretenu, sans risque caractérisé d'agression thermique ?



Approche OTAN en sécurité pyrotechnique : les dernières évolutions

Le corpus réglementaire de l'OTAN en matière de sécurité pyrotechnique des munitions est constitué de deux grandes familles de standards :

- les standards dits *d'aptitude au service et à la sécurité des munitions ou S3*, orientés sécurité intrinsèque et qualification et fondés sur l'idée que le moyen le plus efficace de contrôler les dangers est de les identifier et les réduire voire d'en éliminer certains au stade de la conception par l'ingénierie. Ils servent de base à l'élaboration des logiques de qualification des systèmes ;
- les standards dits *de management du risque résiduel*, orientés sécurité d'utilisation et phases logistiques, où l'on s'attache par un certain nombre de directives et règles techniques à rendre acceptables par le commandement, les conséquences induites sur les personnels et les biens en cas d'accident pyrotechnique impliquant les munitions. L'action majeure en est la maitrise du potentiel d'escalade de l'accident initiateur par le choix de dispositions constructives pertinentes pour les installations ou sièges possibles d'activités humaines situés dans son environnement.

Les standards S3 (Safety and Suitability for Service)

Ils sont élaborés par des groupes d'experts internationaux au sein de l'*Ammunition Safety Group*¹ de la Conférence des Directeurs Nationaux de l'Armement (CNDA) et concernent la qualification des matériaux énergétiques, des dispositifs d'initiation ainsi que la sécurité d'un point de vue système pour la munition. Ratifiés pour l'essentiel par la France et de facto référencés dans la plupart des contrats d'acquisition, ils ont permis de disposer de munitions plus sûres, mieux conçues et contribuent au fait qu'elles représentent de nos jours moins de 2 à 3 % des accidents au sein de l'Alliance avec des conséquences souvent réduites.

Il existe cependant un certain nombre de débats au CASG et au comité directeur du MSIAC (Munitions Safety Information and Analysis Center), ravivés par la situation en Ukraine, sur l'incapacité dans certaines situations et pour certaines nations de conduire leurs évaluations et leurs analyses de risques dans le strict respect de la norme.

Ces questionnements rassemblés sous l'initiative « Non Conventional or Novel S3 Assessment » portée en 2022 à l'OTAN par le Royaume-Uni et la Belgique avec le soutien du MSIAC concernent :

- l'acquisition des munitions qui posent un risque modéré du fait d'une conception simple et robuste ou contenant de petites quantités de matières énergétiques ;
- la réduction des cycles d'acquisition et de qualification pour répondre aux exigences opérationnelles ;
- la sélection de stratégies d'approvisionnement où les données pour valider au sens de la norme l'aptitude au service seront lacunaires ;
- la mise en œuvre de munitions dans des systèmes ou plateformes de pays différents ;
- les démonstrations relatives à l'aérotransportabilité, la durée de vie et l'homologation des matières explosives.

Ils feront l'objet de développements complémentaires dans les prochaines lettres de l'IPE.

Les standards AASTP² de management du risque résiduel

Les textes de référence sont construits et mis à jour régulièrement au sein du CASG. On trouve les standards majeurs suivants, ratifiés par la France et dont l'IPE est le pilote national :

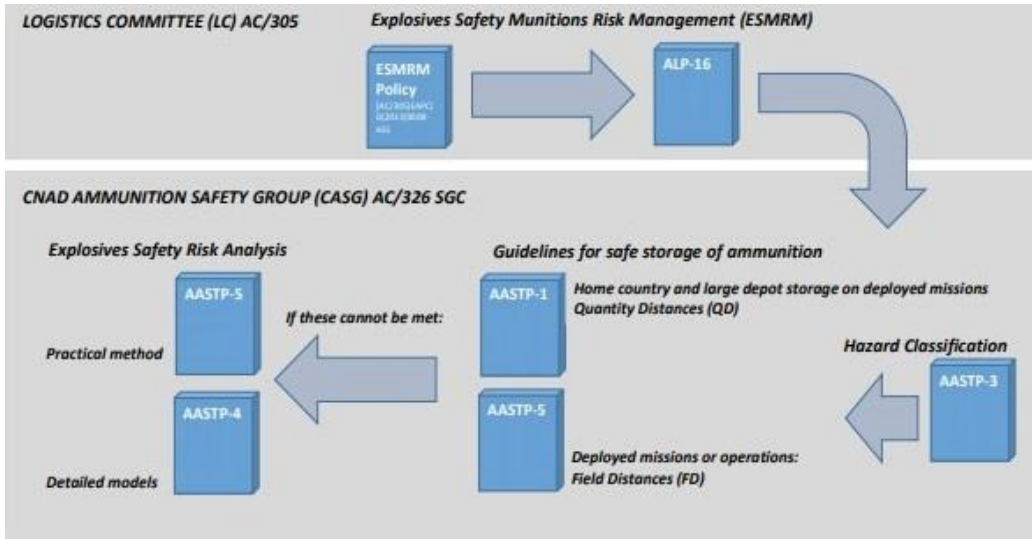
- AASTP-1 édition C version 1 – 2022 en cours de ratification – Directives OTAN pour le stockage des munitions et explosifs militaires ;
- AASTP-3 édition B version 1 – Principes pour la classification des munitions et explosifs militaires ;
- AASTP-4 édition 1 – Manuel sur l'évaluation quantitative du risque pyrotechnique ;
- AASTP-5 édition 1 – en cours de révision – Directive OTAN relative au stockage, maintenance et transport des munitions en opérations extérieures.

Le lien avec les opérationnels du comité logistique de l'OTAN et l'assurance de leur implémentation effective sont assurés conformément au schéma ci-dessous via le projet ESMRM (Explosive Safety Munition Risk Management³) auquel participent les Forces.

¹ CNAD Ammunition Safety Group (CASG)

² Allied Ammunition Storage and Transport Publication – Publication interalliée sur le stockage et le transport des munitions

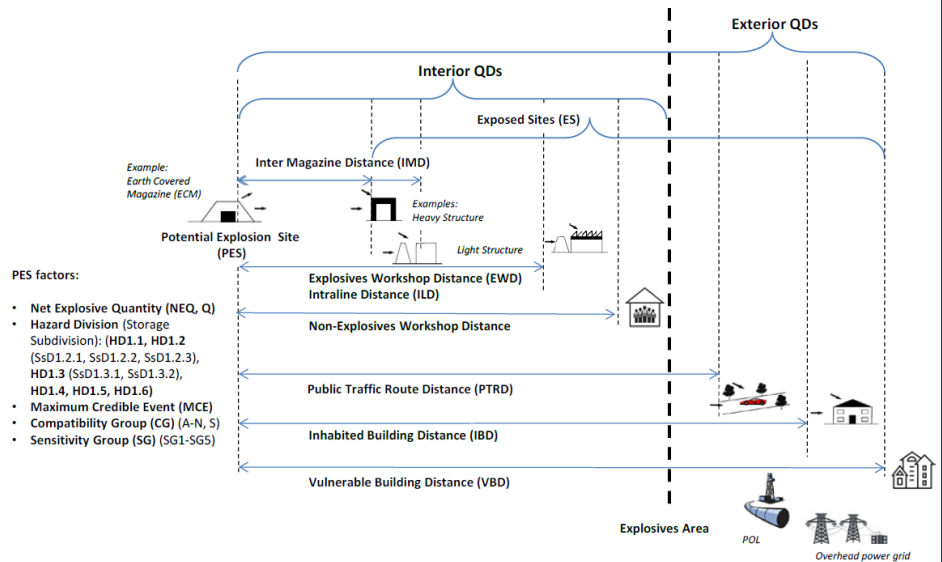
³ Sécurité des explosifs et gestion des risques liés aux munitions



Standards AASTP et politique ESMRM

L'année 2022 a vu la finalisation très attendue de la dernière version de l'AASTP-1, document pivot définissant les règles à suivre pour gérer la sécurité pyrotechnique des munitions en matière de :

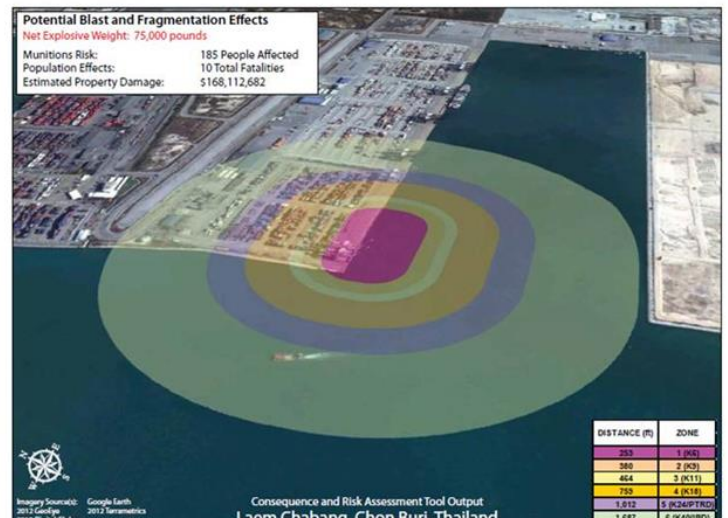
- classification, mélange et agrégation des classes de danger, définition des distances de sécurité (QD) pour les stockages en surface, distances de sécurité aux produits inflammables et aux installations électriques ;
- dispositions constructives et directives opérationnelles relatives aux magasins de stockage des munitions et aux installations pyrotechniques (barricades, dangers électromagnétiques et électrostatiques, lutte contre le feu) ;
- stockage souterrain et dispositions de sécurité relatives aux installations avec des systèmes missiles positionnés, aux bases aériennes et ports militaires.



Distances de sécurité de l'AASTP-1

Principales évolutions de l'AASTP-1

Si les règles déterministes, dites tables QD (quantité – distances) restent la base pour assurer une implantation sécuritaire des installations pyrotechniques (les distances minimales d'isolement entre les couples siège exposant *dit PES*⁴ et siège exposé *dit ES*⁵ étant alors respectées), l'approche probabiliste, considérée comme une alternative aux principes des tables QD, peut être envisagée lorsque les distances déterministes ne peuvent pas être respectées. Cette évaluation est à mener selon les méthodologies de l'AASTP-4.



Exemple ESMRM – modélisation quantitative d'un accident

⁴ Potential Explosion Site

⁵ Exposed Site



Les autres points majeurs concernent l'extension des règles techniques aux petites masses (à partir de 1 kg contre 500 kg dans les versions précédentes) et une nouvelle méthodologie de détermination des distances de séparation par l'introduction de

tables spécifiques à chacun des effets potentiellement induits par le type de scénario accidentel à savoir détonation en masse, explosion progressive (type popcorn) ou incendie généralisé. Ces effets et les quantités de matière à prendre en compte sont définis dans le tableau ci-après suivant les classes de danger des objets pyrotechniques.

Effets	Classes de danger						
	1.1	1.2.1	1.2.2	1.2.3	1.3.1	1.3.2	1.6
Souffle (BD)	QNE	MCE		MCE			MCE
Débris/fragments (DFD)	QNE	MCE		MCE			MCE
Projections/fragments PROG 1.2.1 (PD)		QNE					
Projections/fragments PROG 1.2.2 (PD)			QNE				
Thermique 1.3.1 (TD)					QNE		
Thermique 1.3.2 (TD)				QNE		QNE	QNE

Pour les classes de danger 1.2.1, 1.2.3 et 1.6, l'évènement crédible maximum (MCE) représente la fraction de la masse totale retenue en détonation pour le calcul des effets liés au souffle et aux fragments/débris.

QNE : quantité nette d'explosif

Lien entre classes de danger des objets ou matières et effets

Les distances sont définies dans des tables en fonction des couples sièges exposants/sièges exposés et pour chacun des effets. La valeur maximale suivant la classe de danger est à retenir pour déterminer la distance de sécurité.

36 tables ont été définies pour le souffle (BD), 24 pour les débris (DFD), 8 pour les explosions progressives (PD) et 4 pour les effets thermiques (TD). L'établissement de ces nouvelles distances repose sur une exploitation exhaustive et continue des campagnes massives d'expérimentations menées à échelle 1 par l'OTAN depuis vingt ans et du retour d'expérience des accidents. Elles sont donc consolidées par leur alignement sur l'état de l'art technique et scientifique.



Evaluation de l'effet de souffle



Evaluation des effets des projections et débris

Exemples d'expérimentations échelle 1 avec différents types d'infrastructure

L'AASTP-1 édition C version 1 est actuellement dans le processus de ratification des Etats avec un objectif de promulgation en 2023.

Actualité normalisation OTAN sécurité pyrotechnique : STANAG en cours de ratification

Matériaux énergétiques :

- STANAG 4022 Ed5 couvrant AOP-4022 Ed.A V1, « Matériaux énergétiques – spécifications pour l'hexogène » ;
- STANAG 4543 Ed2 couvrant AOP-4543 Ed.A V1, « Matériaux énergétiques – spécifications pour l'ONTA » ;
- STANAG 4147 Ed3 couvrant AOP-4147 Ed.A V1, « Matériaux énergétiques – compatibilité chimique avec les composants des munitions ».

Suivi en service et gestion de la sécurité des munitions en utilisation :

- STANAG 4440 Ed3 couvrant AASTP-1 Ed.C V1, « Directives OTAN pour le stockage des munitions et explosifs militaires ».



La politique MURAT à l'aune du conflit en Ukraine

La politique MURAT, ou MUnitions à Risques ATténués, vise à réduire la vulnérabilité des munitions aux agressions accidentelles ou malveillantes et limiter les effets collatéraux liés à leur initiation intempestive. Cette **politique est partagée par les alliés dans le cadre de l'OTAN** et se base sur le STANAG 4439 et l'AOP-39. Si la première instruction française déclinant cet accord au niveau national date de 1993, la politique MURAT française a été **réaffirmée en 2011 par le délégué général de l'armement au travers de l'instruction ministérielle IM n°211893 qui définit la politique MURAT et en confie le pilotage à l'IPE.**

Réduire la vulnérabilité, c'est s'intéresser, par exemple, à la sensibilité des matières énergétiques, aux dispositifs de déconfinement au niveau architecture (qui permettent aux gaz de réaction de s'échapper des munitions lorsque le chargement actif est initié de manière non nominale), mais également aux barricades, écrans de protection ou emballages. La politique MURAT est donc bien de ce point de vue une approche globale pour limiter le risque pyrotechnique résiduel.

L'absence de rupture technologique récente dans le domaine, les progrès dans la sécurité intrinsèque dus à des standards de conception et de qualification de haut niveau (rendant les accidents rares et souvent aux conséquences modérées), mais aussi quelques difficultés rencontrées sur certains programmes, ont suscité ces dernières années des questionnements plus fréquents sur la pertinence et le sens de cette politique volontariste.

Le conflit en Ukraine donne l'opportunité de se réinterroger sur les objectifs et les moyens de la politique MURAT : les réflexions menées par le ministère des armées français autour de l'économie de guerre, et plus généralement par les pays de l'OTAN, montrent qu'il faut être capable de relancer les chaînes de production et parallèlement diminuer les cycles de production pour disposer d'une quantité importante de munitions inhérente à un schéma d'engagement de haute intensité. L'envoi d'un tiers des stocks américains de missiles Javelin¹ en Ukraine en est une illustration et a justifié un plan de relance fin 2022 aux Etats-Unis de plusieurs milliards de dollars pour reconstituer les stocks et la définition d'outils contractuels novateurs à l'image de l'UCA (*Undefined Contracting Action*).

Si de prime abord, la politique MURAT semble difficilement compatible de ces nouveaux objectifs, les multiples retours d'expérience fournis par l'abondance d'informations provenant du théâtre d'opérations en Ukraine donnent un éclairage qui permet de nuancer ce point de vue : un rapport du MSIAC² (référence L-283, disponible sur le

portail internet du MSIAC) dresse une liste des dommages collatéraux très importants éprouvés par l'armée russe suite à la prise pour cible de ses stockages par l'armée ukrainienne. La perte de son vaisseau amiral en mer Noire, le *Moskva*, est probablement expliquée par des réactions secondaires de munitions dans la plateforme. L'absence de stratégie de contrôle des effets dominos par des ilotages ou barrières et la prédominance dans le stock de munitions détonant en masse (DD 1.1) a obéré une partie significative de leur capacité opérationnelle.



*Explosion du dépôt russe de munitions de Nova Kakhovka
Destruction du dépôt par une succession de détonations
dans la nuit du 11 au 12 juillet 2022*

Il y a donc un enjeu fort de gestion du risque résiduel dans les stockages ou plateformes de combat qui conforte la pertinence de la politique MURAT et valide les choix pragmatiques effectués : si l'effort ne peut être mis sur la conception de la munition, des mesures conservatoires (écrans entre autres) peuvent et doivent quand même être définies pour limiter les conséquences d'un accident.

Les américains ont exprimé un constat similaire lors de l'IMEMTS³ d'octobre 2022 à Indianapolis (Etats-Unis) en réaffirmant l'intérêt de cette politique. Ils ont par ailleurs proposé à la communauté des évolutions pour tenir compte de nouvelles agressions, à l'image des armes non cinétiques, comme les lasers de puissance.

La nouvelle version du standard OTAN AOP-39 valorise quant à elle l'aspect incrémental du concept de MURATisation : une munition à vulnérabilité réduite peut s'obtenir en utilisant des matières énergétiques relativement sensibles (suite à des considérations de coûts ou de délais...) mais qui, une fois intégrées dans des munitions bien conçues ou agencées, permettent de satisfaire à l'ambition recherchée de minimisation du risque.

¹ Hearing to Receive Testimony on the Health of the Defense Industrial Base, Alderson Court Reporting, US Senate (04/2022)

² Munitions Safety Information Analysis Center

³ Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium



L'IPE et les certificats de classement au transport

Parmi son panel d'activités liées à la sécurité pyrotechnique, l'IPE intervient dans le domaine du transport des marchandises dangereuses (TMD) de la classe 1. Cette compétence est notamment rappelée par l'article 13 de l'arrêté TMD du 29 mai 2009 qui précise que l'IPE intervient en tant qu'organisme compétent délégué du ministre chargé des transports. L'IPE est donc régulièrement sollicitée sur des demandes d'approbation de classement au transport au profit des entités du ministère des armées (MINARM), du ministère de l'Intérieur et des Outre-mer ou d'industriels dont les produits intéressent directement ou indirectement le MINARM. Ces approbations se matérialisent par des certificats de classement au transport ou des certificats d'exclusion de la classe 1. Un certificat de classement au transport approuve le classement d'une définition d'un produit dans un ou des emballages donnés.

Pour un traitement rapide et optimal des dossiers, l'IPE rappelle que ces dossiers doivent être les plus complets possibles et cohérents. Il n'appartient pas à l'IPE d'apporter les compléments, même si elle peut disposer d'informations en interne. Les dossiers doivent donc comporter autant que possible une présentation des produits et des constituants pyrotechniques, la méthodologie retenue pour proposer le classement (résultats d'essais suivant les procédures décrites dans les séries ONU, résultats d'essais ou de simulations sur des sous-ensembles ou sur système complet, reconnaissance d'un classement émis par une autre autorité, analogie à un produit similaire déjà classé par l'IPE) ainsi que les éléments essentiels sur l'emballage (certificat d'agrément de type, plan d'aménagement interne et calages). Tous ces éléments concourent à produire un dossier justificatif complet, archivé à l'IPE et qui peut être présenté si besoin à l'autorité compétente française, le ministre chargé des transports.

Les services de l'IPE rappellent donc les éléments à fournir *a minima* :

- nom commercial du produit ;
- référence(s) du produit : référence fabricant, NNO... ;
- description du produit (plan de définition avec les éléments pyrotechniques, principe sommaire de fonctionnement) ;
- description de l'emballage (certificat d'agrément de type, plan d'encaissement) ;
- éléments justificatifs de la proposition de classement ;
- éventuelles références de certificats IPE analogues.

Un certificat de classement au transport délivré par l'IPE n'est pas la propriété de l'organisme qui le demande. De plus, ce certificat n'est pas, en soi, une autorisation de transport. Il signifie que l'administration reconnaît la transportabilité d'un produit explosif, dans un emballage donné avec éventuellement des limitations. C'est la première pierre obligatoire pour autoriser un transport mais n'est pas suffisant pour réaliser le transport, d'autres obligations devant être respectées (conformité des unités de transport, chauffeurs, règles de mixité...).

La délivrance de ces certificats par l'IPE n'a pas pour objectif d'approuver un classement pour un besoin unique de transport interne qui relève du processus d'évaluation du risque pyrotechnique au travail et se doit d'être traité à travers les études de sécurité ou du document de sécurité des transports internes (article R4462-15).

Afin de tenir compte d'éventuels besoins d'informations complémentaires et de la disponibilité de mes collaborateurs, les demandes de certificat doivent être anticipées, en recherchant un préavis minimal d'un mois.

Incidents / accidents pyrotechniques

Un extrait de la base d'incidents/accidents de l'IPE est accessible pour le personnel du ministère des armées sur le réseau Intradef à l'adresse suivante :

<https://totem.dr-dga.intradef.gouv.fr/inspection/accidents-incidents-pyrotechniques>

Des extractions de cette base peuvent également être envoyées aux acteurs civils sur demande à l'adresse fonctionnelle de l'IPE.

En France

Ce tableau résume les nouveaux événements pyrotechniques (accidents, incidents et faits techniques) portés à la connaissance de l'IPE depuis la précédente lettre.

Une description plus détaillée de certains événements est disponible sur la base ARIA du site du BARPI.



Code couleur indiquant le niveau de gravité
des conséquences humaines

Mort(s)
Blessé(s) grave(s)
Blessé(s) léger(s)
Aucun blessé

DATE	DESCRIPTION	BILAN
Du côté des fabricants		
26/07/2022	<u>Fonctionnement intempestif d'une étoupille lors d'un contrôle électrique</u> Les effets sont restés contenus dans le bouchon de sécurité. Le dégagement de gaz à l'intérieur du bouchon s'est progressivement échappé par le filet du bouchon de sécurité.	Aucun blessé
01/08/2022	<u>Découverte de pièces métalliques et de corps de projectiles enfouis dans le sol</u> lors de travaux de terrassement sur une aire de brulage La décision d'arrêt complet des travaux dans cette zone a été prise. Un balisage de cette zone a été réalisé. La sécurité civile a été appelée concernant les munitions sur lesquelles subsistait un doute.	Aucun blessé
03/08/2022	<u>4 déflagrations rapprochées suivies d'un incendie dans un bâtiment</u> lors d'opérations de maintenance (raccordement d'une cuve à eau et maintenance des raffineurs de nitrocellulose) L'arrière du bâtiment a été totalement soufflé et le toit en partie arraché. Un bâtiment voisin a également subi des dommages.	8 blessés
24/08/2022	<u>Prise en masse en fin de malaxée d'un propergol type azorgol</u>	Aucun blessé Présence d'un bloc figé dans la cuve du malaxeur
Du côté des essais		
21/06/2022	<u>Début d'incendie survenu lors d'une activité forestière d'entretien d'une zone coupe-feu dans une enceinte pyrotechnique de stockage</u> Le feu s'est déclaré au niveau du véhicule. Le conducteur l'a ramené sur une route goudronnée mais n'a pas réussi à maîtriser le début d'incendie avec son extincteur. Le contenu du réservoir de gasoil s'est répandu et a propagé les flammes sur la végétation environnante. L'incendie est resté très limité et a été rapidement maîtrisé par les pompiers.	Aucun blessé Dégâts matériels et végétation brûlée
Du côté des forces		
16/06/2022	Alors que l'instructeur a donné pour consignes de ne pas toucher aux munitions inertes exposées, <u>un stagiaire se saisit d'une grenade et arrache la goupille de sécurité.</u> Bien que la munition présentait un marquage inerte, le bouchon allumeur de la munition fonctionne, provoquant un traumatisme sonore aigu. <i>Actions mises en place :</i> Contrôler le caractère inerte des éléments constitutifs de toutes les munitions exposées dans les salles et qui portent un numéro d'identification apposé par un personnel qualifié sur un seul d'entre eux. Les munitions à éléments pouvant être séparés doivent être marquées sur chacun des éléments constitutifs renfermant des matériaux énergétiques.	3 blessés
19/07/2022	Départ involontaire d'une cartouche de 9mm lors du démontage d'un GLOCK 17 Cet accident est dû à un défaut de formation et une non application des consignes de sécurité.	1 blessé



Code couleur indiquant le niveau de gravité
des conséquences humaines

Mort(s)
Blessé(s) grave(s)
Blessé(s) léger(s)
Aucun blessé

DATE	DESCRIPTION	BILAN
Autres		
14/07/2022	<u>Fonctionnement d'artifices dans le public lors du feu d'artifice du 14 juillet</u> L'accident est probablement dû à un défaut d'application du périmètre de sécurité et à un dysfonctionnement du produit.	2 morts 11 blessés
25/08/2022	<u>Explosion d'un pétard dans la main d'un enfant</u> L'enfant craignait que son pétard ne soit mal allumé alors qu'il se tenait à distance. Il s'est rapproché de l'artifice et l'a empoigné.	1 blessé

Il est rappelé que, conformément à l'article R4462-31 du code du travail, le signalement d'événements pyrotechniques à l'autorité d'approbation compétente et à l'IPE est obligatoire. Pour l'IPE, les signalements peuvent être adressés à votre point de contact habituel ainsi qu'à l'adresse fonctionnelle dga-insp.ipe.fct@intradef.gouv.fr.

À l'étranger

L'équipe IPE présente dans cette rubrique une sélection, non exhaustive, des accidents dont elle a eu connaissance.

L'équipe remercie en particulier DGA ITE (Intelligence Technique et Économique) pour sa veille sur les accidents survenus à l'étranger.

En complément, de nombreux autres signalements d'accidents sont disponibles sur les sites internet indiqués page suivante.

PAYS	DESCRIPTION	BILAN
Allemagne	04/08/2022 : Explosion dans une installation de stockage pyrotechnique de la police (munitions notamment de la seconde guerre mondiale et feux d'artifice) Cette explosion a provoqué un incendie dans la forêt à proximité puis plusieurs autres explosions.	Aucun blessé Destruction d'une forêt à proximité
Arménie	14/08/2022 : Explosion dans un magasin de feux d'artifice sur un marché L'établissement avait été récemment condamné à une amende pour violation des règles de sécurité incendie. L'explosion a provoqué l'effondrement d'un bâtiment.	16 morts 60 blessés
Bésil	17/08/2022 : Explosion dans une fabrique de feux d'artifice	2 morts 1 blessé
Bulgarie	04/10/2022 : Explosion dans une usine de feux d'artifice Le bâtiment a été complètement détruit.	3 morts 1 blessé
Equateur	21/11/2022 : Explosion dans un bâtiment utilisé comme usine de fabrication et de stockage de feux d'artifice L'explosion a touché environ 6 maisons aux alentours.	1 mort 2 blessés
Grèce	16/07/2022 : Crash d'un avion-cargo ukrainien contenant plusieurs tonnes d'armement Des témoins ont vu l'avion en feu et entendu des explosions. Selon des informations de presse, l'avion assurait la liaison entre la Serbie et la Jordanie, et venait de demander une autorisation d'atterrissage d'urgence.	8 morts



Code couleur indiquant le niveau de gravité
des conséquences humaines

Mort(s)
Blessé(s) grave(s)
Blessé(s) léger(s)
Aucun blessé

PAYS	DESCRIPTION	BILAN
Inde	22/06/2022 : Incendie d'un magasin de feux d'artifice Un feu s'est déclaré dans un magasin entraînant l'explosion des feux d'artifice stockés. Le magasin et les véhicules se trouvant devant le magasin ont été détruits.	1 mort
	23/06/2022 : Explosion dans un atelier de fabrication de feux d'artifice	3 morts 2 blessés
	06/09/2022 : Explosion dans un atelier de fabrication clandestin de feux d'artifice Le toit de l'atelier s'est effondré.	1 mort 3 blessés
	10/11/2022 : Explosion dans une usine de fabrication de feux d'artifice lors d'un mélange de produits chimiques Les explosions ont été entendues à plusieurs kilomètres.	5 morts 13 blessés
	19/11/2022 : Explosion dans une usine de fabrication d'armement suivie d'un incendie Cette usine fabrique des propulseurs, de la nitrocellulose et de la nitroglycérine pour les forces armées.	5 blessés
	23/11/2022 : Explosion lors d'un concours de feux d'artifice	30 blessés
Italie	12/09/2022 : Explosion dans une usine de feux d'artifice	1 mort
Malte	04/06/2022 : Explosion de feux d'artifice lors de leur séchage au soleil en extérieur	3 blessés
	26/11/2022 : Explosion dans une usine de feux d'artifice Des débris ont touché les agriculteurs qui travaillaient dans les champs voisins.	1 mort 3 blessés
Mexique	09/06/2022 : Explosion de feux d'artifice lors des célébrations d'une fête	5 blessés
	02/08/2022 : Explosion d'un camion contenant des feux d'artifice	6 blessés
	05/08/2022 : Explosion d'une usine de cartouches L'explosion a eu lieu dans la ligne d'assemblage et de mélange de cartouches explosives, précisément dans la zone de fabrication des balles de calibre 22. Les mauvaises conditions dans lesquelles l'usine fonctionne, avec des machines obsolètes et des risques constants pour les employés, qui sont exposés à la manipulation d'explosifs, sont mis en avant.	1 mort 5 blessés
	12/08/2022 : Explosion dans un atelier de fabrication clandestin de feux d'artifice	2 blessés
	24/08/2022 : Explosion dans un atelier de fabrication de feux d'artifice dans une zone de séchage de l'atelier Aucun personnel n'était présent lors de l'explosion.	Aucun blessé Dégâts matériels (destruction du magasin de poudre)
	10/09/2022 : Explosion de feux d'artifice lors d'une fête Le périmètre de sécurité a été mal défini et les feux d'artifices non contrôlés.	1 mort 30 blessés
	30/09/2022 : Explosion de feux d'artifice lors d'une cérémonie	10 blessés
	26/10/2022 : Explosion d'une poudrière puis incendie	Aucun blessé Dégâts matériels importants
	28/10/2022 : Explosion de feux d'artifice dans une chapelle lors d'une cérémonie	10 blessés
	05/11/2022 : Explosion de feux d'artifice lors d'une célébration Une pile de feux d'artifice a été allumée dans la rue au milieu de la foule.	17 blessés
	12/11/2022 : Explosion dans un atelier de fabrication de feux d'artifice	2 blessés
	29/11/2022 : Explosion dans un atelier de fabrication de feux d'artifice	1 mort 2 blessés



Code couleur indiquant le niveau de gravité
des conséquences humaines

Mort(s)
Blessé(s) grave(s)
Blessé(s) léger(s)
Aucun blessé

PAYS	DESCRIPTION	BILAN
Pérou	22/07/2022 : Incendie d'un dépôt de feux d'artifice L'incendie a touché une zone d'environ 500 m ² où se trouvaient un atelier pyrotechnique et plusieurs maisons.	5 morts 6 blessés
Philippines	03/11/2022 : Explosion dans une usine de fabrication illégale de feux d'artifice L'explosion a brisé les fenêtres et endommagé les toits et les plafonds de certaines maisons proches de la zone.	8 blessés
Suisse	01/08/2022 : Un feu d'artifice est à l'origine d'un incendie dans une école	Aucun blessé Dommages qui s'élèvent à plusieurs milliers de francs
UK	05/11/2022 : Explosion de 2 feux d'artifice dans une foule Lors de l'organisation officielle d'un feu d'artifice, deux artifices sont retombés et ont explosé au sol.	2 blessés
USA	11/06/2022 : Combustion et explosion d'un dépôt de feux d'artifice dues à un feu de broussailles	1 mort 3 blessés
	12/06/2022 : Explosion d'une maison lors de la fabrication d'explosif Les enquêteurs ont trouvé des mèches, des équipements et des produits chimiques associés à la fabrication d'explosifs.	3 morts Maison détruite Incendie des maisons adjacentes
	17/06/2022 : Explosion de feux d'artifice stockés dans un appartement suite à la déclaration d'un incendie	4 blessés (pompiers)
	17/06/2022 : Explosion d'une maison contenant des feux d'artifice	4 morts 1 blessé Maison détruite
	10/07/2022 : Explosion lors de la fabrication artisanale de feux d'artifice dans un appartement	2 blessés Immeuble endommagé
	06/08/2022 : Explosion d'un artifice égaré au sol, dans une foule, lors d'un feu d'artifice L'explosion a blessé 7 personnes dont 4 jeunes enfants (brûlures). Le feu d'artifice a explosé sous la poussette d'un bébé. Le siège de la poussette a absorbé une partie de l'explosion.	7 blessés

Sites internet utiles

Vous trouverez ci-après quelques adresses de sites internet qui présentent des signalements d'accidents :

BARPI (MEEM-Fr), voir *la base de données d'accidents ARIA*

www.aria.developpement-durable.gouv.fr/

Munitions Safety Information Analysis Center (MSIAC-OTAN) : voir *la Newsletter*

www.msiac.nato.int

Health and Safety Executive (HSE-UK) : voir *la base de données d'accidents EIDAS*

www.hse.gov.uk/explosives/eidas.htm

SAFEX International : voir *la base de données d'accidents*

www.safex-international.org



Manifestations annoncées

Séminaire de sensibilisation aux règles techniques OTAN **de l'AASTP-1** **et à l'évaluation quantitative du risque**

18 janvier 2023 (destiné aux entités du ministère des armées)

5 avril 2023 (destiné aux administrations civiles et établissements publics) – date à confirmer

3^{ème} session (destinée aux industriels du domaine pyrotechnique) – date à venir

Inscription : dga-insp.ipe.fct@intra.def.gouv.fr

EUROPYRO 2023

Co-organisé avec le 46th IPS Seminar (séminaire international de pyrotechnie)

11 au 14 septembre 2023 à Saint-Malo

<https://europyro2023.org/>

Les lettres de l'IPE sont disponibles sur son site internet :

<https://www.defense.gouv.fr/dga/poudres-explosifs/lettre-ipe>

IPE - 60 boulevard général Martial Valin – 75509 Paris cedex 15
Secrétariat tél : +33 – (0)9 88 67 73 56 – fax : +33 – (0)9 88 67 86 41

Adresse fonctionnelle : dga-insp.ipe.fct@intra.def.gouv.fr

Diffusion : numérique / 2 numéros par an

ISSN 2554-0912

Dépôt légal : janvier 2023

Editeur : DGA/INSP/IPE