



La lettre de l'IPE

Expert de la sécurité pyrotechnique

Numéro spécial - normes OTAN de sécurité pyrotechnique

Juillet 2023 – N°51

Editorial

Ce nouveau numéro de la lettre de l'IPE est consacré à un dossier spécial sur les normes OTAN de sécurité pyrotechnique et leur comparaison avec les règles techniques françaises.

Nous sommes également heureux de présenter le fruit d'une collaboration avec l'INERIS, engagée depuis quelques années, qui a pris la forme d'une note commune sur l'historique des formules de calcul des effets pyrotechniques de la circulaire du 20 avril 2007.

Plusieurs articles proposés visent à réaliser une comparaison détaillée des règles techniques de la dernière édition de la norme OTAN AASTP-1 promulguée en début d'année 2023 et des règles françaises. Ces articles reprennent et complètent les présentations faites lors des séminaires consacrés à ce sujet en janvier, avril et juillet 2023.

Pour ceux qui le souhaitent, l'édition C de la norme OTAN de sécurité pyrotechnique AASTP-1 est téléchargeable librement, uniquement en anglais, à l'adresse suivante : <https://nso.nato.int/nso/nsdd/main/list-promulg>.

Nous proposons aussi des articles sur la norme AASTP-4 qui pose les principes de l'évaluation quantitative du risque pyrotechnique (EQR), sur certains codes de calcul d'évaluation quantitative du risque pyrotechnique existants ainsi que des réflexions sur la définition de seuils de risque, nécessaires pour cette démarche.

Les travaux menés interrogent naturellement les règles techniques françaises et posent les bases d'une réflexion, qui reste à mener avec tous les acteurs de la pyrotechnie, sur la pertinence d'une évolution de ces règles techniques qui ont été établies dans les années 70. Le passage à une économie de guerre justifie d'autant plus de se poser la question d'une nécessaire évolution pour rejoindre l'état de l'art porté par les règles OTAN, régulièrement remises à jour.

Bien évidemment, nous restons à l'écoute de tous les acteurs qui souhaiteraient approfondir le sujet. Prochainement, des outils seront mis à disposition pour le ministère des armées sur le site Intradef ou sur demande pour les acteurs civils : calculateur numérique pour la mise en œuvre de l'AASTP-1 et traduction en français de l'AASTP-1. Nous envisageons par ailleurs d'engager un travail de référencement de codes de calcul d'EQR par des évaluations de type round-robin à partir des bases de données de résultats d'expérimentations.

Je vous souhaite une bonne lecture estivale.

Françoise LEVEQUE

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

Sommaire

Note technique IPE-INERIS :
les zones d'effets pyrotechniques de
la circulaire du 20 avril 2007 au
regard de l'état de l'art
page 2

L'AASTP-1 en bref
page 3

Correspondance entre
les zones d'effets pyrotechniques
des règles françaises et
les distances QD de l'AASTP-1
page 7

Les projections générées par
les effets pyrotechniques :
un état de l'art
qui a largement progressé
page 10

De l'efficacité des merlons
page 15

Impact de l'utilisation de l'AASTP-1
sur quelques exemples
page 20

L'évaluation quantitative
du risque pyrotechnique –
les seuils de risque pyrotechnique
page 25

Codes de calcul d'évaluation
quantitative du risque pyrotechnique
page 30

Documents accessibles en ligne
relatifs aux normes OTAN
de sécurité pyrotechnique
page 36

Incidents / accidents
pyrotechniques
page 36

Sites internet utiles
page 40

Manifestations annoncées
page 41

Nous contacter
page 42





Note technique IPE-INNERIS : les zones d'effets pyrotechniques de la circulaire du 20 avril 2007 au regard de l'état de l'art

La création en 2013 du chapitre R.4462 du code du Travail a conduit à se réinterroger sur l'exposition des travailleurs au risque pyrotechnique et, de ce fait, à consolider l'estimation des effets pyrotechniques portée par la circulaire du 20 avril 2007 au regard de l'état de l'art.

A cette fin, l'INNERIS et l'IPE se sont associés et ont co-signé une note technique qui peut être téléchargée sur les sites de l'IPE ou de l'INNERIS¹.

Cette note passe tout d'abord en revue la phénoménologie des accidents pyrotechniques, puis une analyse détaillée est menée sur les efforts historiques de quantification et de transcription réglementaire des zones d'effets dangereux sur les personnes et les biens.

Si les premiers travaux expérimentaux datent en France du début du XX^{ème} siècle à l'initiative de la commission des substances explosives, les premières prescriptions réglementaires ne sont apparues véritablement qu'après la première guerre mondiale avec un champ d'application relatif au stockage des munitions. Par la suite, l'évaluation précise des conséquences des bombardements de Londres pendant la seconde guerre mondiale a permis à des scientifiques britanniques de proposer une échelle des dommages aux biens qui servira de référence à l'OTAN et en France pour la quantification en cinq zones d'effets pyrotechniques, exprimées sous forme de lois réduites fonction de la masse Q de matière active.

L'arrêté du 26 septembre 1980 se place alors comme la pierre angulaire d'une nouvelle réglementation ambitieuse construite semi quantitativement sur du risque en modulant les contraintes d'exploitation en fonction de la probabilité d'accident et de l'échelle de dommages associée. Malgré certaines difficultés posées sur la signification des zones de danger compte tenu de la complexité des phénomènes physiques liés à une explosion, les formules de calcul édictées à cette époque ont été reprises dans les textes successifs et sont toujours en vigueur aujourd'hui.

La note IPE-INNERIS retrouve donc les fondements historiques et présente les biais de compréhension voire les limitations du fait du caractère très général des formules de calcul qui sont censées s'appliquer à des situations très diverses et qui amalgament par facilité des effets de nature différente (effets direct et indirect du souffle, projections primaires et secondaires en cas de détonation en masse...). La genèse des différentes formules permet de retrouver leur champ de validité initial, parfois éloigné de leur domaine d'application actuel.

On notera que la principale limitation de ces formules réside dans le fait que les dispositions constructives des sièges exposants et exposés ne sont pas valorisées. Ceci peut être largement problématique quand, par exemple, la protection des personnes situées à l'intérieur de bâtiments exposés est assurée par la tenue de la structure aux différents effets pyrotechniques. Qui plus est, à l'intérieur des locaux constituant le siège exposant et pour les petites masses de matière active, il faudrait essentiellement considérer les effets directs et l'efficacité des écrans de sécurité entre postes de travail pour garantir un découplage, notamment vis-à-vis des éclats primaires.

Les nombreux travaux menés par l'OTAN depuis les années 80 ont largement fait progresser les connaissances en matière d'effets pyrotechniques et de lois pour les distances de sécurité permettant d'assurer une protection des installations et des personnes. Les différences mises en exergue dans la note technique entre les règles actuelles et l'état de l'art suggèrent de séparer la gestion du risque pyrotechnique entre infrastructures d'une part et travailleurs d'autre part, de manière à mieux l'appréhender pour les personnes exposées. Les règles techniques françaises gagneraient à être enrichies de lois complémentaires qui permettraient d'affiner l'analyse du risque pyrotechnique. La définition de seuils de léthalité pour les différentes zones réglementaires prenant en compte les effets pyrotechniques conjugués permettraient un rapprochement avec l'état de l'art.



Direction générale
de l'armement



Inspection de l'armement



Institut national de l'environnement
industriel et des risques



Unité explosifs et articles pyrotechniques

NOTE TECHNIQUE IPE – Inneris
N° DGA01D21046543/INSP/IPE

Les zones d'effets pyrotechniques de la circulaire du 20 avril 2007
au regard de l'état de l'art

¹ Liens de téléchargement de la note IPE – INNERIS :

[Site intradef IPE](#) [Site internet IPE](#) [Site internet INNERIS](#)



L'AASTP-1 en bref

Dans la lettre de l'IPE n°50, nous avons présenté les documents OTAN relatifs à la sécurité pyrotechnique ainsi que leurs évolutions. Il s'agissait notamment de la série des AASTP (Allied Ammunition Storage and Transport Publication / Publication interalliée sur le stockage et le transport des munitions).

L'AASTP-1² est le manuel OTAN des principes de sécurité applicables pour la conservation des munitions et explosifs militaires. Il ne s'agit pas uniquement d'un référentiel « d'infrastructure » mais bien d'un document complet de management de la sécurité incluant la gestion de la ressource. Le présent article a pour objectif de présenter les principes généraux pour les infrastructures en surface, et plus particulièrement pour leur implantation.

I - Présentation générale

L'AASTP-1 est par définition un recueil définissant les principes de sécurité relatifs à l'implantation des installations de conservation et de maintenance pour les munitions et les explosifs conventionnels. Il se décompose en quatre parties :

- Partie I : Principes généraux et directives applicables à tous les types de stockage et tables des distances de sécurité entre installations dans le cas d'un stockage en surface ;
- Partie II : dispositions constructives pour les magasins de stockage et directives opérationnelles pour les installations pyrotechniques (barricades, dangers électromagnétique et électrostatique, lutte contre le feu...) ;
- Partie III : Stockage souterrain des munitions ;
- Partie IV : Dispositions particulières relatives aux installations missiles, aux bases aériennes et ports militaires.

Ce document a fait l'objet de nombreuses mises à jour par les experts du sous-groupe C de l'AC/326 du CNAD³ au fil de l'évolution des connaissances. Il sert de base à la doctrine ONU et OSCE⁴ concernant les meilleures pratiques pour la conservation, le transport, le marquage, l'emballage, le suivi en service ainsi que la destruction des munitions et des explosifs. Il a été ratifié par 28 des 30 pays qui composent l'OTAN, ce qui illustre sa large reconnaissance et base d'application.

Dans l'AASTP-1, les règles de conception et d'implantation des installations s'appuient sur un grand nombre d'essais grandeur nature ou à échelle plus réduite, réalisés par les pays membres et partenaires de l'OTAN, depuis la fin de la seconde guerre mondiale. Elles référencent un nombre important de types d'installations souterraines et en surface comme les magasins durcis (recouverts de terre) et les ateliers de maintenance. Des règles adaptées pour des installations complexes comme les aéroports et ports militaires sont également proposées.

Comme indiqué en introduction, la suite de l'article s'attache à présenter les principes pour des installations en surface tels que définis dans la partie I de l'AASTP-1.

II-Risques liés aux produits explosifs

Classification des produits

Dans sa première partie, l'AASTP-1 présente, pour les activités de conservation, le classement retenu des munitions et explosifs en termes de divisions et sous-divisions de danger suivant leurs effets attendus ainsi qu'en termes de groupes de compatibilité. La classification proposée est cohérente avec le Système Général Harmonisé (SGH) de l'ONU. La définition des divisions de danger est pour l'essentiel similaire à celle de l'arrêté du 20 avril 2007.

Il est cependant utile de préciser dans cet article la définition des divisions de danger car, comme évoqué dans la lettre de l'IPE n°49, des ambiguïtés ont conduit, en France, à des interprétations erronées qui perdurent, notamment pour les divisions de danger 1.1 et 1.2. L'AASTP-1 définit également des sous-divisions de danger au stockage permettant de mieux discriminer les effets des munitions et explosifs par rapport à la classification au transport.

Division de danger 1.1 (DD 1.1) :

Elle regroupe les matières ou objets présentant un danger d'explosion en masse, caractérisé par une explosion de la quasi-totalité des produits pyrotechniques présents et de façon pratiquement instantanée. Les principaux dangers associés à cette division de danger sont la surpression ainsi que les projections soit à grande vitesse tels que les éclats de l'enveloppe des produits, soit à vitesse relativement réduite tels que les débris. L'explosion de ce type de produits provoque des dommages structurels sévères, dont la gravité et la portée dépendent de la quantité d'explosifs présente. Elle peut notamment induire un danger de projection de débris lourds provenant du cratère ou de la structure à l'intérieur de laquelle s'est produite l'explosion.

Dans l'AASTP-1, la problématique des débris est essentiellement associée à cette division de danger et est traitée indépendamment de l'effet de surpression.

Division de danger 1.2 (DD 1.2) :

Elle regroupe les matières ou objets comportant un danger de projection mais sans danger d'explosion en masse. En cas d'explosion, les produits brûlent et explosent de façon progressive, à raison de quelques unités simultanément. En outre, des éclats, des débris enflammés et des munitions non explosées peuvent être projetés en grand nombre. En vue de déterminer les distances de sécurité, l'AASTP-1 fait une distinction entre les munitions qui génèrent des éclats de portée modérée (classées dans la sous-division de danger 1.2.2 – sDD 1.2.2) et celles qui génèrent des éclats ayant une portée considérable (classées dans la sous-division de danger 1.2.1 – sDD 1.2.1). Cette définition qualitative est objectivée par un seuil de 136 g de masse de matière active (MMA) pour la charge explosive des produits, une masse supérieure conduisant à un classement en sDD 1.2.1. Il est à noter qu'un produit de la DD 1.2 dont la charge militaire ne contient pas d'explosif est de facto classé en sDD 1.2.2.

² Manual of NATO Safety Guidelines for the Storage of Military Ammunition and Explosives, AASTP-1 Edition C (2023)

³ Conference of National Armement Directors

⁴ Organisation pour la Sécurité et la Coopération en Europe



Pour la sDD 1.2.1, l'AASTP-1 définit également l'événement crédible maximum (MCE⁵ en anglais) qui représente la fraction limitée des produits explosant simultanément. Le MCE est représenté par la masse de matière active de ces produits en équivalent TNT et est généralement inférieur à 50 kg⁶.

Groupes de compatibilité

Dans l'absolu, la sécurité du stockage de matières ou d'objets explosifs serait accrue si chaque type de produit était entreposé séparément. Cependant, le juste équilibre entre les considérations de sécurité et d'autres facteurs peut nécessiter le stockage combiné de plusieurs types de ces produits. Ainsi, des matières ou objets explosifs sont considérés comme compatibles s'ils peuvent être stockés ensemble sans qu'il y ait d'augmentation significative soit de la probabilité d'accident, soit, pour une quantité donnée, des conséquences des effets d'un tel accident. Ils ne doivent pas être stockés avec d'autres matières susceptibles d'augmenter le risque encouru, par exemple des composés très inflammables, acides ou corrosifs.

L'AASTP-1 définit, dans sa partie I, les caractéristiques des groupes de compatibilité (A à L, N et S) et les principes de combinaison pour des produits appartenant à des groupes différents. Ces règles sont équivalentes à celles de la réglementation française, l'AASTP-1 laissant toutefois plus de liberté à l'autorité nationale dans quelques cas.

Regroupement en stockage de produits explosifs de divisions de danger différentes

Les règles de combinaison de plusieurs divisions de danger dans des installations de stockage en surface sont différentes entre la réglementation française et l'AASTP-1.

Les règles OTAN, sur la base de données expérimentales, permettent de regrouper des matières et objets explosifs de divisions de danger différentes en respectant les groupes de compatibilité et avec, dans certains cas, beaucoup moins de contraintes et surtout plus de discernement dans la prise en compte des effets. En effet, en France, le regroupement de produits de divisions de danger différentes conduit à considérer la totalité comme appartenant à la division de danger la plus contraignante. Par comparaison, le tableau ci-dessous synthétise les règles définies dans l'AASTP-1 pour l'agrégation des divisions et sous-divisions de danger.

DD / sDD	1.1	1.2.1	1.2.2	1.2.3	1.3.1	1.3.2	1.4	1.5	1.6
1.1	1.1	1)	1)	1)	1.1	1.1	3)	1.1	1.1
1.2.1	1)	1.2.1	2)	2)	2), 6)	2), 6)	3)	1)	4)
1.2.2	1)	2)	1.2.2	2)	2), 6)	2), 6)	3)	1)	4)
1.2.3	1)	2)	2)	1.2.3	2)	2)	3)	1)	4)
1.3.1	1.1	2), 6)	2), 6)	2)	1.3.1	5)	3)	1.1	4)
1.3.2	1.1	2), 6)	2), 6)	2)	5)	1.3.2	3)	1.1	4)
1.4	3)	3)	3)	3)	3)	3)	1.4	3)	3)
1.5	1.1	1)	1)	1)	1.1	1.1	3)	1.1	1.1
1.6	1.1	4)	4)	4)	4)	4)	3)	1.1	1.6

Tableau 1 : règles d'agrégation des divisions et sous-divisions de risque dans un stockage en surface.

NOTAS (tableau 1) :

- 1) Choisir la distance de sécurité la plus grande obtenue comme suit :
 - a) totaliser la QNE des matières DD 1.1 ou 1.5 et des matières DD 1.2 et la considérer comme relevant de la DD 1.1 ;
 - b) ne prendre en compte que la QNE des produits de la DD 1.2 et appliquer les critères appropriés de la DD 1.2.
- 2) La QNE de la combinaison est la QNE de la sous-division exigeant la distance de sécurité la plus grande. Ne pas totaliser les différentes sDD présentes, mais déterminer la distance de sécurité pour chacune d'entre elle individuellement.
- 3) Les produits DD 1.4 peuvent être stockés avec les articles de n'importe quelle autre division de risque sans qu'il faille totaliser leurs QNE respectives.
- 4) Assimiler les produits DD 1.6 à des produits sDD 1.2.3 et appliquer la note 2.
- 5) Totaliser les QNE et utiliser la distance de sécurité la plus grande obtenue en considérant :
 - a) que la QNE obtenue relève de la sDD 1.3.1 ;
 - b) que la QNE obtenue relève de la sDD 1.3.2.
- 6) Il existe un risque important, dans certaines circonstances, de voir une combinaison de produits appartenant aux sDD 1.2.1 et 1.2.2 et à la DD 1.3 se comporter comme une quantité totalisée de produits de la DD 1.1.

En présence d'un des cas de figure ci-après, la combinaison doit impérativement être considérée dans son ensemble comme relevant de la DD 1.1, sauf indication contraire apportée par les analyses ou les essais appropriés :

 - a. présence de charges creuses de la DD 1.2 ;
 - b. poudres/prop ergols à haute énergie (comme ceux utilisés pour certaines munitions de canon de char) ;
 - c. densité de stockage élevée de produits de la DD 1.3 dans des conditions de confinement relativement important ;
 - d. produits de la DD 1.2 dont la QNE individuelle est supérieure à 5 kg.

D'autres circonstances restant à déterminer peuvent par ailleurs se présenter, dans lesquelles le regroupement des produits devra être traité dans sa totalité comme relevant de la DD 1.1.

⁵ Maximum Credible Event

⁶ Des expérimentations menées en 2004 ont été réalisées afin d'évaluer les effets d'une explosion dans des stockages de d'obus de 81 mm et 105 mm de la DD 1.2 (Document OTAN PFP(AC/326-SG/5)N(2004)0001 du

14 juin 2004). Elles ont montré que les obus générant un événement équivalent à une explosion en masse (MCE) représentaient une masse d'explosif inférieure à 50 kg.



Les différences majeures concernent :

- les produits de la division de danger 1.4 qui, suivant les règles OTAN, peuvent être stockés avec les munitions et explosifs des autres divisions de danger sans cumul des masses et donc des effets. Cette disposition découle des résultats de nombreuses expérimentations qui ont montré qu'en cas d'événement pyrotechnique, les produits de la division de danger 1.4 n'augmentent pas les effets générés par la réaction de ceux d'autres divisions de danger. En particulier, ils ne propagent pas les effets pyrotechniques et peuvent donc être utilisés comme écran entre des produits d'autres divisions de danger. Ils contribuent ainsi à l'optimisation des capacités physiques des stockages.
- le stockage conjoint de matières et objets des sous-divisions de danger 1.2.1 à 1.2.3 ou de ces mêmes produits avec ceux des sous-divisions de danger 1.3.1 et/ou 1.3.2 pour lequel les distances de sécurité QD sont calculées individuellement par sous-division de danger et la quantité de produits correspondante, seule la distance la plus grande étant retenue. Il est à noter que cette règle d'agrégation ne s'applique pas dans les cas identifiés dans le nota 6) du tableau 1.

III – L'approche déterministe de l'AASTP-1

Principes de l'AASTP-1

L'approche OTAN proposée dans l'AASTP-1 est déterministe en ce sens que la conformité à la norme repose sur le respect d'une distance minimale entre installations D dépendante d'une quantité d'explosif Q (QD). Cette relation quantité-distance varie selon le type de couple « siège exposant – siège exposé » et est indépendante de la probabilité d'occurrence d'un événement pyrotechnique. Le respect de ces distances minimales d'isolement assure une implantation sécuritaire des installations pyrotechniques ou non pyrotechniques tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du site.

Dans la démarche déterministe, toute source potentielle de dommage est combattue systématiquement par la mise en place de « barrières » sans évaluation précise et objective de la probabilité d'occurrence. Les installations pyrotechniques sont ainsi conçues pour combattre les causes d'explosion et d'incendie et pour assurer, en cas de survenue d'un événement pyrotechnique, la protection de l'environnement humain et matériel ainsi que la poursuite de la mission opérationnelle. Les conditions générales et spécifiques de sécurité imposées par la réglementation et la connaissance du produit ou du processus sont mises en œuvre pour combattre à la source les causes d'explosion (telles que la foudre, l'électricité statique...) et les distances minimales d'isolement déterministes (dépendant des conditions techniques) sont respectées pour combattre les effets de surpression, thermique et de projection et ainsi assurer la protection de l'environnement matériel et humain en cas d'accident.

La distance minimale de sécurité, obtenue par l'approche déterministe, est la distance minimale entre un siège exposant et un siège exposé, pour laquelle le risque encouru est jugé acceptable. L'utilisation de l'AASTP-1 implique donc d'accepter ce niveau de risque.

Logique d'application des QD

L'AASTP-1 édition C a introduit des distances de sécurité spécifiques à chacun des effets potentiellement induits par le type de scénario accidentel à savoir explosion en masse, explosion progressive (type pop-corn) ou incendie généralisé. Ces effets et les quantités de matière à prendre en compte sont définis dans le tableau ci-après suivant les divisions ou sous-divisions de danger des produits : par exemple, souffle et débris/fragments pour les produits de la DD 1.1 et distances de sécurité calculées en considérant la QNE pour chacun des effets.

La distance de sécurité est la valeur maximale des distances ainsi déterminées par effet suivant la division / sous-division de danger. Ce principe s'applique quels que soient les sièges exposant et exposé.

Effets	Quantité de produits pour le calcul des distances de sécurité QD suivant la division / sous-division 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 (P1D)		QNE					
Projections/fragments PROG 1.2.2 (P2D)			QNE				
Thermique 1.3.1 (TD)					QNE		
Thermique 1.3.2 (TD)				QNE		QNE	QNE

QNE : quantité nette d'explosif MCE : événement crédible maximum

BD : Blast Distance - DFD : Debris/Fragment Distance

P1D et P2D : Progressive event Distance (sDD 1.2.1 et sDD 1.2.2) - TD : Thermal Distance

Tableau 2 : effets et quantité de produits à considérer pour le calcul des distances de sécurité QD suivant la division / sous-division de danger.



Tables QD

Les distances de sécurité QD sont définies pour chaque type d'effets en fonction des couples siège exposant – siège exposé et sont présentées sous

forme de tables : 36 pour le souffle (BD), 24 pour les débris/fragments (DFD), 4 pour les explosions progressives sDD 1.2.1 (P1D), 4 pour les explosions progressives sDD 1.2.1 (P2D) et 4 pour les effets thermiques (TD). A titre d'exemple, des extraits de tables QD sont données dans le tableau 3 pour le souffle et les débris/fragments.

MASS	BLAST DISTANCE (m)					
	BD31	BD32	BD33	BD34	BD35	BD36
300	66	168	85	109	298	135
325	71	172	90	115	306	142
350	75	177	94	121	313	149
375	79	181	99	127	321	157
400	82	185	103	132	328	163
425	85	188	107	138	334	170
450	89	192	111	143	341	177
475	92	196	116	148	347	183
500	95	199	120	154	353	189
600	107	211	135	173	375	214
700	119	222	150	192	395	237
800	130	233	163	210	413	259
900	140	242	177	227	429	280
1,000	150	250	189	243	444	300

MASS	DEBRIS AND FRAGMENT DISTANCE (m)					
	DFD1	DFD2	DFD3	DFD4	DFD5	DFD6
300	136	325	332	450	267	309
325	139	331	339	450	273	313
350	141	338	345	450	278	317
375	143	338	351	450	283	320
400	145	338	357	450	287	324
425	147	338	362	450	291	327
450	148	338	367	450	295	330
475	150	339	372	450	299	333
500	152	339	376	450	302	336
600	158	340	392	450	314	346
700	163	340	406	450	325	355
800	167	341	417	450	334	363
900	172	342	428	450	342	370
1,000	175	343	437	450	349	376

Tableau 3 : extraits de tables QD pour le souffle et les débris/fragments (colonnes encadrées BD31 et DFD2 correspondant à l'exemple présenté dans le tableau 4 pour des produits de la DD 1.1).

Tables siège exposant – siège exposé

L'AASTP-1 présente, sous la forme de tables, les distances de sécurité QD à appliquer suivant les situations siège exposant – siège exposé, tel qu'illustré dans le tableau 4 pour un magasin recouvert de terre exposant une conduite enterrée. Ces distances de sécurité sont définies pour chacun des effets suivant les divisions ou sous-divisions de danger. Dans l'exemple du tableau ci-dessous, pour des produits de la DD 1.1, si la conduite enterrée se situe dans la direction frontale du magasin, les formules BD31 et DFD2 sont à appliquer pour les distances respectivement souffle et débris/fragments (tableau 3). Les règles de calcul et de choix de la distance de sécurité à retenir suivent la logique d'application des QD présentée au début de cette partie.

Cette présentation en tableaux permet ainsi une lecture facile et rapide du niveau de sécurité selon le type de sièges exposant et donneur ainsi que la division de danger.

Les distances de sécurité sont définies entre les points les plus proches des sièges exposant et exposé. Elles sont mesurées en ligne droite, sans tenir compte des merlons.

L'IPÉ a développé un calculateur sous Excel reprenant toutes les dispositions de l'AASTP-1 pour établir automatiquement les distances de sécurité QD. Ce calculateur sera prochainement mis à disposition pour le ministère des armées sur le site Intradef ou sur demande pour les acteurs civils. Les utilisateurs s'engagent à transmettre à l'IPÉ les bugs éventuels qu'ils identifieraient.

PES →	EFFECT	 Earth covered magazine. Directional effects through the door and headwall are away from an Exposed Site. (a)	 Earth covered magazine. Directional effects through the door and headwall are perpendicular to the direction of an ES. (b)	 Earth covered magazine. Directional effects through the door and headwall are towards an Exposed Site. (c)	See introduction for full instructions and calculation tables for full formula.								
					1. Select correct PES/ES interaction. 2. Use HD/SsD table to determine applicable calculations. 3. Use HD/SsD table to determine quantity, either NEQ or MCE. 4. Use associated formula for min Distance or max Quantity.								
						HD / SsD							
						1.1	1.2.1	1.2.2	1.2.3	1.3.1	1.3.2	1.6	
 28b POL Facilities incl Pipelines Unprotected, aboveground vital	BLAST	BD31	BD31	BD31	NEQ	MCE		MCE				MCE	
	DEBRIS & FRAG	DFD1	DFD1	DFD2	NEQ	MCE		MCE				MCE	
	PROG' 1.2.1	MCE ≤ 50kg 60m MCE > 50kg P1D4	MCE ≤ 50kg 60m MCE > 50kg P1D4	P1D4		NEQ							
	PROG' 1.2.2	30m	30m	P2D4			NEQ						
	THERMAL 1.3.1	TD4	TD4	TD4					NEQ				
	THERMAL 1.3.2	TD4	TD4	TD4				NEQ		NEQ	NEQ		

PES : Potential Explosion Site (siège exposant) ES : Exposed Site (siège exposé)

Tableau 4 : exemple de table définissant les règles QD à appliquer pour les différents effets suivant la division ou sous-division de danger (cas d'un magasin recouvert de terre et exposant une conduite enterrée).

IV- L'approche probabiliste

Lorsque les implantations d'installations ne sont pas conformes avec l'approche déterministe en QD, l'approche probabiliste offre une alternative. Elle ne doit être utilisée qu'après avoir justifié le non-respect des distances de sécurité QD et s'être assuré que la mise en place de mesures de maîtrise du risques (MMR), tel que l'ajout

d'un merlon, ne sont pas suffisantes. Elle permet d'affiner l'approche et de l'adapter à la situation spécifique en intégrant des barrières supplémentaires si besoin. Encadrée par le standard OTAN AASTP-4, elle permet de quantifier le niveau de risque associé à une situation donnée et ainsi d'estimer s'il est acceptable en fonction des seuils admis par la réglementation ou l'autorité du pays concerné.



Correspondance entre les zones d'effets pyrotechniques des règles françaises et les distances QD de l'AASTP-1

INTRODUCTION

La connaissance des effets pyrotechniques et la transcription de leur gravité suivant différentes zones trouve sa genèse dans les travaux de la britannique E.B. Philip, qui s'intéressa, pendant la seconde guerre mondiale, aux dégâts causés par les bombardements sur les maisons anglaises. Elle élaborait des équations reliant la masse des bombes et les niveaux de gravité des dégâts occasionnés suivant la distance au point de chute.

Ce travail fut ensuite approfondi et publié par des scientifiques anglais qui définirent 5 zones d'effets en fonction de la gravité des dégâts. Ces 5 zones constituent des précurseurs des zones modernes que nous connaissons actuellement et appelées zones d'effet « Zi ». Ces études ont été diffusées à l'OTAN au début des années 1970 et ont inspiré durablement la réglementation pyrotechnique française.

Alors que les règles techniques françaises de détermination des distances de zones d'effets sont restées largement inchangées, celles de l'OTAN ont en revanche beaucoup évolué afin de tenir compte des connaissances acquises à la suite de nombreuses expérimentations. La genèse commune a cependant laissé une certaine empreinte que l'on peut tenter de retrouver pour établir la correspondance entre les zones d'effets pyrotechniques des règles françaises et les distances de sécurité QD de l'AASTP-1.

MATERIEL ET METHODE

Les règles françaises

Les cinq zones d'effets pyrotechniques, Zi, délimitées par les rayons Ri (figure 1), sont actuellement définies et caractérisées dans l'arrêté du 20 avril 2007 et sa circulaire d'application ainsi que dans l'arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation. Les formules de calcul des zones d'effets sont fonction de la quantité de matière active, affectée d'un coefficient d'équivalent TNT, le cas échéant.

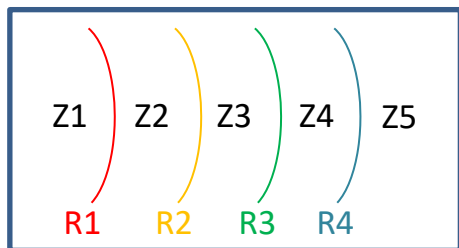


Figure 1 : zones d'effets Zi et rayons Ri de la réglementation française.

Distances QD de l'AASTP-1

Dans cet article, sont prises en compte les règles du standard OTAN AASTP-1 édition C version 1 promulgué en 2023, sauf mentionné différemment.

Les règles de calcul des distances d'implantation des installations pyrotechniques dites QD (quantité-distance) dépendent de la nature du siège exposant et du siège exposé intérieur ou extérieur. Chaque

couple siège exposant-siège exposé est rapporté à une ou plusieurs formules qui prennent en compte les dispositions constructives. Plusieurs dizaines de combinaisons sont possibles.

Dans cet article, seront pris comme référence les sièges exposés suivants :

- Installation pyrotechnique : atelier pyrotechnique partiellement protégé. Considéré comme installation a2 en France ;
- Atelier non pyrotechnique ou bureau de moins de 20 personnes : Considéré comme installation a3 en France ;
- Premières habitations occupées : assimilées à des installations a4 si situées à l'intérieur de l'établissement ou habitations extérieures à l'établissement pyrotechnique.

Les formules indiquées dans les exemples ci-dessous sont valables quel que soit le siège exposant pour les effets souffle et thermique.

RESULTATS

Comparaison des formules de distance liées à l'effet « souffle » sur la base des valeurs physiques de surpression

Pour l'effet de souffle, une première comparaison (tableau 1) a été réalisée sur la base des niveaux de surpression pris comme références dans les réglementations françaises et dans l'AASTP-1. Dans ce tableau, les valeurs indiquées se basent :

- pour la réglementation Travail, sur la circulaire (abrogée) du 8 mai 1981 relative à l'application de l'arrêté du 26 septembre 1980 fixant les règles de détermination des distances d'isolement relatives aux installations pyrotechniques ;
- pour la réglementation Environnement, sur le guide technique relatif aux valeurs de référence des seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées version octobre 2004.

Rayons Ri Fr	Travail (1980-81)	Environnement (2004-05)	OTAN (2023)*	Létalité
R1	5 Q ^{1/3} (600 mbar)	-	4,8 Q ^{1/3} (400 mbar)	50 % arrêté 20/04/2007
R2	8 Q ^{1/3} (300 mbar)	200 mbar (effets dominos)	8 Q ^{1/3} (210 mbar)	-
R3	15 Q ^{1/3} (100 mbar)	140 mbar	14,8 Q ^{1/3} (100 mbar)	1 % guide MEDD 2004
R4	22 Q ^{1/3} (50 mbar)	50 mbar	22,2 Q ^{1/3} (50 mbar)	
R5	44 Q ^{1/3}	20 mbar (bris de vitres)	44,4 Q ^{1/3}	

* Formules pour Q > 4500 kg

Tableau 1 : comparaison des formules de distance historiques sur la base de la valeur physique de surpression.

D'après ce tableau, les formules OTAN et les valeurs de surpression correspondantes sont globalement équivalentes à celles retenues dans la réglementation française. Les valeurs de surpression correspondant aux différentes zones sont globalement égales ou proches.



Comparaison des formules « souffle » Ri françaises et QD AASTP-1

Le tableau 2 compare les formules de calcul des distances d'implantation « souffle » pour des produits explosifs de la division de danger 1.1 (DD 1.1) en considérant : pour l'AASTP-1, les trois sièges exposés de référence et pour la réglementation française, les Ri. Comme le montre ce tableau, les formules pour l'IBD¹ (règles OTAN) et le rayon R4 (limite Z4/Z5) sont quasi-identiques et montrent une correspondance, pour l'effet de souffle, entre la distance de référence de l'AASTP-1, l'IBD, et le rayon R4 de la réglementation française. Cette correspondance est, en particulier, intéressante pour comparer les autres distances QD et Ri en ratio par rapport à l'IBD ou au R4. Les ratios ainsi obtenus montrent le lien entre sièges exposés AASTP-1 et Ri : habitations extérieures ↔ R4, bureau < 20 personnes ↔ R3 et atelier pyrotechnique partiellement protégé ↔ R2.

OTAN			Réglementation française		
Installations exposées	Formules QD	Ratio IBD	Ri	Formules Ri	Ratio R4
Habitations extérieures	$22,2 Q^{1/3}$	IBD	R4	$22 Q^{1/3}$	R4
Bureau < 20 pers.	$14,8 Q^{1/3} *$	$0,67 \times \text{IBD}$	R3	$15 Q^{1/3}$	$0,67 \times R4$
Atelier pyrotechnique partiellement protégé	$8 Q^{1/3} *$	$0,36 \times \text{IBD}$	R2	$8 Q^{1/3}$	$0,36 \times R4$

* Formules pour $Q > 4500 \text{ kg}$

Tableau 2 : formules de calcul « souffle » (produits explosifs de la DD 1.1).

Une correspondance entre le positionnement des installations suivant l'AASTP-1 et la matrice des ai a également été recherchée et est présentée dans le tableau 3.

Suivant la matrice des ai, ce positionnement correspond à une exposition par une activité de probabilité P2. Les règles de l'AASTP-1 pour le stockage de produits pyrotechniques sont ainsi plus sécuritaires que les règles et pratiques françaises qui

OTAN			Réglementation française				
Installations exposées	Formules QD	Ratio IBD	Ri	Formules Ri	Ratio R4	Installations autorisées P1	Installations autorisées P2
Habitations extérieures	$6,4 Q^{1/3}$	IBD	R4	$6,5 Q^{1/3}$	R4	a4	a4
Bureau < 20 pers.	$4,3 Q^{1/3}$	$0,67 \times \text{IBD}$	R3	$5 Q^{1/3}$	$0,77 \times R4$	a4	a3
Atelier pyrotechnique partiellement protégé	$3,2 Q^{1/3}$	$0,5 \times \text{IBD}$	R2	$3,5 Q^{1/3}$	$0,54 \times R4$	a3	a2

Tableau 4 : formules de calcul pour les effets thermiques (produits de la sDD 1.3.1 - $Q > 6000 \text{ kg}$).

OTAN Installations exposées	Correspondance réglementation française		Matrice ai	
	Ri « souffle »	ai	Installations autorisées P1	Installations autorisées P2
Habitations extérieures	R4	a4	a4	a4
Bureau < 20 pers.	R3	a3	a4	a3
Atelier pyrotechnique partiellement protégé	R2	a2	a3	a2

Tableau 3 : positionnement des installations de référence suivant l'AASTP-1 et la réglementation française (matrice ai) – effet de souffle.

peuvent jouer sur la probabilité P1 et permettre des distances d'isolement plus faibles, notamment pour les ateliers pyrotechniques et les bureaux. Pour la protection de l'environnement, la réglementation française autorise la présence d'habitations en Z3 et Z4, à des distances inférieures à R4 (correspondant à l'IBD des règles OTAN). Enfin, notons que la réglementation dépollution pyrotechnique² n'autorise les habitations extérieures³ qu'au-delà de R4 pour les activités pyrotechniques de probabilité P2, se rapprochant ainsi des principes de l'AASTP-1. Cette différence d'approche concernant les probabilités d'événement pyrotechniques fait l'objet d'une analyse spécifique dans la suite de l'article.

Ces exemples montrent qu'une correspondance directe peut être établie entre les règles françaises et OTAN pour l'effet de souffle et que les formules QD d'implantation des installations de référence peuvent donc permettre de déterminer les Ri françaises.

Comparaison des formules effet thermique - Ri françaises et QD AASTP-1

Pour l'effet thermique, les formules applicables sont présentées dans le tableau 4 avec des produits de la sDD 1.3.1 (équivalent 1.3a pour les règles françaises).

De même que pour le souffle, on constate que les distances IBD et R4 sont quasiment identiques, que les ratios à l'IBD et au rayon R4 sont proches pour les installations exposées de référence et que l'implantation de ces installations correspondrait, suivant la matrice des ai, à une probabilité P2.

¹ Inhabited Building Distance qui représente la distance minimale d'implantation d'habitations extérieures à un site pyrotechnique.

² Arrêté du 12 septembre 2011 fixant les règles de détermination des distances d'isolement relatives aux chantiers de dépollution pyrotechnique

³ Types c3 (locaux habités) et c4 (lieu de grand rassemblement)



Ainsi, pour les effets thermiques de la sDD 1.3.1, les formules QD d'implantation des installations considérées en référence peuvent donc permettre de déterminer les Ri françaises, ce qui établit, pour ces installations, une correspondance directe

entre les règles françaises et OTAN. Il est à noter que les règles AASTP-1 pour l'implantation d'un bureau ou d'une habitation pour la sDD 1.3.2 sont identiques à celles de la sDD 1.3.1 bien que les effets soient sensiblement moins intenses (facteur de l'ordre de 2 suivant les Ri françaises). Des travaux OTAN étant en cours afin d'affiner ces formules QD et plus globalement celles des effets thermiques, aucune comparaison n'est réalisée dans le présent article pour la sDD 1.3.2.

Comparaison des formules projections

Pour les projections, il s'avère plus complexe pour établir la correspondance entre les distances forfaitaires françaises et les formules utilisées dans l'AASTP-1 en vigueur. Dans ses éditions précédentes, l'IBD était fixée à 400 m tout comme le rayon R4. Les nombreuses expérimentations réalisées par des pays de l'OTAN ces dernières décennies ont permis d'affiner les distances QD suivant les sièges exposants.

Un [article](#) spécifique est dédié au sujet de la comparaison des distances de projection, toutefois le tableau 4 montre la correspondance des ratios à l'IBD et au rayon R4 pour les formules de projections correspondant à des produits explosifs de la sDD 1.2.1.

Installation exposées	OTAN			Réglementation française				
	sDD 1.2.1* AASTP-1 Ed. B (2015)	sDD 1.2.1 AASTP-1 Ed C (2023)	DD 1.1 AASTP-1 Ed C (2023)	Ri	Distance Ri ***	Ratio R4	Installations autorisées P1	Installations autorisées P2
Habitations extérieures	400 m IBD	Formule IBD**	Formule IBD*	R4	400 m ****	400 m	a4	a4
Bureau < 20 pers.	270 m 0,67 x IBD	0,67 x IBD	0,67 x IBD	R3	300 m	0,75 x R4	a4	a3
Atelier pyrotechnique partiellement protégé	145 m 0,36 x IBD	0,36 x IBD	0,67 x IBD	R2	135 m	0,34 x R4	a3	a2

* $50 \text{ kg} < \text{MCE}^4 \leq 500 \text{ kg}$

*** MMA unitaire > 750 g

** Dépendant du siège exposant (distance progressive)

**** $R4 = 75 \text{ QNE}^{1/6}$ si $75 \text{ QNE}^{1/6} > 400$

Tableau 5 : formules de calcul pour l'effet des projections (produits de la DD 1.1 et de la sDD 1.2.1).

DISCUSSION

Les résultats des différentes études comparatives montrent la base historique commune des formules françaises et OTAN et mettent en lumière des correspondances entre les formules QD d'implantation de certaines installations et les Ri françaises.

Les distances QD sont établies sans référence à une probabilité explicite d'évènement pyrotechnique. En se rapportant à la matrice aiZjPk de l'arrêté du 20 avril 2007 pour les installations considérées, les résultats montrent que cette probabilité serait équivalente à P2. On peut donc supposer que cette matrice a été établie historiquement de sorte que l'implantation des installations ai respectait globalement les distances QD pour la probabilité P2.

En France, le choix a été fait de considérer que certaines installations puissent être implantées de façon plus rapprochée que ce qui a été établi par l'OTAN, en particulier pour les stockages auxquels est souvent attachée une probabilité P1. Une explication pourrait être qu'au sein de l'OTAN, les installations qui abritent des munitions représentent des cibles privilégiées d'une agression ennemie, ces standards pouvant être employés pour les situations opérationnelles. L'éloignement plus important des installations correspondrait ainsi à la prise en compte comme non négligeable d'une telle probabilité d'agression. Rappelons que les travaux de l'OTAN ont été menés après la seconde guerre mondiale et durant la guerre froide. Le risque d'agression sur les cibles que représentent les stockages de munitions des armées a pu être considéré comme

devant être pris en considération pour la sauvegarde des capacités des armées. A contrario, la France aurait pu considérer pour l'élaboration de ses règles techniques un abaissement de la probabilité par réduction de la probabilité d'agression ennemie.

Une seconde explication pourrait être liée à la méthode de construction des QD. A l'origine, les premières distances d'éloignement auraient été établies au regard des conséquences de l'évènement pyrotechnique sur les installations⁵ et non selon une démarche de risque consenti, les distances retenues devant garantir un certain niveau de sauvegarde des capacités de défense. On peut ainsi penser que l'ajout d'une approche probabiliste dans les règles françaises permettait davantage de souplesse, peut-être pour la prise en compte d'espaces fonciers relativement restreints, notamment pour les stockages. Il en résulte néanmoins le biais, d'autant plus depuis la codification dans le code du Travail, que les règles d'implantation en France prendraient surtout en considération la prévention des risques pour les travailleurs plutôt que la sauvegarde des installations et de l'activité. Ainsi la méthode communément admise de gestion de la conformité à la matrice aiZjPk, qui consiste à interdire la co-activité dans des installations voisines ne respectant pas les distances prévues, permet sans doute de préserver les travailleurs mais ne prend pas en considération l'intégrité de ces installations elles-mêmes, c'est-à-dire leur capacité à continuer d'être exploitées après un évènement pyrotechnique.

⁴ Maximum Credible Event (cf. [article dédié sur les projections](#))

⁵ Experimental and Theoretical Basis of NATO Standards for Safe Storage of Ammunition and Explosives, MSIAC L-229 Report, M. van der Voort & al. (2019)



CONCLUSION

Ces travaux montrent que pour certaines installations exposées, la correspondance entre les QD et les distances établies par les règles françaises sont équivalentes et qu'il est possible de reconstituer les distances des Zi en choisissant les formules établies pour ces installations dans l'AASTP-1.

Cependant, la méthode la plus rigoureuse serait d'établir les correspondances à partir de seuils de létalité ou de gravité fixés par le législateur. La construction des Zi sur la base de seuils quantifiés de létalité ou de gravité serait une avancée en adéquation avec les concepts et les connaissances actuels. Ces seuils ouvriraient également la voie à l'utilisation de codes de calcul sur des bases partagées comme on le verra dans [l'article](#) consacré à ce sujet.

Les projections générées par les effets pyrotechniques : un état de l'art qui a largement progressé

Cet article a été rédigé par Pierre-François Péron (DGA/IPE).

INTRODUCTION

Jusqu'aux années 1970, les projections de débris n'étaient pas considérées comme posant un problème majeur au regard des effets directs de l'onde de choc, pour les installations abritant des objets ou matières pyrotechniques pouvant exploser en masse. Or, les nombreux essais menés dans le cadre de l'OTAN et de programmes nationaux ont montré que les débris jouent un rôle important, excédant parfois les effets du souffle en termes d'effets collatéraux sur les personnes.

Cette prise de conscience tardive s'explique essentiellement par le fait que la caractérisation (densité, portée) de ces projections et débris est basée pour l'essentiel sur des essais à l'échelle 1 et requiert un effort de dépouillement très important. Lors de ces essais, le souffle est mesuré assez aisément et de manière directe par des capteurs alors que la collecte et l'analyse des débris implique un travail long et fastidieux (parfois plusieurs semaines pour une équipe de plusieurs personnes dédiées à la simple tâche de collecte et classification des fragments).

En France, alors que les seuils d'effets de la réglementation pour le calcul des effets de surpression, thermiques et toxiques sont précisément documentés dans l'arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation (arrêté PCIG), aucune valeur de référence n'est précisée pour les effets liés aux projections.

Que recouvre la notion de projections ?

Le terme « projections » est générique. Il recouvre en fait les éclats ou fragments générés par l'enveloppe des objets (projections primaires) et les débris issus de l'environnement comme la destruction de l'infrastructure, la cratérisation... (projections secondaires). Ces fragments et débris sont de taille et de vitesses variables et peuvent être projetés à de grandes distances.

La phénoménologie de génération des projections diffère suivant la division de danger (DD).

Les produits de la DD 1.1 explosent en masse et génèrent des éclats primaires résultant de la fragmentation de leur enveloppe métallique ainsi que des débris provenant de la projection d'objets situés à proximité, des débris de l'infrastructure et des éjectas du cratère.

Les produits de la DD 1.2 n'explosent pas en masse. Ils génèrent essentiellement des projections primaires liées à leur explosion progressive. Les débris sont généralement réduits par comparaison avec la DD 1.1 du fait de la faible quantité de matière explosant simultanément qui limite l'endommagement de l'infrastructure ainsi que le nombre et l'énergie des débris générés.

LES PRINCIPES GÉNÉRAUX DES RÈGLES FRANÇAISES ET AASTP-1

Les règles françaises de calcul des distances de projections

Les règles françaises de calculs d'effets sont définies dans la circulaire du 20 avril 2007. Elles s'appliquent en terrain nu et ne prennent donc en compte que les projections primaires. Historiquement, les projections secondaires ont été considérées comme incluses dans l'enveloppe des zones de surpression.

Les zones d'effets des projections primaires sont déterminées en utilisant des formules forfaitaires qui dépendent de la masse de matière active unitaire, inférieure ou supérieure à 750 g. Par exemple, pour des objets de plus de 750 g, la limite Z4/Z5 est au moins égale à 400 m et est réduite d'un tiers pour des quantités totales d'explosifs inférieures à 100 kg.

Les règles de l'AASTP-1

Les distances de sécurité QD¹ à respecter pour l'implantation d'installations pyrotechniques ont été définies sur la base d'expérimentations. Ces essais ont été réalisés en variant les types d'infrastructures, la division de danger et la quantité des produits. L'influence de la présence ou non d'un écran a également été étudiée. Lors de ces expérimentations, la répartition spatiale des débris et fragments générés et leur masse ont été cartographiés précisément. Elles ont permis d'établir les formules empiriques à appliquer selon les types d'installations exposante et exposée, la division de danger et la quantité de produits explosifs.

¹ Quantity-Distance en anglais



- Types d'installations exposantes

Pour la détermination des distances d'implantation entre installations pyrotechniques, l'AASTP-1 distingue quatre types d'infrastructures exposantes, de l'installation légère au magasin recouvert de terre (ECM² en anglais). Sont également pris en compte le volume de l'infrastructure, les effets directionnels et les merlons. Les pictogrammes utilisés sont indiqués dans la figure 2.

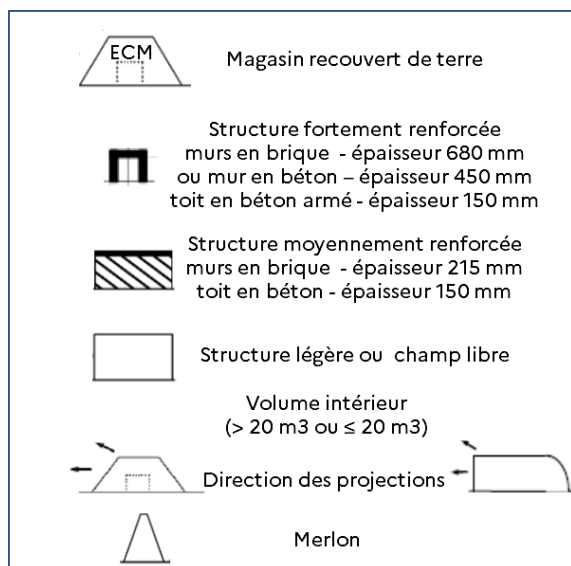


Figure 2 : pictogrammes des types d'installations exposantes dans l'AASTP-1.

- Distance minimale aux habitations (IBD³ en anglais)

L'IBD est la distance de référence dans l'AASTP-1. Elle représente la distance minimale d'éloignement des habitations et est caractérisée par une probabilité d'atteinte d'une personne par un fragment d'énergie supérieure à 79 J de 1 %⁴. Expérimentalement, elle correspond à un seul éclat récupéré sur une surface de 56 m² (1 % de cette surface représentant la surface apparente du corps humain).

Pour une même quantité de produits, la distance IBD est différente suivant le type d'installation exposante, la présence ou non d'un merlon et la division de danger étant donné que chacun de ces paramètres influe sur la quantité et la répartition des projections générées en cas d'événement pyrotechnique. La distance IBD ainsi caractérisée est utilisée, dans l'AASTP-1, comme base pour la définition des distances d'implantation des autres installations. Et comme montré dans l'article sur les effets de souffle et thermique, elle a également pu être utilisée historiquement pour déterminer les

limites des autres zones d'effets de la réglementation française qui correspondaient, dans l'AASTP-1, à des distances entre certaines catégories d'installations internes au site pyrotechnique.

- Principes de calcul des distances de sécurité entre installations

En fonction de la division de danger, l'AASTP-1 distingue la quantité nette de matière pyrotechnique (QNE⁵) présente dans le siège exposant et la quantité de matière pyrotechnique correspondant à l'événement crédible maximum (MCE⁶ en anglais) dans le cas d'objets n'explosant pas en masse mais de façon progressive (sous-division de danger 1.2.1⁷). Le MCE représente la fraction limitée des objets explosant de façon simultanée et est déterminé expérimentalement. Il est généralement inférieur à 50 kg^{8,9}. Selon le mode de réaction des produits, l'AASTP-1 définit des formules de calcul des distances de sécurité entre implantations (tableau 1) et distingue le cas des produits réagissant en masse ou de façon progressive. Ce point sera détaillé dans les paragraphes suivants en fonction de la division ou sous-division de danger des produits.

Effets - distance	DD 1.1	sDD 1.2.1	sDD 1.2.2
Explosion en masse - Débris / fragments (formules DFD)	QNE ⁵	MCE ⁶	
Réaction progressive - Projections/ fragments (formules P1D ou P2D)		QNE	QNE

MCE : Evénement crédible maximum

sDD : sous-division de danger

Tableau 1 : masses d'explosifs et formules projections de l'AASTP-1 prises en compte suivant la division ou sous-division de danger.

Hypothèses de travail pour les exemples traités dans cet article

Dans la suite de l'article, on dénomme Zi les zones d'effets de la réglementation française et Ri les rayons qui les délimitent (figure 3).

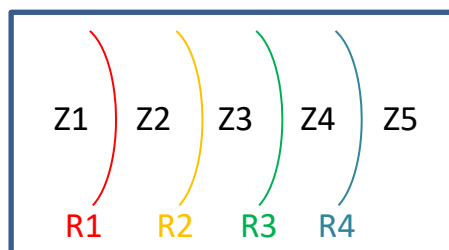


Figure 3 : zones d'effets Zi et rayons Ri de délimitation de ces zones.

² Earth Covered Magazine

³ Inhabited Building Distance

⁴ D'après des modèles documentés dans l'AASTP-4 concernant les effets des projections sur le corps humain, le niveau de létalité d'un fragment d'énergie 79 J est de 30 %, ce qui correspond à une probabilité de létalité de $0,01 \times 0,3 = 0,003$ soit 0,3 %.

⁵ Quantité Nette d'Explosif – NEQ Net Explosive Quantity en anglais

⁶ Maximum Credible Event

⁷ Produits de la DD 1.2 dont la charge militaire contient de l'explosif et a une masse de matière active supérieure à 136 g

⁸ 60 % des munitions américaines classées en sDD 1.2.1 ont un MCE inférieur à 50 kg (d'après la base de données américaine sur le classement en division de danger des munitions US en service).

⁹ Des expérimentations menées en 2004 ont été réalisées afin d'évaluer les effets d'une explosion dans des stockages de d'obus de 81 mm et 105 mm de la DD 1.2 (Document OTAN PFP(AC/326-SG/5)N(2004)0001 du 14 juin 2004). Elles ont montré que les obus générant un événement équivalent à une explosion en masse (MCE) représentaient une masse d'explosif inférieure à 50 kg.



Pour la détermination des distances selon l'AASTP-1, les installations exposées suivantes ont été prises comme référence :

- un atelier pyrotechnique partiellement protégé correspondant dans la réglementation française à une installation a2 qui doit être positionnée au-delà de R2 (donc en Z3) pour une activité de probabilité P2 au niveau du siège exposant ;
- un atelier non pyrotechnique ou un bureau de moins de 20 personnes correspondant à une installation a3 qui doit être positionnée au-delà de R3 (donc en Z4) pour une activité de probabilité P2 au niveau du siège exposant ;
- premières habitations, assimilées à des installations a4 (non liées à l'activité de l'établissement) qui doivent être positionnées au-delà de R4 (donc en Z5) pour une activité de probabilité P2 au niveau du siège exposant.

RESULTATS ET DISCUSSION

Lien IBD - R4 et implantation des installations selon l'AASTP-1 et les règles françaises

Dans l'article sur les effets de souffle et thermique, nous avons vu qu'il existe un lien entre les formules françaises et OTAN. Une analyse similaire a été menée pour les projections.

Le tableau 2 présente les rayons des effets de projections calculés selon l'arrêté du 26 septembre 1980 fixant les règles de détermination des distances d'isolement relatives aux installations pyrotechniques reprises dans la circulaire du 20 avril 2007 d'application de l'arrêté du 20 avril 2007. Les rayons sont également exprimés en ratio par rapport au rayon R4.

	Travail (1980-81) Projections	Travail (1980-81) Projections	Installation de référence probabilité P2 Travail – AASTP-1	AASTP-1 Ed. B (2015) sDD 1.2.1 **	AASTP-1 Ed. C (2023) sDD 1.2.1	AASTP-1 Ed. C (2023) DD 1.1
R1	25 m	0,07 x R4				
R2	135 m	0,34 x R4	a2 atelier pyrotechnique	145 m 0,36 x IBD	0,36 x IBD	0,67 x IBD
R3	300 m	0,75 x R4	a3 bureau < 20 pers.	270 m 0,67 x IBD	0,67 x IBD	0,67 x IBD
R4	400 m *	R4	a4 habitations	400 m IBD	IBD***	IBD

* ou $75 \text{ QNE}^{1/6}$ si $75 \text{ QNE}^{1/6} > 400$

** $50 \text{ kg} < \text{MCE} \leq 500 \text{ kg}$

*** distance progressive

Tableau 2 : distances des zones d'effet projections suivant les règles françaises et AASTP-1.

Comparaison à l'IBD/R4 des distances françaises et OTAN pour la DD 1.1

La division de danger 1.1 correspond à un danger d'explosion en masse, c'est-à-dire une détonation quasi-instantanée de la totalité des produits explosifs. La distance projections est calculée dans l'AASTP-1 (tableau 1) et la réglementation française en utilisant la quantité nette d'explosif présente.

Le graphique de la figure 4 compare les distances IBD et R4 en considérant, pour l'AASTP-1, plusieurs sièges exposants

Par comparaison, dans l'édition b de 2015 de l'AASTP-1, le positionnement des installations exposées était aussi défini par des distances forfaitaires pour la sDD 1.2.1 (tableau 2). En particulier, l'IBD était représentée par une distance minimale de 400 m, ce qui permet de faire un lien direct entre le rayon R4 et l'IBD historique. La comparaison des ratios à l'IBD ou à R4 montre une correspondance assez bonne entre certaines installations de l'AASTP-1 et les Ri de la réglementation française.

Dans la nouvelle édition de l'AASTP-1 (édition c de 2023), l'IBD a été précisée en fonction du type de siège exposant. La distance d'éloignement des installations internes au site est exprimée en ratio par rapport à l'IBD comme illustré dans le tableau 2 pour la DD 1.1 et la sDD 1.2.1.

La comparaison des ratios à l'IBD ou R4 suivant l'AASTP-1 et la réglementation française (tableau 2) montre une correspondance assez bonne pour les objets de la sous-division de danger 1.2.1. Pour la division de danger 1.1, il en est de même pour R3/bureau de moins de 20 personnes mais en revanche, l'AASTP-1 ne permet pas le rapprochement d'un atelier pyrotechnique en-deçà de $0,67 \times \text{IBD}$ et les ratios ne sont donc pas conservés. Cet éloignement « forcé » prend probablement en compte les résultats d'expérimentations qui montrent que les débris liés à la destruction de l'infrastructure exposante peuvent être projetés à longue distance. A contrario, cet effet n'est pas intégré aux règles françaises mais serait partiellement compensé par la présence d'un merlon ([cf. article sur ce sujet dans la présente lettre](#)).

Même si la correspondance n'est pas totale, cette analyse montre un lien entre le rayon R4 (limite Z4/Z5) et l'IBD que nous avons utilisé dans la suite de l'article pour comparer les distances R4 et IBD suivant les divisions et sous-divisions de danger.

(représentés par les pictogrammes de la figure 2) : en bleu, structure légère, en marron et en vert, un magasin recouvert de terre. Suivant l'AASTP-1, la distance IBD dépend de l'orientation du magasin recouvert de terre (frontal en orange ou latéral et arrière, en vert). En latéral et arrière, les distances sont nettement inférieures car ces faces comportent une grande quantité de terre et l'énergie transmise aux débris est plus faible.

La distance R4 y est représentée en rouge. S'agissant d'une distance forfaitaire, elle s'applique quels que soient les sièges exposant et exposé.



Ce graphique montre que la distance R4 est significativement sous-évaluée par rapport à l'IBD pour un siège exposant de type infrastructure légère et magasin recouvert de terre (direction frontale). Il est à noter que l'écart en termes de risque d'atteinte peut rester limité en raison de la faible densité de projections et débris en champ lointain.

A l'inverse, la distance R4 est largement surévaluée par rapport à l'IBD pour un siège exposant de type infrastructure légère et magasin recouvert de terre (directions latéral et arrière). Dans tous les cas, elle est surestimée pour les faibles quantités d'explosifs.

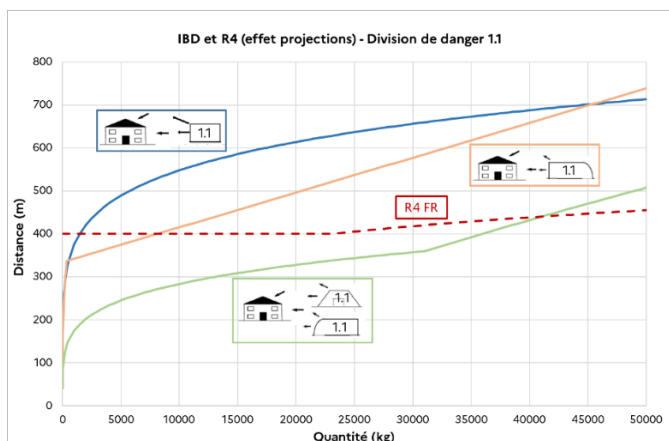


Figure 4 : représentation graphique des distances projections IBD pour différents sièges exposants et comparaison avec le rayon R4 (produits de la DD 1.1).

En complément, la figure 5 propose une représentation spatiale des effets à l'IBD pour un siège exposant représenté au centre et contenant 15 tonnes de produits explosifs de la DD 1.1. Le schéma permet, en particulier, de visualiser l'effet directionnel des projections dans le cas d'un magasin recouvert de terre. Par ailleurs, le rayon R4 (en rouge) sous-estime, la distance IBD projections pour une installation exposante de type structure légère ou magasin

recouvert de terre (partie frontale). En revanche, il la surestime dans le cas de ce magasin pour les directions arrière et latérale, ce qui correspond à un large secteur angulaire (de l'ordre de 240°).

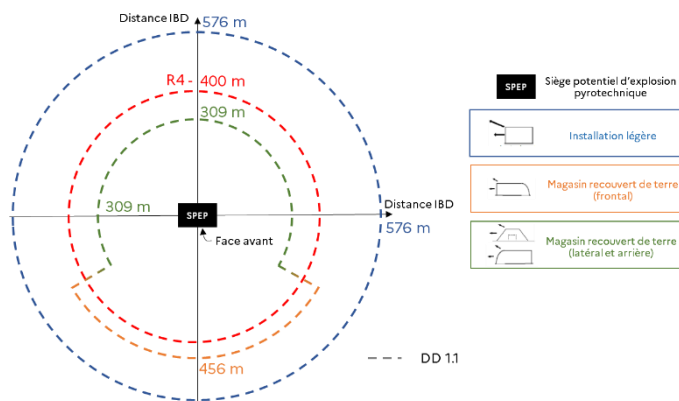


Figure 5 : représentation spatiale des distances projections IBD pour différents sièges exposants et comparaison avec le rayon R4 (QNE : 15 tonnes DD 1.1).

Cette comparaison pourrait être considérée comme partielle puisque l'approche française traite les projections secondaires au travers des zones souffle. La combinaison de ces effets est donc représentée sur le graphique de la figure 6 avec en bleu foncé la distance projections R4 de 400 m et en bleu clair la courbe R4 souffle qui prédomine au-delà de 5 tonnes. Ces distances sont comparées aux distances IBD obtenues lors des expérimentations réalisées ces dernières décennies sur un large panel d'installations exposantes et des quantités d'explosif jusqu'à plus de 100 tonnes. Jusqu'à 1 tonne environ, les distances IBD déterminées lors de ces essais sont inférieures au R4 et à la valeur historique de l'IBD de 400 m. Au-delà de cette quantité, elles deviennent majorantes par rapport au R4 projections mais également au R4 souffle, jusqu'à 20 tonnes ou plus, pour certaines installations exposantes. Ces travaux expérimentaux montrent ainsi que les éléments projetés à de grandes distances sont essentiellement des débris et que la formule française pour la suppression n'est pas toujours enveloppe des projections secondaires.

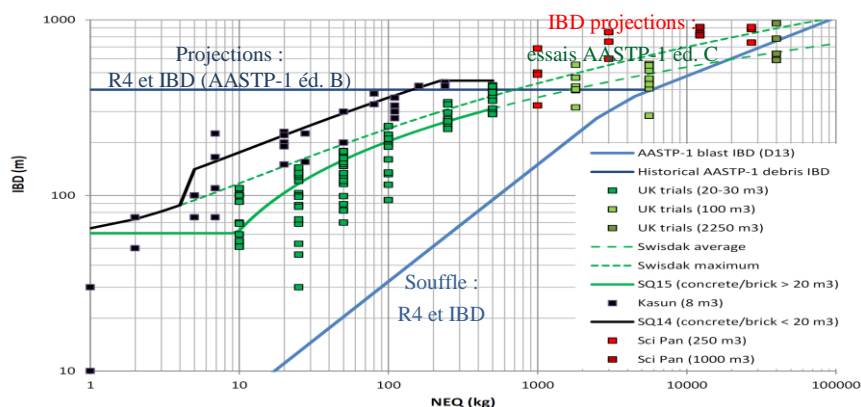


Figure 6 : expérimentations menées par différents pays de l'OTAN pour évaluer les distances IBD projections et comparaison avec les distances R4 souffle et projections.

Comparaison IBD/R4 pour la sDD 1.2.1

En division de danger 1.2, il n'y a pas de danger d'explosion en masse. Seuls quelques objets détonent simultanément. Les autres réagissent de façon progressive. Dans l'AASTP-1, la DD 1.2 comporte deux sous-divisions : sDD 1.2.1 pour des produits dont la

charge militaire contient de l'explosif et a une masse de matière active supérieure à 136 g ; sDD 1.2.2 sinon¹⁰. En France, la sDD 1.2.1 correspond aux objets contenant plus de 750 g de matière active (incluant la charge militaire et la charge propulsive), ce qui est très proche de la définition retenue dans les précédentes éditions de l'AASTP-1¹¹.

¹⁰ La sDD 1.2.2 inclut de facto un objet avec une charge militaire inerte.

¹¹ 710 g dans l'AASTP-1 Edition 1 Change 2 (2006) - charge militaire contenant de l'explosif



Pour la sDD 1.2.1, les objets qui détonent simultanément représentent l'événement crédible maximum (MCE en anglais). La distance des projections est calculée en utilisant la formule de la DD 1.1 pour le MCE (objets détonant simultanément) et une formule représentant l'effet

progressif pour l'ensemble des objets (QNE) (tableau 1). La distance retenue correspond au maximum de ces deux distances.

A titre d'exemple, le graphique de la figure 7 présente le cas d'un magasin recouvert de terre en frontal (courbes de couleur orange). Le MCE retenu, 50 kg dans ce cas, est constant quelle que soit la quantité d'objets présents dans l'installation. La distance des projections liées au MCE ne varie donc pas. L'effet progressif de projection d'éclats primaires prend en compte l'ensemble des objets et augmente avec la quantité de produits. La distance projections (maximum des deux distances) est définie par la détonation (MCE) pour les très faibles masses puis par les effets progressifs (figure 7).

A noter que l'AASTP-1 distingue le cas d'un MCE faible, pour lequel la structure de l'installation est résistante à la détonation de cette quantité (courbes de couleur verte - figure 7). Un magasin recouvert de terre respectant les règles de construction d'un igloo 3 ou 7 bars rentre dans cette catégorie. Dans ce cas, les projections sont arrêtées dans les directions ne présentant pas d'ouverture, telles que les faces latérales et arrière d'un magasin recouvert de terre. Une distance progressive réduite à 60 m est alors appliquée.

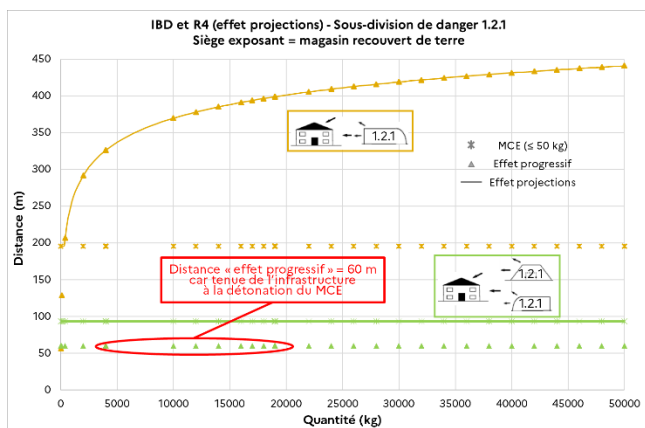


Figure 7 : représentation graphique des distances projections IBD pour un magasin recouvert de terre (produits de la sDD 1.2.1).

Le graphique de la figure 8 présente la comparaison de la distance R4 en rouge et de l'IBD pour une structure légère (courbe bleue), un magasin recouvert de terre face frontale (courbe orange) et faces latérales ou arrière (courbe verte).

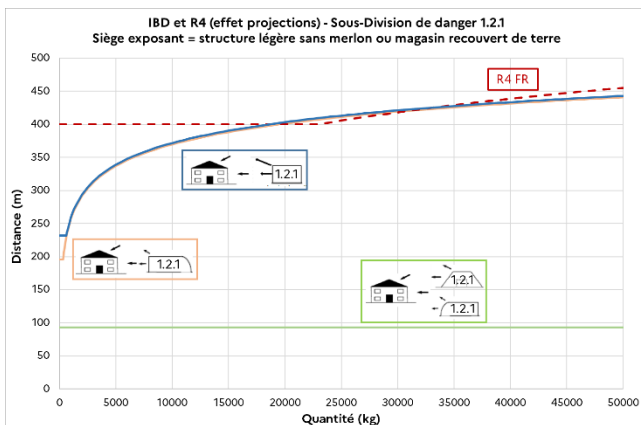


Figure 8 : comparaison de la distance R4 et de l'IBD pour différents sièges exposant (produits de la sDD 1.2.1).

Les distances IBD sont quasiment identiques entre structures résistante à la détonation du MCE (face frontale) ou non résistante. Par ailleurs, contrairement au cas de la DD 1.1, un très bon accord existe entre la distance projections R4 et l'IBD au-delà de 15 tonnes. En revanche, la distance R4 est sur-contrainte en faces latérales et arrière d'une installation résistante à la détonation du MCE (secteur angulaire de 340°).

L'apport de la structure résistante à la détonation du MCE est particulièrement visible sur la représentation spatiale des effets (figure 9) où on observe, pour une QNE de 15 tonnes, des distances voisines de R4, avec, en siège exposant, une structure légère ou un magasin recouvert de terre en frontal. Pour ce dernier, les projections sont dans un angle très fermé (plus ou moins 10°) puisqu'elles ne sortent que par l'ouverture en face avant. Les distances latérales et arrière sont, quant à elles, quatre fois inférieures au R4 et couvrent un arc très large de 340°.

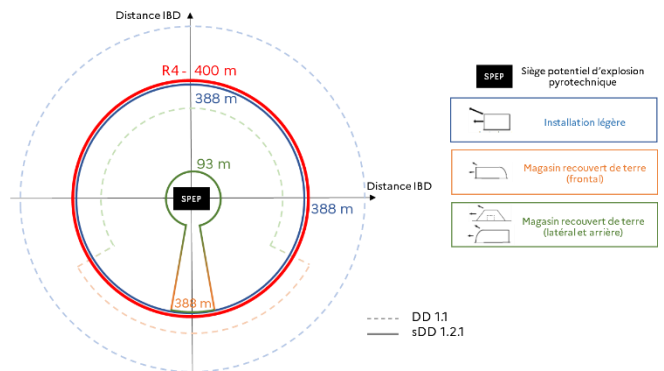


Figure 9 : représentation spatiale des distances projections IBD pour différents sièges exposants et comparaison avec le rayon R4 (QNE : 15 tonnes sDD 1.2.1 - MCE : 50 kg).

Comparaison à l'IBD/R4 des distances françaises et OTAN pour la sDD 1.2.2

Pour la sDD 1.2.2, les objets ont une charge militaire ne contenant pas d'explosif ou en quantité inférieure à 136 g. Ils génèrent donc moins d'effets que des objets de la sDD 1.2.1 et la notion de MCE ne s'applique pas car l'effet progressif est prépondérant.

La distance IBD (figure 10) est identique entre structure légère et magasin recouvert de terre (face frontale). Par comparaison, la distance R4 apparaît comme sur-contrainte. L'écart est encore plus grand par rapport aux faces arrière et latérales de ce magasin pour lesquelles la structure résistante de l'installation conduit à une distance réduite à 30 m sur un secteur angulaire de 340°.

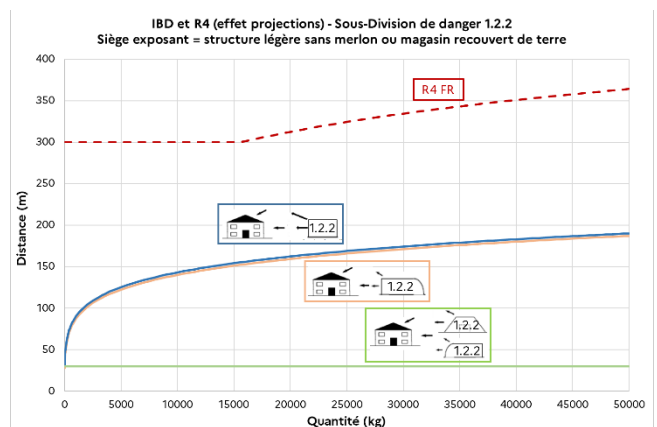


Figure 10 : comparaison de la distance R4 et de l'IBD pour différents sièges exposant (produits de la sDD 1.2.2).



La représentation spatiale des effets (figure 11) confirme que les distances sont très inférieures à celles des projections générées par les produits de la sDD 1.2.1. Le rayon IBD est, par ailleurs, deux fois plus petit que R4, pour une structure légère et 10 fois inférieur en latéral ou à l'arrière d'un magasin recouvert de terre.

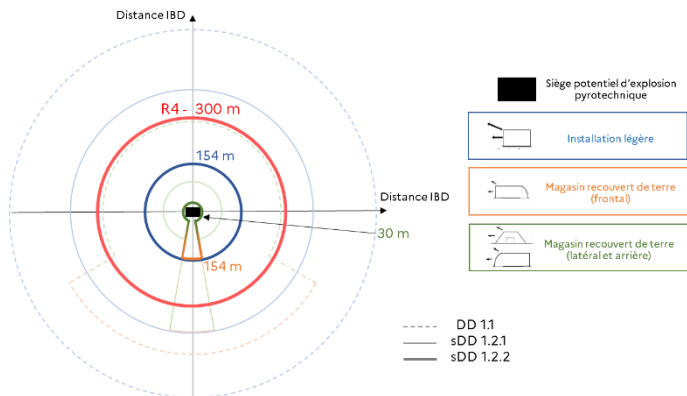


Figure 11 : représentation spatiale des distances projections IBD pour différents sièges exposants et comparaison avec le rayon R4 (QNE : 15 tonnes sDD 1.2.2).

CONCLUSION

La connaissance des effets des projections a beaucoup progressé à l'OTAN depuis 40 ans grâce aux résultats des nombreuses expérimentations réalisées.

En comparant les ratios entre les zones d'effets françaises et les ratios entre les distances d'implantation des installations dans l'AASTP-1, on peut retrouver certaines similitudes pour les produits de la sDD 1.2.1 mais plus difficilement pour la DD 1.1. Par ailleurs, dans certaines circonstances, les distances liées à la surpression n'intègrent pas totalement les projections secondaires, comme

généralement admis dans la réglementation française. Ce constat est révélateur du différentiel qui s'est créé entre les règles françaises et OTAN. Une analyse quantifiée du risque permettrait de préciser si la différence de risque en résultant est significative ou non.

Le résultat le plus marquant de cette étude est la sur-contrainte liée aux règles françaises avec les produits explosifs de la DD 1.2. Elle est notable pour la sDD 1.2.1 pour des sièges exposants résistants à la détonation du MCE et très importante avec la sDD 1.2.2 quel que soit le type de siège exposant.

De nombreux produits explosifs, dont les munitions, relèvent de la DD 1.2 et l'impact économique de ce constat peut être important. Des gains sont susceptibles d'être obtenus sur la densification des stockages et la productivité. En effet, les stockages pourraient être densifiés en autorisant un timbrage beaucoup plus important, sans régression de la sécurité pyrotechnique. Un gain de productivité pourrait aussi être obtenu en limitant les contraintes actuelles liées aux interdictions de co-activités dues à des zones d'effets surdimensionnées au regard des résultats expérimentaux.

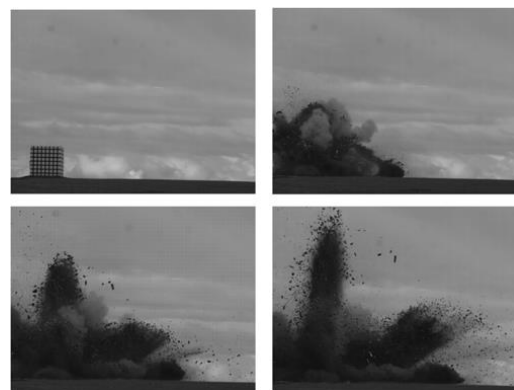


Figure 12 : visualisation des effets de projections générés par la détonation d'une charge explosive nue de 6,9 kg (éq. TNT) dans une installation en béton armé de volume 8 m³.

De l'efficacité des merlons

Cet article a été rédigé par Pierre-François Péron (DGA/IPE).

Un article de la lettre de l'IPE n°47 rappelait l'importance des merlons. La présentation de l'AASTP-1 dans ce numéro donne l'occasion de quantifier le gain en sécurité apporté par la présence de merlons en fonction des types de sièges exposants et exposés.

I- RAPPELS SOMMAIRES SUR LES MERLONS

Les merlons sont des élévations de terre ou d'autres matériaux positionnés autour des installations. Leur rôle premier est d'arrêter les éclats à haute énergie générés lors d'une détonation afin d'éviter une transmission quasi-simultanée aux installations pyrotechniques voisines. Ils permettent également de réduire les conséquences sur les personnes en interceptant une partie des projections primaires et secondaires. Enfin, ils perturbent les effets de souffle et thermique lorsqu'ils sont situés à proximité du siège exposant et les réduisent lorsqu'ils sont positionnés au niveau du siège exposé.

Pour être efficaces et justifier l'utilisation des règles spécifiques de l'AASTP-1 pour les installations disposant de merlons, ils doivent respecter certaines dispositions constructives précisées dans l'AASTP-1 telles que leurs dimensions, leur position par rapport aux installations et les matériaux utilisés (Figure 1).

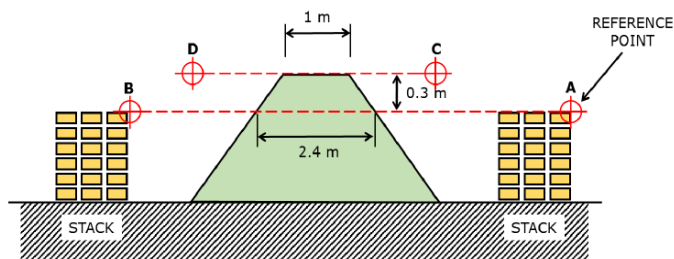


Figure 1 : schéma de principe de construction de merlons selon les normes OTAN (AASTP-1 édition c, partie II, page II-2-8).



Dans la suite de l'article, l'apport des merlons est illustré en étudiant différentes configurations traitées dans l'AASTP-1 :

- prévention de la transmission simultanée de la détonation entre installations ;

- présence d'un merlon à proximité d'un siège exposant ;
- éloignement entre sièges exposant et exposé ;
- positionnement d'un merlon à proximité du siège exposé ;
- faible quantité de produits explosifs dans le siège exposant.

Pour chacune de ces configurations, la comparaison des distances de sécurité QD en fonction de la présence de merlons ou non, est réalisée en considérant comme siège exposant une infrastructure légère contenant des produits des divisions de danger 1.1 et 1.2 (DD 1.1 et DD 1.2) et en se limitant à un MCE¹ de 50 kg dans le cas de la sous-division de danger 1.2.1 (sDD 1.2.1).

II- PREVENTION DE LA TRANSMISSION QUASI-SIMULTANEE DE LA DETONATION ENTRE INSTALLATIONS

L'AASTP-1 définit pour chaque couple d'installations de stockage exposante / exposée une distance minimale, appelée distance inter-magasins destinée à prévenir la transmission quasi-simultanée de la détonation. L'ajout d'un merlon au niveau de l'une de ces installations permet d'arrêter les projections rasantes susceptibles d'engendrer cette transmission.

Par exemple, dans le cas d'infrastructures légères exposante et exposé, il apporte, comme illustré figure 2, une réduction d'un facteur six de la distance d'implantation pour des produits de la DD 1.1.

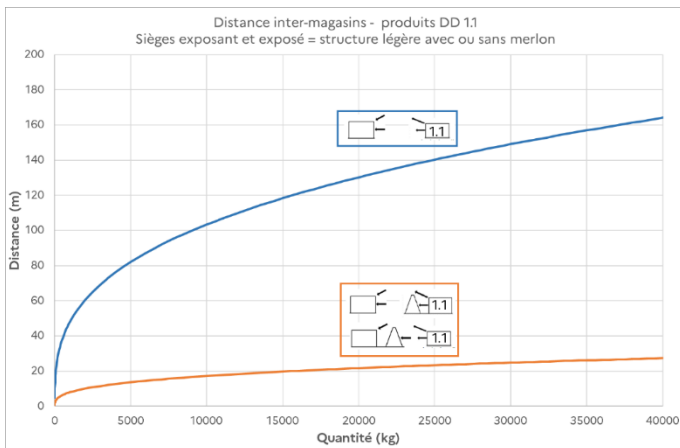


Figure 2 : effets d'un merlon sur la distance inter-magasins dans le cas d'infrastructures légères (produits DD 1.1 dans le siège exposant).

III- IMPACT DE LA PRESENCE DE MERLONS POUR LA PROTECTION DES HABITATIONS

Comme rappelé en introduction, l'un des intérêts des merlons est d'arrêter les projections rasantes et d'améliorer ainsi la protection des installations exposées. Pour illustrer cet effet, nous avons considéré le cas d'une infrastructure légère, merlonnée ou non, exposant une habitation².

Cas des produits de la DD 1.1

Le graphique de la figure 3 compare la distance minimale de sécurité (IBD³) à laquelle peut être implantée cette habitation en fonction de la quantité de produits de la DD 1.1 sans merlon (courbe bleue) et avec merlon côté siège exposant (courbe orange). La distance R4 de la réglementation française correspondant à la limite Z4/Z5 est représentée en rouge. Pour rappel, elle est définie par la distance la plus grande calculée avec les formules dites « surpression » ($22 Q^{1/3}$) et « projections » (distance minimale forfaitaire de 400 m).

D'après ce graphique, suivant l'AASTP-1, la présence d'un merlon apporte une réduction de la distance IBD pour des quantités allant jusqu'à environ 7 tonnes. Par ailleurs, la courbe de l'effet souffle seul⁴ (triangles verts) a également été représentée et permet de visualiser l'effet majorant entre projections/débris et souffle en fonction de la quantité de produits explosifs. L'effet projections/débris prédomine en-deçà de 22 tonnes, ce qui confirme que les projections ne sont pas systématiquement comprises dans les zones souffle (cf. article précédent de cette lettre). Ainsi, pour des quantités inférieures à 7 tonnes, la réduction des distances QD apportée par les merlons vis-à-vis des projections n'est pas masquée par une prédominance de l'effet de souffle.

La réglementation française quant à elle ne prévoit pas de formules adaptées en présence de merlons. Jusqu'à 5 tonnes, la distance forfaitaire de 400 m est supérieure ou égale à la distance obtenue par les règles de l'AASTP-1, en présence de merlon. Elle ne restitue pas son effet protecteur contre les projections. Elle le sous-estime ensuite pour des quantités supérieures, jusqu'à ce que l'effet de souffle soit prépondérant.

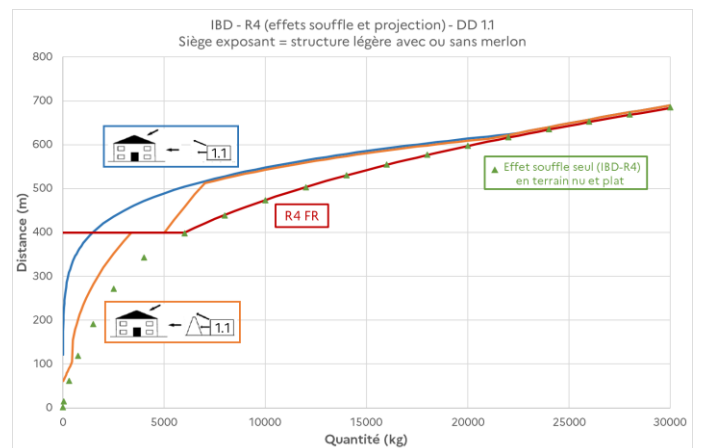


Figure 3 : effet d'un merlon à proximité d'une infrastructure légère exposant une installation située à l'IBD (produits DD 1.1).

¹ Maximum Credible Event

² Situation équivalente, pour des installations internes à un site pyrotechnique, à un bureau d'au moins 20 personnes

³ Inhabited Building Distance

⁴ Courbe identique dans l'AASTP-1 avec ou sans merlon



Cas des produits de la sDD 1.2.1

Dans le cas d'une structure légère contenant des produits de la sDD 1.2.1, l'apport du merlon est limité (figure 4). L'effet progressif⁵ est prépondérant hormis dans le cas d'une quantité de quelques centaines de kg où les

projections des produits détonant simultanément (MCE) conduisent à des distances plus grandes en l'absence de merlon. La présence d'un merlon apporte alors un gain significatif. Cette situation particulière pour des « petites quantités » est analysée dans la dernière partie de cet article.

Les zones forfaitaires françaises apparaissent surprotectrices jusqu'à 20 tonnes environ.

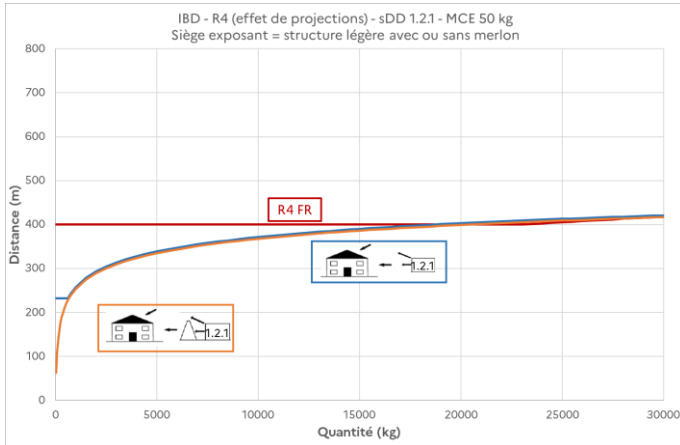


Figure 4 : effet d'un merlon à proximité d'une infrastructure légère exposant une installation située à l'IBD (produits sDD 1.2.1).

Cas des produits de la sDD 1.2.2

Enfin, les produits de la sDD 1.2.2, génèrent des effets de projections limités en raison de leur faible masse de matière active unitaire. Les distances sont ainsi inchangées avec ou sans merlon (figure 5).

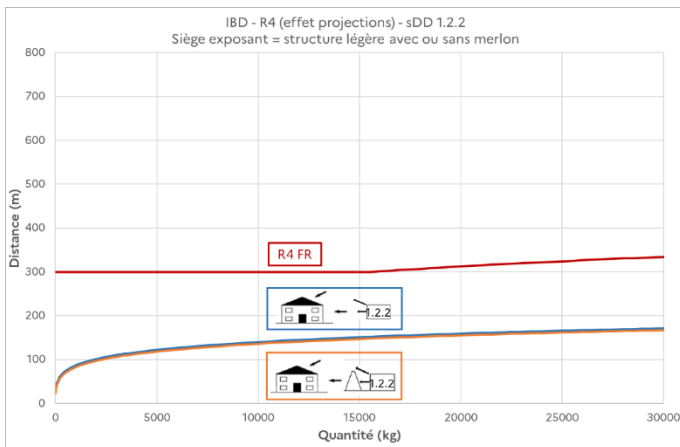


Figure 5 : effet d'un merlon à proximité d'une infrastructure légère exposant une installation située à l'IBD (produits sDD 1.2.2).

Analyse des résultats obtenus

En résumé, dans le cas d'une infrastructure légère exposant une habitation (ou un bureau d'au moins 20 personnes), l'apport du merlon est significatif dans le cas de produits de la DD 1.1 en

⁵ Pour mémoire, pour ce type de produits explosifs, il est attendu un effet dit « pop-corn » correspondant à un enchaînement successif de réactions

quantité inférieure à 7 tonnes. Ceci ne signifie pas que le merlon n'est pas efficace pour des quantités supérieures mais que les projections rasantes ont majoritairement une portée limitée en raison de leur faible angle initial. En effet, comme illustré figure 6, la trajectoire balistique des éclats est la plus grande pour des angles initiaux de l'ordre de 20 à 25° et est sensiblement réduite pour des angles de quelques degrés. Ainsi, à grande distance, les projections et débris sont essentiellement ceux ayant une trajectoire courbe qui n'est pas perturbée par la présence ou non d'un merlon au niveau du siège exposant.

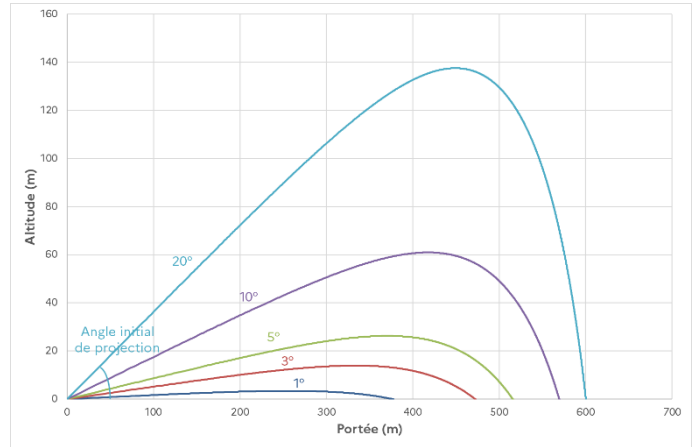


Figure 6 : exemple de portée d'un éclat (en acier de masse 120 g et de vitesse initiale 1600 m/s) en fonction de son angle initial de projection (calcul EVREST).

Cette analyse pourrait également expliquer l'apport limité d'un merlon pour les produits de la sDD 1.2.1 dans le cas d'une installation située à l'IBD. En effet, seule une faible quantité de produits détone quasi-simultanément, limitant ainsi le nombre d'éclats rasants générés. La distance IBD étant d'au moins 300 m à 400 m (hormis pour les quantités jusqu'à 2 tonnes), la balistique extérieure de ces éclats devrait conduire à la retombée d'une partie d'entre eux à des distances inférieures, ce qui réduit d'autant plus la probabilité d'être atteint par un éclat rasant. L'apport d'un merlon pour arrêter ces éclats primaires apparaîtrait ainsi limité. Il en est de même pour les débris générés, le phénomène étant probablement amplifié par leur faible densité qui conduit à une surface exposée en vol plus grande et accroît donc l'effet de traînée.

III- IMPACT DE LA PRESENCE DE MERLONS POUR LA PROTECTION DES ATELIERS PYROTECHNIQUES

L'effet des projections primaires et des débris rasants étant naturellement atténué en s'éloignant du siège exposant, nous avons également considéré la situation d'exposition d'un atelier pyrotechnique situé à l'intérieur du site pyrotechnique dont la distance d'implantation par rapport à des sièges exposant peut être sensiblement inférieure à l'IBD. Dans cette situation, l'atelier est potentiellement à portée de ces projections qu'elles aient une trajectoire rasante ou balistique.

Le cas de produits de la sDD 1.2.2 ne sera pas analysé dans la suite. En effet, comme au paragraphe précédent, du fait des effets relativement mineurs, la présence de merlons n'a pas d'impact sur les distances de sécurité QD.

de quelques objets à la fois mais sans explosion en masse. D'où la dénomination d'effet progressif.



Merlon situé au niveau du siège exposant

L'apport d'un merlon au niveau du siège exposant est particulièrement visible dans le cas de produits de la sDD 1.2.1 (figure 7), les distances de sécurité QD étant pratiquement divisées par 2.

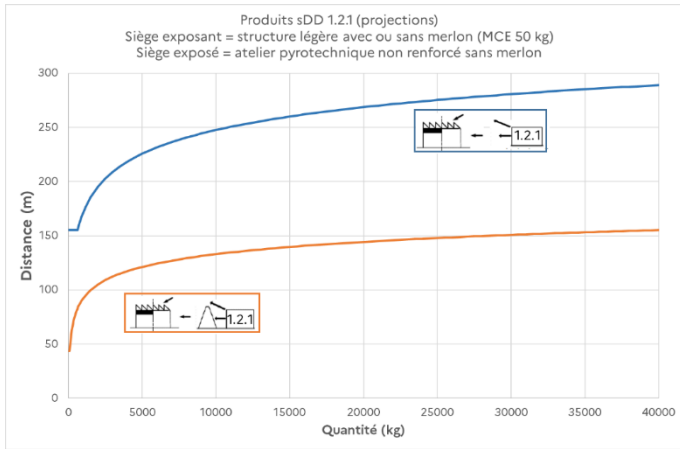


Figure 7 : effets d'un merlon à proximité d'une infrastructure légère exposant un atelier pyrotechnique non renforcé (produits sDD 1.2.1).

Un effet significatif de la présence d'un merlon au niveau du siège exposant est également noté avec des produits de la DD 1.1 (figure 8). L'écart résulte d'une part de la présence du merlon qui apporte une réduction de la distance des projections et débris jusqu'à 7 tonnes (comme dans le cas précédent d'une installation située à l'IBD) et d'autre part d'un positionnement de l'atelier pyrotechnique sans merlon au-delà de l'IBD souffle ($22,2 Q^{1/3}$) au lieu de $8 Q^{1/3}$ avec merlon. Ce principe d'éloignement d'une installation non protégée et exposée aux effets de produits de la DD 1.1 a également été identifié [dans l'article précédent](#). Il pourrait provenir historiquement des anciennes versions de l'AASTP-1 où seule une distance souffle était appliquée ($22,2$ ou $8 Q^{1/3}$ dans le cas présent).

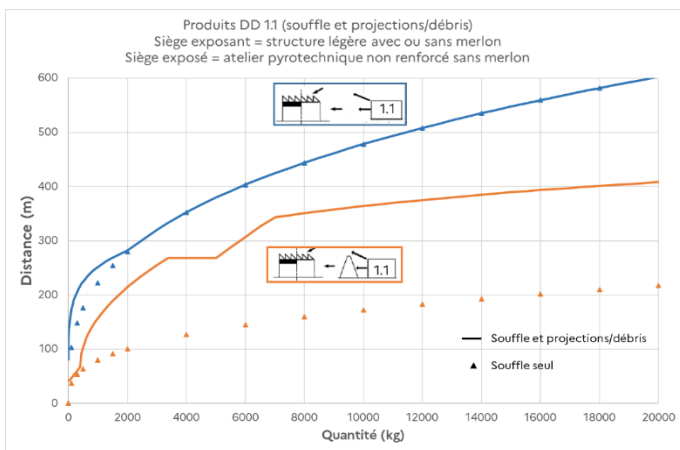


Figure 8 : effets d'un merlon à proximité d'une infrastructure légère exposant un atelier pyrotechnique non renforcé (produits DD 1.1).

⁶ Il est à noter que la présence du merlon côté siège exposé ne modifie pas la distance projections/débris (courbe représentée par des ronds verts et bleus).

Influence de la position des merlons

L'influence de la position du merlon est également prise en compte dans l'AASTP-1 pour certains couples de sièges exposant et exposé. Elle est illustrée sur les figures 9 et 10 en reprenant le cas précédent d'une infrastructure légère exposant un atelier pyrotechnique non renforcé avec ou sans merlon au niveau de l'une des deux installations ou des deux simultanément.

Pour les produits de la DD 1.1, la présence d'un merlon à proximité uniquement de l'atelier pyrotechnique exposé lève le principe d'éloignement évoqué dans le paragraphe précédent et réduit ainsi significativement les distances d'implantation au-delà de 2 tonnes par rapport à des installations non merlonnées⁶ (figure 9). Positionné du côté du seul siège exposant, le merlon apporte un gain supplémentaire par l'interception à la source des éclats rasants et faibles angles jusqu'à des quantités de 7 tonnes. Ce gain reste inchangé si les deux installations présentent un merlon.

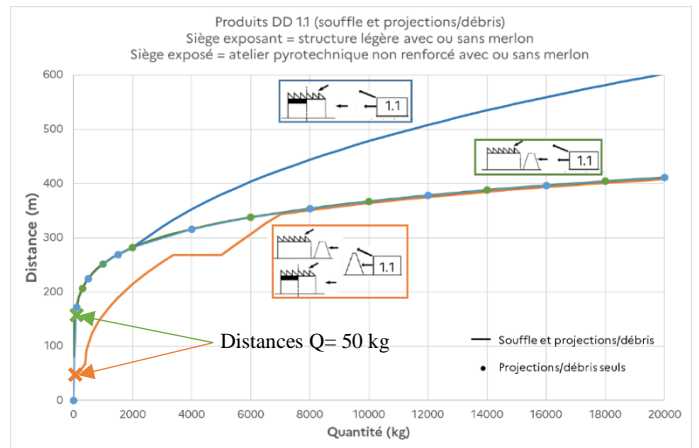


Figure 9 : effets des merlons positionnés au niveau soit du siège exposant ou exposé soit des deux simultanément (produits DD 1.1).

La contribution du merlon à la protection des ateliers pyrotechniques exposés est similaire avec des produits de la sDD 1.2.1 (figure 10). La réduction de la distance d'implantation est limitée par la détonation du MCE qui conduit à une distance minimale plus élevée avec un merlon côté siège exposé⁷ que siège exposant (cf. figure 9). Les distances sont ensuite identiques au-delà de 36 tonnes, l'effet lié à la réaction progressive des munitions devenant alors prépondérant.

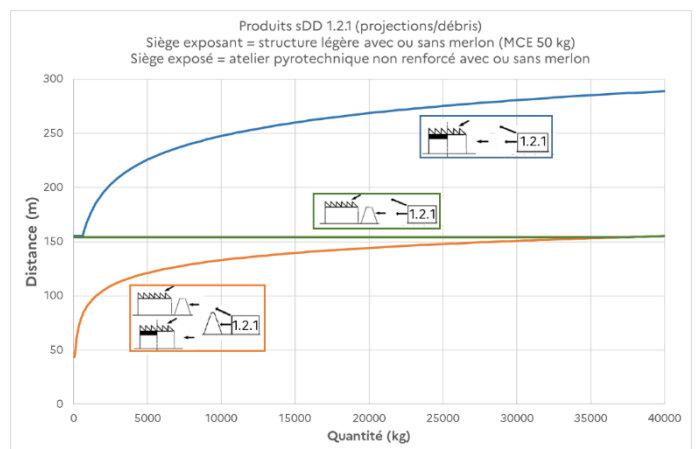


Figure 10 : effets des merlons positionnés au niveau soit du siège exposant ou exposé soit des deux simultanément (produits sDD 1.2.1).

⁷ Il est à noter qu'aucune contribution du merlon du siège exposé à l'arrêt des éclats rasants du MCE n'est prise en compte (distance identique à celle en l'absence de merlon).



IV- FAIBLES QUANTITES DE PRODUITS EXPLOSIFS DANS LE SIEGE EXPOSANT

La nouvelle édition de l'AASTP-1 a élargi la plage des quantités d'explosif couvertes pour le calcul des QD et s'applique à partir d'une quantité de 1 kg. Cette évolution permet d'affiner le calcul

des distances d'implantation dans le cas d'installations faiblement timbrées en matière pyrotechnique et de bénéficier des gains en réduction des distances apportés par la présence de merlons. Ces gains sont illustrés sur les figures 11 et 12 pour une structure légère, merlonnée ou non, exposant une habitation ou un bureau d'au moins 20 personnes. L'apport du merlon est significatif puisque la distance d'isolement de ces installations est réduite d'un facteur 2 à 3 pour des quantités de produits inférieures à 1250 kg (DD 1.1) et 130 kg (sDD 1.2.1).

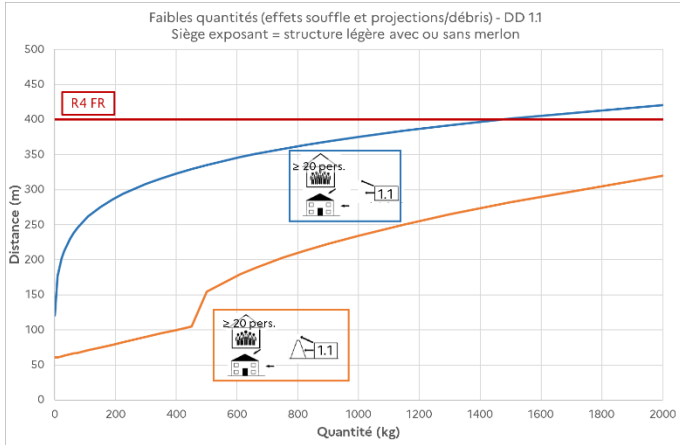


Figure 11 : effets d'un merlon positionné au niveau d'une infrastructure légère exposante (produits DD 1.1).

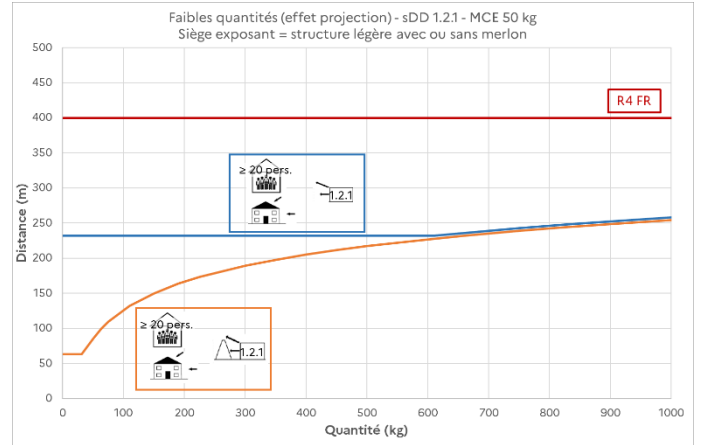


Figure 12 : effets d'un merlon positionné au niveau d'une infrastructure légère exposante (produits sDD 1.2.1).

CONCLUSION

Les exemples présentés dans cet article montrent que la présence de merlons permet une réduction sensible des distances de sécurité (QD) entre les installations en utilisant les règles de l'AASTP-1. Il convient de noter que ces réductions de distance peuvent se faire sans abaissement du niveau de sécurité sur la base des résultats des nombreuses expérimentations menées par l'OTAN, sous réserve que les merlons soient conformes aux caractéristiques décrites dans les documents OTAN (tel qu'illustré figures 1 et 13).

Les analyses effectuées confirment que les zones d'effet de souffle établies avec les règles françaises (formule dite surpression) ne prennent pas bien en compte les projections (éclats primaires et débris) qui, en fonction des quantités de produits explosant en

masse, peuvent avoir un effet prépondérant. Il semble très vraisemblable que la prise en compte des débris dans les zones d'effet de souffle établies avec les règles françaises ait été réalisée à l'origine pour des dépôts merlonnés, ce qui était alors la norme.

Il est donc nécessaire de continuer à exiger la présence de merlons (ou écrans équivalents) en particulier au niveau des sièges exposants présentant un risque d'explosion en masse. Pour les implantations existantes qui ont été dimensionnées avec les règles françaises forfaitaires, cette exigence sur les merlons est particulièrement cruciale du fait de la sous-estimation possible des effets des projections, notamment pour les produits explosifs de la DD 1.1.

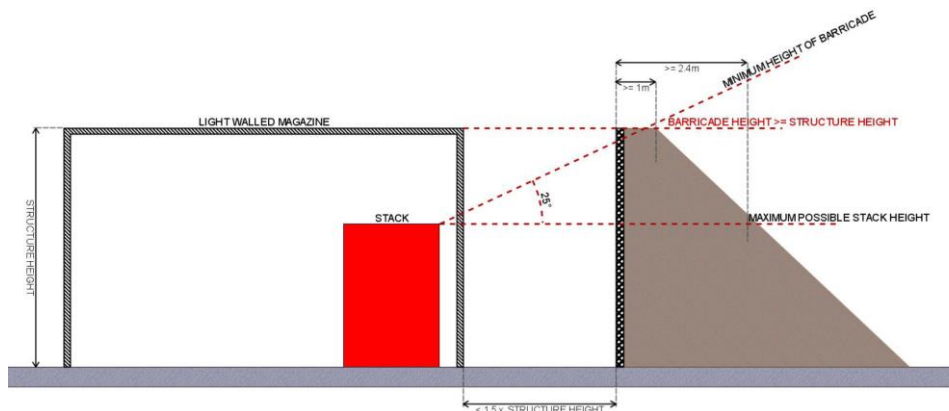


Figure 13 : exemple de dispositions constructives pour le merlonnage d'une infrastructure légère (extrait du document SRD AASTP-1.2 édition A).



Impact de l'utilisation de l'AASTP-1 sur quelques exemples

INTRODUCTION

L'article sur la correspondance entre les règles OTAN et françaises a montré la filiation entre ces réglementations.

Le présent article va quant à lui s'attacher à illustrer, par quelques exemples, les impacts possibles de l'utilisation de l'AASTP-1 édition C en comparant les distances d'implantation suivant ce document avec celles de l'arrêté et la circulaire du 20 avril 2007.

MATERIEL ET METHODES

Sièges exposants :

- Magasin recouvert de terre résistant jusqu'à 7 bars¹ de volume supérieur à 500 m³ - timbrage 10 tonnes
- Atelier pyrotechnique avec une structure renforcée en béton armé (murs et toit d'épaisseurs respectives 450 mm et 150 mm) - timbrage 1 tonne

Sièges exposés – classement de l'installation selon l'arrêté du 20 avril 2007 :

- Magasin recouvert de terre : installation a2
- Atelier pyrotechnique avec toit renforcé et merlon ou standard sans merlon : installations a2
- Atelier non pyrotechnique de moins de 20 personnes : installations a3
- Route extérieure 1000 - 5000 véhicules/jour
- Installation interne à l'établissement non liée à l'activité pyrotechnique classée a4
- Habitation extérieure

Suivant l'AASTP-1, les formules pour l'atelier non pyrotechnique et la route extérieure sont identiques pour les exemples étudiés dans cet article. Il en est de même pour une installation a4 et une habitation extérieure (distance IBD²).

Pour le classement des installations suivant l'arrêté du 20 avril 2007, la route est assimilée à une installation a3 en cohérence avec l'approche appliquée dans l'arrêté du 26 septembre 1980 (classement b2 pour une route avec une fréquentation de 200 à 2000 véhicules/jour et critère d'implantation identique à une installation a3). Par ailleurs, l'habitation extérieure a été considérée avec un classement par analogie avec des installations « accueillant des personnes non liées à l'activité pyrotechnique du site en vue d'activités sportives ou sociales ».

La conformité d'implantation selon l'arrêté du 20 avril 2007 est rappelée dans le tableau 1 en fonction de la probabilité d'accident pyrotechnique.

Zones d'effets	Probabilité d'accident pyrotechnique				
	P1	P2	P3	P4	P5
Z1	a0	a0	a0*	a0**	a0**
Z2	a2	a1a2*	a1	a1*	a1*
Z3	a1a2a3	a2	a1a2	a1	a1*
Z4	a1a2a3a4	a1a2a3	a1a2	a1a2	a1
Z5	a1a2a3a4	a1a2a3a4	a1a2a3a4	a1a2a3	a1a2a3

Tableau 1 : matrice de conformité d'implantation des installations (arrêté du 20 avril 2007).

Hypothèses retenues

L'analyse réalisée dans l'article sur la correspondance entre les zones d'effets des règles françaises et les distances de sécurité QD montre qu'il existe un lien entre les approches française et OTAN et que les distances OTAN semblent plutôt équivalentes aux zones de conformité à l'arrêté du 20 avril 2007 associées à une probabilité P2 pour le siège exposant (cf. [article sur la correspondance entre zones d'effets des règles françaises et distances QD de l'AASTP-1](#)).

Dans les exemples retenus, pour la réglementation française, on retiendra une probabilité de l'évènement pyrotechniques P1 ou P2 pour le stockage et P2 pour l'atelier pyrotechnique. On prendra en compte des produits de la division de danger 1.2 (DD 1.2) contenant plus de 750 g de matière active. Pour les effets thermiques, on considérera des produits de la sous-division de danger 1.3a (sDD 1.3a).

Pour les règles OTAN, l'évènement maximal crédible MCE de munitions de sous-division 1.2.1 (sDD 1.2.1) sera de 50 kg³. Pour les effets thermiques, on retiendra des produits de sDD 1.3.1.

Pour un siège exposant de type magasin recouvert de terre, l'AASTP-1 prend en compte, dans certains cas, des effets directionnels en faces frontale ou latéral/arrière. Les distances QD en faces latéral/arrière sont alors réduites et s'appliquent sur de larges secteurs, comme illustré sur la figure 1 dans le cas du magasin recouvert de terre pour des produits des DD 1.1 et 1.3 (secteur de l'ordre de 240°) ou de la DD 1.2 (secteur de l'ordre de 340°). Les exemples retenus sont instruits pour des installations situées en faces latérale ou arrière du magasin exposant, à l'exception de quelques situations qui sont alors clairement identifiées.

¹ Critères donnés dans le document OTAN SRD AASTP-1.3, Edition A, version 1

² Inhabited Building Distance

³ 60 % des munitions américaines classées en sDD 1.2.1 ont un MCE inférieur à 50 kg (d'après la base de données américaine sur le classement en division de danger des munitions US en service).

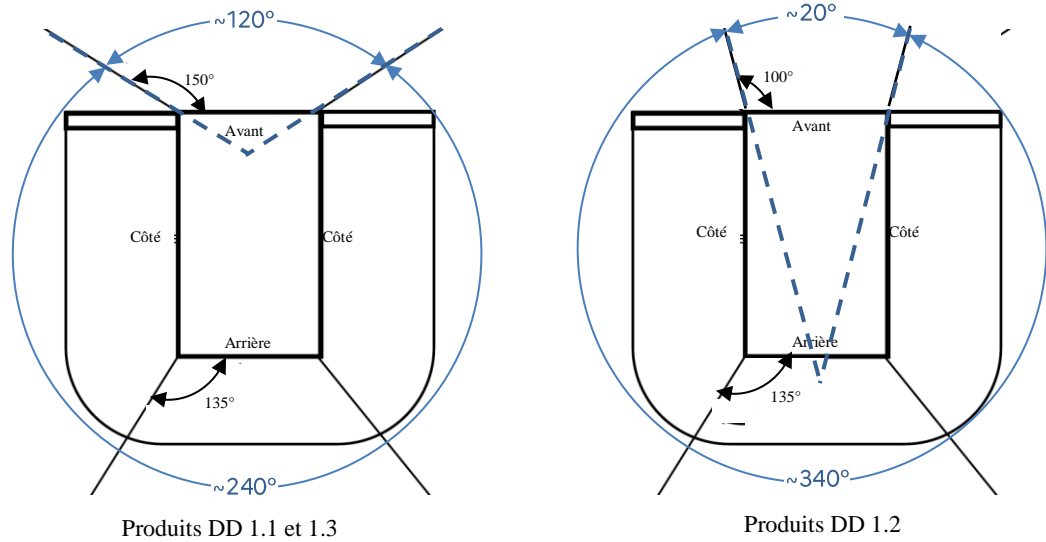


Figure 1 : couverture angulaire des effets directionnels pour un magasin recouvert de terre comme siège exposant.

RESULTATS

Pour les différents cas étudiés, les résultats sont présentés dans des tableaux comparatifs des distances à respecter selon les règles françaises et OTAN. Pour chaque résultat, un code couleur est utilisé afin d'indiquer :

- en vert : distance de sécurité calculée avec les règles OTAN inférieure à celle obtenue avec les règles françaises. Le stockage peut donc être densifié. L'indication « max » est ajoutée dans certains cas et signifie que la quantité de munitions pouvant être ajoutée n'est limitée que par la capacité physique de l'installation, sans impact sur les distances d'effets ;
- en jaune : les distances calculées peuvent être considérées comme équivalentes. La densification du stockage n'est pas possible ;
- en rouge : la distance de sécurité calculée avec les règles OTAN est plus élevée qu'avec les règles françaises. Ces situations traduisent une surexposition acceptée avec les règles françaises. L'utilisation de l'AASTP-4 et d'un code de calcul adapté permettrait de quantifier le seuil de risque admis selon les règles françaises.

Cas 1 – Distances à respecter entre un magasin recouvert de terre et différents sièges exposés

Produits de la DD 1.1

Dans le cas de la DD 1.1 (tableau 2), des gains importants peuvent être obtenus en densité de stockage dans les magasins recouverts de terre. Même si pour ce type de magasin en tant que siège exposé, le guide défense des bonnes pratiques préconise l'utilisation des distances QD, il n'en résulte pas moins que ces distances ne respectent pas la matrice réglementaire française aiPjZk. Cela montre par ailleurs que les zones de magasins au ministère des armées ont été conçues selon les règles OTAN lorsque celles-ci pouvaient être utilisées par les armées (avant l'abrogation des instructions interarmées 1006 et 1007). Pour les autres installations, la comparaison des distances illustre concrètement la surexposition induite par l'utilisation des règles françaises dans le cas d'une probabilité P1, qui a été identifiée dans l'article sur la correspondance entre les zones d'effets françaises et les distances de sécurité QD.

Sièges exposés		Conformité d'implantation		DD 1.2 / sDD 1.2.1 Distances d'éloignement (m)				
		Fr/P1	Fr/P2	Fr/P1	Fr/P2	OTAN	Densification	
Magasin recouvert de terre	a2	Z2	Z3	(11) / 108 *	(11) / 172 *	11 / 78 **	P1	P2
Atelier pyrotechnique avec merlon et toit renforcé	a2	Z2	Z3	108	172	173	P1	P2
Atelier pyrotechnique sans merlon	a2	Z2	Z3	108	172	191	P1	P2
Atelier non pyrotechnique ou route publique (trafic moyen)	a3	Z3	Z4	172	323	201 / 259 ***	P1	P2
Habitations	a4	Z4	Z5	323	474	302 / 388 ***	P1	P2

* (valeur selon Guide défense des bonnes pratiques) / valeur selon l'arrêté et la circulaire du 20/04/2007

** secteurs arrière et latéral du magasin exposé / faces avant des magasins exposant et exposé en vis-à-vis

*** secteur arrière du magasin exposant / secteur latéral du magasin exposant

Tableau 2 : calcul des distances d'éloignement en latéral et arrière d'un magasin de stockage recouvert de terre (10 tonnes de produits de la DD 1.1).



Par ailleurs, les règles OTAN permettent de prendre en compte les effets directionnels, c'est-à-dire qu'elles distinguent les effets selon les faces du siège exposant comme illustré dans le tableau 1 pour les magasins recouverts de terre mais également l'atelier non pyrotechnique ou les habitations. Ce point est intéressant lors de la conception d'installations pour optimiser les implantations en fonction de l'orientation des faces du siège exposant. La prise en compte d'un merlon et d'un toit renforcé permet quant à elle de réduire la distance d'éloignement d'un atelier pyrotechnique. Enfin, pour les habitations, les distances de sécurité des règles OTAN sont soit équivalentes soit inférieures aux distances de la réglementation française.

Produits de la DD 1.2 / sDD 1.2.1

Pour la DD 1.2 / sDD 1.2.1 (tableau 3), des gains très importants peuvent être réalisés en particulier à l'intérieur de zones de stockage avec des magasins recouverts de terre. En effet, le magasin peut être rempli à la limite de ses capacités dimensionnelles. Des gains peuvent également être obtenus en densification de stockage ou, le cas échéant, en allègement des contraintes prises pour la gestion de co-activités mise en place par dérogation tacite à la grille de conformité d'implantation d'installations de l'arrêté du 20 avril 2007. Par ailleurs, l'absence de merlon et de toit renforcé a un impact important sur les QD. Pour ce qui concerne les habitations extérieures et dans cet exemple, les distances d'éloignement sont beaucoup plus faibles avec les règles OTAN.

Sièges exposés		Conformité d'implantation		DD 1.2 / sDD 1.2.1			
		Fr/P1	Fr/P2	Distances d'éloignement (m)			
		Fr/P1	Fr/P2	Fr/P1	Fr/P2	OTAN	Densification
Magasin recouvert de terre	a2	Z2	Z3	25	135	2 / 14 *	max
Atelier pyrotechnique avec merlon et toit renforcé	a2	Z2	Z3	25	135	30	P1 P2
Atelier pyrotechnique sans merlon	a2	Z2	Z3	25	135	63	P1 P2
Atelier non pyrotechnique ou route publique (trafic moyen)	a3	Z3	Z4	135	300	63	max
Habitations	a4	Z4	Z5	300	400	94	max

* secteurs arrière et latéral du magasin exposé / faces avant des magasins exposant et exposé en vis-à-vis

Tableau 3 : calcul des distances d'éloignement en latéral et arrière d'un magasin de stockage recouvert de terre (10 tonnes de produits de la DD 1.2 ou sDD 1.2.1).

Produits de la sDD 1.3a / sDD 1.3.1

Enfin, pour la sDD 1.3a / sDD 1.3.1 (tableau 4), les distances d'éloignement avec les règles françaises et OTAN sont équivalentes sauf entre magasins recouverts de terre qui peuvent être placés de façon beaucoup plus rapprochée que les règles françaises ne le permettent. Dans ce cas, aucune contrainte de distance n'est définie dans les directions du magasin exposant qui ne comportent pas d'ouverture (latérale et arrière). De plus, ces magasins peuvent être remplis au maximum de leur capacité volumique en tenant compte

toutefois des densités de chargement afin de limiter le risque de transition des produits vers un régime d'explosion en cas d'événement pyrotechnique.

Les règles OTAN prennent en compte les ouvrants des magasins recouverts de terre. On voit que les distances peuvent être très différentes selon que l'on se situe dans ou hors du cône d'exposition lié à l'ouverture.

Sièges exposés		Conformité d'implantation		sDD 1.3a / sDD 1.3.1			
		Fr/P1	Fr/P2	Distances d'éloignement (m)			
		Fr/P1	Fr/P2	Fr/P1	Fr/P2	OTAN	Densification
Magasin recouvert de terre	a2	Z2	Z3	54	76	0 / 25 **	max
Atelier pyrotechnique avec merlon et toit renforcé	a2	Z2	Z3	54	76	69	
Atelier pyrotechnique sans merlon	a2	Z2	Z3	54	76	69	
Atelier non pyrotechnique ou route publique (trafic moyen)	a3	Z3	Z4	76	108	93	
Habitations	a4	Z4	Z5	108	140	138	

* secteurs arrière et latéral du magasin exposant/ secteur avant du magasin exposant

Tableau 4 : calcul des distances d'éloignement en latéral et arrière d'un magasin de stockage recouvert de terre (10 tonnes de produits de sDD 1.3a/1.3.1).



Cas 2 – Distances à respecter entre un atelier pyrotechnique et différents sièges exposés

Comme indiqué dans les hypothèses en début d'article, les distances sont calculées suivant les règles françaises en prenant une probabilité P2 pour un atelier pyrotechnique en tant que siège exposant.

Produits de la DD 1.1

Pour des produits explosifs de la DD 1.1 (tableau 5), le calcul des distances suivant la réglementation française a été réalisé de deux façons : la première en prenant en compte uniquement l'effet de souffle et la seconde en ajoutant les projections.

Avec l'effet de souffle seul, les résultats montrent que les distances OTAN sont beaucoup plus importantes pour les sièges exposés sans merlon ou à grande distance. Ce résultat met en lumière que, pour

la DD 1.1, les règles françaises, contrairement à ce qui est communément admis, ne prennent pas bien en compte les projections en se limitant à la surpression (la maxime considérant que les zones souffle englobent les projections n'est pas correcte et ne peut pas être généralisée). D'ailleurs, la présence d'un merlon et d'un toit renforcé au niveau du siège exposé permet de retrouver des distances équivalentes entre règles françaises et OTAN confirmant que la différence est bien liée à la prise en considération, ou non, des projections.

Cette analyse est confirmée en prenant en compte dans le calcul, à la fois les effets du souffle et des projections : les distances sont alors équivalentes pour des installations éloignées. En se rapprochant, elles sont estimées dans l'approche française pour un atelier pyrotechnique exposé sans merlon et mettent en lumière le choix implicite de n'implanter dans les zones d'effets les plus proches du siège exposant que des installations présentant un haut niveau de protection vis-à-vis des projections.

Sièges exposés		P2	DD 1.1 Distance d'éloignement (m)			
			Fr/P2 souffle	Fr/P2 souffle et projections	OTAN	Densification (souffle et projections)
Magasin recouvert de terre	a2	Z3	80	135	11*	
Atelier pyrotechnique avec merlon et toit renforcé	a2	Z3	80	135	80	
Atelier pyrotechnique sans merlon	a2	Z3	80	135	293	
Atelier non pyrotechnique ou route publique (trafic moyen)	a3	Z4	150	300	293	
Habitations	a4	Z5	220	400	437	

* 222 m si face avant du magasin en vis-à-vis de l'atelier exposant et 11 m sinon

Tableau 5 : calcul des distances d'éloignement à un atelier pyrotechnique (1 tonne de produits de la DD 1.1).

Produits de la DD 1.2 / sDD 1.2.1

Avec des produits de la DD 1.2 / sDD 1.2.1 (tableau 6), les distances françaises sont toutes surévaluées. Encore une fois, des gains très importants peuvent être obtenus en limitant des contraintes de co-

activités ou éventuellement en augmentant la quantité de produits dans l'atelier.

Sièges exposés		P2	DD 1.2 / sDD 1.2.1 Distance d'éloignement (m)		
			Fr/P2	OTAN	Densification
Magasin recouvert de terre	a2	Z3	135	5 / 82*	max
Atelier pyrotechnique avec merlon et toit renforcé	a2	Z3	135	30	max
Atelier pyrotechnique sans merlon	a2	Z3	135	118 / 172 **	max
Atelier non pyrotechnique ou route publique (trafic moyen)	a3	Z4	300	118 / 172 **	max
Habitations	a4	Z5	400	175 / 257 **	max

* 82 m si face avant du magasin en vis-à-vis de l'atelier exposant et 5 m sinon

** atelier exposant sans ouverture en direction du siège exposé / atelier exposant avec ouverture en direction du siège exposé

Tableau 6 : calcul des distances d'éloignement à un atelier pyrotechnique (1 tonne de produits de sDD 1.2.1).



Produits de la sDD 1.3a / sDD 1.3.1

Enfin, pour la sDD 1.3a / sDD 1.3.1 (tableau 7), les distances d'éloignement à un autre atelier pyrotechnique sont plus importantes avec les règles OTAN. Elles sont équivalentes ou inférieures pour les autres sièges exposés.

Sièges exposés	P2	DD 1.2 / sDD 1.2.1 Distance d'éloignement (m)			
		Fr/P2	OTAN	Densification	
Magasin recouvert de terre	a2	Z3	35	0 / 25 *	max
Atelier pyrotechnique avec merlon et toit renforcé	a2	Z3	35	60	
Atelier pyrotechnique sans merlon	a2	Z3	35	60	
Atelier non pyrotechnique ou route publique (trafic moyen)	a3	Z4	50	60	
Habitations	a4	Z5	65	64	

* atelier exposant sans ouverture en direction du magasin exposé / atelier exposant avec ouverture en direction de la face avant du magasin exposé

Tableau 7 : calcul des distances d'éloignement à un atelier pyrotechnique (1 tonne de produits de sDD 1.3a/1.3.1).

Cas 3 – Regroupement de munitions de différentes divisions de danger

Les règles OTAN autorisent le regroupement de munitions de division de danger différentes sans cumul systématique des masses d'explosifs vers la division de danger la plus contraignante contrairement à ce que prévoit, par conservatisme, l'arrêté du 20 avril 2007. Ces règles d'agrégation sont précisées dans [l'article de présentation de l'AASTP-1](#). En particulier, pour un regroupement de produits des DD 1.2 et 1.3, les distances de sécurité sont calculées en considérant indépendamment leurs effets suivant leurs sous-divisions de danger. La plus grande de ces distances est alors retenue, ce qui représente généralement un gain conséquent puisque les produits de la DD 1.3 génèrent moins d'effets. Par ailleurs, les règles d'agrégation OTAN donnent un statut particulier aux produits de la DD 1.4 en raison des faibles effets qu'ils génèrent.

Il n'est ainsi pas retenu de distance de sécurité QD pour ces munitions de la DD 1.4 (seule une distance minimale pour faciliter la lutte incendie est à considérer). De plus, il a été montré que ces produits ne transmettent pas les effets pyrotechniques et peuvent ainsi jouer un rôle d'écran. Précisons que les produits de la DD 1.4 évoqués dans cette lettre sont des produits, essentiellement des munitions, à usage militaire et, de ce fait, qualifiés selon des normes très exigeantes.

Les gains résultants sont illustrés dans les tableaux 8 à 10 en comparant les distances d'éloignement à un stockage conjoint de munitions de la DD 1.1 ou sDD 1.2.1 avec des munitions de la DD 1.4 dans un magasin recouvert de terre.

Stockage 1 tonne DD 1.1 + 4 tonnes DD 1.4	Distances d'éloignement (m)		
	Fr/P1	OTAN	Comparaison
→ Dépôt de munitions	85	5 / 36*	
→ Atelier pyrotechnique	85	80	
→ Atelier non pyrotechnique ou route publique	137	118	
→ Habitations	300	175	

Tableau 8 : 5 tonnes de produits – 20 % DD 1.1 et 80 % DD 1.4.

Stockage 5 tonnes DD 1.1 + 5 tonnes DD 1.4	Distances d'éloignement (m)		
	Fr/P1	OTAN	Comparaison
→ Dépôt de munitions	108	9 / 62 *	
→ Atelier pyrotechnique	108	137	
→ Atelier non pyrotechnique ou route publique	172	165 / 206 **	**
→ Habitations	323	246 / 308 **	

Tableau 9 : 10 tonnes de produits – 50 % DD 1.1 et 50 % DD 1.4.

- * secteurs arrière et latéral du magasin exposé / secteur avant des magasins exposant et exposé en vis-à-vis
- ** secteur arrière du magasin exposant / secteur latérale du magasin exposant

Stockage 5 tonnes sDD 1.2.1 + 5 tonnes DD 1.4	Distances d'éloignement (m)		
	Fr/P1	OTAN	Comparaison
→ Dépôt de munitions	25	2 *	
→ Atelier pyrotechnique	25	30	
→ Atelier non pyrotechnique ou route publique	135	63	
→ Habitations	300	94	

Tableau 10 : 10 tonnes de produits – 50 % sDD 1.2.1 et 50 % DD 1.4.

Distances d'éloignement en latéral et arrière d'un magasin de stockage recouvert de terre suivant les règles françaises et OTAN d'agrégation des divisions et sous-divisions de danger



Les règles OTAN d'agrégation des divisions de danger apportent des gains conséquents surtout lorsqu'une majorité des produits sont de la DD 1.4 (objets explosifs à usage militaire qualifiés). Elles leur donnent ainsi un rôle particulier dans l'optimisation des stockages qui peuvent

être complétés par des munitions de la DD 1.4 sans modification des règles d'implantation. Les produits de la DD 1.4 peuvent également participer à l'amélioration de la sécurité des stockages ou la réduction des effets en les utilisant comme des barrières entre les piles de munitions d'autres divisions de danger.

CONCLUSION

L'utilisation des règles OTAN induit une forte réduction des contraintes et une densification des stockages sans réduction du

niveau de sécurité. La réduction des contraintes de co-activités peut permettre quant à elle une fluidification donc une augmentation potentielle de la productivité en autorisant plusieurs activités compatibles simultanément.

L'utilisation des règles OTAN dès la phase de conception des installations peut permettre d'optimiser les stockages de munitions, en tenant compte des dispositions constructives qui ne sont pas pleinement considérées avec les règles françaises comme par exemple, le cône d'exposition en latéral ou arrière des magasins recouverts de terre. Des gains économiques sont ainsi attendus, toutefois chaque situation étant spécifique, ils sont à estimer au cas par cas pour chaque établissement en fonction de la densification possible de l'existant et en exploitant les règles d'agrégation fixées par l'OTAN, notamment pour les munitions de la DD 1.4.

L'évaluation quantitative du risque pyrotechnique – les seuils de risque pyrotechnique

INTRODUCTION

L'évaluation quantitative du risque avait fait l'objet d'un article de sensibilisation dans la lettre de l'IPE n°46.

L'évaluation quantitative du risque (EQR) comme méthode existe depuis plusieurs dizaines d'années. Au niveau international, elle s'est développée pour le risque pyrotechnique à partir des années 2000 d'abord dans le monde pyrotechnique militaire puis a parfois été adaptée pour le monde civil. Des codes de calcul ont progressivement été développés dans différents pays et se sont imposés aujourd'hui comme des références. La France est restée largement à l'écart de ce mouvement général dans le domaine du risque pyrotechnique alors que de nombreux pays ont décliné l'EQR dans leur réglementation.

L'engagement dans le développement, le référencement et l'utilisation de codes d'évaluation quantitative du risque nécessite un certain nombre de prérequis. La complexité des phénomènes physiques des effets pyrotechniques ne peut être abordée uniquement par des lois physiques et le recours à une approche semi-empirique est indispensable. Les modèles physiques des effets, notamment pour les effets de projections sont construits à partir de résultats de nombreuses expérimentations. Ce sont les travaux expérimentaux menés par l'OTAN qui servent de base pour la plupart de ces modèles. Ces travaux expérimentaux permettent également de recalibrer les modèles existants et de préciser leur plage de validité. Les modèles d'effets physiques doivent ensuite être associés à des modèles de gravité et de létalité.

Les codes de calcul basés sur ces modèles peuvent être utilisés pour déterminer des zones d'effets, des zones de gravité ou de létalité, les effets prépondérants et l'impact de l'utilisation de barrières. Associés à une probabilité, les résultats obtenus peuvent être présentés sous forme de risque individuel ou de risque de groupe de létalité ou de blessures graves. Lorsqu'un niveau de risque résiduel maximal à ne pas dépasser a été fixé par les autorités, les codes d'EQR permettent d'apporter des éléments quantifiés sur

l'acceptabilité du risque et ainsi d'orienter les décisions d'implantation d'installations ou de dimensionner des moyens de prévention complémentaires.

Pour s'engager dans l'évaluation quantitative du risque, il convient de définir des seuils de létalité et des valeurs de risque résiduel maximal à ne pas dépasser. Cet article présente les niveaux de risque pyrotechnique définis réglementairement dans différents pays et une analyse de la situation française aux regards de ses différentes réglementations pyrotechniques.

DANGER ET RISQUE PYROTECHNIQUE

La précision sémantique du sens de risque est importante car le terme est utilisé communément avec des acceptions très variables. On rappellera d'abord qu'il faut bien distinguer le danger et le risque. Les produits pyrotechniques représentent par essence une source de danger en raison des dommages conséquents qu'ils peuvent générer en cas de réaction. Pour éviter le danger, il faudrait s'éloigner hors des zones d'effets, ce qui n'est pas toujours possible. Les personnes et les installations situées à l'intérieur des zones d'effets sont donc soumises à un risque représenté comme la combinaison de la probabilité de l'événement pyrotechnique et de la gravité de ses conséquences.

On évoque parfois la notion de risque consenti comme étant le risque résiduel maximal à ne pas dépasser. Il peut être exprimé de façon qualitative ou quantitative. Certains pays distinguent également le risque individuel et le risque de groupe : le risque de groupe de taille N est égal à $N \times$ risque individuel. Un facteur d'aversion est parfois introduit. Ce facteur prend en compte une modification de la perception du risque au-delà de sa quantification objective, en fonction par exemple d'un seuil en nombre de personnes exposées.



NIVEAUX DE RISQUE PYROTECHNIQUE RÉGLEMENTAIRES A L'INTERNATIONAL

Différents pays ont défini un seuil réglementaire de risque individuel et de groupe dans le domaine pyrotechnique. Il s'agit de décisions qui relèvent d'un choix politique et sociétal. Le tableau 1 précise les seuils de risque individuel ou de groupe définis par différents pays pour les travailleurs et le public. En général, les seuils sont définis sur un intervalle et peuvent dépendre du type de personnes exposées. De manière similaire la France a fait le choix historique d'accepter un niveau d'exposition plus élevé pour les travailleurs pyrotechniciens que pour les autres travailleurs.

ESTIMATION DES SEUILS DE RISQUE PYROTECHNIQUE EN FRANCE

La France n'a pas quantifié explicitement de seuils de risque pyrotechnique sauf, depuis 2011, dans le domaine particulier de la dépollution pyrotechnique. En effet la réglementation Travail et la réglementation Environnement sont des approches semi-quantitatives. Le risque acceptable pour les travailleurs est implicite dans l'arrêté du 20 avril 2007, défini par une matrice qui subordonne l'implantation des installations (ai) à la probabilité d'occurrence d'un événement pyrotechnique et à la gravité de ses conséquences. Pour ce qui concerne les enjeux extérieurs, l'arrêté du 29 septembre 2005 définit des seuils réglementaires de létalité et de gravité pour les différentes zones d'effets surpression, thermique et toxique mais pas pour les projections. Le risque est abordé par une matrice de comptage du nombre maximal de personnes autorisées en fonction de la zone d'effets et de la probabilité d'occurrence.

Seuils réglementaires de risque en dépollution pyrotechnique

L'article 8 de l'arrêté du 12 septembre 2011 fixant les règles de détermination des distances d'isolement relatives aux chantiers de dépollution pyrotechnique¹ exige un risque annuel maximal admissible pour les travailleurs sur ces chantiers de 10^{-3} à 10^{-5} , selon la nature de leur activité et en admettant un risque supérieur pour les travailleurs pyrotechniciens (tableau 2). Ces valeurs sont plutôt assez élevées en comparaison de la plupart des autres pays mais restent dans le cadre des recommandations ONU (tableau 1).

Pays	Seuil réglementaire Risque Individuel (létalité annuelle)	Seuil réglementaire Risque de Groupe (nombre de morts par an)
Royaume-Uni	10^{-6} et ALARP* entre 10^{-3} à 10^{-6} (travailleurs) 10^{-4} à 10^{-6} (public)	Facteur d'aversion
Etats Unis	10^{-4} (travailleurs) 10^{-6} (public)	10^{-3} (travailleurs) 10^{-5} (public)
Belgique	ALARP entre 10^{-5} à $3 \cdot 10^{-7}$ (travailleurs) 10^{-6} (public)	ALARP entre 10^{-4} et $3 \cdot 10^{-6}$ (travailleurs)
Pays-Bas	10^{-6} (public)	10^{-5} (public) et facteur d'aversion
Norvège	$4 \cdot 10^{-5}$ à $2 \cdot 10^{-7}$ (travailleurs)	$3 \cdot 10^{-4}$ à 10^{-4} (travailleurs) facteur d'aversion
Suède	10^{-6} (tiers quelconque)	10^{-4} (tiers quelconque) et facteur d'aversion
Suisse	$3 \cdot 10^{-5}$ à 10^{-5} (travailleurs) $3 \cdot 10^{-6}$ (public)	10^{-5} à $5 \cdot 10^{-5}$ (travailleurs) et facteur d'aversion
Australie	$5 \cdot 10^{-4}$ à $5 \cdot 10^{-5}$ (travailleurs)	10^{-4} à 10^{-5} (travailleurs)
Recommandation ONU	10^{-3} à 10^{-6} (travailleurs) 10^{-4} à 10^{-6} (public)	

* ALARP : As Low As Reasonably Practicable - niveau aussi faible qu'il est raisonnable d'atteindre.

Tableau 1 : exemples de niveaux de seuils réglementaires de risque pyrotechnique individuel et de groupe.

Pour les installations extérieures à l'établissement, le risque résiduel admissible est compris entre 10^{-5} et 10^{-7} et est d'autant plus faible que le nombre de personnes exposées augmente. Il est cohérent avec les valeurs retenues dans les autres pays.

La réglementation définit également les zones Zi par des seuils de létalité représentant la probabilité de létalité allant de 50 % en limite Z1/Z2 à 0,3 % au-delà de Z4.

Réglementation relative à la dépollution pyrotechnique					
Zones d'effets Zi	Z1	Z2	Z3	Z4	ZLP
Seuils de létalité	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-2}	$3 \cdot 10^{-3}$	
Risque annuel maximal admissible	$< 10^{-3}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-5}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-7}$
Travailleurs ti à l'intérieur du chantier	t1	t2	t3		
Installations extérieures à l'établissement			c2	c3	c4

ZLP : Zone limite de portée des effets, généralement représentée par la distance maximale de projection des éclats (risque légal résiduel considéré inférieur à 10^{-7} au-delà)

Tableau 2 : seuils de létalité des zones d'effets de la réglementation en dépollution pyrotechnique et risque résiduel annuel maximal à ne pas dépasser pour les travailleurs.

¹ appelé, dans la suite de l'article, arrêté dépollution pyrotechnique



Estimation par rétro-ingénierie des seuils de risque pyrotechnique de la réglementation Travail

Dans la réglementation travail, les seuils de risque n'étant pas quantifiés, une estimation a été réalisée par rétro-ingénierie en partant de la matrice d'implantation des ai du 20 avril 2007.

Dans cette matrice, la combinaison de la probabilité d'un événement pyrotechnique et de la gravité de ses conséquences représentées par les zones d'effets donne le risque acceptable exprimé par la position des installations ai. Pour cette matrice, nous disposons de quelques données quantifiées dans les textes réglementaires : les valeurs annuelles de probabilité (arrêté PCIG du 29 septembre 2005) et le seuil de létalité en limite des zones Z1 et Z2 de 50 % (tableau 2). Nous avons également supposé par conservatisme que la probabilité de létalité est égale à 1 au centre du a0.

La démarche mise en œuvre a consisté, dans un premier temps, à identifier, pour chaque zone d'effet, le risque maximal par installation ai (en noir dans le tableau 3). Par exemple, en Z2, l'installation a2 la plus exposée est en P1Z2.

		10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	Probabilité annuelle
		P1	P2	P3	P4	P5
Seuil de létalité	1	a0	a0	a0*	a0**	a0**
	5 10 ⁻¹	a1a2	a1a2*	a1	a1*	a1*
		a1a2a3	a1a2	a1a2	a1	a1*
		a1a2a3a4	a1a2a3	a1a2	a1a2	a1
		a1a2a3a4	a1a2a3a4	a1a2a3a4	a1a2a3	a1a2a3

Tableau 3 : risque maximal par installations ai (en noir) pour chaque zone Zi et données quantifiées disponibles.

Par ailleurs, les probabilités n'étant pas quantifiées au-delà de P3, les colonnes P4 et P5 n'ont pas été utilisées (tableau 4). Dans ces conditions, le risque létal maximal acceptable peut être estimé pour le a0 et correspond, sur la ligne Z1, au produit P2Z1 soit 10⁻³. En procédant de même sur la ligne Z2, il peut être estimé à 5 10⁻³ pour une installation a1 et à 5 10⁻⁵ pour une installation a2.

		10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	Probabilité annuelle
		P1	P2	P3		
Seuil de létalité	1	a0	a0	a0*		
	5 10 ⁻¹	a1a2	a1a2*	a1		
	5 10 ⁻³	a1a2a3	a1a2	a1a2		
		a1a2a3a4	a1a2a3	a1a2		
		a1a2a3a4	a1a2a3a4	a1a2a3a4		

Tableau 4 : évaluation du risque létal maximal pour les installations a0, a1, a2 et a3.

L'absence de seuil de létalité quantifié pour la limite Z2/Z3 ne permet pas de poursuivre cette analyse à partir des données disponibles et oblige à poser une hypothèse. Il a été considéré que le risque maximal est constant pour une installation ai d'une zone d'effets à l'autre. Cette hypothèse s'inspire du principe retenu dans l'arrêté dépollution et est, en cela, plausible. En appliquant cette hypothèse pour l'installation a2 (ligne Z3), on obtient un seuil de létalité de 5 10⁻³ en limite Z2/Z3². Ceci permet ensuite de remonter au risque associé à a3 en Z3 (tableau 4).

Par itérations successives, on peut ainsi estimer les niveaux de risque correspondant aux installations ai dans les différentes zones (tableau 5).

		10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	Probabilité annuelle
		P1	P2	P3		
Seuil de létalité	1	a0	a0	a0*		
	5 10 ⁻¹	a1a2	a1a2*	a1		
	5 10 ⁻³	a1a2a3	a1a2	a1a2		
	5 10 ⁻⁴	a1a2a3a4	a1a2a3	a1a2		
	5 10 ⁻⁶	a1a2a3a4	a1a2a3a4	a1a2a3a4		

Tableau 5 : risque létal annuel maximal par installation ai et seuil de létalité par Zi estimés à partir de la matrice de conformité d'implantation des ai.

Les estimations des niveaux de létalité en limite des Zi et des risques maximaux admissibles pour les installations ai sont récapitulées dans le tableau 6.

Réglementation travail – matrice des ai (arrêté du 20 avril 2007)					
Zones d'effets Zi	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Seuils de létalité	5 10 ⁻¹	5 10 ⁻³	5 10 ⁻⁴	5 10 ⁻⁶	
Installations ai	a0	a1	a2	a3	a4
Risque pyrotechnique résiduel annuel maximal	< 10 ⁻³	< 5 x 10 ⁻³	< 5 x 10 ⁻⁵	< 5 x 10 ⁻⁷	< 5 x 10 ⁻⁸

Tableau 6 : estimation par rétro-ingénierie des seuils de létalité des zones d'effets et du risque létal annuel maximal dans les installations ai (arrêté du 20 avril 2007).

² P3Z3 = 5 10⁻⁵ et P3 = 10⁻² soit Z3 = 5 10⁻³



Estimation par rétro-ingénierie des seuils de risque pyrotechnique de la réglementation Environnement

Dans la réglementation Environnement, les risques admissibles sont définis au travers de la matrice d'exposition maximale des personnes figurant dans la circulaire du 10 mai 2010³ (tableau 7). Cette matrice prend en compte la probabilité d'un événement pyrotechnique (Pj) et ses conséquences exprimées sous forme de zones d'effets (Zk). Le risque est représenté par un nombre maximal de personnes pour chaque couple (Pj, Zk) mais il n'est pas défini de risques acceptables quantifiés. Une estimation des niveaux de risque a donc été recherchée par rétro-ingénierie.

Zones d'effets	Probabilité annuelle d'événement pyrotechnique					
	P0/E	P1/D	P2/C	P3/B	P4/A	P5
Z1/Z2						
Z3	< 100	< 20	< 10	≤ 1		
Z4	< 1000	< 100	100	10	≤ 1	
Z5	Pas de restriction	≤ 2000	≤ 500	≤ 200	< 100	

Tableau 7 : matrice de la réglementation Environnement représentant le nombre maximal de personnes extérieures à l'établissement exposées à un événement pyrotechnique et données quantifiées utilisées pour l'estimation des niveaux de risques.

Pour cela, le tableau 7 synthétise les données réglementaires quantifiées disponibles : probabilités annuelles d'événement pyrotechnique, seuils de létalité pour les effets toxiques (5 % en limite Z2/Z3 et 1 % en limite Z3/Z4). Pour les autres effets, des valeurs de référence sont définies en limite de ces zones pour la surpression et le thermique mais ne sont pas exprimées en terme d'effet létal et aucune valeur n'est donnée pour l'effet de projections. En l'absence de certains seuils, nous avons repris les niveaux de létalité des zones Zi de la réglementation de dépollution pyrotechnique (tableau 7), les valeurs étant, pour le moins, identiques avec celle de l'effet toxique en limites Z2/Z3 et Z3/Z4. La valeur quantifiée de la probabilité annuelle P4 (10⁻¹) définie dans cette réglementation a également été ajoutée. Il a enfin été supposé par conservatisme que la probabilité de létalité est égale à 1 au centre de la Z1.

A partir de ces données quantifiées, il est possible d'évaluer en n'importe quel point de la matrice le niveau de risque d'exposition individuel et de tracer ainsi des courbes « iso-risques » représentées en vert dans le tableau 8. Par exemple, pour un couple (P1, Z4), le risque maximum est obtenu à l'intersection d'une probabilité de 10⁻⁴ et d'un seuil de létalité de 10⁻² et vaut donc 10⁻⁶. Ce point est bien positionné sur la courbe iso-risque correspondant à cette valeur.

Les nombres maximaux de personnes exposées de la matrice Environnement ont été superposés sur ces courbes iso-risques (tableau 8). Cette représentation semble faire apparaître un lien entre ces nombres de personnes et les plages de risque (tableau 9), excepté en P2Z4 où il aurait été attendu 20 personnes afin de suivre l'augmentation progressive de l'effectif exposé en réduisant le niveau de risque.

Cette analyse permet ainsi d'estimer le niveau de risque individuel acceptable en fonction du nombre de personnes exposées.

Zone d'effets	Seuil de létalité	Probabilité annuelle d'événement pyrotechnique					
		P0/E 10 ⁻⁵	P1/D 10 ⁻⁴	P2/C 10 ⁻³	P3/B 10 ⁻²	P4/A 10 ⁻¹	P5
Z1/Z2	1						
Z3	5 10 ⁻²	100	20	10	1		
Z4	3 10 ⁻³	1000	100	100	10	1	10 ⁻³

— Courbes iso-risques

Tableau 8 : représentation des courbes iso-risques sur la matrice de la réglementation Environnement.

Risque individuel	Nombre maximal de personnes exposées
10 ⁻³ à 10 ⁻⁴	1
10 ⁻⁴ à 10 ⁻⁵	1 - 10
10 ⁻⁵ à 10 ⁻⁶	10 - 20
10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁷	20 - 100
10 ⁻⁷ à 10 ⁻⁸	100 - 1000
< # 10 ⁻⁸	1000 – pas de restriction

Tableau 9 : estimation par rétro-ingénierie du nombre de personnes exposées en fonction du niveau de risque individuel à partir de la matrice de la réglementation Environnement.

³ récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux

plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées (§ 2.2.6 Secteur de la pyrotechnie)



Synthèse des estimations du risque pyrotechnique à ne pas dépasser en France

Les résultats de ces analyses sont présentés figure 1 sur une même échelle afin de les comparer plus facilement selon les réglementations (Figure 1) : installations ai de la réglementation Travail, travailleurs ti et installations ci de la réglementation de dépollution pyrotechnique et nombre maximal de personnes autorisées pour la réglementation Environnement.

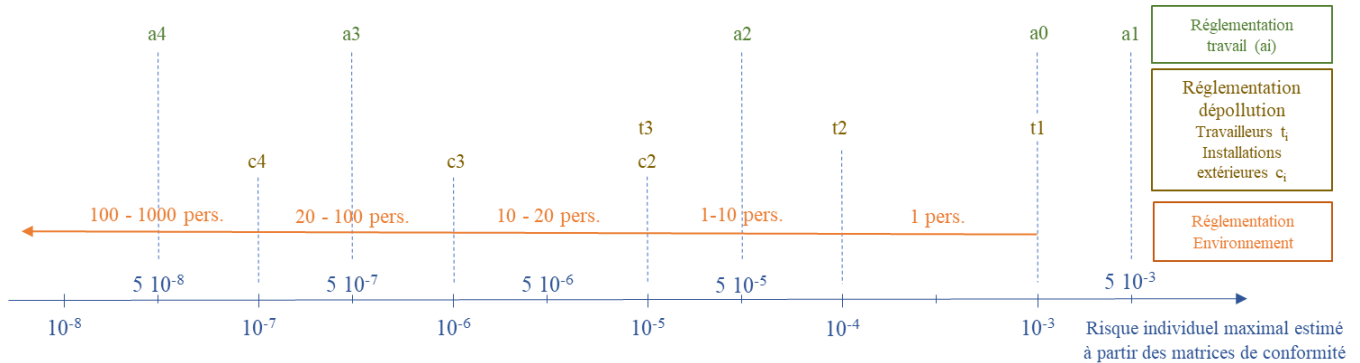


Figure 1 : estimation du risque pyrotechnique individuel obtenu selon les différentes réglementations françaises.

Les résultats obtenus pour les travailleurs appellent les commentaires suivants.

Un travailleur situé dans une installation a1 peut être davantage exposé que dans une installation a0. Ce résultat donne l'occasion de rappeler que le classement a1 doit rester exceptionnel car il surexpose effectivement les travailleurs présents. Il est probable qu'à l'origine de la réglementation, les installations classées a1 n'accueillaient pas de personnes. En effet, les règles OTAN sont construites pour assurer la préservation des personnes et des biens. Il est donc envisageable qu'une installation classée en a1 était considérée comme indispensable à l'activité pyrotechnique, sans personne présente à l'intérieur ou de façon exceptionnelle et encadrée par des mesures particulières de maîtrise du risque, et qu'on acceptait sa destruction éventuelle en cas d'évènement pyrotechnique.

Les travailleurs situés dans une installation a0 et les travailleurs t1 qui sont au plus près de la charge pyrotechnique sont soumis au même risque pyrotechnique. Le seuil de risque individuel est généralement plus élevé que celui retenu dans d'autres pays et est au maximum de la recommandation de l'ONU. Il est donc indispensable de chercher à le réduire par des mesures de protection collective ou individuelle. En particulier, des équipements individuels de protection devraient toujours être portés lorsqu'ils sont compatibles de l'activité réalisée, en l'absence d'écrans efficaces.

Les travailleurs qui ne sont pas en lien avec l'activité de dépollution pyrotechnique ne doivent pas être soumis à un risque de létalité annuel supérieur à 10^{-5} . En revanche dans une installation classée a3 comme un atelier non pyrotechnique ou un bureau, le niveau de risque pyrotechnique ne devrait pas excéder $5 \cdot 10^{-7}$. Cette valeur paraît très basse. Elle serait du même ordre que le risque maximum annuel pour des regroupements extérieurs jusqu'à 100 personnes (figure 1) et serait inférieure au seuil retenu dans la plupart des autres pays. Ce constat amène à s'interroger sur l'hypothèse prise d'un niveau de risque constant par installation et sur une possible surexposition d'une installation a2 en P3Z3, situation à partir de laquelle a été déduite le risque pour une installation a3. En effet, en reprenant l'analyse pour la matrice des ai et en considérant que sur la ligne Z3, le niveau de risque de $5 \cdot 10^{-5}$ pour une installation a2

correspond une exposition en Z3P2 (tableau 10), on obtient pour une installation a3 un risque de $5 \cdot 10^{-6}$ et un seuil de létalité de $5 \cdot 10^{-2}$ pour la limite Z2/Z3. Ces valeurs sont cohérentes au regard, d'une part, de la réglementation dépollution (respectivement 10^{-5} et $5 \cdot 10^{-2}$) et d'autre part, du niveau de risque accepté dans la plupart des autres pays pour des travailleurs non pyrotechniciens. Ceci signifie également que le risque acceptable estimé en a2P3Z3 serait de $5 \cdot 10^{-4}$ (tableau 10) et interroge sur l'exposition des personnels à un risque très proche de celui estimé pour le a0 (figure 1). A ce titre, il est à noter que dans la réglementation dépollution, un personnel t2 n'est pas autorisé en P3Z3.

Par itérations successives, on peut ainsi estimer les niveaux de risque correspondant aux installations ai dans les différentes zones (tableau 5).

		10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	Probabilité annuelle
		P1	P2	P3		
1	Z1	a0	a0 10^{-3}	a0*		
$5 \cdot 10^{-1}$	Z2	a1a2 $5 \cdot 10^{-5}$	a1a2*	a1 $5 \cdot 10^{-3}$		
$5 \cdot 10^{-2}$	Z3	a1a2a3 $5 \cdot 10^{-6}$	a1a2 $5 \cdot 10^{-5}$	a1a2 $5 \cdot 10^{-4}$		
$5 \cdot 10^{-3}$	Z4	a1a2a3a4 $5 \cdot 10^{-7}$	a1a2a3 $5 \cdot 10^{-6}$	a1a2		
$5 \cdot 10^{-5}$	Z5	a1a2a3a4	a1a2a3a4	a1a2a3a4 $5 \cdot 10^{-7}$		
Seuil de létalité						

Tableau 10 : risque létal annuel maximal par installation ai et seuil de létalité par Zi estimés à partir de la matrice de conformité d'implantation des ai (en considérant un risque de $5 \cdot 10^{-5}$ en a2P2Z3).

Les installations a4 situées sur un site pyrotechnique, qui accueillent des personnes sans lien avec l'activité du site et potentiellement vulnérables, comme des logements, des crèches... sont soumises à un risque correspondant à des zones extérieures d'habitations de plus 100 personnes ou des lieux de grand rassemblement (figure 1). Ceci traduit un risque associé très bas par rapport aux autres réglementations. En reprenant l'analyse menée pour les installations classées a3 (tableau 10), le risque estimé pour une installation a4 est



de $5 \cdot 10^{-7}$ et est cohérent des réglementations environnement (regroupements de moins de 100 personnes) et dépollution (c3 – locaux habités) et des seuils appliqués dans la plupart des pays (tableau 1).

CONCLUSION

Les codes de calcul d'évaluation quantitative du risque pyrotechnique donnent la possibilité d'affiner les calculs de risque pyrotechnique notamment dans des situations complexes comme des ports militaires, des bases aériennes des sites industriels complexes. Pour être pleinement utiles, les niveaux de risque quantifiés doivent être comparés à une référence afin de déterminer leur acceptabilité.

Alors que beaucoup d'autres pays ont déterminé des seuils de risques pyrotechniques maximaux pour les travailleurs et le public,

en France, des approches semi-quantitatives ont été développées, sauf en ce qui concerne la réglementation de dépollution pyrotechnique. Par défaut, actuellement, les utilisateurs de codes de calcul pour l'évaluation quantitative du risque pyrotechnique utilisent généralement les niveaux de létalité et de risque établis dans cette réglementation.

La reconstitution par rétro-ingénierie des seuils de risque pyrotechnique sous-jacents aux réglementations Travail et Environnement donne comme résultats des niveaux de risque pyrotechnique individuel pour le public et les travailleurs compris entre 10^{-3} et 10^{-7} . On constate globalement que les travailleurs chargés des opérations pyrotechniques peuvent être parfois relativement exposés. Les valeurs de risque fixées pour les travailleurs et les tiers exposés dans la réglementation de dépollution pyrotechnique paraissent adaptées, conformes aux recommandations de l'ONU et relativement alignées par rapport à celles d'autres pays.

Codes de calcul d'évaluation quantitative du risque pyrotechnique

Cet article a été rédigé par Pierre-François Péron (DGA/IPE).

INTRODUCTION

L'évaluation quantitative du risque pyrotechnique (EQR) fait l'objet de développements suivant les pays depuis plus de 20 ans voire 30 ans, sur la base des règles OTAN de l'AASTP-1 et de l'AASTP-4. En appui de cette approche, différents pays ont progressivement mis au point des codes de calcul dont certains commencent à s'imposer internationalement comme des références.

En France, quelques codes ont été développés principalement au sein de la sphère militaire. Toutefois, certains industriels se sont également engagés dans de telles démarches en élaborant parfois leurs propres modèles d'effets physiques ou de létalité. La mise en place de ces démarches EQR vise en premier lieu à affiner la détermination des distances d'effets lorsque les règles françaises simplifiées ne sont pas adaptées. Ces outils peuvent également être utilisés afin de quantifier la contribution de chaque effet et ainsi aider au dimensionnement des moyens de maîtrise adaptés, par exemple d'écrans pour réduire le niveau d'effet de projections.

Cet article vise à présenter un point de situation sur les codes d'EQR qui sont connus de l'IPE. Quelques exemples d'applications sont également développés à des fins d'illustration.

Il est à noter que ces outils sont complexes et doivent, dans tous les cas, être mis en œuvre par des spécialistes afin de s'assurer du bon paramétrage et de l'interprétation avec discernement des résultats.

CODES DE CALCUL D'EQR EXISTANT POUR LE RISQUE PYROTECHNIQUE

Différents pays ont reconnu officiellement des codes de calcul d'EQR pour le risque pyrotechnique. Le tableau 1 recense ceux connus de l'IPE. La plupart de ces outils concerne prioritairement les munitions et le secteur de la Défense. Toutefois certains ont également été adaptés pour le secteur civil des explosifs.

Pays	Outils	Antériorité du code	Périmètre	Classe du modèle
Royaume-Uni	RISKWING	1986	Activités impliquant des munitions - Défense	Semi-empirique
Etats Unis	SAFER (DoD)	1999	Activités impliquant des munitions – Défense	Semi-empirique
	HAZ X	2010		Physique
	IMESAFR (civil)	2006	Fabrication et stockage d'explosifs civils et militaires	Semi-empirique
Allemagne	ESQRA-GE	2000	Stockage et manutention des munitions - Défense	Semi-empirique
Pays Bas	RISK-NL	1998	Stockage et manutention des munitions - Défense	Semi-empirique
Norvège et Suède	AMRISK	2000	Stockage et manutention des munitions - Défense	Empirique
Suisse	EXPLORISK	1990	Stockage et manutention des munitions - Défense	Empirique
Australie	AUSRISK, eRISKAT, SAFER	1996	Stockage et manutention des munitions - Défense	Semi-empirique
Canada et Belgique	IMESAFR	2007	Fabrication et stockage d'explosifs	Semi-empirique

Tableau 1 : outils d'EQR reconnus pour le risque pyrotechnique dans différents pays.



Les modèles intégrés sont essentiellement semi-empiriques, c'est-à-dire qu'ils combinent les données issues de l'expérimentation et les algorithmes de modélisation des phénomènes physiques.

En complément de cette liste de modèles reconnus nationalement, le MSIAC a développé un outil accessible en ligne, MQDCAT (MSIAC Quantity Distance Consequence Analysis Tool).

En France, la DGA a développé depuis plusieurs années les codes EVREST et CRONOS. Certains industriels ont également développé des modèles afin de mieux apprécier certains effets (éclats, souffle notamment en environnement 3D) et leurs conséquences.

CARACTERISQUES DE QUELQUES CODES DE CALCUL CONNUS DE L'IPE

EVREST : Evaluation du Risque Explosif lié au Stockage des munitions¹

Codé sous Excel par des ingénieurs de la DGA, à partir des modèles américains et suisse décrits dans l'AASTP-4, EVREST permet de simuler les effets d'un événement pyrotechnique dans un siège exposant et de calculer les conséquences dans un siège exposé en les exprimant notamment par une probabilité de létalité.

EVREST intègre les différents types d'installations exposantes et exposées définies dans l'AASTP-1 et prend en compte la présence de merlons. En complément, il dispose de bases de données munitions et infrastructures qui permettent de mieux approcher les scénarios réels et ainsi d'affiner les effets générés. A titre

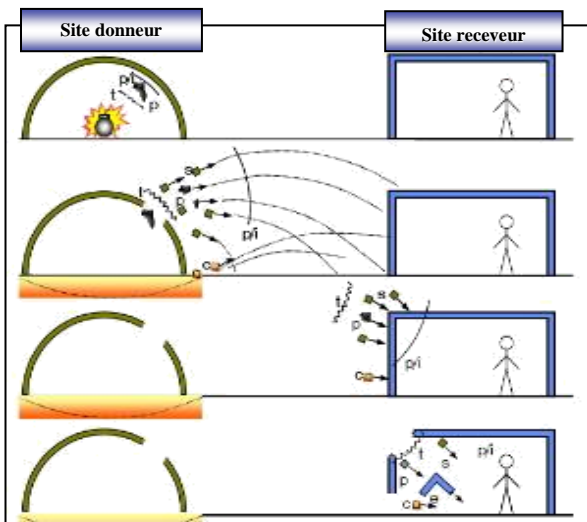


Figure 1 : principe d'interaction entre sièges exposant et exposé modélisé dans EVREST.

d'exemple, si l'AASTP-1 définit les munitions de façon générique par leur division/sous-division de danger, EVREST permet de préciser leurs caractéristiques à partir des objets implémentés dans l'outil tels que missile air-air, obus de 155 mm, bombe de 500 kg. Il en est de même pour les infrastructures dont les épaisseurs et matériaux des murs et du toit peuvent être renseignés, ces deux paramètres étant particulièrement sensibles puisqu'ils influent au premier rang sur les quantités de débris générés.

De plus, les modèles utilisés prennent en compte la physique des phénomènes (principes schématisés sur la figure 1) et leur impact sur l'homme. En particulier, concernant la létalité, l'effet des fragments est évalué en considérant la gerbe des éclats primaires produits par les objets et les débris générés par l'endommagement de la structure et par les éjectas de cratère. Connaissant la masse et l'énergie de ces projections, leur répartition spatiale est calculée en fonction de la distance afin d'évaluer la probabilité d'atteinte (P_{atteinte}) d'une personne. Cette donnée est couplée avec un modèle d'effet létal des fragments^{2, 3, 4} (figure 2) pour calculer la probabilité de létalité ($P_{\text{létalité}}$) :

$$P_{\text{létalité}} \approx P_{\text{atteinte}} \times \text{effet létal}_{\text{atteinte}}$$

En termes de données de sortie, les probabilités de létalité ainsi quantifiées en fonction de la distance sont présentées sous la forme de zones d'effets Z_i de la réglementation française en considérant les seuils de létalité repris de la réglementation de dépollution pyrotechnique⁵ (arrêté du 12 septembre 2011 fixant les règles de détermination des distances d'isolement relatives aux chantiers de dépollution pyrotechnique). Il est important de noter que les rayons de ces zones d'effets correspondent au scénario particulier modélisé et prennent en compte les caractéristiques des sièges exposant et exposé contrairement aux formules forfaitaires de la circulaire du 20 avril 2007 qui considère une situation en terrain nu.

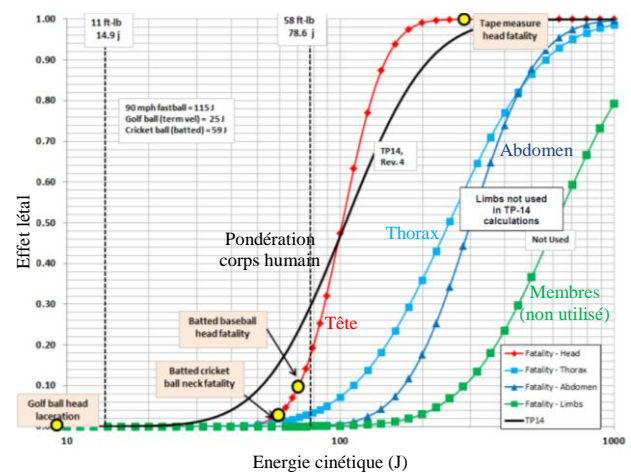


Figure 2 : effet létal d'un fragment en fonction de son énergie cinétique à l'impact et de la zone touchée du corps humain².

¹ Guide de l'utilisateur EVREST, Garcia Y. et Bordachar S. (version du 12/05/2010)

² AASTP-4 édition 1 – version 4 (page 305)

³ Approved Methods and Algorithms for DOD Risk-based Explosives Siting, Technical Paper 14 (TP-14)

⁴ Cette représentation prend en compte les effets des fragments sur différentes zones vitales (tête, thorax, abdomen et membres) et les pondère suivant les surfaces exposées de ces organes.

⁵ Le code EVREST a été utilisé pour définir les zones à risque dans l'annexe I de l'arrêté dépollution pyrotechnique.



Les résultats d'un calcul de létalité avec EVREST sont synthétisés dans le tableau 2. Le scénario simulé est une détonation en masse de bombes MK82 stockées dans une structure légère exposant un bâtiment en briques (Figure 1). Le risque de létalité à l'intérieur du bâtiment receveur est indiqué sous la forme des distances (en mètres) des limites des zones Z1 (rouge),

Z2 (orange), Z3 (Jaune) et Z4 (vert). Les pourcentages indiqués correspondent aux seuils de létalité de l'arrêté dépollution de 2011. Dans le cas particulier où l'installation exposée est située à 170 m du siège exposant, la probabilité de létalité est de 11 %.

Les résultats détaillés sont accessibles dans les différentes feuilles Excel d'EVREST, notamment le niveau d'endommagement de la structure exposée, la probabilité de létalité par des projections rasantes/faibles angles vs grands angles (protection par les murs vs la toiture).

EVAL	MUNITION	MK82 (250 kg)		4672,90 kg	SAISIE DES DONNEES Munition, PES (dont cratère) et ES		10,96%					
	- EVREST Version 1.X (17/01/2014) - Méthodologie(s) AASTP-4 partie II				Détonation en masse	PUIS CALCULS DE LETALITE EN FONCTION DE LA DISTANCE (CTRL+L)		Lethality à 170,00 m				
STOCKAGE	Masse réagissante	W1 (kg) =	4672,897196	4672,897196		CHECK Lethality à 9,27% pour M107 à 265,13 m pour les valeurs par défaut						
	Nombre de munitions	NW (su) =	54	54								
	% sur surface externe	Npos (%) =	24,20%	100,00%								
DANGER	Nombre surface externe	Npos (su) =	13	54	REFERENCE		OLD					
	NEW	NEWQD (kg) =	87,1	87,1	NEW		87,1					
DANGER		Maximal Range (m) =	1097	1162	50%	144	5%	193	1%	282	0,3%	367
	Conséquences sur l'homme extrêmement graves ⁽¹⁾ 50% de létalité (R1)		Conséquences sur l'homme très graves ⁽¹⁾ Seuil des effets létaux significatifs (R2)		Conséquence sur l'homme graves ⁽¹⁾ Seuil des effets létaux (R3)		Conséquences significatives (*) Létalité (R4)					

Tableau 2 : résultat d'une simulation réalisée avec le code EVREST.

MQDCAT : MSIAC Quantity Distance Consequence Analysis Tool⁶

Cet outil a été développé par le MSIAC (Munitions Safety Information Analysis Center⁷) sous la forme d'une application internet utilisable en ligne sur son site sécurisé^{8,9}. Il permet de calculer un risque individuel et un risque de groupe pour une ou plusieurs installations exposées par un siège potentiel d'explosion. Il intègre des modèles globaux d'évaluation des effets pyrotechniques pour des sièges exposants et exposés génériques répondant aux définitions de l'AASTP-1. Contrairement à EVREST, il n'est pas possible de paramétrer des caractéristiques particulières des installations.

Les modèles des effets (surpression, projections et thermique) sur l'homme sont décrits dans le document L-252⁶. En particulier, le modèle projections s'appuie sur des essais échelle 1 réalisés par l'OTAN avec différents types d'infrastructures exposantes et pour lesquels la densité de débris a été évaluée en fonction de la distance au siège de l'explosion. L'analyse de ces essais montre qu'une probabilité d'atteinte de 100 % par un fragment d'énergie supérieure

à 79 J correspond au plus à une distance égale à la moitié de l'IBD¹⁰ et est ainsi enveloppe de l'ensemble des essais réalisés. D'après le modèle d'effets sur l'homme retenu¹¹, ce fragment conduit systématiquement un effet de blessure mineure dans 100 % des cas et induit un effet léthal dans 44 % des cas. Ainsi à la distance IBD/2, les probabilités de blessure légère et de létalité sont respectivement de 100 % et de 44 %. Cette donnée a été utilisée pour bâtir un modèle de létalité en champ libre¹². Avec une installation comme siège exposé, il a été considéré que seule une fraction des débris pénètre dans le bâtiment et la protection apportée est traduite par une diminution de la probabilité de létalité par un facteur 5 par rapport à la situation en extérieur.

Cette approche paraît particulièrement conservatrice en champ libre puisque la distance IBD/2 correspondrait sensiblement à la Z1 (50 % de létalité). Cette surévaluation est atténuée en présence d'une infrastructure exposée par l'application d'un facteur de réduction de 5 sur la probabilité de létalité en champ libre.

⁶ Specification of the MSIAC Quantity Distance Consequence Analysis Tool (MQDCAT) V2.4, MSIAC Report L-252, Van der Voort M., Raimbault S. (2020)

⁷ Centre d'Information et d'Analyse sur la Sécurité des Munitions

⁸ Adresse en ligne : <https://mqdcats.msiac.nato.int/>

⁹ Comme tous les produits du MSIAC, MQDCAT est accessible aux utilisateurs des pays membres du MSIAC (dont la France). Son accès est protégé par un identifiant et un mot de passe personnels qui peuvent être demandés en suivant [ce lien](#).

¹⁰ Inhabited Building Distance qui représente la distance minimale d'implantation d'habitations extérieures à une installation pyrotechnique.

¹¹ Les effets de blessures et létaux sont évalués en utilisant les mêmes modèles qu'EVREST pour les organes vitaux (figure 2) mais la pondération suivant les organes touchés est différente, ce qui explique l'écart pour le niveau léthal avec éclat de 79 J (44 % vs 30 % d'après la figure 2).

¹² A la distance IBD, la probabilité d'atteinte par un fragment d'énergie supérieure à 79 J étant de 1 %, on obtient des probabilités de blessure légère et de létalité de 1 % et de 0,44 %. Ces données ont été utilisées pour bâtir un modèle d'effets de projection sous la forme d'une exponentielle décroissante ($A \times \exp(-B \times d)$) avec A et B des constantes et d la distance) à partir de ces deux points.

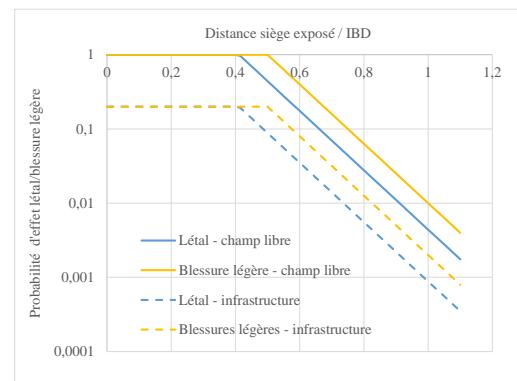


Figure 3 : modèle d'effet de projections intégré dans MQDCAT pour des niveaux de gravité de type blessure légère et léthal.



La figure 4 présente un exemple de calcul réalisé avec MQDCAT pour déterminer le risque individuel et de groupe dans un bureau situé à 200 mètres d'un magasin recouvert de terre contenant 5 tonnes de produits de division de danger 1.1. Les risques individuel et de groupe sont

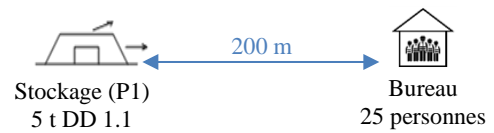
indiqués en donnée de sortie. Les nombres de décès et de personnes blessées sont également précisés.

C'est un outil plutôt simple à mettre en œuvre mais qui nécessite un jugement de spécialiste pour analyser les résultats du fait du risque de surévaluation en champ libre de la probabilité de létalité ou de sous-évaluation dans le cas d'un siège exposé présentant une protection limitée face aux projections.

SAFER : Safety Analysis for Explosive Risk

Cet outil a été développé et approuvé par le ministère de la défense américain. Une version commerciale est disponible sous licence, IMESA^{13, 14}. Ces deux outils sont basés sur des algorithmes très proches, IMESA¹³ disposant de modules spécifiques à des activités industrielles telles qu'un modèle pour le nitrate d'ammonium ou une structure de type silo.

SAFER permet de calculer un risque individuel et un risque de groupe prenant en compte un ou plusieurs sièges exposant(s) et exposé(s). Comme EVREST, il intègre des familles d'installations et de produits explosifs définis dans l'AASTP-1 et les déclinent dans des bases de données d'infrastructures et de munitions plus larges qui permettent de mieux approcher les scénarios à modéliser et ainsi affiner les effets générés. En revanche, les caractéristiques des



ES Name	ES Type	Distance (m)	Exposure	People in ES	Fatalities	Injuries	Individual Risk (fatality 1/yr)	Group Risk (fatalities 1/year)
ES1	Inhabited Building	200	1	25	1.61	2.18	3.551e-6	8.878e-5
Total numbers				25	1.61	2.18		8.878e-5

Figure 4 : résultat d'une simulation réalisée avec MQDCAT.

infrastructures et des munitions ne sont pas modifiables. Enfin, le modèle de létalité est proche de celui d'EVREST.

Les résultats des calculs SAFER donnent une évaluation des conséquences sur les sièges exposés ainsi que les niveaux de risques individuel et de groupe complétés d'un calcul d'incertitude sur les différents paramètres d'entrée (masse de matière active, distance...) afin d'identifier les facteurs influant au premier ordre.

L'interface de présentation des résultats permet de visualiser le risque quantifié sur une carte indiquant les sièges exposant et exposés (Figure 5). Les zones de risque sont présentées en couleur avec une échelle par décade. Il est intéressant de noter que les effets directionnels observés lors d'expérimentations (Figure 6) sont pris en compte.

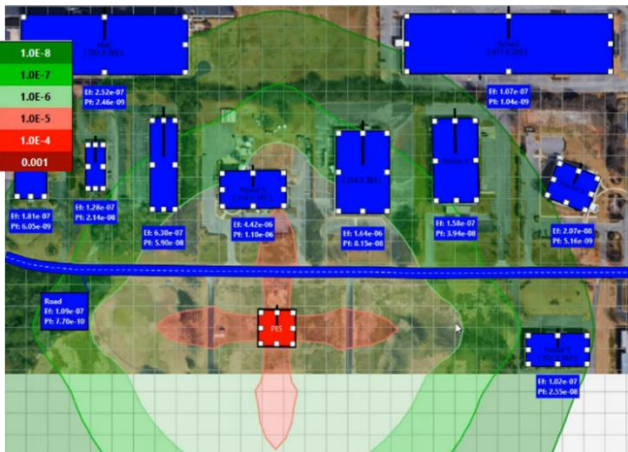


Figure 5 : exemple de visualisation des zones de risque individuel calculées avec le code IMESA¹³.

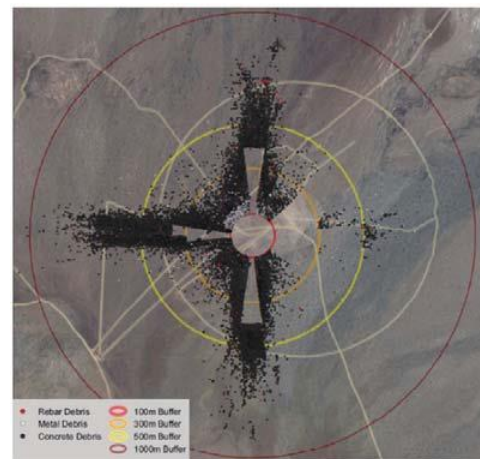


Figure 6 : répartition des projections récupérées après tir d'une charge de 3000 kg (éq. TNT) positionnée dans une structure en béton armé - visualisation des effets directionnels des projections.

EXEMPLES D'UTILISATION DES CODES DE CALCUL D'EQR

Dans la suite de l'article, l'application de la démarche EQR est illustrée au travers de plusieurs exemples qui correspondent à des situations non conformes aux règles françaises et/ou ne respectant pas les distances QD de l'AASTP-1.

Exemple 1 : bâtiment administratif exposé par un stockage

Le premier exemple concerne le cas d'un magasin recouvert de terre contenant 5 tonnes de produits explosifs de division de danger 1.1 (DD 1.1) exposant latéralement un bâtiment administratif de moins de 20 personnes (présentes 7 h par jour et 5 jours par semaine) et situé à 145 mètres (figure 7).

¹³Institute of Makers of Explosives Safety Analysis for Risk

¹⁴Une vidéo de démonstration de l'utilisation de l'outil IMESA¹³ est disponible à l'adresse suivante : <https://www.apr-research.com/capabilities/training/imesafr-training>

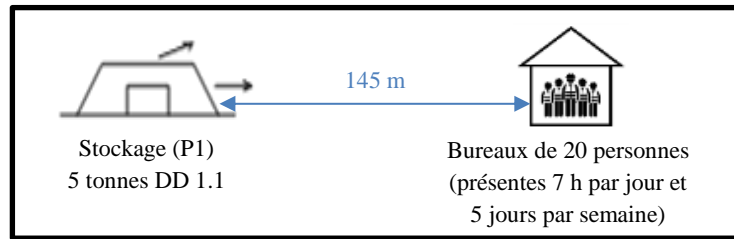


Figure 7 : scénario considéré (exemple 1) - magasin de stockage recouvert de terre exposant latéralement un bâtiment administratif.

1. Analyse suivant les règles françaises et AASTP-1

Evaluation de la conformité à l'arrêté du 20 avril 2007 :

Le bureau est une installation a3 exposée à une activité de probabilité P1 et doit donc se situer au minimum en Z3.

La limite Z2/Z3 vis-à-vis du souffle et des projections est respectivement de 137 m et 135 m.

L'implantation est donc conforme au regard de la réglementation travail.

Evaluation de la conformité selon l'AASTP-1 :

La distance QD pour un bureau de 20 personnes est de 380 m (souffle) et 246 m (projections).

L'implantation ne respecte donc pas les distances de sécurité données par l'AASTP-1.

Cette situation s'explique, pour partie, par la prise en compte d'une probabilité P1 d'évènement pyrotechnique avec les règles françaises alors que les QD OTAN sont plutôt en adéquation avec la prise en compte d'une probabilité P2 (cf. article de cette lettre sur la comparaison des règles françaises et OTAN). En outre, suivant l'AASTP-1, une installation non pyrotechnique d'au moins 20 personnes doit être considérée comme une habitation et positionnée au-delà de l'IBD soit au minimum en Z4.

2. Evaluation quantitative du risque

La distance de sécurité QD n'étant pas respectée, l'OTAN requiert qu'une EQR soit menée afin de quantifier le risque et déterminer son acceptabilité.

Calcul du risque individuel :

Pour une probabilité de l'opération pyrotechnique de niveau P1, la **probabilité annuelle d'évènement pyrotechnique (P_e)** est définie dans l'arrêté PCIG¹ et est comprise entre 10⁻⁴ et 10⁻⁵. Pour cet exemple, il est retenu une valeur moyenne soit P_e = 5 10⁻⁵.

La **fraction annuelle du temps d'exposition (T_e)** correspond au ratio de la durée pendant laquelle les personnes sont présentes dans l'installation exposée comparée à la durée d'une année soit T_e = 35 x 52 / (365 x 24) = 2,1 10⁻¹.

La **probabilité de létalité (P_{lét})** est calculée, pour cet exemple, en utilisant MQDCAT. Pour l'effet de souffle, le niveau de létalité est marginal, l'installation n'étant pas dans le champ proche du siège exposant. Pour l'effet de projections, la probabilité de létalité est de 4 10⁻². Les valeurs calculées étant faibles, la probabilité de létalité est la somme des probabilités calculées par effet soit P_{lét} = 4 10⁻².

Le **risque individuel (R_i)** est, comme rappelé dans l'article sur l'EQR, le produit de ces trois paramètres soit :

$$R_i = P_e \times T_e \times P_{lét} = 4,5 \cdot 10^{-7}$$

3. Acceptabilité du risque

En l'absence de seuils quantifiés dans la réglementation travail, les seuils de risque individuel de la réglementation de dépollution pyrotechnique ont été utilisés pour cet exemple. Pour un bâtiment administratif, la valeur de référence ainsi considérée est de 10⁻⁵ (installation a3). Avec ce référentiel, le risque individuel calculé de 4,5 x 10⁻⁷ apparaîtrait acceptable (figure 8).

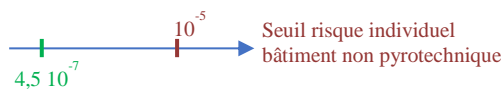


Figure 8 : exemple 1 - risque individuel calculé et seuil acceptable suivant la réglementation dépollution.

Exemple 2 : Logements situés à proximité d'une zone de chargement/déchargement

Dans ce deuxième exemple, il est considéré le cas de logements situés à l'intérieur de l'établissement ou à l'extérieur de l'établissement et exposés par une zone de chargement/déchargement timbrée à 5 tonnes de produits explosifs de la DD 1.1 et utilisée 5 demi-journées par semaine (figure 9).

L'analyse est réalisée suivant le même principe que dans l'exemple 1 et est présentée ci-après de manière synthétique.

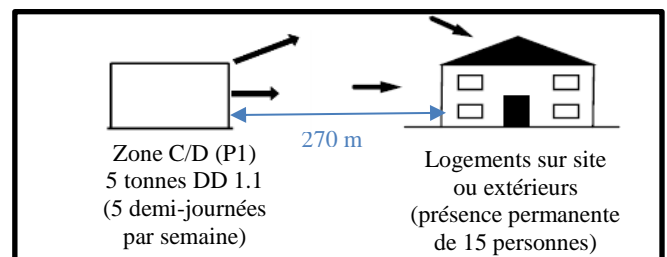


Figure 9 : scénario considéré (exemple 2) – quelques logements sur un site pyrotechnique ou extérieurs et exposés par une zone de chargement/déchargement (C/D).

¹ Arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et

de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation



1. Analyse suivant les règles françaises et AASTP-1

Evaluation de la conformité à l'arrêté du 20 avril 2007 :

- installation a4 et probabilité P1 soit une implantation au minimum en Z4
- Limite Z3/Z4 : 257 m (souffle) et 300 m (projections)

L'implantation est située en Z3 projections et n'est donc pas conforme à la réglementation travail.

Evaluation de la conformité à la réglementation Environnement :

- Habitations en Z4 souffle soit au plus 100 personnes exposées
 - Habitations en Z3 projections soit au plus 20 personnes exposées
- L'implantation est donc conforme à la réglementation Environnement.

Evaluation de la conformité selon l'AASTP-1 :

- distances de sécurité QD (IBD) : 380 m (souffle) et 490 m (projections)

L'implantation ne respecte donc pas les distances de sécurité données par l'AASTP-1.

2. Evaluation quantitative du risque

La distance de sécurité QD n'étant pas respectée, l'OTAN requiert qu'une EQR a été réalisée afin de quantifier le risque et de d'apprécier son acceptabilité.

Calcul du risque individuel :

- Probabilité annuelle d'évènement pyrotechnique : $P_e = 5 \cdot 10^{-5}$
- Temps d'exposition (fraction annuelle) : $T_e = (5 \times 4 \times 52) / (365 \times 24) = 1,2 \cdot 10^{-1}$ (présence permanente des habitants mais activité pyrotechnique temporaire)

Exemple 3 : Habitations extérieures à proximité d'un stockage

Le troisième exemple concerne le cas d'un stockage de 10 tonnes de produits de la DD 1.1 dans un magasin recouvert de terre et exposant latéralement un lotissement situé à l'extérieur d'un établissement pyrotechnique (figure 11).

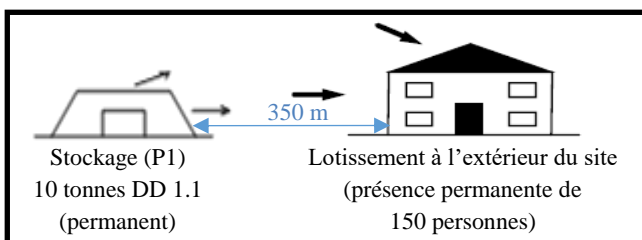


Figure 11 : scénario considéré (exemple 3) - magasin de stockage exposant latéralement un lotissement situé à 350 m.

1. Analyse suivant les règles françaises et AASTP-1

Evaluation de la conformité à la réglementation Environnement :

Le nombre de personnes étant supérieur à 100 et la probabilité de P1, le lotissement doit se situer au minimum en Z5 :

- limite Z4-Z5 : 479 m (souffle) et 400 m (projections)

L'implantation est donc non conforme à la réglementation Environnement.

- Probabilité de létalité (calcul MQDCAT) :

$$P_{\text{lét}} (\text{souffle}) = \text{marginal} \text{ et } P_{\text{lét}} (\text{projections}) = 6 \cdot 10^{-2} \text{ soit } P_{\text{lét}} = 6 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{Risque individuel : } R_i = P_e \times T_e \times P_{\text{lét}} = 4 \cdot 10^{-7}$$

3. Acceptabilité du risque

Le seuil de risque individuel de la réglementation de dépollution pyrotechnique correspondant à des locaux habités (installation c3) a été retenu pour l'étude, soit 10^{-6} . Avec ce référentiel « seuil », le risque individuel calculé de $4 \cdot 10^{-7}$ semblerait acceptable (figure 10) mais est relativement proche de la valeur limite.

De plus, il est à noter que le temps d'exposition est limité et induit une réduction du niveau de risque d'une décade par rapport à une activité pyrotechnique permanente. Sans prise en compte de ce facteur temporel, le risque calculé aurait été légèrement inférieur au seuil considéré dans cet exemple, ce qui amène à envisager des mesures de réduction du risque.

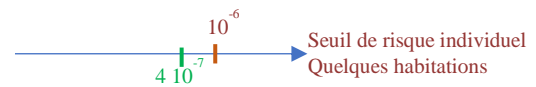


Figure 10 : exemple 2 - risque individuel calculé et seuil acceptable suivant la réglementation dépollution.

4. Mesures de réduction du risque

Si ce risque calculé est jugé trop proche du seuil, l'EQR peut également être utilisée afin de cibler les moyens de renforcement de protection éventuels. Dans cet exemple, les risques létaux sont portés principalement par les effets des projections. L'ajout d'un merlon est étudié car il permet de diminuer, d'après les distances QD de l'AASTP-1, l'IBD à 400 m. La probabilité de létalité est ainsi réduite à $2 \cdot 10^{-2}$ et le risque individuel est ramené à $1 \cdot 10^{-7}$ soit une décade en-deçà du seuil pris en référence.

Evaluation de la conformité selon l'AASTP-1 :

- distances QD (IBD) : 479 m (souffle) et 284 m (projections)
- L'implantation ne respecte donc pas la distance de sécurité soufflé donnée par l'AASTP-1.

2. Evaluation quantitative du risque

La distance de sécurité QD n'étant pas respectée, l'OTAN requiert qu'une EQR a été réalisée.

Calcul du risque individuel :

- Probabilité annuelle d'évènement pyrotechnique : $P_e = 5 \cdot 10^{-5}$
- Temps d'exposition (fraction annuelle) : $T_e = 1$ (présence permanente des habitants et de l'activité pyrotechnique)

- Probabilité de létalité (calcul MQDCAT) :

$$P_{\text{lét}} (\text{souffle}) = \text{marginal} \text{ et } P_{\text{lét}} (\text{projections}) = 10^{-4} \text{ soit } P_{\text{lét}} = 10^{-4}$$

$$\text{Risque individuel : } R_i = P_e \times T_e \times P_{\text{lét}} = 5 \cdot 10^{-9}$$

3. Acceptabilité du risque

Le seuil de risque individuel de la réglementation de dépollution pyrotechnique correspondant à une zone de population dense (installation c4) a été pris en référence soit 10^{-7} . Avec ce référentiel, le risque individuel calculé de $5 \cdot 10^{-9}$ semblerait acceptable.



Le niveau de risque calculé est très bas et pourrait être jugé contradictoire avec le non-respect des règles Environnement et OTAN. L'explication tient au fait que la probabilité de létalité liée au souffle est marginale. En considérant uniquement l'effet de projections, la distance de

sécurité retenue serait de 284 m, rendant ainsi acceptable la position du lotissement, sans contrainte sur le nombre de personnes présentes. Cet exemple traduit également le fait que les zones d'effets dangereux (notamment projections) OTAN sont plus précises que celles de la réglementation française et que, dans ce cas particulier (en latéral d'un magasin recouvert de terre), les distances projections sont bien inférieures à celles données par la circulaire du 20 avril 2007 (284 vs 400m). Les résultats auraient été très différents si le lotissement avait été positionné dans le cône frontal du magasin.

CONCLUSION

Les codes de calcul d'évaluation quantitative du risque pyrotechnique sont des outils puissants permettant d'apporter des éléments d'aide à la décision. Cependant et afin d'éviter une dérive dans leur utilisation, ils doivent être mis en œuvre par des spécialistes sur des plages de validité qui sont à définir précisément.

Bien évidemment d'autres applications des outils d'EQR sont envisageables comme l'aide à la conception d'installations ainsi que l'optimisation de leur emplacement et de leur orientation. Ils pourraient également être mis en œuvre afin d'éclairer les choix de niveaux de protection et de réaliser d'éventuelles économies en ciblant au plus juste les dispositions constructives des bâtiments exposés.

Dans le cas des situations complexes tels que les ports militaires, les bases aériennes ou les sites industriels contraints, leur utilisation semble incontournable pour combler les lacunes des règles françaises, trop simplifiées pour prendre en compte ces situations, en objectivant le risque sur des seuils de létalité qui restent à préciser par l'administration.

Les bases de données de résultats d'expérimentations donnent les moyens d'évaluer et de comparer les codes d'EQR pour apprécier leur pertinence sur des utilisations précises. Au regard des enjeux, le référencement par l'administration de codes d'EQR reconnus doit permettre de maîtriser l'utilisation de ces outils qui va inévitablement s'intensifier en France.

Documents accessibles en ligne relatifs aux normes OTAN de sécurité pyrotechnique

Les documents suivants sont téléchargeables sur le site NSO de l'OTAN (<https://nso.nato.int/nso/nsdd/main/list-promulg>) :

- AASTP-1 édition C - version 1 ;
- AASTP-4 édition 1 – change 4 – partie I.

Un calculateur des distances de sécurité QD et un projet de traduction en français de l'AASTP-1 seront mis prochainement à disposition pour le ministère des armées sur le site Intradef ou sur demande pour les acteurs civils.

L'ONU a également développé un outil sommaire de calcul disponible en ligne à l'adresse suivante : <https://unsafeguard.org/map/index.fr.php>. Ce calculateur permet de tracer sur une carte les distances à respecter entre un siège exposant et des bâtiments vulnérables, habités ou des routes. Les distances calculées sont assez conservatives et cet outil est principalement destiné à des pays qui peuvent stocker des munitions et ne disposent que d'une réglementation très sommaire en matière de sécurité pyrotechnique.

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		
05/09/2022	Cristallisation d'hexogène au fond d'un fondoir de tolite lors d'une opération de chargement d'obus. <i>Actions mises en place par l'entreprise :</i> <ul style="list-style-type: none"> • opération de dépollution ; • formation au risque pyrotechnique et au fonctionnement de l'atelier ; • révision de l'équipe et du management ; • mise en place de règles de traçabilité des matières ; • amélioration de la documentation de l'atelier ; • mise en place de contrôles supplémentaires ; • amélioration des moyens techniques. 	Fondoir inutilisable et à dépolluer
05/12/2022	Initiation d'une composition traçante lors d'une opération de pastillage qui a provoqué la prise en feu dans une des matrices. <i>Actions mises en place par l'entreprise :</i> diminution de la quantité maximale autorisée dans la trémie compte tenu des dégâts observés.	Quelques dégâts matériels
20/12/2022	Prise en feu de reliquat de propergol composite lors d'une maintenance. L'incident s'est produit lors d'une opération de meulage qui a projeté des particules incandescentes sur un équipement contenant des résidus de propergol.	Sans objet
22/03/2023	Lors du démontage d'un clapet d'alimentation en produits explosifs, une opération de dévissage a généré un claquement, blessant au doigt un des techniciens de maintenance. Le claquement est vraisemblablement dû à la présence d'une pollution résiduelle d'explosif agressive par le dévissage (frottement, friction).	1 blessé
04/04/2023	Prise en feu d'une rondelle de propergol composite lors d'un usinage	Peu de dégâts matériels
14/04/2023	Allumage intempestif de résidus de propergol au sol suite à étincelles venant d'une opération de meulage. Le garde feu a déclenché son extincteur à poudre et la flamme s'est éteinte. Le sol était vraisemblablement mal nettoyé avant la maintenance.	Sans objet
19/05/2023 et 04/06/2023	Initiation de compositions pyrotechniques avec propagation sur une ligne d'assemblage. Cet événement est dû à un manque de nettoyage avec des zones difficiles d'accès. <i>Actions mises en place par l'entreprise :</i> Nettoyage intégral des lignes et renforcement de leur nettoyage préventif périodique.	Peu de dégâts matériels
06/06/2023	Combustion lors de la fabrication de poudre pour chasse avec de la nitrocellulose. Lors du démarrage de la bi-vis, l'opérateur a vu sur son écran de contrôle de la fumée et une flamme. Le système de noyage automatique s'est aussitôt déclenché permettant une extinction rapide. <i>Actions mises en place par l'entreprise :</i> La vanne a été entièrement nettoyée et révisée avant remise en service, et les vannes de même type ont été inspectées sur les autres bi-vis.	Sans objet
Du côté des essais		
15/02/2023	Feu de forêt suite à l'utilisation d'un feu d'artifice, dans le cadre d'un essai de tir de feux d'artifice par un artificier hors de son site de production. L'incendie a parcouru 1 ha. Les pompiers sont intervenus.	Destruction d'une partie de la forêt
17/02/2023	Lors du test d'un composant pyrotechnique contenant de l'hexocire, une projection métallique s'est échappée de la casemate de tir et est retombée sur la toiture d'un hangar voisin situé à environ 150 m. La projection métallique est passée, semble-t-il, entre les mailles de la protection supérieure de la casemate de tir (caillebotis métallique). <i>Actions mises en place par l'entreprise :</i> Nécessité de valider l'adéquation des écrans de protection de l'aire d'essais avec les objets testés ; si nécessaire conception d'un nouveau dispositif de protection.	Trou dans la toiture



Code couleur indiquant le niveau de gravité
des conséquences humaines

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

Du côté des essais		
21/02/2023	<u>Non maîtrise des effets lors d'un essai de fonctionnement sur batteries F2 de feux d'artifice.</u> L'une des batteries s'est couchée et des artifices sont partis horizontalement à 50 cm de hauteur dont 4 vers les pyrotechniciens et un autre sous le véhicule de service. Cet incident est dû à une erreur de calage de la batterie (non-respect des consignes).	Sans objet
06/03/2023	<u>Fonctionnement pyrotechnique d'un boîtier d'allumage lors d'un essai d'environnement mécanique.</u> L'incident s'est produit suite à la remise en marche, menée à distance depuis la salle de commande, du système d'amplificateur de puissance ayant disjoncté. <i>Actions mises en place par l'entreprise : Les actions correctives envisagées portent sur l'interdiction de commander l'envoi de puissance au pot vibrant lorsque l'amplificateur est inopérant.</i>	Sans objet
10/03/2023	<u>Accident lors du chargement d'une munition flèche de 25 mm.</u> Lors de la fermeture de la culasse de l'appareil de tir, le bloc arrière a été projeté pour une raison inconnue vers les personnels d'essai situés à proximité.	1 mort 1 blessé
20/03/2023	<u>Fonctionnement intempestif lors de tirs avec une arme de 12,7 mm montée sur berceau.</u> En fin de campagne de tir, après approvisionnement d'une bande de 100 cartouches de 12,7 mm, le premier chargement a été immédiatement suivi du déclenchement du tir de la bande complète sans possibilité de l'arrêter. Les butées mécaniques en place sur l'arme ont permis de maîtriser la trajectoire des projectiles et d'assurer le respect du gabarit de sécurité. Cet incident est dû à un problème de conception du berceau qui porte l'arme. En effet, une des pièces de ce berceau était trop courte. Elle ne permettait à la sureté de bloquer la percussion sans action sur la détente et a donc conduit à un tir automatique suite au chargement de la première cartouche.	Sans objet
30/03/2023	<u>Eclatement pneumatique d'un propulseur lors d'un tir d'essai</u> et propergol non consommé projeté dans le stand.	Peu de dégâts matériels
09/06/2023	<u>Combustion d'un pain éjecteur de la queue porte charge lors de tirs de mortier de 120 mm en cadence depuis un véhicule.</u> Le problème résulterait de la combustion du pain éjecteur de la queue porte-charge dont les gaz s'échappent par des événements dirigés vers le bas et donc en direction du personnel.	1 blessé
Du côté des forces		
16/03/2023	<u>Chute de munitions d'une hauteur de 50 cm lors d'un transfert interne</u> sur palette métallique type 1400 kg contenant 20 munitions. 6 d'entre-elles ont été éjectées de la palette et ont roulé sur le sol.	Munitions abîmées
Autres		
03/11/2022	<u>Découverte d'engins explosifs dans un bac de déchets banaux,</u> dans un centre de collecte de déchets non dangereux <i>Actions mises en place par l'entreprise : Une équipe de déminage est intervenue. Une fiche de non-conformité a été adressée à l'entreprise d'où provenait le bac.</i>	Sans objet
26/02/2023	<u>Explosion d'une arme lors d'un tir de réglage sur un stand de tir</u> due à une munition défectueuse.	2 blessés

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.

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
Australie	11/12/2022 : Fonctionnement intempestif d'un feu d'artifice après retombée sur un enfant (périmètre de sécurité non maîtrisé). L'enfant a été très gravement blessé.	9 blessés
Bolivie	07/03/2023 : Explosion dans une usine de fabrication d'explosifs (probablement clandestine) lors de travaux de couverture sur un bâtiment.	1 mort 3 blessés
Brésil	01/01/2023 : Explosion d'un feu d'artifice , retombé dans les vêtements d'un spectateur qui se trouvait sur une plage (manifestation non autorisée).	1 mort
Chine	26/05/2023 : Explosion de feux d'artifice dans un commissariat au moment du prélèvement d'échantillons par les policiers afin d'identifier un commerce illégal de feux d'artifice.	4 morts 5 blessés 2 disparus
Inde	19/01/2023 : Explosion dans une usine de fabrication de feux d'artifice . Une inspection des lieux par l'administration du district a eu lieu quelques heures avant l'explosion. L'équipe d'inspection avait détecté des anomalies et avait préconisé des mesures correctives.	4 morts 56 blessés
	30/01/2023 : Explosion dans un atelier de feux d'artifice . Des feux d'artifice étaient étalés dans le hangar pour les sécher. L'explosion s'est produite alors que les 4 personnes travaillant dans l'unité s'étaient éloignées du site. L'une d'elles, voyant de la fumée, est retournée dans l'unité et a été blessée par l'explosion. Elle est décédée quelques jours après des suites de ses blessures.	1 mort
	05/03/2023 : Explosion dans une usine de fabrication de feux d'artifice .	1 mort 8 blessés
	18/03/2023 : Explosion dans une usine de feux d'artifice puis incendie .	3 pièces rasées dans l'usine
	20/03/2023 : Explosion dans une usine (probablement clandestine) de fabrication de feux d'artifice suivie d'un incendie aggravé par les vents forts.	3 morts
	22/03/2023 : Incendie dans une usine de fabrication de feux d'artifice .	12 morts 27 blessés
	07/04/2023 : Explosion dans un atelier de fabrication de feux d'artifice .	3 hangars de travail démolis
	16/05/2023 : Explosion dans une usine clandestine de fabrication de feux d'artifice . L'usine était composée d'un hangar en tôles ondulées. Le propriétaire avait eu ordre de fermer l'usine le mois précédent. Certaines maisons voisines ont pris feu.	9 morts 5 blessés
28/05/2023 : Incendie dans un verger de manioc où un atelier illégal de feux d'artifice avait été installé .	5 blessés Verger brûlé	
Indonésie	19/02/2023 : Explosion dans un atelier clandestin de fabrication de feux d'artifice .	4 morts Dizaines de bétails morts Endommagement de 25 maisons
Iran	05/03/2023 : Explosion dans un atelier (probablement clandestin) de fabrication de feux d'artifice .	4 morts 5 blessés
Kirghizistan	29/05/2023 : Explosion d'un feu d'artifice dans une foule d'élèves lors d'une cérémonie de remise de diplômes .	1 blessé



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
Mexique	Entre le 01/12/2022 et le 12/05/2023, 19 accidents pyrotechniques recensés lors de la fabrication clandestine, du stockage, du transport ou de l'utilisation (fêtes religieuses ou meeting politiques) de feux d'artifice.	Entre le 01/12/2022 et le 12/05/2023 : 18 morts 97 blessés Nombreux commerces, ateliers, maisons et véhicules détruits ou endommagés Dégâts matériels considérables
Pakistan	13/05/2023 : Explosion puis incendie dans un atelier clandestin de fabrication de feux d'artifice.	3 morts
Pérou	11/12/2022 : Explosion dans un atelier de feux d'artifice.	1 mort
	14/12/2022 : Explosion dans un atelier clandestin de feux d'artifice.	Maisons impactées
	28/12/2022 : Explosion dans un entrepôt pyrotechnique clandestin.	1 mort 40 blessés
	14/04/2023 : Explosion dans un atelier de fabrication de feux d'artifice clandestin.	1 blessé
Russie	16/02/2023 : Explosion dans une usine d'armement (détonateurs et explosifs).	1 mort 3 blessés
Salvador	04/12/2022 : Explosion d'un feu d'artifice pendant un spectacle dans un stade.	1 mort 1 blessé
	01/04/2023 : Explosion dans un atelier clandestin de fabrication de feux d'artifice. Des mégots de cigarettes à proximité de plusieurs produits chimiques explosifs ont été retrouvés ; les enquêteurs ont découverts que des ouvriers cuisinaient dans le même espace où les produits explosifs étaient fabriqués.	6 morts 10 blessés
Slovénie	17/02/2023 : Explosion dans un atelier de fabrication de feux d'artifice.	1 mort 2 blessés
Suède	10/05/2023 : Explosion dans une usine de fabrication de munitions. L'origine pourrait être des travaux de maintenance.	1 blessé
Vietnam	25/12/2022 : Explosion lors de la fabrication artisanale de feux d'artifice par deux élèves.	2 morts 3 blessés
USA	21/05/2023 : Explosion dans un atelier clandestin de fabrication de feux d'artifice.	1 blessé

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

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@intradef.gouv.fr

ISSN 2554-0912

Diffusion : numérique / 2 numéros par an

Dépôt légal : juillet 2023

Editeur : DGA/INSP/IPE