

**Direction générale
de l'armement**

**Institut national de l'environnement
industriel et des risques**



Inspection de l'armement









*maîtriser le risque
pour un développement durable*

Unité explosifs et articles pyrotechniques

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

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

Contribution	Grade, prénom et nom des contributeurs	Affectation	Signature
Rédaction	IETA Joffrey DUCHON	ARM/DGA/INSP/IPE/SM	
Rédaction et vérification	ICA Serge BORDACHAR	ARM/DGA/INSP/IPE/SM	
Vérification	IC1ETA Jean-Marc LEVEAU	ARM/DGA/INSP/IPE/SP	
Vérification	M. Lionel AUFAUVRE	INERIS/PYRO	
Vérification	Mme Sylvie BODIN-REMOND	INERIS/PYRO	
Approbation	M. Raymond COINTE	INERIS/DG	
Approbation	IGHCA Françoise LÉVÊQUE	ARM/DGA/INSP/IPE	

0 ÉVOLUTIONS DE LA NOTE

Édition	Date	Nature de l'évolution
1	05/01/2022	Édition originale

Table des matières

0	ÉVOLUTIONS DE LA NOTE.....	2
1	GLOSSAIRE.....	5
2	FINALITÉ DE LA NOTE.....	6
3	TYPOLOGIE DES ACCIDENTS PYROTECHNIQUES.....	7
3.1	Explosions ou détonations en masse.....	7
3.2	Explosions progressives ou dites « <i>pop-corn</i> ».....	8
3.3	Incendies généralisés.....	8
4	EFFETS COLLATÉRAUX DES ÉVÉNEMENTS PYROTECHNIQUES.....	9
4.1	Effet de souffle.....	9
4.1.1	Préliminaires techniques.....	9
4.1.1.1	Équivalents TNT.....	9
4.1.1.2	Effets d'une enveloppe.....	9
4.1.1.3	Géométries sphériques et non sphériques.....	9
4.1.1.4	Effets du relief.....	10
4.1.1.5	Explosions confinées – Annexe 2.....	10
4.1.1.6	Souffle dans des sites de stockage souterrains (cf. AASTP-4 [1], méthode suisse).....	10
4.1.2	Dommmages aux personnes et aux installations – Annexe 3.....	11
4.2	Projections.....	12
4.2.1	Conséquences des effets de projections.....	12
4.2.2	Dommmages aux personnes et aux installations – Annexe 5.....	12
4.3	Effets thermiques.....	13
4.3.1	Conséquences des effets thermiques – Annexe 6.....	13
4.3.2	Dommmages aux personnes et aux installations.....	13
4.4	Onde tellurique.....	14
4.4.1	Présentation des effets.....	14
4.4.2	Dommmages aux installations.....	14
4.5	Effets d'escalade et détonation par transmission simultanée.....	14
4.6	Prévention des effets collatéraux.....	14
5	TRAITEMENT DES ZONES D'EFFET DANS LA RÉGLEMENTATION FRANÇAISE.....	15
5.1	Effet de souffle.....	15
5.1.1	Genèse et historique.....	15
5.1.2	Réglementation actuelle associée.....	17
5.1.3	Périmètre et limites d'application.....	17
5.2	Effets de projections.....	17
5.2.1	Genèse et historique.....	17
5.2.2	Réglementation actuelle associée.....	20
5.2.3	Périmètre et limites d'application.....	20
5.3	Effets thermiques.....	20

5.3.1	Genèse et historique	20
5.3.2	Réglementation actuelle associée	20
5.3.3	Périmètre et limites d'application	21
5.4	Détonation par transmission simultanée	21
5.4.1	Réglementation actuelle associée	21
5.4.2	Périmètre et limites d'application	21
6	DISCUSSION.....	23
6.1	La détonation ou l'explosion en masse.....	23
6.2	Les explosions progressives.....	25
6.3	Les incendies ou feux généralisés.....	25
6.4	Introduction de seuils de létalité dans la réglementation actuelle.....	26
7	RÉFÉRENCES	27
8	ANNEXES	28

1 GLOSSAIRE

AASTP	<i>Allied Ammunition Storage and Transport Publication</i>
ACR	<i>Average Circle Radius</i> , rayon moyen du cercle [de dégâts]
ADD	Actual Debris Density, densité de débris réelle
DMA	Délégation Ministérielle de l'Armement (création en 1961, devient la DGA en 1977)
DGA	Direction Générale de l'Armement (Délégation Générale de l'Armement avant 2009)
DR	Division de Risque
EDD	Étude De Dangers
ESKIMORE	<i>Explosives Safety Knowledge IMprovement Operation Redux</i> (nom d'une campagne expérimentale américaine)
EST	Étude de Sécurité pour le Travail
EWD	<i>Explosives Workshop Distance</i> , distance entre ateliers pyrotechniques
IAD	Indice d'Aptitude à la Détonation
IBD	<i>Inhabited Building Distance</i> , distance entre habitations et événement pyrotechnique
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
INERIS	Institut National de l'Environnement industriel et des RISques
IPE	Inspectrice pour les Poudres et les Explosifs
MPTN	<i>Modified Pseudo Trajectory Normal</i> (nom d'un modèle de calcul pour les débris)
MSIAC	<i>Munitions Safety Informations Analysis Center</i>
NEQ	<i>Net Explosive Quantity</i> , masse de matière active (MMA)
ONU	Organisation des Nations Unies (<i>UN</i> en anglais)
OTAN	Organisation du Traité de l'Atlantique Nord (<i>NATO</i> en anglais)
PCIG	Probabilité d'occurrence, de la Cinétique, de l'Intensité des effets et de la Gravité
PES	<i>Potential Explosion Site</i> , Site d'Explosion Potentiel
PF	<i>Principal Frequency</i> , fréquence principale
PPRT	Plan de Prévention des Risques Technologiques
PPV	<i>Principal Particles Velocity</i> , vitesse des particules de crête
PTN	<i>Pseudo Trajectory Normal</i> (nom d'un modèle de calcul pour les débris)
Q	Masse de matière active
QD	<i>Quantity-Distance</i> , distance fonction de la masse de matière active
QSP	<i>Quasi-Static Pressure</i> , pression quasi-statique
SFEPA	Syndicat des Fabricants d'Explosifs, de Pyrotechnie et d'Artifices
SNPE	Société Nationale des Poudres et Explosifs (ArianeGroup actuellement)
SQQD	<i>Small Quantiy Quantity-Distance</i>
TNT	TriNitroToluène ou Tolite
VBD	<i>Vulnerable Building Distance</i> , distance aux bâtiments vulnérables

2 FINALITÉ DE LA NOTE

L'évaluation des conséquences d'un potentiel accident impliquant des matières ou objets explosifs est une étape clé du traitement réglementaire de la sécurité pyrotechnique. Conjuguée à l'estimation en amont de la probabilité de cet accident, elle définit les contraintes d'implantation des installations et des personnels travaillant à l'intérieur du site pyrotechnique faisant l'objet de l'analyse.

La pertinence de cette évaluation dépend au premier ordre de la capacité à décrire avec un conservatisme raisonné la réalité physique parfois complexe associée aux scénarios d'accident.

Cette note a pour objet de confronter les lois utilisées dans la réglementation nationale pour déterminer les zones d'effets à l'état de l'art technique dans le domaine des effets des explosions, très largement enrichi ces vingt dernières années par des travaux de l'Organisation du Traité de l'Atlantique Nord (OTAN) [1][2].

Le parcours sur la genèse de leur utilisation dans les réglementations successives permet de mieux identifier les réels périmètres de validité associés et d'ouvrir une discussion sur l'opportunité au sein de l'inspection de l'armement, notamment auprès de l'Inspectrice pour les Poudres et Explosifs (IPE – rattachée à la Direction générale de l'armement, Ministère des armées) et de l'Institut National de l'Environnement industriel et des RISques (INERIS – établissement public à caractère industriel et commercial, sous tutelle du Ministère de la transition écologique), d'engager des travaux complémentaires pour proposer des évolutions aux acteurs ministériels en charge de l'élaboration des textes de référence en sécurité pyrotechnique.

3 TYPOLOGIE DES ACCIDENTS PYROTECHNIQUES

La nature même des matières et objets pyrotechniques, qui peuvent réagir de façon soudaine et violente, rend nécessaire l'élaboration de règles pour la sécurité des opérations qui les concernent et pour les risques afférents. Les décisions peuvent être prises à meilleur escient lorsqu'on connaît la probabilité et les conséquences d'un accident causé par des explosifs et toute réglementation dans le domaine pyrotechnique doit démontrer la maîtrise de ces termes majeurs de l'équation du risque pour les personnels et les biens.

3.1 Explosions ou détonations en masse

Lorsqu'une détonation ou explosion en masse (cf. Figure 1) se produit dans l'air ou dans le sol, plusieurs effets primaires doivent être pris en compte : souffle, fragmentation, projections de cratère, ébranlement tellurique et effets thermiques. Ces phénomènes sont abondamment documentés et la science relative à leur compréhension a beaucoup progressé ces vingt dernières années. Le standard scientifique établi par les experts de l'OTAN [1] est une référence très complète dont on peut tirer la phénoménologie de base qui suit.



Figure 1 : visualisation d'une détonation en masse

Tout d'abord, l'onde de choc aérienne induite par la détonation de la matière pyrotechnique crée une surpression (appelée phase positive, où la pression est supérieure à la pression atmosphérique) dans l'environnement. Ce phénomène est presque instantanément suivi par un vent de souffle qui engendre à son tour une variation négative de la pression dans l'environnement (on parle de pression dynamique). Enfin, une explosion dans un espace clos ou dans une enceinte de confinement total produit des réverbérations et des réflexions de l'onde de choc qui, en présence des gaz de détonation, finissent par induire une pression quasi-statique, également appelée "pression de gaz de crête".

Pour ce qui relève de la fragmentation, on en distingue deux types. En effet, selon leur origine, les projections sont appelées "primaires" ou "secondaires". Les fragments primaires proviennent de la rupture de l'enveloppe (des munitions ou comme les mélangeurs, malaxeurs ou trémies) en contact direct avec l'explosif. Ces fragments, généralement de faibles dimensions, sont projetés à des vitesses initiales de quelques milliers de mètres par seconde et peuvent être mortels, même à grande distance de l'explosion.

Les débris secondaires proviennent eux des structures et autres éléments situés dans l'environnement immédiat de l'explosion. Ils sont généralement plus volumineux que les fragments primaires et ont des vitesses de quelques centaines de mètres par seconde. Des projections de cratère peuvent également résulter des événements explosifs avec des volumes de projections en général plus importants lors d'explosions souterraines.

Dans une explosion en masse, les effets thermiques sont généralement de courte durée et de moindre conséquence que les autres manifestations. La zone de danger associée est généralement moins étendue que celle où s'exercent les effets de souffle et de fragmentation. Ces effets thermiques sont généralement associés à une boule de feu générée par une explosion. Des matières incandescentes peuvent également être projetées autour du site de détonation, provoquant alors des feux secondaires.

Les fumées et les gaz de post combustion peuvent constituer un problème supplémentaire pour les bâtiments et les personnes situées à proximité du siège de l'explosion. Les événements souterrains présentent également d'autres particularités qui seront abordées ultérieurement.

L'ébranlement tellurique désigne le couplage d'énergies dans le sol, après une détonation ou une explosion. Il se traduit par des mouvements localisés du sol ou des structures à proximité de l'événement explosif.

3.2 Explosions progressives ou dites « pop-corn »

On définit selon ce terme des accidents de matières emballées ou objets pyrotechniques sans effets de masse simultanés, caractérisés par une cinétique relativement lente de quelques minutes à quelques dizaines d'heures, des effets de surpression modérés liés à des explosions d'objets en quantité marginale au regard de la masse totale et un risque prédominant d'incendie et de projections d'éclats primaires ou d'objets avec ou sans autopropulsion.

S'ils n'ont pas les mêmes effets destructeurs que les explosions ou détonations en masse de produits et la même cinétique très rapide, les conséquences de ces accidents sont difficiles à appréhender et le bon dimensionnement des installations à même de circonscrire les effets est ici le point majeur.

3.3 Incendies généralisés

Il s'agit des scénarios d'accidents les plus courants, impliquant une combustion en masse des matières ou objets pyrotechniques. Dans les causes traditionnelles, on retrouve des mécanismes de décomposition conduisant à de l'auto-initiation (consommation de stabilisant avec le temps dans les poudres...), des dysfonctionnements électriques ou des décharges électrostatiques ou encore des prises de feu de matériaux adjacents (conteneurs, matériels électriques, végétation...) entre autres.

Dans la plupart des accidents de ce type, l'incendie peut se dérouler pendant plusieurs minutes voire plusieurs heures avant que la réaction majeure ne se produise et cette dernière peut prendre plusieurs formes jusqu'à l'explosion ou la détonation si le feu a lieu dans une installation lourdement confinée comme un igloo par exemple (cf. Figure 2 ci-dessous). Une transition de l'incendie vers un phénomène plus violent peut également se manifester sous conditions d'un confinement plus léger (cas des artifices de divertissement par exemple).



Figure 2 : Influence du confinement sur la combustion de poudres

Les gaz de combustion générés peuvent ainsi causer une fragmentation de l'installation et une projection de débris secondaires. On peut également avoir un déconfinement brutal par expulsion d'éléments structurellement plus fragiles (portes), expulsion d'une partie des matériaux énergétiques par ces ouvertures et fin de la combustion en dehors de l'installation. Aussi, il faut se garder d'avoir une représentation faussée de ce type d'accident en considérant que les matériaux énergétiques brûlent aussi simplement que des matériaux inertes et que le danger associé serait relativement bénin au regard des autres types de phénomènes.

4 EFFETS COLLATÉRAUX DES ÉVÉNEMENTS PYROTECHNIQUES

L'évaluation des conséquences indésirables d'un accident potentiel constitue le second terme majeur de l'équation des risques. Ces conséquences sont évaluées selon une approche simple ou en deux étapes. L'approche simple consiste en un calcul direct des conséquences indésirables tandis que l'approche en deux temps commence par une estimation des effets physiques de l'explosion, suivi par une prédiction des conséquences associées.

4.1 Effet de souffle

Le souffle est l'effet de base produit par la détonation des principaux produits explosifs avec ou sans enveloppe. Les manifestations du souffle qui seront constatées sur le site exposé sont la surpression de crête, l'impulsion spécifique de l'onde de souffle et la pression dynamique (mouvement de l'air). La pression et la durée du souffle varient approximativement comme la racine cubique de la masse et de la distance aux matières et objets pyrotechniques.

4.1.1 Préliminaires techniques

4.1.1.1 Équivalents TNT

La masse équivalente d'une substance énergétique correspond à la masse d'un explosif standard (généralement, le TNT) nécessaire pour produire une onde de choc de même intensité. Un même événement explosif ou substance énergétique peut avoir plusieurs équivalences selon le paramètre d'onde choisi (cf. Annexe 1 pour la définition des termes liés aux explosions et incendies). Il peut, par exemple, avoir une équivalence basée sur la pression de crête, une autre d'après l'impulsion positive (première phase de l'explosion) ou le temps d'arrivée. Toutefois, les deux équivalences les plus répandues sont celles basées sur la pression de crête et l'impulsion positive.

En général, les équivalences basées sur le temps d'arrivée ou la durée de la phase positive ne sont pas disponibles et ne sont donc qu'approximatives. Les équivalences basées sur la surpression de crête peuvent donc se substituer à celles basées sur le temps d'arrivée, de même que les équivalences basées sur l'impulsion positive peuvent remplacer celles basées sur la durée positive.

4.1.1.2 Effets d'une enveloppe

L'ajout d'une enveloppe autour de la charge explosive introduit de nouvelles variables dans la fonction définissant le souffle. Ces variables, qui peuvent se révéler importantes, sont les suivantes :

- La masse de l'enveloppe et ses propriétés associées comme sa dureté, sa densité, son épaisseur ;
- Les propriétés explosives comme la densité, la vitesse de détonation et la forme de la charge.

Cependant, le retour d'expérience des recherches et des essais tend à suggérer que les effets apparents de l'enveloppe qui entraînent une réduction de la masse effective de l'explosif doivent être ignorés car ils ne sont pas suffisamment connus.

4.1.1.3 Géométries sphériques et non sphériques

La plupart des objets ou matières explosives sont de forme non-sphérique. Pour une charge non-sphérique, l'onde de choc ne pénètre pas dans l'air ambiant sous forme d'onde sphérique, ni au même instant pour toute la surface de la charge. La forme et l'intensité de l'onde de choc pénétrant l'air dépendent en effet à la fois de la géométrie de la charge et de la position relative d'amorçage.

Les paramètres du souffle dépendent non seulement de la masse de la charge et de la distance radiale par rapport à cette charge, mais aussi de l'azimut et parfois de l'élévation autour de la charge. Il n'existe aujourd'hui aucun « facteur de correction » facilement identifiable capable de prendre en compte des formes non-sphériques.

4.1.1.4 Effets du relief

Les caractéristiques d'une onde de choc sont modifiées par des variations de relief telles que déclivités ou vallées. Les pressions de l'onde de choc augmentent généralement lorsque l'onde rencontre une pente ascendante ou lorsqu'elle descend l'axe d'une vallée flanquée de versants parallèles ou convergents. En revanche, les pressions d'onde diminuent lorsque l'onde rencontre une pente descendante.

4.1.1.5 Explosions confinées – Annexe 2

Les explosions confinées ou contenues au sein de structures donnent généralement lieu à une courbe temps-pression difficile à anticiper. Bien que ce chargement complexe ne puisse pas être déterminé avec précision, certaines approximations permettent de définir les charges du souffle avec un degré de confiance acceptable. Dans des structures closes, les ondes de choc subissent des réflexions multiples.

De plus, dans certaines configurations et dans des zones limitées de la surface interne, les ondes réfléchies peuvent se renforcer et augmenter en intensité, mais, elles sont en général considérablement atténuées pour les bâtiments de grandes dimensions avant de frapper à nouveau les parois, le sol ou le plafond. Une explosion dans une enceinte de confinement totale ou un espace clos produit des réverbérations de choc, telles que définies plus haut, qui diminuent progressivement jusqu'à la pression de gaz de crête. Dans une chambre confinée, cette pression de gaz diminue d'emblée sous l'effet des échanges thermiques avec les parois.

4.1.1.6 Souffle dans des sites de stockage souterrains (cf. AASTP-4 [1], méthode suisse)

Dans une chambre souterraine, il y a formation d'une forte surpression qui propage le souffle à l'intérieur de la galerie. Le front d'onde se déplace alors dans la galerie à vitesse supersonique, chargeant la paroi de la galerie de surpression latérale.

À mesure que le souffle progresse dans la galerie, une partie de son énergie est convertie au niveau des parois de la galerie en une « onde tellurique », qui se propage à son tour dans la roche ou le sol. Dans le cas d'une longue galerie, une quantité importante d'énergie peut être transmise au profit de ce phénomène d'onde tellurique. Une grande partie de l'énergie de détonation se propage dans la galerie par écoulement de gaz. Un fort vent de souffle, capable de détruire les installations présentes et d'emporter les pièces ainsi détachées, est alors généré. Ce vent se compose d'air, de produits de détonation et de flammes en cas de post-combustion.

Nota :

Les débris projetés (projections secondaires) hors de la galerie constituent également l'un des effets les plus dangereux d'une explosion au sein d'un magasin souterrain intra-roche. En effet, les débris de galerie sont des fragments qui proviennent de munitions et d'emballages, d'installations techniques (telles que les systèmes de ventilation, les portes et les dispositifs coupe-feu), de revêtements de galerie ou de chambre, d'autres éléments structuraux en béton armé et de la roche ou d'éboulis causés par l'explosion. Tous ces éléments de débris sont accélérés par les gaz de l'explosion qui s'échappent du magasin et ils sont projetés hors de la galerie.

La projection de débris de galerie dépend principalement de la masse d'explosifs stockée dans le magasin et de la configuration (rapport longueur/diamètre de la section de tunnel en entrée immédiate de galerie).

4.1.2 Dommages aux personnes et aux installations – Annexe 3

Le souffle peut avoir pour conséquence de causer des dommages directs aux personnes, aux équipements et aux bâtiments. Sur les êtres humains, les conséquences vont de la déchirure du tympan (basse pression) jusqu'à l'hémorragie pulmonaire entraînant la mort (haute pression). Outre ces effets primaires, le souffle peut également provoquer des dommages corporels en projetant les personnes à terre ou contre des objets.

Les effets directs ou primaires sur les personnes sont liés à la durée et à la surpression de l'onde de choc : les organes renfermant de l'air, tels que les oreilles et les poumons, sont les plus touchés par ce type d'effets. Les lésions engendrées dépendent des propriétés de l'onde de choc comme la pression dynamique, réfléchiée et incidente, la durée et l'impulsion de l'onde de choc ainsi que le taux d'augmentation de la pression de crête.

Le degré de gravité des traumatismes subis est directement fonction du sexe et de la taille de la personne en question, et probablement de son âge. Enfin, les poumons, les oreilles, le larynx, la trachée et la cavité abdominale sont les parties anatomiques qui risquent le plus d'être touchées par ces effets.

D'autres type d'effets sont liés au déplacement du corps, suivi d'une importante charge dynamique décélétratrice. Dans ce cas, le corps subit une translation due au souffle et à sa pression. Cet effet peut entraîner des lésions à la tête et aux organes vitaux, ainsi que des fractures. La force de surpression dépend de l'orientation du corps par rapport à l'onde de choc.

Dans le cas d'une détonation survenant à l'intérieur ou à proximité d'un bâtiment, les conséquences vont du bris de vitre (faible pression) jusqu'à la dislocation de la structure, à l'effondrement, voire à la désintégration du bâtiment (très forte pression). Les effets destructeurs de la pression varient considérablement en fonction de la conception des bâtiments : les constructions légères à faible résistance (en bois) sont aisément détruites, tandis que les édifices plus solides et plus lourds (en béton) peuvent résister à des cas de charges (impulsions) nettement supérieurs.

Ainsi, les personnels à l'intérieur peuvent alors se trouver blessés, voire tués, par un ou plusieurs mécanismes déclenchés par les effets directs de l'explosion mais s'exposent également aux conséquences supplémentaires liées à la réponse du bâtiment aux effets du souffle.

Les approches de modélisation reposent principalement sur une méthode probabiliste qui permet d'évaluer les conséquences indésirables. La fonction de répartition est souvent utilisée pour décrire la probabilité de conséquences données. Une des méthodes courantes dans ce domaine est celle des Probits (utilisée avec succès dans plusieurs pays occidentaux, cf. Annexe 3).

Les approches de type diagrammes P-i (pression-impulsion) sont également largement répandues (cf. Annexe 4). Il s'agit de courbes d'iso-réponse définies en fonction du type de sollicitation et de structure. Ces diagrammes peuvent permettre d'évaluer la réponse, les dommages, les lésions et la mortalité pour des personnes comme pour toute une structure.

Ils peuvent également être très utiles pour évaluer les conséquences générales car ils ne requièrent qu'un minimum d'informations (la pression et l'impulsion incidentes au niveau de la structure, ou la portée et la quantité d'explosifs, et le type de structure). La réponse des structures peut être déterminée en fonction de données d'essais ou d'accidents, ou évaluée d'après une analyse structurelle dynamique élaborée et des techniques de modélisation. Les diagrammes P-i peuvent également être semi-empiriques lorsque les relations définies analytiquement ont été modifiées pour rendre compte des données d'essais ou d'accidents.

4.2 Projections

4.2.1 Conséquences des effets de projections

La détonation de matières ou d'objets pyrotechniques entraîne la projection de fragments primaires dont la trajectoire peut généralement être estimée au moins de manière conservative. Différents niveaux de protection contre ces fragments primaires peuvent être obtenus au moyen de structures, de merlons ou de couvertures de terre.

Une détonation se produisant à l'intérieur ou en surface du sol peut former un cratère, ou entonnoir, et projeter dans les environs le contenu de l'excavation ainsi formée. Le danger de ces projections est fonction du type, du volume et de la trajectoire des débris. En règle générale, le sable est inoffensif à partir d'une certaine distance, mais les matériaux plus lourds comme les blocs de roche peuvent être dangereux. Si l'explosion survient à l'intérieur d'une structure, les gravats créés par l'endommagement de cette dernière sont susceptibles d'être projetés dans la zone avoisinante sous forme de débris secondaires.

Les fragments et débris issus d'une explosion sont préjudiciables aux personnes, aux constructions et aux équipements jusqu'à une certaine distance du lieu de l'accident. Les conséquences des impacts dépendent de la taille, de la forme, de la masse et de la vitesse de ces débris, et (pour les personnes) du point où le corps est atteint. La tête et les organes vitaux sont naturellement plus vulnérables que les membres. La construction de murs et toitures renforcés est le meilleur moyen de protéger les bâtiments contre les fragments, mais cette solution sera difficile à mettre en œuvre sur des constructions plus légères. Les panneaux vitrés sont particulièrement vulnérables aux ondes de chocs. Une bonne protection peut être assurée par des structures en béton massif et/ou recouvertes de terre.

4.2.2 Dommages aux personnes et aux installations – Annexe 5

Jusqu'aux années 1970, les débris n'étaient pas considérés 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 détoner en masse. Or, les nombreux essais menés dans le cadre de l'OTAN sur des munitions et des programmes nationaux ont montré depuis que les projections jouaient 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 débris requiert un effort très important. Lors des essais, par exemple, le souffle est mesuré de manière directe assez aisément par des capteurs alors que la collecte 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).

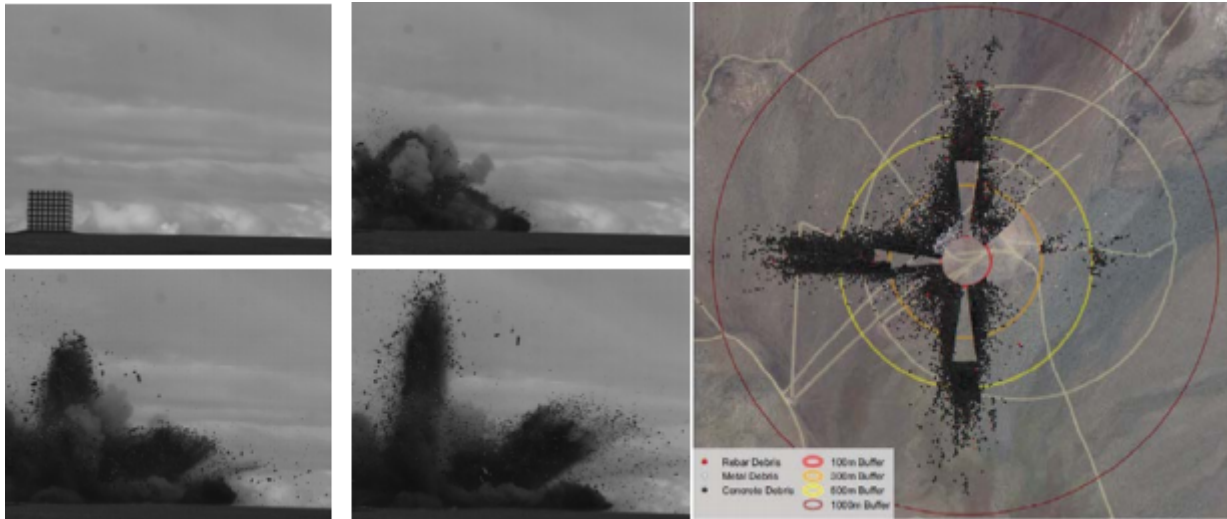


Figure 3 : débris secondaires lors d'une détonation en masse (à gauche) et répartition géographique associée des débris (à droite)

L'exploitation de ces essais traduit un constat fondamental : en dehors du champ très proche de l'explosion et dans le cas des explosions en masse à partir de quelques centaines de kilogrammes, le risque pyrotechnique pour les personnels est certes piloté par la tenue des structures receveuses (effondrement, bris de vitres...) à l'onde de choc aérienne mais également et significativement par les projections.

4.3 Effets thermiques

4.3.1 Conséquences des effets thermiques – Annex

Les conséquences associées à un feu sont essentiellement liées au rayonnement thermique, sur l'homme et les équipements, à l'augmentation de la température ambiante, aux dégagements de fumées, particulièrement aux gaz toxiques qu'elles véhiculent, mais aussi à la diminution de la visibilité induite, à la pollution des eaux ou des sols liés par exemple au transport de substances dangereuses pour l'environnement via les eaux d'extinction.

Au vu de la réactivité des produits mis en jeu, les effets de rayonnement thermique sont ceux qui présentent le risque principal pour les personnes. Des données précises sur le potentiel thermique et toxique de ces produits permettent d'appréhender numériquement la cinétique de développement de l'incendie, et ainsi d'évaluer l'augmentation progressive de la température dans un local ainsi que l'évolution des concentrations en agents toxiques dans l'air ambiant. Les démarches d'évaluation des dangers liés à l'incendie permettent de caractériser l'intensité de l'incendie par comparaison à des valeurs seuils.

4.3.2 Dommages aux personnes et aux installations

Les dangers liés au rayonnement thermique se caractérisent par les brûlures. La brûlure est une destruction du revêtement cutané, voire des tissus sous-jacents, provoquée par la chaleur sous toutes ses formes et mettant d'emblée en cause l'intégrité du milieu intérieur.

Sa gravité dépend de plusieurs facteurs comme son étendue et sa profondeur, le terrain sur lequel elle survient, sa localisation (compromettant une fonction vitale, entraînant un risque fonctionnel, majorant un risque infectieux), l'âge du blessé, la précocité de la mise en route d'une thérapeutique substitutive.

Connaissant les caractéristiques d'une combustion de matières pyrotechniques en termes de dimensions et de température, il est possible d'en déduire le flux thermique rayonné en un point donné

distant du feu. Si l'on connaît également la durée de la combustion, il est possible d'évaluer la dose de rayonnement thermique en ce point. En comparant ensuite ces données avec des niveaux seuils de blessures ou de ruine de structures, on peut en déduire les dommages susceptibles d'être engendrés à une distance donnée d'un feu.

4.4 Onde tellurique

4.4.1 Présentation des effets

Les conséquences de l'onde tellurique se limitent aux abords immédiats du lieu de l'explosion, ce qui signifie souvent que les personnes, les bâtiments ou l'équipement ne subiront pas d'effet important.

L'ébranlement tellurique dépend principalement des caractéristiques du site et est influencé par les facteurs suivants : structure géologique et propriétés de la masse rocheuse, masse de la charge explosive et portée relative, densité de chargement de l'installation, distribution de charge et volume de l'installation.

L'évaluation de l'onde tellurique doit être envisagée en termes d'évaluation de réponse des structures. Une définition complète de l'onde tellurique consiste donc en un spectre de réponses qui peut être obtenu soit de manière empirique, soit de manière analytique.

Dans le cadre de l'évaluation de la réponse des structures, les paramètres fondamentaux de l'onde tellurique sont l'amplitude et le contenu fréquentiel. L'amplitude s'exprime souvent en termes de vitesse de particules de crête alors que le contenu fréquentiel peut être assimilée à la fréquence principale. En général, l'onde tellurique induite par le souffle est moins intense que l'onde tellurique directe.

La vibration des bâtiments provoquée par les sollicitations du souffle ne doit pas être considérée comme une onde tellurique et doit donc faire l'objet d'une étude indépendante.

4.4.2 Dommages aux installations

De nombreuses études ont été menées sur le sujet, les principes communs sont décrits en Annexe 7.

4.5 Effets d'escalade et détonation par transmission simultanée

Les dispositions prises pour se prémunir de la transmission par influence de la détonation entre produits ou installations pyrotechniques sont des points majeurs de la réglementation. Sous un angle plus scientifique, l'excitation de charges pyrotechniques par influence a fait l'objet d'études approfondies. Généralement, il s'agit de déterminer des critères de séparation par le temps ou par des barrières entre deux sources explosives pour éviter les phénomènes de coalescence des ondes de choc. Les bases expérimentales et scientifiques de la séparation par le temps sont dérivées des travaux sur les détonations séquentielles.

4.6 Prévention des effets collatéraux

Par leur gravité certaine liée aux dommages qu'ils peuvent induire sur les personnes et les installations, il va de soi que les effets collatéraux doivent être évités à tout prix, ou du moins limités au maximum en adoptant des règles de bonnes pratiques. Les types d'accidents à anticiper et cités au § 3 nous renseignent ainsi sur les problématiques techniques à traiter dans la réglementation pyrotechnique et permettant in fine de protéger les travailleurs.

5 TRAITEMENT DES ZONES D'EFFET DANS LA RÉGLEMENTATION FRANÇAISE

5.1 Effet de souffle

5.1.1 Genèse et historique

Pendant la seconde guerre mondiale, la docteure anglaise E.B. Philip s'intéresse aux dégâts causés par les bombes allemandes sur les maisons anglaises. Elle élabore des équations permettant d'estimer la masse des bombes tombées en observant les niveaux de dégâts d'une bombe en fonction de son point de chute, et donc des « rayons moyen de dégâts » associés [1].

Son travail est plus tard déclassifié, publié et approfondi par des scientifiques anglais qui vont extrapoler le terme de rayon moyen de dégâts pour distinguer 5 zones avec des dégâts plus ou moins importants. Ces 5 zones constituent des précurseurs des zones modernes que nous connaissons actuellement et appelées zones d'effet (les Zi). Chaque zone de dégâts (et donc le rayon associé) est définie à l'époque comme suit : la zone doit contenir autant de dégâts d'un certain niveau qu'il y en a du niveau inférieur à l'extérieur de la zone. Par exemple, en prenant les zones de dégâts définies dans le Tableau 1 ci-dessous, la zone de dégâts « B » est définie comme contenant x dégâts importants aux bâtiments (à l'intérieur de la zone) et x dégâts moyens ou légers aux bâtiments à l'extérieur de la zone.

Ces études qui ont diffusé à l'OTAN au début des années 1970 ont inspiré la réglementation pyrotechnique française. En effet, la première apparition de formules analytiques pour les effets du souffle sous une forme proche de la formule actuelle se trouve dans l'instruction militaire n° 5700 EMA/LOG du 7 décembre 1965, reprise ensuite dans l'instruction n° 11311 DMA/CAB du 14 mai 1970, publiée par la Délégation Ministérielle de l'Armement (DMA, ex-DGA). C'est d'ailleurs la première fois qu'une classification par nature des risques encourus et que des règles de détermination apparaissent dans une instruction, où l'on retrouve les 5 zones de dégâts mentionnées supra.

Les 2 instructions font la différence entre la sécurité intérieure, qui concerne les travailleurs, et la sécurité extérieure, pour l'environnement. Ces deux instructions viennent apporter des compléments et précisions au décret n° 55.1188 du 3 septembre 1955, quant à lui très succinct. L'instruction de l'année 1965 est le résultat de travaux sur le stockage des munitions poursuivis pendant plus de 10 ans par les experts de l'OTAN et fournit le calcul des distances d'isolement repris des recommandations publiées par cette dernière.

Zone de dégâts	Distance au lieu de l'explosion	Surpression en limite de zone	Effets à l'intérieur de la zone : Dommages aux personnes	Effets à l'intérieur de la zone : Dommages aux bâtiments
A	$1,1 \cdot Q^{1/3}$	6 bars	Risque léthal	Dégâts très importants
B	$3,6 \cdot Q^{1/3}$	1 bar	Blessures graves	Dégâts importants
C	$8 \cdot Q^{1/3}$	0,2 bar	Nombreuses blessures légères	Dégâts moyens ou légers
D	$15 \cdot Q^{1/3}$	80 mbar	Peu de blessures légères	Nombreux dégâts légers
E	$22 \cdot Q^{1/3}$	50 mbar	Très peu de blessures légères	Peu de dégâts légers

Tableau 1 : Zones d'effets de souffle et dommages associés de l'instruction n° 5700 EMA/LOG

Plus tard, l'arrêté du 26 septembre 1980 se place comme la pierre angulaire de la nouvelle réglementation. Il fixe en particulier les règles de détermination des distances d'isolement mais définit également les critères permettant de classer le risque généré par une installation pyrotechnique.

La publication de l'arrêté de 1980 va introduire également une deuxième difficulté par rapport aux textes précédents sur la définition des zones de danger (Zi) et leur signification réelle. En pratique on définit des zones par leurs effets sur les personnes et sur les biens, mais ces effets n'étaient à l'origine liés qu'au souffle et fort justement affichés comme tel. La difficulté apparaît néanmoins de manière immédiate si l'on doit associer les effets des projections à la définition de ces zones, comme le montre le Tableau 2.

Désignation de la zone	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Dommmages prévisibles aux personnes	Blessures mortelles dans plus de 50 % des cas	Blessures graves pouvant être mortelles	Blessures	Possibilités de blessures	Très faibles possibilités de blessures légères
Dégâts prévisibles aux biens	Dégâts très graves	Dégâts importants	Dégâts moyens et légers	Dégâts légers	Dégâts très légers

Tableau 2 : Dommages prévisibles aux personnes et aux biens selon l'arrêté du 26 septembre 1980

L'arrêté donne néanmoins des formules pour le calcul des distances d'isolement pour les effets de souffle, en terrain plat et nu, pour toutes les DR (de 1.1 à 1.5) qui sont affichés dans les Tableau 3 à Tableau 6 ci-dessous. À noter que les distances d'isolement de la DR 1.5 sont identiques à la DR 1.1.

Désignation de la zone	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
DR 1.1	$0 < R1 \leq 5 \cdot Q^{1/3}$	$< R2 \leq 8 \cdot Q^{1/3}$	$< R3 \leq 15 \cdot Q^{1/3}$	$< R4 \leq 22 \cdot Q^{1/3}$	$< R5 \leq 44 \cdot Q^{1/3}$
DR 1.4	-	$0 < R2 \leq 0,5 \cdot Q^{1/3}$ ou 5 si $0,5 \cdot Q^{1/3} > 5$	$< R3 \leq 10$	$< R3 \leq 25$	-

Tableau 3 : Formules pour le calcul des distances d'isolement pour les effets de surpression (DR 1.1 et 1.4) selon l'arrêté du 26 septembre 1980

Les origines des formules de calcul des zones d'effet indiquées dans le Tableau 3 pour la DR 1.1, et notamment les valeurs des coefficients retenus devant le terme en $Q^{1/3}$ sont les suivantes (de AASTP-1 [3]) :

- Pour la Z1 (coefficient de 5) : C'est l'instruction de 1955 qui indique qu'une formule supplémentaire en $5 \cdot Q^{1/3}$ permet de prendre en compte une létalité de 50% liée au déplacement du corps à la suite du passage de l'onde de choc, c'est donc logiquement cette valeur qui est reprise dans le décret de 1979 et l'arrêté de 1980 pour déterminer le calcul de la Z1 ;
- Pour la Z2 (coefficient de 8) : Basée sur des campagnes d'expérimentations anglaises et américaines, cette distance protège les personnels des blessures graves engendrées par les effets de souffle ;
- Pour la Z3 (coefficient de 15) : Valable normalement pour des masses de matière active supérieure à 4 500 kg, la distance a été généralisée pour l'ensemble des masses (donc surestimée pour les faibles quantités de matière active) et représente les 2/3 de l'*Inhabited Building Distance (IBD)* de l'OTAN, qui est par définition la distance de sécurité à laquelle on trouve un lieu habité depuis le siège de l'évènement pyrotechnique ;
- Pour la Z4 (coefficient de 22) : C'est la distance de « référence », qui correspond à l'*IBD* et qui est basée sur l'ensemble des travaux commencés par E.B. Philip lors de la seconde guerre mondiale ;
- Pour la Z5 (coefficient de 44) : De façon forfaitaire, on prend le rayon de la Z5 comme étant deux fois celui de la Z4.

À noter que les origines des coefficients retenus dans l'instruction n° 5700 EMA/LOG de 1955 sont également explicités dans l'AASTP-1 [3].

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 (PCIG) des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation, est portée par l'environnement et fixe des seuils techniques pour les effets de souffle et thermiques associés aux zones de dangers Z2 à Z5.

Pour les effets de souffle, le document introduit un décalage au niveau de la Z3 entre le seuil technique de 140 mbar qui y est défini et la formule de calcul donnée par l'arrêté de 1980. En effet, 140 mbar correspond à un coefficient de 11 en non de 15 comme défini dans l'arrêté de 1980 pour la Z3.

L'arrêté du 20 avril 2007 est le dernier en date à fixer les règles relatives à l'évaluation des risques et à la prévention des accidents dans les établissements pyrotechniques. Il abroge l'arrêté du 26 septembre 1980. Il modifie légèrement la définition des zones de dangers sans pour autant régler le problème de l'inadéquation avec le risque de projection. Il introduit par ailleurs des seuils techniques pour la Z1 (430 mbar pour les effets de souffle), en complément de ceux définis par l'arrêté de 2005 pour les Z2 à Z5.

5.1.2 Réglementation actuelle associée

Afin de limiter les effets collatéraux des événements pyrotechniques, se prémunir des effets domino est essentiel. Cette prévention est réalisée grâce à l'arrêté de 2007 dans lequel on retrouve les lois réduites et distances forfaitaires héritées des précédents textes pour isoler les installations pyrotechniques. Ces formules proviennent de campagnes intensives d'expérimentations faites en champ libre.

Dans un second temps, séparer les postes de travail et lieux de stockages les uns des autres pour diminuer le risque de propagation des effets collatéraux et donc, l'aggravation de la situation initiale, est un des fondamentaux de la sécurité pyrotechnique.

5.1.3 Périmètre et limites d'application

L'effet de souffle est traité dans la réglementation actuelle via deux formules seulement dont la donnée d'entrée est la masse de matière active en puissance $1/3$ et pondérée de coefficient spécifique à chacune des 5 zones d'effet. Les données d'entrée ne sont pas assez nombreuses pour un phénomène aussi complexe, capable de se recombinaison ou se réfléchir en présence de surfaces et dont la caractérisation n'est pas exacte en fonction de l'explosif et de la position de l'observateur en champ libre.

Qui plus est, ces formules des distances d'isolement sont basées uniquement sur des essais en champ libre pour les dépôts et pour de larges quantités de matières actives. Enfin, leur application est étendue à l'ensemble des installations (faibles ou fortes), à l'ensemble des configurations de construction (murs forts ou parois soufflables non prises en compte) et notamment aux personnels (protégés ou non selon les cas).

5.2 Effets de projections

5.2.1 Genèse et historique

L'instruction n° 5700 de 1965 définit 7 classes de risque et 11 groupes de compatibilité, d'inspiration OTAN et déclinée dans l'instruction 11311 DMA/CAB de 1970. Elle propose de plus des abaques donnant les distances de sécurité à respecter suivant le triplet site exposant, site exposé et charge (nature et masse) à l'image des *Quantity-Distance (QD)* de l'OTAN. Ainsi, des règles sont fixées pour les risques projection et thermique.

Concernant les dommages, la distance de sécurité mentionnée dans l'instruction n° 5700 est associée à la notion de risque acceptable sans pour autant que ce dernier ne soit quantifié. On peut néanmoins supposer qu'il est proche de l'IBD.

Lors de la parution de l'arrêté du 26 septembre 1980, les formules de calcul des zones d'effet pour les produits de la DR 1.2 sont indiquées pour la première fois, comme le montre le Tableau 4 ci-dessous (où Q est la masse nette des matières explosibles). Le calcul des zones d'effet est différent selon la masse de matière active des objets (supérieure à 100 kg, inférieure à 10 kg et entre les 2).

Désignation de la zone	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Q ≥ 100 kg	1°- Dans le cas de munitions de calibre ≤ 60 mm ou s'il y a un risque de projection de plus de 150 g à plus de 15 m sans risque de projections de plus de 250 g à plus de 15 m :				
	0 < R1 ≤ 15	< R2 ≤ 90	< R3 ≤ 200	< R4 ≤ 60·Q ^{1/6} ou 300 si 300 ≥ 60·Q ^{1/6}	< R5 ≤ 120·Q ^{1/6} ou 600 si 600 ≥ 120·Q ^{1/6}
	2°- Dans le cas de munitions de calibre > 60mm ou s'il y a un risque de projection de plus de 250 g à plus de 15 m :				
	0 < R1 ≤ 25	< R2 ≤ 135	< R3 ≤ 300	< R4 ≤ 75·Q ^{1/6} ou 400 si 400 ≥ 75·Q ^{1/6}	< R5 ≤ 150·Q ^{1/6} ou 800 si 800 ≥ 150·Q ^{1/6}
10 kg ≤ Q < 100 kg	Les distances figurant ci-dessus peuvent être réduites d'un tiers				
Q < 10 kg	Les limites des zones de dangers sont à définir par une étude particulière				

Tableau 4 : Formules pour le calcul des distances d'isolement pour les effets de projections (DR 1.2) selon l'arrêté du 26 septembre 1980

L'arrêté du 20 avril 2007 vient quant à lui modifier les distances d'isolement de la DR 1.2 fixées par l'arrêté de 1980 en simplifiant les règles de calcul pour les objets pyrotechniques dont la masse nette de matière active dépassent les 100 kg, en distinguant les objets unitaires de plus ou moins 750 g (cf. Tableau 5).

Désignation de la zone	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Q ≥ 100 kg	1°- Dans le cas d'objets contenant unitairement moins de 750 g de matière active :				
	0 < R1 ≤ 15	< R2 ≤ 90	< R3 ≤ 200	< R4 ≤ 60·Q ^{1/6} ou 300 si 300 ≥ 60·Q ^{1/6}	< R5 ≤ 120·Q ^{1/6} ou 600 si 600 ≥ 120·Q ^{1/6}
	2°- Dans le cas d'objets contenant unitairement plus de 750 g de matière active :				
	0 < R1 ≤ 25	< R2 ≤ 135	< R3 ≤ 300	< R4 ≤ 75·Q ^{1/6} ou 400 si 400 ≥ 75·Q ^{1/6}	< R5 ≤ 150·Q ^{1/6} ou 800 si 800 ≥ 150·Q ^{1/6}
10 kg ≤ Q < 100 kg	Les distances figurant ci-dessus peuvent être réduites d'un tiers				
Q < 10 kg	Les limites des zones de dangers sont à définir par une étude particulière				

Tableau 5 : Formules pour le calcul des distances d'isolement pour les effets de projections (DR 1.2) selon l'arrêté du 20 avril 2007

De la même manière que pour la DR 1.1, les origines des distances des zones d'effet indiquées dans le Tableau 5 pour la DR 1.2 sont les suivantes (de AASTP-1 [3]) :

- Pour les objets contenant unitairement moins de 750 g de matière active :
 - Pour la Z1 (15 m) : Cette distance provient du transport, notamment du premier règlement ONU pour l'épreuve d'incendie et la différenciation entre les DR 1.2 et 1.3 ;
 - Pour la Z2 (90 m) : Basée sur des essais américains, cette distance représente le risque acceptable venant des fragments et éléments projetés d'une munition de calibre inférieur à 60 mm lors d'un événement intempestif. Les ateliers peuvent être évacués et le trafic stoppé avant que les projections finales (et donc les plus létales) n'interviennent. En effet, durant les premières minutes d'une explosion accidentelle de type pop-corn, peu d'éléments et fragments de munitions ont une probabilité d'atteindre ces distances de sécurité. La possibilité que des structures protégées puissent être fissurées par une explosion survenant en leur sein et que des explosions ultérieures puissent projeter des fragments et débris hors de ces structures est acceptée. Puisque la notion de calibre ne peut s'appliquer à l'ensemble des matières explosives, la valeur moyenne (mais margée) de 750 g a été inscrite dans la réglementation pyrotechnique ;
 - Pour la Z3 (200 m) : Cette distance est prise forfaitairement comme étant les 2/3 de l'IBD pour des objets dont le calibre est inférieur à 60 mm ;
 - Pour la Z4 :
 - $60 \cdot Q^{1/6}$: Cette distance est utilisée dès lors que c'est impossible d'arrêter le trafic spontanément lorsqu'un événement intempestif survient ;
 - 300 m : Cette distance correspond à l'IBD pour des objets dont le calibre est inférieur à 60 mm ;
 - Pour la Z5 (600 m ou $120 \cdot Q^{1/6}$) : De façon forfaitaire, on prend le rayon de la Z5 comme étant deux fois celui de la Z4.
- Pour les objets contenant unitairement plus de 750 g de matière active :
 - Pour la Z1 (25 m) : Une distance fixe de 25 m est utilisée comme distance de sécurité pour des ateliers renforcés avec des toits protectifs, dès lors qu'ils offrent une bonne protection contre les fragments ;
 - Pour la Z2 (135 m) : Basée sur des essais américains, cette distance représente le risque acceptable venant des fragments et éléments projetés d'une munition de calibre supérieur à 60 mm lors d'un événement intempestif. Les ateliers peuvent être évacués et le trafic stoppé avant que les projections finales (et donc les plus létales) n'interviennent. En effet, durant les premières minutes d'une explosion accidentelle de type pop-corn, peu d'éléments et fragments de munitions ont une probabilité d'atteindre ces distances de sécurité. La possibilité que des structures protégées puissent être fissurées par une explosion survenant en leur sein et que des explosions ultérieures puissent projeter des fragments et débris hors de ces structures est acceptée ;
 - Pour la Z3 (300 m) : Cette distance est prise forfaitairement comme étant les 2/3 de l'IBD pour des objets dont le calibre est supérieur à 60 mm.
 - Pour la Z4 :
 - $75 \cdot Q^{1/6}$: Cette distance est utilisée dès lors que c'est impossible d'arrêter le trafic spontanément lorsqu'un événement intempestif survient ;
 - 400 m : Cette distance correspond à l'IBD pour des objets dont le calibre est supérieur à 60 mm ;
 - Pour la Z5 (800 m) : De façon forfaitaire, on prend le rayon de la Z5 comme étant deux fois celui de la Z4.

À noter que les origines des coefficients retenus dans l'arrêté de 1980 sont également explicitées dans l'AASTP-1 [3].

5.2.2 Réglementation actuelle associée

De la même manière que les effets de souffle, les projections sont un risque intrinsèque de détonation en masse et les formules indiquées dans le Tableau 5 devraient permettre logiquement de s'en prémunir.

5.2.3 Périmètre et limites d'application

Pour les effets de projections, la pertinence de n'utiliser qu'une seule loi est clairement limitée. La prise en compte par l'ingénierie des vrais paramètres physiques qui pilotent le processus de fragmentation qu'il soit primaire pour les matériaux directement au contact de l'explosif ou secondaire pour les installations est essentielle pour comprendre la nature particulière de ce risque.

L'abattement de 1/3 de chacun des rayons de zones d'effet pour des masses de matière active inférieures à 100 kg n'a pas de sens physique et son origine traduirait une tentative d'amalgamer les protections prises contre les fragments primaires et les débris secondaires potentiels.

L'absence de prise en compte des dispositifs de protections des installations receveuses dans l'actuelle réglementation est également une limite au regard de l'essence même de ces dispositifs et de leur efficacité démontrée.

5.3 Effets thermiques

5.3.1 Genèse et historique

Les formules de calcul pour les produits des DR 1.3a et 1.3b apparaissent pour la première fois dans l'arrêté du 26 septembre 1980 et sont données dans le Tableau 6 ci-dessous. À noter que la circulaire du 10 mai 2010 reprend l'intégralité de ces formules sans les modifier.

Désignation de la zone	Division de risques	Z1	Z2	Z3	Z4
Distance R à la charge de masse Q	1.3a	$0 < R1 \leq 2,5 \cdot Q^{1/3}$	$R2 \leq 3,5 \cdot Q^{1/3}$	$R3 \leq 5 \cdot Q^{1/3}$	$R4 \leq 6,5 \cdot Q^{1/3}$
	1.3b	$0 < R1 \leq 1,5 \cdot Q^{1/3}$	$R2 \leq 2 \cdot Q^{1/3}$	$R3 \leq 2,5 \cdot Q^{1/3}$	$R4 \leq 3,25 \cdot Q^{1/3}$

Tableau 6 : Formules pour le calcul des distances d'isolement pour les effets thermiques (DR 1.3) selon l'arrêté du 26 septembre 1980

Pour la DR 1.3, les origines des distances des zones d'effet indiquées dans le Tableau 6 sont reprises de la division 1.3 des Nations-Unies et inscrites dans l'arrêté de 1980. Il est dit que « le risque principal présenté par les munitions de cette classe est l'émission d'un flux calorifique de courte durée ». En conséquence, les valeurs différenciant les zones d'effet correspondent à des flux calorifiques mesurés à une certaine distance. Entre les classes 1.3a et 1.3b et pour une même zone d'effet, les flux sont égaux à distances équivalentes, ce sont donc les caractéristiques des poudres (vivacité notamment) qui font la distinction de classement entre les 2 groupes.

La circulaire du 8 mai 1981 donne quant à elle la possibilité de réduire les zones d'effets thermiques par la méthode du stéradian. Elle complète également les définitions des zones d'effets données dans l'arrêté du 26 septembre 1980, en fixant les densités de flux associées aux zones d'isolement.

5.3.2 Réglementation actuelle associée

Très limitée, la boîte à outils de la réglementation actuelle concernant la prise en compte des effets thermiques dans les événements pyrotechniques se limite aux formules indiquées dans le Tableau 6.

5.3.3 Périmètre et limites d'application

Sur le plan des effets thermiques, la différenciation sur l'utilisation des zones d'effets entre 1.3a ou 1.3b reste imprécise.

Par ailleurs, un séminaire OTAN a eu lieu en décembre 2021 au sujet des effets thermiques et les principales conclusions ont été les suivantes :

- Les distances de séparation actuelles, fonction de la masse à la puissance $1/3$ ($Q^{1/3}$), sont issues de tests de combustion en champ libre de brins de cordite (jusqu'à 18 t). La cordite est une composition double base avec une grande surface de combustion et des durées de combustion de quelques secondes. Enfin, il a été acté que ces essais sur brins de cordite ne représentent pas les propriétés thermiques de l'ensemble des objets et substances actuelles de la DR 1.3 ;
- Les critères retenus sont plutôt de type brûlure au premier degré en dessous de 4,5 t, exprimée en dose pour calculer les distances des zones d'effet thermique ;
- Les paramètres clés liés aux substances pyrotechniques de la DR 1.3 sont le taux de combustion, la chaleur de combustion, la température de flamme, sa structure géométrique (taille, diamètre), et la fraction radiative émise ;
- Pour les incendies de petite quantité de matière active (< 1 t) en champ libre ou dans des installations confinant faiblement, les lois actuelles fonction de $Q^{1/3}$ sont conservatives (à défaut d'être représentatives). Le flux thermique radiatif pour ce cas de figure a trois origines possibles :
 - Flux radiatif direct émis par la source ;
 - Flux radiatif émis par les fumées ;
 - Flux radiatif émis par les murs de l'installation.
- Le cas des incendies de grande quantité de matière active (avec densité de chargement élevée) dans des structures lourdes reste le plus complexe à traiter dans la mesure où l'approche actuelle sur les zones d'effets n'est pas conservatrice vis-à-vis du risque. Il y a soit un risque d'effet de jet très directif, soit un risque d'explosion de l'installation et de génération de débris projetés à grande distance (si la vitesse des gaz issus de la combustion des matières peut atteindre la vitesse du son dans les surfaces de décharge (on parle du phénomène de « *choked flow* »). On se ramène alors à un risque piloté par les débris et non le flux thermique. Dans ce cas précis, l'utilisation de distances de séparation spécifique est proposée ;
- La modélisation est nécessaire pour apprécier la dynamique de propagation du feu ;
- Les effets toxiques liées aux fumées sont rarement pris en compte dans les études de sécurité.

5.4 Détonation par transmission simultanée

5.4.1 Réglementation actuelle associée

Les formules de Burlot concernent le risque de détonation simultanée en masse. La réglementation actuelle indique que :

- La détonation d'une masse Q entraîne par effet de souffle la détonation de toute masse explosive située dans un rayon de $0,5 \cdot Q^{1/3}$;
- La détonation d'une masse Q entraîne par effet de projections la détonation de toute masse explosive située dans un rayon de $2,4 \cdot Q^{1/3}$.

5.4.2 Périmètre et limites d'application

Ces formules indiquent comment se prémunir du risque de détonation en masse et permettent donc de mettre en place des distances d'isolement supplémentaires pour exclure un tel scénario. Elles ont été déterminées à l'origine à partir d'essais sur des dépôts merlonnés de type magasins enterrés et complétées par des travaux expérimentaux de la Commission sur les Substances Explosives sur l'excitation par influence de charge explosives.

Concernant leur origine, l'AASTP-1 [3] indique que :

- La formule en $0,5 \cdot Q^{1/3}$ donne la séparation minimale entre les murs de 2 igloos de stockage adjacents protégés et recouverts de terre ; une telle formule est donc très éloignée du fondement réel quant à la distance minimale à respecter en champs libre pour éviter la détonation par influence due aux effets de souffle ;
- La formule en $2,4 \cdot Q^{1/3}$ est basée sur les travaux de Burlot et des campagnes expérimentales anglaises, et représente la distance sensée empêcher la propagation des effets collatéraux de types thermiques et souffle (semble donc indépendante des effets de projections).

Le périmètre d'application reste malgré tout réduit et il faut s'interroger systématiquement sur leur représentativité dans chacune des évaluations de risques à réaliser comme déjà soulevé dans la lettre de l'IPE n° 36 en janvier 2016.

6 DISCUSSION

On tire la conclusion des chapitres précédents que les lois retenues dans la réglementation française pour traiter les zones d'effets (conséquences potentielles d'un accident) en sécurité pyrotechnique sont d'inspiration et d'origine militaire : depuis la fin de la première guerre mondiale jusqu'aux travaux OTAN des années soixante et soixante-dix sur les munitions.

Si ces lois ont ensuite été étendues au domaine civil et sanctuarisées dès les années quatre-vingt dans des arrêtés, leur périmètre de validation initial a été largement déterminé par des expérimentations et du retour d'expérience portant sur des grandes quantités de munitions et matières explosives. Ces approches de mise en œuvre aisée ont démontré une certaine efficacité.

On relève une première difficulté concernant la capacité à décrire des situations à risque par nature très différentes (fabrication de feux d'artifice, de matières énergétiques pour la dissuasion ou le spatial, dépôts de munitions des Armées...) avec des lois générales qui définissent plutôt une protection implicite des personnels apportée par le respect de distances d'isolement entre installations, les préservant des effets domino. Les seuils techniques de l'arrêté PCIG qui sont venus compléter le corpus réglementaire historique en 2005 sur les zones d'effets portent leur part d'ambiguïté, parfois représentatifs d'effets directs (par exemple thermiques) et indirects (par exemple surpression).

En outre, la complexité de la phénoménologie des accidents s'accommode assez peu d'une approche en tuyaux d'orgues par types d'effets. Par exemple, il est peu pertinent de disposer de mêmes distances de protection pour se prémunir des effets projections pour des détonations en masses et des explosions progressives n'ayant que très peu de choses en commun sur ce point-là (cinétique, densité des gerbes d'éclats ou de débris...). Enfin, les effets liés à l'onde tellurique ne sont pas traités.

Les récents progrès accomplis dans la connaissance des effets des explosions peuvent être réinvestis en introduisant dans la réglementation une mesure de ces effets liée au risque. Pour la protection des personnes, par exemple, les mesures utilisables comprennent le décès, la blessure, la lésion mineure, etc. L'analyse des différentes mesures employées à l'échelle internationale révèle clairement que la protection de la vie humaine est un objectif important et constant dans la plupart des pays. La "probabilité de mort accidentelle" est la mesure utile qui permet de comparer directement les modèles nationaux.

Des études montrent que le choix d'autres mesures ne modifie généralement que très peu la décision qui résulte de la prise en compte du risque. À titre d'exemple, si l'évaluation d'un événement indésirable particulier s'appuyait à la fois sur des probabilités de décès et de traumatismes, l'application individuelle de l'une ou l'autre mesure et l'application indépendante des deux mesures ensemble se traduiraient dans la plupart des cas par une décision quasi identique. La raison en est que les deux séries de conséquences sont fortement corrélées d'un événement à l'autre. De ce fait, le choix de plusieurs mesures n'apportera probablement aucune valeur ajoutée à la qualité de la décision, mais tend en revanche à alourdir considérablement le travail d'analyse qu'implique un calcul séparé des risques.

6.1 La détonation ou l'explosion en masse

Les deux questions clés pour évaluer les conséquences potentielles au niveau des travailleurs d'un bâtiment **distinct** du siège de l'accident dans un site pyrotechnique sont la tenue de cette structure à l'onde de choc aérienne et/ou tellurique issue de l'accident potentiel et le degré de protection qu'elle apporte par rapport aux inévitables projections primaires ou débris secondaires issus de la fragmentation de l'installation donneuse. On est là sur une problématique d'effets indirects essentiellement.

Pour ce qui concerne les risques pour les travailleurs dans l'installation siège de l'accident potentiel : le raisonnement doit intégrer les effets d'échelle associés à la masse de matière active en jeu. Pour des petites masses qui ne mettent pas en jeu l'intégrité structurale du bâtiment, la problématique sera de

type effets directs entre poste de travail et prise en compte du caractère partiellement ou totalement confiné de l'explosion. On le voit, pour un même mécanisme réactionnel de base, les risques sont de nature différente.

La boîte à outil réglementaire met à disposition des niveaux de protection empiriques (fonction réduite de la masse à la puissance $1/3$) entre installations ou seuils techniques (indirect) en surpression et des distances forfaitaires pour les éventuelles projections primaires.

Pour la surpression, par exemple, la zone d'effets dite « Z3 » dans la réglementation pyrotechnique correspond normalement au début des effets létaux et la pression associée à cette zone (et mentionnée dans la genèse réglementaire) est de 140 mbar. Mais cette dernière valeur est plus cohérente d'effets létaux indirectement liés aux dommages structurels importants sur les structures induisant des conséquences sur les personnes qui sont présentes à l'intérieur. Les études physiologiques et modèles existants révèlent que des niveaux de pression crête de 400 à 500 mbar n'induisent pas de conséquences létales sur les personnes (mais les tympanes sont irréversiblement endommagés).

Il n'y a rien pour tenir compte des deux points clés évoqués précédemment et on ne sait pas distinguer le risque en fonction de la protection ou absence de protection apportée par l'installation receveuse. Le risque débris est supposé être traité dans l'enveloppe des distances de protection prises contre les effets indirects liés à la surpression même si parfois des distances forfaitaires sont utilisées. Par ailleurs, le cas des ondes telluriques n'est pas traité non plus, de même que le risque d'effondrement associé.

La pertinence de ces distances forfaitaires a fait l'objet d'interrogations nombreuses pendant des années et toutes les expérimentations récentes tendent à montrer qu'elles seraient à redéfinir pour la plupart des installations donneuses : elles ne sont en effet pas fonction du type d'installation et de sa conception, mais plutôt de la densité de chargement (rapport masse de matière active sur volume interne à la structure) qui constitue le vrai paramètre physique.

De plus, les chargements internes en pression sont déterminés par la géométrie de l'installation, les propriétés mécaniques des murs et des toits et les possibilités de déconfinement par des ouvertures. Ainsi, des *pattern* débris de type cruciforme ont été observés dans plusieurs essais d'explosion d'installations rectangulaires. Cette distribution spécifique (avec des débris concentrés sur des directions perpendiculaires aux murs) n'est pas traitée dans la réglementation actuelle.

De même, la conception des installations receveuses n'est également pas toujours prise en compte pour déterminer les distances où les personnels seront en sécurité. Elle joue pourtant un rôle majeur pour eux en termes de protection vis-à-vis du chargement en pression (risque d'effondrement, bris de vitres) et de la pénétration par les murs et le toit de débris.

Pour ce type d'accident redouté aux conséquences potentiellement désastreuses, il y a sans doute nécessité de réaligner les outils réglementaires avec l'état de l'art. Ce constat a été fait dans la plupart des pays d'occidentaux qui ont profité des travaux expérimentaux menés par l'OTAN et les Etats Unis (Projet ESKIMORE, cf. Annexe 8) pour faire évoluer leur réglementation dans les deux directions suivantes :

- Evolution des lois réduites, intégration des paramètres physiques comme la densité de chargement (rapport masse de matière active sur volume de l'installation) pour les débris ou la protection apportée par les installations receveuses ;
- Ouverture à l'ingénierie de sécurité pyrotechnique par généralisation des méthodes d'évaluation quantitative du risque sur la base de seuils admissibles de létalité ou blessure définis pour les personnels.

6.2 Les explosions progressives

Pour ce type d'accident, la réglementation ne permet que l'utilisation des mêmes distances d'isolement que dans le cas précédent. Les niveaux d'onde de choc étant modérés, les conséquences sont à évaluer du point de vue des projections de fragments ou débris, d'objets propulsifs ou de matières en combustion à même de générer éventuellement des feux. En général, les dispositions qui consistent à prendre les distances forfaitaires (initialement déterminées pour des accidents de type détonation) de la circulaire de 2007 sont conservatives.

Le retour d'expériences et la capitalisation des connaissances à l'OTAN sont utiles si l'on veut affiner et bien tenir compte de la protection potentielle apportée par la conception de l'installation potentielle donneuse. Il est clair que si l'on est amené à traiter des objets pouvant nous conduire à ce type de scénario (munitions classées en DR 1.2 par exemple), la capacité à circonscrire les effets par une structure massive est cruciale. Le Tableau 7 ci-dessous donne des exemples de calculs de distances d'isolement utilisées dans le cadre d'explosions progressives pour le risque de fragmentation.

AASTP-1 EdC V1	AASTP-1 EdB V1	Application	CONDITION [kg]	FORMULA P1D# = ... [m]
P1D1	D4	EWD	$1 \leq Q < 20$	20
			$20 \leq Q < 500\ 000$	$0.36[-1.303*(LN(Q))^2 + 70.345*LN(Q) - 167.648]$
P1D2	1/2*D2	PTRD low	$1 \leq Q < 80$	60
			$80 \leq Q < 500\ 000$	$0.5[-1.303*(LN(Q))^2 + 70.345*LN(Q) - 167.648]$
P1D3	D6	PTRD medium	$1 \leq Q < 50$	60
			$50 \leq Q < 500\ 000$	$0.67[-1.303*(LN(Q))^2 + 70.345*LN(Q) - 167.648]$
P1D4	D2	IBD, VBD, PTRD high	$1 \leq Q < 30$	60
			$30 \leq Q < 500\ 000$	$-1.303*(LN(Q))^2 + 70.345*LN(Q) - 167.648$

Tableau 7 : Exemple de distances d'isolement déterminées en 2020 pour traiter du risque fragmentation dans les explosions progressives

Légende :

Q : masse de matière active

EWD : *Explosives Workshop Distance*, distance entre ateliers pyrotechniques

IBD : *Inhabited Building Distance*, distance aux habitations

PTRD : *Public Traffic Route Distance*, distance aux routes publiques en fonction du trafic (comprendre par *low*, *medium* et *high* le taux de fréquentation de la route désignée)

VBD : *Vulnerable Building Distance*, distance aux bâtiments vulnérables

6.3 Les incendies ou feux généralisés

La prise en compte des accidents de type incendie de matières ou d'objets pyrotechniques n'échappe pas aux constats faits précédemment : une confusion existe dans la réglementation entre un certain nombre de dispositions historiques relatives à la séparation entre installations et les distances de protection basées sur le risque de brûlure par flux thermiques rayonnés essentiellement. Les zones d'effets actuelles différencient les matières ou objets présentant une combustion rapide qui génère des flux thermiques considérables des autres modes de combustion plus lents. Leur pertinence fait l'objet d'une analyse de fond conduite en 2021 par le Syndicat des Fabricants d'Explosifs, de Pyrotechnie et d'Artifices (SFEPA), l'Ineris et l'IPE qui n'est pas détaillée dans ce document.

On peut néanmoins dégager deux axes majeurs pour une meilleure prise en compte des risques induits par ce type d'accident :

- Caractérisation et modélisation du comportement en combustion à pression atmosphérique des matériaux énergétiques. Les techniques de simulation des grands feux d'hydrocarbures doivent pouvoir sous certaines conditions être étendues à ce type de feu pour accéder à une représentation fidèle, spatiale et temporelle, seule à même de caractériser le risque dans des installations de géométrie intérieure complexe ;

- Prise en compte du risque débris associé à la combustion de matières énergétiques dans une installation lourde et confinée. Sous certaines conditions déterminées expérimentalement, on peut avoir une fragmentation de l'installation qui conduit à des projections parfois à longue distance.

6.4 Introduction de seuils de létalité dans la réglementation actuelle

Les multiples écarts mis en exergue dans les paragraphes précédents entre la réglementation pyrotechnique actuelle et l'état de l'art suggèrent de séparer la gestion du risque pyrotechnique entre infrastructures et travailleurs de manière à mieux l'appréhender pour les personnels justement exposés : les formules actuelles ne sont en effet pas adaptées car liées aux effets indirects des accidents pyrotechniques (par exemple effondrements des installations sur les travailleurs en faisant des victimes).

En outre, et devant le caractère conservatif des formules de la réglementation actuelle (comme nous avons pu le montrer au début de cette discussion), leur utilisation peut être conservée, mais augmentée de lois complémentaires qui permettraient d'affiner la gestion du risque pyrotechnique pour les travailleurs selon les 3 scénarios redoutés et décrits au §3. Le moyen le plus pertinent selon nous est de définir des seuils de létalité basé sur les seuils techniques des effets de souffle de l'arrêté PCIG de 2005, et extrapolés pour les effets de projections. Ces seuils sont les suivants :

- 300 mbar pour la limite de la Z1 ;
- 200 mbar pour la Z2 ;
- 140 mbar pour la Z3 ;
- 50 mbar pour la Z4 ;
- 20 mbar pour la Z5.

Des études du MSIAC [4] ont déjà interprété ces seuils techniques ainsi que les niveaux de dégâts décrits dans le Tableau 2 en niveaux de létalité. Les résultats de cette interprétation sont indiqués dans le Tableau 8 ci-dessous.

Zones d'effet	Effets sur l'homme		
	Létalité	Létalité + Blessures sévères	Létalité + Blessures sévères + Blessures légères
Z1	≥ 50%	≥ 65%	≥ 80%
Z2	≥ 9%	≥ 15%	≥ 40%
Z3	Environ 1%	Environ 4%	Environ 10%
Z4	0%	≥ 0,2%	≥ 6%
Z5	0%	Environ 0%	Environ 0%

Tableau 8 : Niveaux de létalité sur l'homme en fonction des zones d'effet proposés par le MSIAC

Du Tableau 8 ci-dessus et à des fins de simplification, nous proposons de retenir les seuils de létalité sur l'homme suivants :

- 50% pour la Z1 : c'est la définition même de la Z1 ;
- 10% pour la Z2 car c'est une décade ;
- 1% pour la Z3 ;
- 0,3% pour la Z4 : c'est l'IBD donc la référence des études ;
- Pas de seuil officiel pour la Z5 : le calcul de son rayon reste dans tous les cas comme étant 2 fois celui du rayon de la Z4 associée, ce qui permet de retrouver des classes de probabilités d'effets sur l'homme négligeables.

7 RÉFÉRENCES

- [1] AASTP-4, Manual on Explosives Safety Risk Analysis, document OTAN, 2015
- [2] L-229, Experimental and Theoretical Basis of NATO Standards for Safe Storage of Ammunition and Explosives – Final Report, document MSIAC, Martijn van der Voort, 2019
- [3] AASTP-1, Manual of NATO Safety Principles for the Storage of Military Ammunition and Explosives, Edition 1, Change 3, document OTAN, 2010
- [4] O-174, Experimental and Theoretical Basis of Current NATO Standards for Safe Storage of Ammunition and Explosives, document MSIAC, Martijn van der Voort & al, 2016
- [5] Technical Paper 21, Procedures for the Collection, Analysis, and Interpretation of Explosion-Produced Debris, Revision 2, document DDESB, 2017
- [6] Explosive Safety Seminar, DEBRIS QUANTITY-DISTANCES FOR USE IN EXPLOSIVES LICENSING, J. Henderson, C. Hoing, M. M. Swisdak, document Defense Ordnance Safety Group et Naval Surface Warfare Center, 2006

8 ANNEXES

- Annexe 1 : Définitions
- Annexe 2 : Réponse des structures à un cas de charge type souffle/surpression
- Annexe 3 : Vulnérabilité des personnes à une onde de choc
- Annexe 4 : Diagramme pression-impulsion
- Annexe 5 : Les débris en cas d'explosion en masse – bilan des essais et expérimentations
- Annexe 6 : Calcul des zones d'effets thermiques – formules 1.3a ou 1.3b
- Annexe 7 : Caractéristiques de l'onde tellurique
- Annexe 8 : Le projet ESKIMORE (Explosives Safety Knowledge IMprovement Operation REdux)

ANNEXE 1

DÉFINITIONS

Effets de souffle

Le « souffle aérien » auquel on s'intéresse est la conséquence d'une explosion qui se manifeste par la propagation depuis la zone de l'évènement pyrotechnique d'une onde de pression à travers l'atmosphère. Lorsqu'on mesure en un point fixe de l'espace les caractéristiques d'une telle onde, on observe une impulsion positive de pression dont la durée se mesure en général en millisecondes suivie d'une phase de dépression.

Trois grandeurs principales déterminent l'onde de pression :

- La pression maximum, ou pic de pression, c'est l'intensité maximale du signal de pression ;
- Le temps d'arrivée de l'onde, qui correspond à la durée entre le moment de l'évènement pyrotechnique et celui où l'onde arrive au niveau du point fixe de la mesure ;
- L'impulsion positive, qui correspond à l'intégrale de la pression positive de l'onde au cours du temps.

Si l'explosion a pour origine la détonation d'une substance explosive, l'impulsion positive se caractérise par une très brusque montée (quasi-instantanée) jusqu'au pic de pression suivie d'une décroissance exponentielle. La phase négative est peu marquée.

En revanche, si l'explosion est une déflagration d'un nuage explosif de violence modérée (vitesse de flamme plus petite que 120 m/s), les taux de croissance et de décroissance de la surpression et de l'impulsion positive sont du même ordre. La phase négative est presque une homothétie inversée de la phase positive, cf. Figure 4 a) (Lannoy, 1984).

L'onde de surpression (impulsion positive) s'accompagne d'une mise en mouvement de l'atmosphère dans le même sens que celui de la propagation de l'onde tandis que le passage de l'onde de détente (phase négative) se traduit par un mouvement des particules fluides dans le sens opposé à la direction de propagation.

La Figure 4 suivante illustre les différentes formes de signaux de pression selon la nature du phénomène explosif.

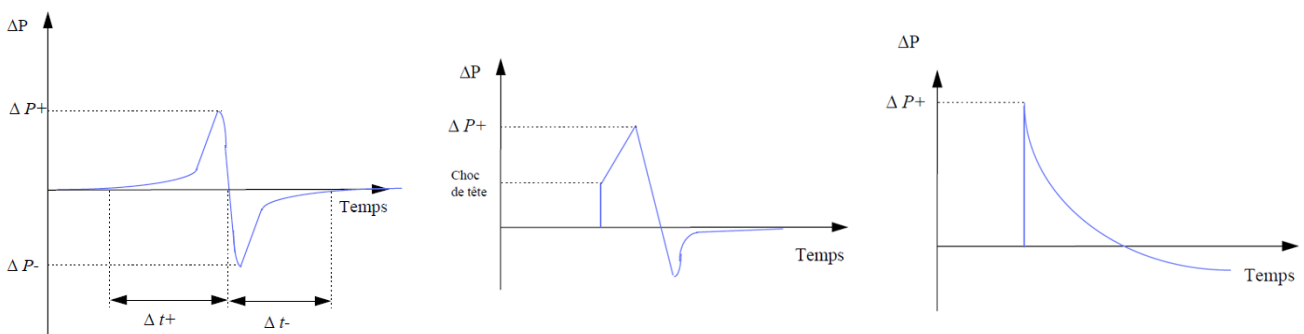


Figure 4 : a) Onde de pression engendrée au droit d'une déflagration à vitesse de flamme modérée
b) Onde de pression engendrée au droit d'une déflagration à vitesse de flamme supérieure à 120 m/s
c) Onde de pression dite « onde de choc »

Projections

On distingue trois types de projections ou fragments. En effet, selon leur origine, les projections sont appelées "primaires", "secondaires" ou " tertiaires".

- **Éclats primaires :**

Les projections primaires, ou éclats primaires, proviennent de la rupture de l'enveloppe (les munitions, les malaxeurs...) en contact direct avec l'explosif. Ces éclats, généralement de faibles dimensions, sont projetés à des vitesses initiales de quelques milliers de mètres par seconde et peuvent être mortels, même à grande distance de l'explosion.

- **Projections secondaires :**

Les projections secondaires proviennent des structures et autres éléments situés dans l'environnement proche de l'explosion (bâtiment donneur typiquement). Ces débris sont généralement plus volumineux et plus massifs, ils sont donc projetés plus loin que les éclats primaires et ont des vitesses de quelques centaines de mètres par seconde.

- **Débris tertiaires :**

Il s'agit des effets dominos des projections primaires et secondaires ou des effets indirects d'un événement pyrotechnique sur les structures : par exemples, bris de vitres ou fragments de bâtiments exposés dans l'environnement.

Effets thermiques

Les effets thermiques sont provoqués par des réactions de combustion. Leurs principales caractéristiques, par rapport à une de pression, plus violente, sont les suivantes :

- Vitesse de front de régression faible : quelques mm/s ou cm/s ;
- Élévation brutale de la température dans la zone de réaction ;
- Décroissance progressive en arrière de la zone de réaction (conduction et rayonnement).

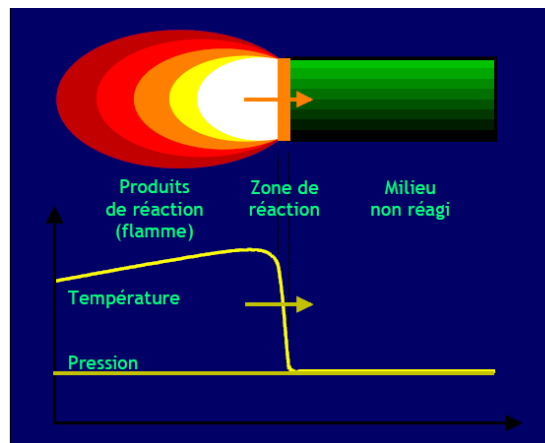


Figure 5 : Schéma du phénomène de la combustion

ANNEXE 2

RÉPONSE DES STRUCTURES À UN CAS DE CHARGE TYPE SOUFFLE/SURPRESSION

Tenue à l'onde de choc – Éléments théoriques

La plupart des dommages structuraux consécutifs à une explosion externe s'expliquent par la réponse des structures au souffle, aux impacts de fragments et à l'ébranlement tellurique. Cette annexe s'intéresse donc à l'évaluation des réponses et des dommages structuraux globaux causés par le souffle.

Il existe à ce jour diverses méthodes pour les déterminer. En vue d'une précision et d'un degré de confiance accru en l'évaluation de la réponse des structures, il convient de mieux caractériser la structure et la charge. Par ailleurs, le choix des méthodes d'évaluation des charges et de la réponse est intimement lié aux fins et à la portée de l'étude. Quelques méthodes d'analyses alternatives ainsi que les caractéristiques requises des charges et des structures sont résumées ici.

Analyse structurelle (générale)

La réponse dynamique des structures aux charges d'un souffle dépend de l'intensité, de la forme et de la durée de la charge dynamique (onde de surpression) et des caractéristiques mécaniques (résistance, raideur, masse et mécanisme de rupture) de la structure. Les modèles les plus simples et les plus anciens reposaient sur la pression de crête au niveau de la structure et sur le type général de structure (par exemple, une maison à charpente en bois et à un seul étage). Ces méthodes sont encore utilisées actuellement pour des modélisations grossières des conséquences. Elles reposent sur la réponse observée des structures à des charges de souffle lors d'essais ou d'accidents.

Des évaluations plus précises de la réponse d'éléments individuels et de structures globales sont désormais possibles à partir de modèles à un ou plusieurs degrés de liberté et de modèles à éléments finis. La réponse (flèche, rotation, ductilité) est comparée aux critères d'endommagement et de rupture pour déterminer les niveaux de dommages. L'évaluation des dommages corporels et des pertes de personnel peut être reliée indirectement au degré d'endommagement (variable en fonction du type de construction).

À défaut, il est possible d'avoir recours aux modèles biomécaniques pour établir un lien direct entre les lésions et les impacts de débris sur la structure soumise aux charges du souffle.

L'efficacité des diagrammes P-i

Les diagrammes P-i constituent une méthode reconnue et largement appliquée pour déterminer les conséquences (dommages et lésions). Ils utilisent à la fois la pression (P) et l'impulsion (i) pour relier la charge dynamique aux dommages structuraux et corporels/réponse des structures. La précision de la méthode P-i dépend de celles des données d'entrée utilisées pour établir les relations ci-dessus. La réponse des structures peut être déterminée en fonction de données d'essais ou d'accidents, ou évaluée d'après une analyse structurelle dynamique (cf. ci-dessus) et des techniques de modélisation biomécanique.

Les diagrammes P-i peuvent également être semi-empiriques lorsque les relations définies analytiquement ont été modifiées pour rendre compte des données d'essais ou d'accidents. Il est important de connaître les hypothèses et les limites des méthodes P-i utilisées afin d'éviter toute mauvaise application. Par exemple, un modèle P-i basé sur la réponse en flexion d'éléments de construction tels qu'une dalle ou une poutre ne devrait pas être utilisé pour la rupture quasi-fragile de colonnes ou la fissuration de murs. L'AASTP-4 décrit plus en détails les modèles disponibles et de la méthodologie P-i.

Les figures suivantes, extraites de l'AASTP-4, fournissent quelques exemples de diagrammes P-i illustrant la réponse des structures et les lésions graves dans le cas de bâtiments en béton armé et de fenêtres en verre recuit.

À noter qu'un bâtiment en béton armé de taille moyenne est supposé avoir les caractéristiques nominales suivantes : 929 m², des murs en béton armé de 20 cm et une ossature portique avec un toit constitué de solives en acier/tablier métallique/dalle légère en béton armé. De plus, une fenêtre en verre recuit de taille moyenne a les dimensions nominales suivantes : 1,2 m x 1,2 m x 4,8 mm.

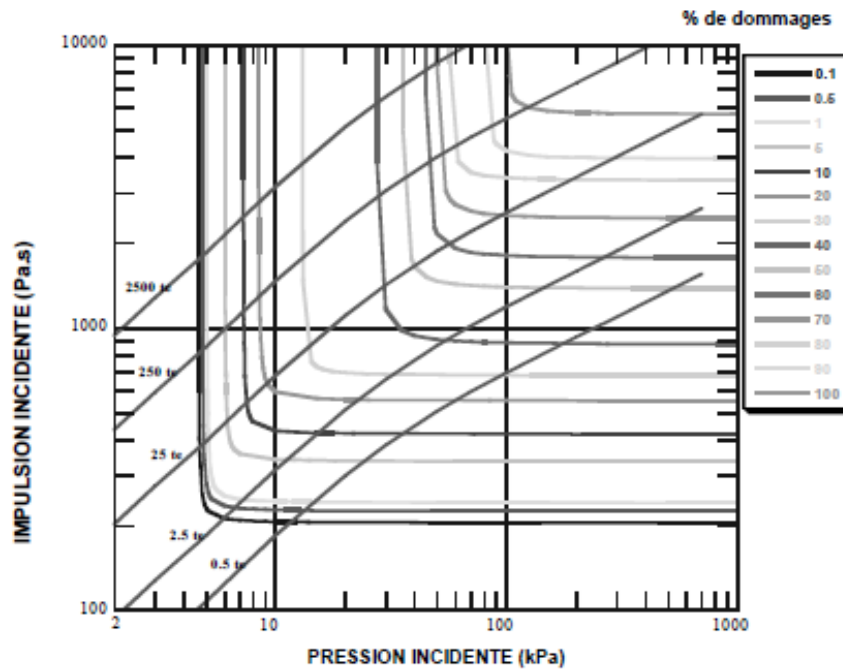


Figure 6 : Pourcentage de dommages structuraux en fonction de la pression & de l'impulsion incidentes pour un bâtiment en béton armé de taille moyenne

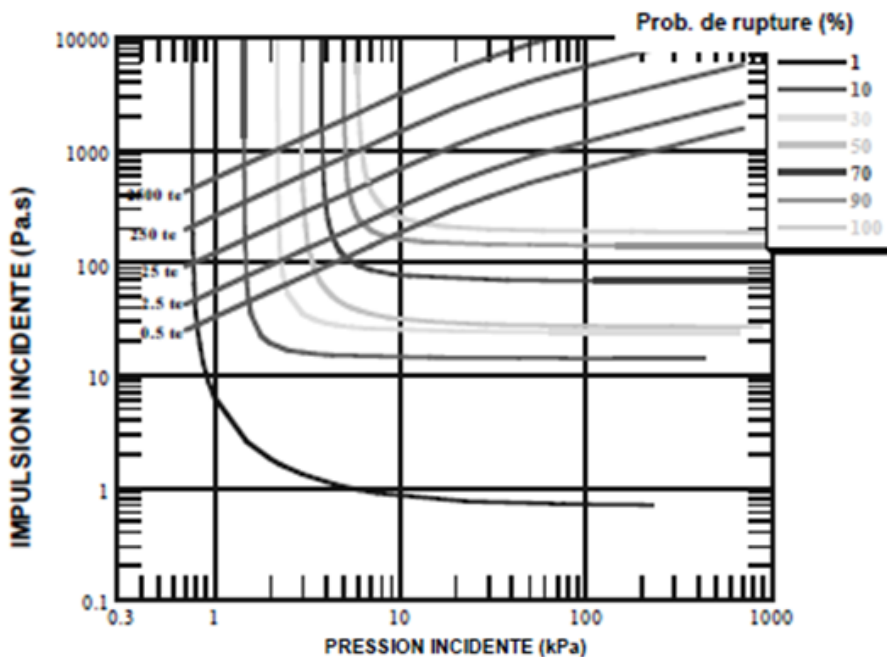


Figure 7 : Pourcentage de probabilité de rupture en fonction de la pression & de l'impulsion incidentes pour une fenêtre en verre recuit de taille moyenne

Cas des explosions confinées

Les explosions contenues et confinées qui se produisent à l'intérieur de structures sont généralement à l'origine de courbes pression/temps très complexes en quelque point que ce soit de la surface interne. Bien que cette charge complexe ne puisse pas être évaluée avec exactitude, des relations basées sur des modélisations ainsi que des approximations ont été développées et permettent de définir les charges du souffle avec un haut degré de confiance.

Dans des structures fermées, les ondes de choc subissent plusieurs réflexions. Par ailleurs, dans certaines configurations et sur des zones limitées de la surface interne, les ondes réfléchies peuvent se renforcer et augmenter d'intensité, mais en général, elles sont considérablement atténuées avant de frapper à nouveau les murs, le plancher ou le plafond.

Dans le cas d'une détonation centrée et dans un bâtiment aux larges dimensions, on peut supposer que la pression et l'impulsion de choc secondaire représentent la moitié du choc réfléchi initial, le troisième choc est égal à la moitié de l'amplitude du choc secondaire et les réflexions postérieures sont négligeables.

Par conséquent, les chocs interviennent tous avec le même intervalle de temps T_r (où $T_r = 2 \cdot i_r / P_r$). Le premier des trois chocs est supposé se produire à l'instant t_a , déduit des courbes présentées plus haut pour les explosions aériennes. Le second choc se produit donc à deux fois ce temps, soit : $2 \cdot t_a$ et le dernier choc à $4 \cdot t_a$. On obtient finalement le graphique de la Figure 8 suivante représentant la charge de choc en fonction du temps.

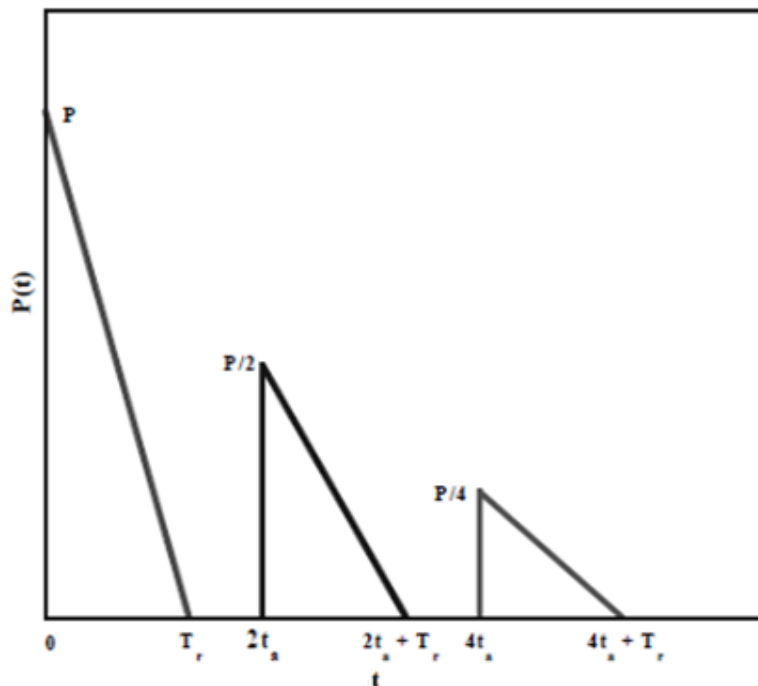


Figure 8 : Pression en fonction du temps pour une détonation centrale dans un espace confiné

Le temps au cours duquel se produisent les trois impulsions est relativement court, d'une durée de $4 \cdot t_a + T_r$ (temps le plus long sur la Figure 8), il est possible d'envisager une simplification pour les structures dont les temps de réponse sont beaucoup plus longs (d'un facteur dix, ou plus). En effet, la réponse de telles structures est sensible à l'impulsion totale du choc et non à sa distribution temporelle. Une juste approximation consiste à combiner les trois impulsions en une seule dont l'impulsion et la pression de crête représentent alors 1,75 fois l'impulsion initiale.

La réponse structurelle peut être estimée de manière conservative lorsque la période propre de la structure est inférieure au dixième de T_r . Dans ces conditions, la réponse de l'élément est sensible à l'application soudaine de la pression de crête de première impulsion et il y a alors lente réflexion à mesure que la pression diminue. Dans ce cas, la distribution temporelle est telle que les impulsions suivantes engendreront des flèches plus faibles, ainsi seule la première impulsion doit être évaluée.

Lorsqu'un élément de structure soumis au premier pic atteint sa réponse maximale en un temps inférieur au tiers de la durée de l'onde de choc initiale ($T_r/3$), il est possible de procéder à une approximation en ne considérant que l'impulsion initiale et en ignorant les deux impulsions suivantes réfléchies. Dans ce cas, la structure atteint sa flèche maximum avant que le premier choc n'ait complètement disparu et elle est alors encore soumise aux réflexions résiduelles du premier choc, ce qui ralentit sa réponse de résilience. Le second choc est moitié moins intense que le premier et peut atteindre l'élément à n'importe quel instant de son cycle de réponse. Les calculs effectués ont montré que cette distribution temporelle conduit très souvent à une flèche maximum inférieure ou égale à celle associée au premier choc.

D'autres calculs ont démontré qu'il était possible d'évaluer la réponse maximale à la triple charge d'impulsion en assimilant cette dernière à une simple impulsion. Cette impulsion unique présente alors une pression et une impulsion de crête de 1,2 fois celle de la première impulsion.

Pour les structures dont les temps de réponse sont compris dans l'intervalle de temps de réverbération, il peut y avoir résonance structurelle et il est alors possible que la définition de la réponse maximale ne comporte qu'une limite supérieure. C'est cette limite qui doit être utilisée en conception et dans les analyses, et non la courbe pression-temps présentée Figure 8, à moins qu'on ne lui accorde un haut degré de confiance et de pertinence.

Il est important d'être en mesure d'établir la courbe charge-temps réelle pour l'élément de structure si l'évaluation de sa réponse réelle en fonction du temps est requise. La courbe charge-temps présentée étant une approximation, elle peut ne pas être représentative de la situation étudiée. Cette courbe approximative nous permet toutefois de définir une limite supérieure en terme de réponse des éléments, avec une période semblable à $4 \cdot t_a + T_r$.

Les diverses discussions ci-dessus offrent un aperçu du processus complexe de réflexions qui accompagne une explosion contenue ou confinée et définissent une méthode simplifiée de calcul des charges de choc. Elles montrent également que la limitation de la courbe pression-temps réelle à une seule impulsion permet toujours d'obtenir une estimation correcte ou une surestimation de la réponse des structures, sans jamais sous-estimer cette réponse. Bien que ces discussions se limitent à des systèmes à réponse élastique, la situation est la même pour des systèmes élasto-plastiques dont le temps de réponse maximale peut être semblable à celui d'un système élastique.

Les méthodes d'évaluation de la phase de chargement du choc et les discussions associées (fondées sur le facteur temps) présentées ci-dessus peuvent servir de base à l'analyse.

Cependant, les méthodes décrites ne sont pas des moyens privilégiés d'évaluation de la phase de chargement du choc. Des codes informatiques, peuvent en effet modéliser avec précision le processus de réflexion complexe et, par conséquent, être également appliqués aux détonations excentrées.

Une explosion à l'intérieur d'une unité ou chambre de confinement total ou sans aération génère des réverbérations de choc, comme indiqué plus haut, qui s'estompent pour laisser place à une pression quasi-statique appelée "pression quasi-statique (ou de gaz) de crête". Dans une pièce fermée, cette pression de gaz décroît sous l'effet des échanges de chaleur, principalement.

Dans des situations-types, on a pu observer que la structure réagissait en un temps inférieur à celui associé à une réduction significative de la pression de gaz par échanges de chaleur. Par conséquent, la charge est considérée comme quasi-statique (de longue durée, mais, d'application soudaine).

Le Tableau 9 suivant fournit les coefficients de l'équation de la pression quasi-statique (QSP) de TNT en fonction de la densité de chargement définie comme le rapport entre la masse de substances énergétiques totale et le volume de la chambre (W/V). Ces données ont été obtenues grâce au code BLASTX (d'origine US, et décrit dans l'AASTP-4 [1]).

W/V (kg/m ³)	A	B	C	D	E	F
0.0005 < W/V < 2.4	7.62687	0.50982	0.0029737	0.03037	0.0051921	0.0002525
2.4 ≤ W/V < 200	7.58930	0.45790	0.15145	0.01676	0.0001171	0.0001577

Tableau 9 : Détermination des coefficients de la formule d'évaluation de la pression quasi-statique de TNT en fonction de la densité de chargement W/V

Formule de calcul de la QSP:

$$QSP = \exp \left(A + B * \ln \left(\frac{W}{V} \right) + C * \left[\ln \left(\frac{W}{V} \right) \right]^2 + D * \left[\ln \left(\frac{W}{V} \right) \right]^3 + E * \left[\ln \left(\frac{W}{V} \right) \right]^4 + F * \left[\ln \left(\frac{W}{V} \right) \right]^5 \right)$$

Unités:

- QSP est exprimé en kPa ;
- W/V en kg/m³.

Afin de déterminer la pression quasi-statique pour d'autres substances énergétiques, on utilise la masse de charge équivalente TNT, qui dépend de la densité de chargement W/V.

Les équivalences quasi-statiques sont fournies dans le Tableau 10 pour plusieurs substances énergétiques. Aux fins de l'analyse des réponses, la charge de pression de gaz peut être considérée comme statique pour la valeur de QSP calculée avec cette méthodologie. La phase de chargement du choc et la pression quasi-statique ou de gaz peuvent être combinées dans la courbe de charge totale et, par conséquent, ne pas être traitées comme des charges distinctes.

W/V (kg/m ³)	ANFO	COMPOSITION A-3	COMPOSITION B	COMPOSITION C4	CYCLOTOL (70/30)	DESTEX	H-6	HBX-1	HBX-3	MI PROPELLANT
0.005	0.30	0.86	0.82	0.83	0.76	1.23	1.13	1.11	1.28	0.82
0.007	0.28	0.84	0.79	0.81	0.73	1.25	1.13	1.11	1.30	0.81
0.01	0.27	0.82	0.77	0.79	0.71	1.29	1.13	1.11	1.33	0.79
0.02	0.26	0.80	0.75	0.77	0.69	1.35	1.15	1.12	1.38	0.78
0.03	0.26	0.80	0.75	0.77	0.69	1.37	1.15	1.13	1.40	0.77
0.05	0.28	0.82	0.77	0.79	0.71	1.37	1.16	1.14	1.40	0.78
0.07	0.29	0.84	0.78	0.81	0.73	1.37	1.17	1.15	1.40	0.79
0.1	0.31	0.86	0.81	0.83	0.76	1.35	1.17	1.16	1.38	0.80
0.2	0.37	0.93	0.88	0.90	0.84	1.27	1.18	1.17	1.33	0.83
0.3	0.41	0.98	0.93	0.96	0.90	1.22	1.17	1.17	1.28	0.85
0.5	0.48	1.04	1.01	1.03	0.99	1.13	1.17	1.17	1.22	0.89
0.7	0.54	1.09	1.06	1.08	1.05	1.07	1.16	1.16	1.17	0.91
1	0.60	1.14	1.11	1.13	1.12	1.01	1.15	1.15	1.12	0.94
2	0.74	1.23	1.21	1.23	1.25	0.90	1.12	1.12	1.02	0.99
3	0.82	1.27	1.27	1.29	1.32	0.84	1.09	1.09	0.97	1.01
5	0.93	1.32	1.32	1.34	1.40	0.78	1.06	1.05	0.92	1.03
7	1.00	1.34	1.35	1.37	1.44	0.75	1.04	1.03	0.89	1.05
10	1.06	1.35	1.36	1.39	1.46	0.73	1.01	0.99	0.87	1.05
20	1.15	1.33	1.35	1.38	1.46	0.70	0.97	0.93	0.84	1.05

Tableau 10 : Exemples d'équivalences TNT quasi-statiques pour des matières énergétiques en fonction de la densité de chargement

ANNEXE 3

VULNÉRABILITÉ DES PERSONNES À UNE ONDE DE CHOC

Généralités

On distingue trois catégories de lésions induites par le souffle chez l'homme, soit :

- Lésions dues aux effets directs ou primaires ;
- Lésions dues aux effets indirects ou secondaires ;
- Lésions dues aux effets tertiaires.

Effets primaires

Les effets directs ou primaires sont dus à la durée et à la surpression de l'onde de choc. Les organes renfermant de l'air (tels que les oreilles et les poumons) sont les plus affectés par ce type de lésions. La lésion est définie par les propriétés de l'onde de choc, telles que la pression incidente, réfléchiée et dynamique, la durée et l'impulsion de l'onde de choc et le temps de montée de la pression de crête. De plus, le niveau de lésions subi dépend de la taille de la personne, de son sexe et, parfois, de son âge. Les organes susceptibles d'être affectés par ce type de dommages sont les poumons, les oreilles, le larynx, la trachée et la cavité abdominale.

Effets secondaires

Les effets secondaires sont liés aux collisions avec des projectiles ou des débris générés par un événement explosif. Les paramètres qui déterminent le degré de gravité des traumatismes sont la masse, la vitesse, la forme, la densité, la section transversale et l'angle d'impact de chaque élément. Les effets secondaires comptent des déchirures tissulaires, des pénétrations des organes vitaux, des traumatismes contondants ainsi que des fractures.

Effets tertiaires

Les effets tertiaires sont dus au déplacement de l'ensemble du corps, suivi d'une charge de choc à forte décélération. Dans ce cas, le corps se déplace par translation sous l'effet du souffle et de la pression de choc. Cet effet peut entraîner des lésions à la tête et aux organes vitaux ainsi que des fractures.

Analyse des probits

Une fois les paramètres appropriés quantifiés, leurs effets sur l'homme peuvent être évalués par le biais des fonctions « probits ». Ces dernières, qui sont déduites de données expérimentales, permettent d'établir la probabilité d'un événement en fonction d'une variable qui combine les paramètres applicables.

La forme générale de la fonction probit est :

$$Probit = a + b * \ln (S)$$

Où a et b sont des constantes et S la variable.

D'après la valeur de S, la grandeur du probit permet de déterminer la probabilité de certains événements. Les probabilités associées aux valeurs des probits sont fournies dans le Tableau 11 ci-après.

Si la valeur du probit est supérieure à 7,33, la probabilité de l'événement est supposée être de 100%. Par exemple, pour une valeur probit de 4,88, la probabilité associée est considérée comme étant 46%.

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33

Tableau 11 : Valeurs des probits en fonction de S et probabilité d'occurrence associée

Souffle applicable

La charge de surpression dépend de l'orientation du corps par rapport à l'onde de choc. On distingue alors trois cas :

- Cas 1 : Corps placé en champ libre et orienté de telle sorte que son axe longitudinal soit parallèle à l'onde de choc. Dans ce cas, l'onde incidente ne rencontre aucun obstacle et le corps est soumis à la surpression latérale de l'onde incidente ;
- Cas 2 : Corps placé en champ libre et orienté de telle sorte que son axe longitudinal soit perpendiculaire à l'onde de choc. Dans ce cas, l'onde de choc est arrêtée. En raison des faibles dimensions du corps au regard de la vitesse de l'onde, la phase de réflexion de la charge peut être négligée et la surpression résultante qui s'exerce sur les parois thoraciques est la somme de la pression incidente et de la pression dynamique ;
- Cas 3 : Corps placé à proximité d'une surface réfléchissante, avec une onde de choc qui se propage en direction de cette surface sous incidence normale. Dans ce cas, le corps est soumis à la pression réfléchie.

Exemple de létalité due à des lésions aux poumons

Le probit associé à la létalité entraînée par des lésions aux poumons est défini en termes de rapports sans dimension comme suit :

- $P_{sc} = P_s/P_0$;
- $I_{sc} = I_s/(m^{1/3} \cdot P_0^{1/2})$.

Où P_{sc} est la pression relative, I_{sc} est l'impulsion relative, P_s est la pression incidente appropriée en kPa (incidente, incidente et dynamique, ou réfléchie), P_0 est la pression ambiante en kPa, I_s est l'impulsion incidente en kPa·s et m est la masse d'un homme.

En supposant que $P_0 = 100$ kPa et $m = 70$ kg, on obtient les relations suivantes :

- $P_{sc} = 0,01 \cdot P_s$;
- $I_{sc} = 0,7673 \cdot I_s$.

On en déduit alors la relation probit suivante pour les lésions aux poumons :

- $S = (4,2/P_{sc}) + (1,3/I_{sc})$;
- $\text{Probit} = 5,00 - 5,74 \cdot \ln(S)$.

Létalité par impact/déplacement du corps

De la même manière que pour une lésion à des poumons, on évalue la létalité par déplacement du corps comme suit :

- $S = (7280/Ps) + (1,30 \cdot 10^9 / Ps \cdot Is)$;
- $Probit = 5,00 - 2,44 \cdot \ln(S)$.

Létalité due à un choc à la tête

Et enfin pour un choc à la tête :

- $S = (2430/Ps) + (4,00 \cdot 10^8 / Ps \cdot Is)$;
- $Probit = 5,00 - 8,49 \cdot \ln(S)$.

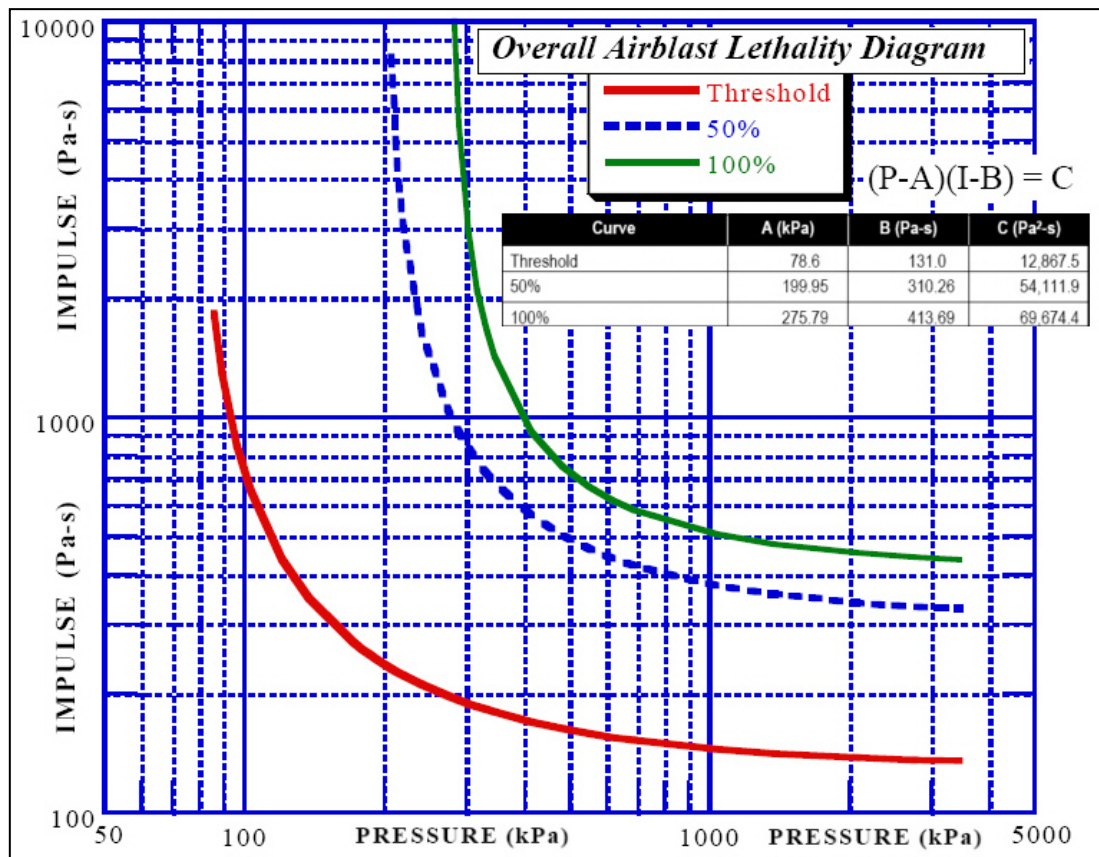


Figure 9 : Exemple de modèles de létalité – MODELE US – SAFER AASTP-4 [1]

ANNEXE 4 DIAGRAMME PRESSION-IMPULSION

En 1994, consécutivement aux travaux de Jarett mentionnés au §5.1.1, les études sont reprises par Gilbert, de nouveau extrapolées, et permettent finalement de mettre en évidence 3 régimes de dégâts théoriques en fonction de la masse de matière active (Q) :

- Impulsionnel pour des masses inférieures à 2,5 T où l'ACR est proportionnel à $Q^{2/3}$;
- Quasi-statique pour des masses supérieures à 4,5 T, où l'ACR est proportionnel à $Q^{1/3}$;
- Dynamique pour des masses entre 2,5 et 4,5 T, où l'ACR peut s'évaluer à un facteur de $Q^{1/2}$.

La Figure 10 ci-dessous, reprise du document du MSIAC [4], illustre la distinction entre ces 3 régimes sur un diagramme ACR-Q.

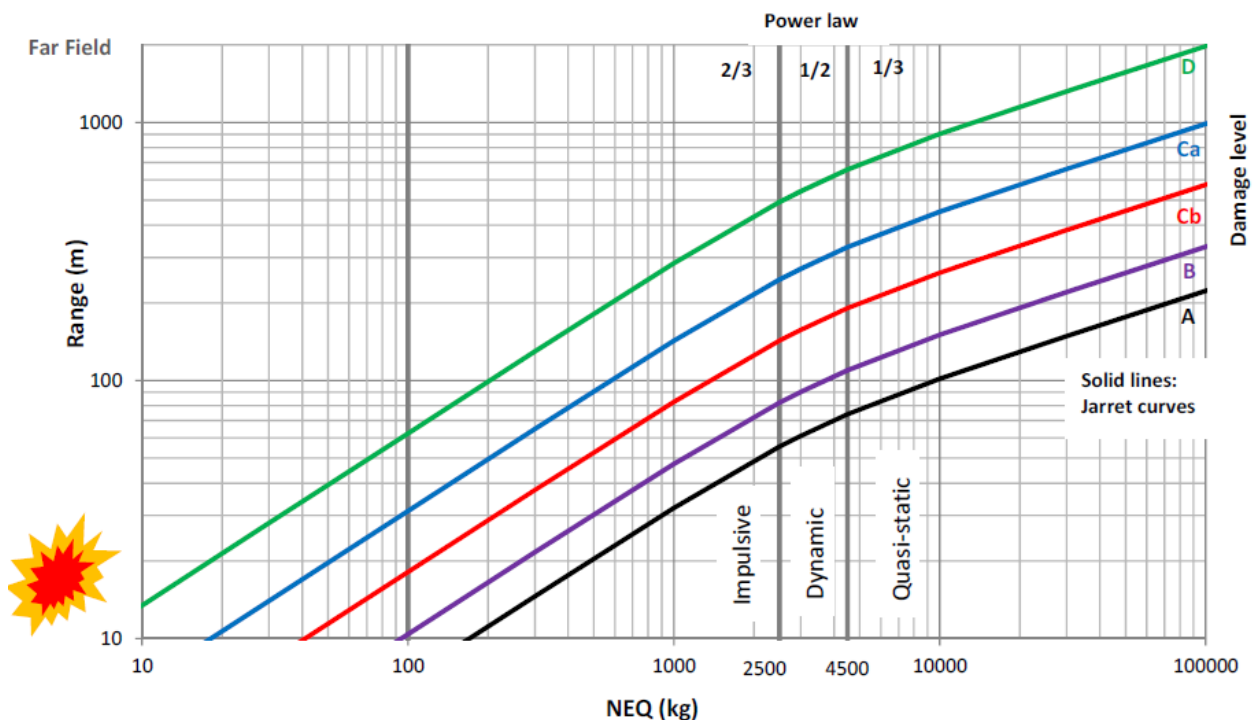


Figure 10 : ACR en fonction de la masse de matière active et régimes de dégâts [4]

Lorsque l'on s'intéresse au problème ci-dessus en choisissant un diagramme pression-impulsion (P-i), les régimes sont encore plus apparents :

- Au-dessus de 4,5 T, la charge de l'effet de souffle est quasi-statique ;
- En dessous de 2,5 T, la charge est impulsive ;
- La transition entre les 2 régimes est clairement visible (autour de l'angle droit des courbes de dommages).

L'utilisation d'un tel diagramme, comme le montre la Figure 11, permet également d'évaluer les dommages aux installations causés par des charges explosives complexes, au détriment d'un diagramme ACR-Q.

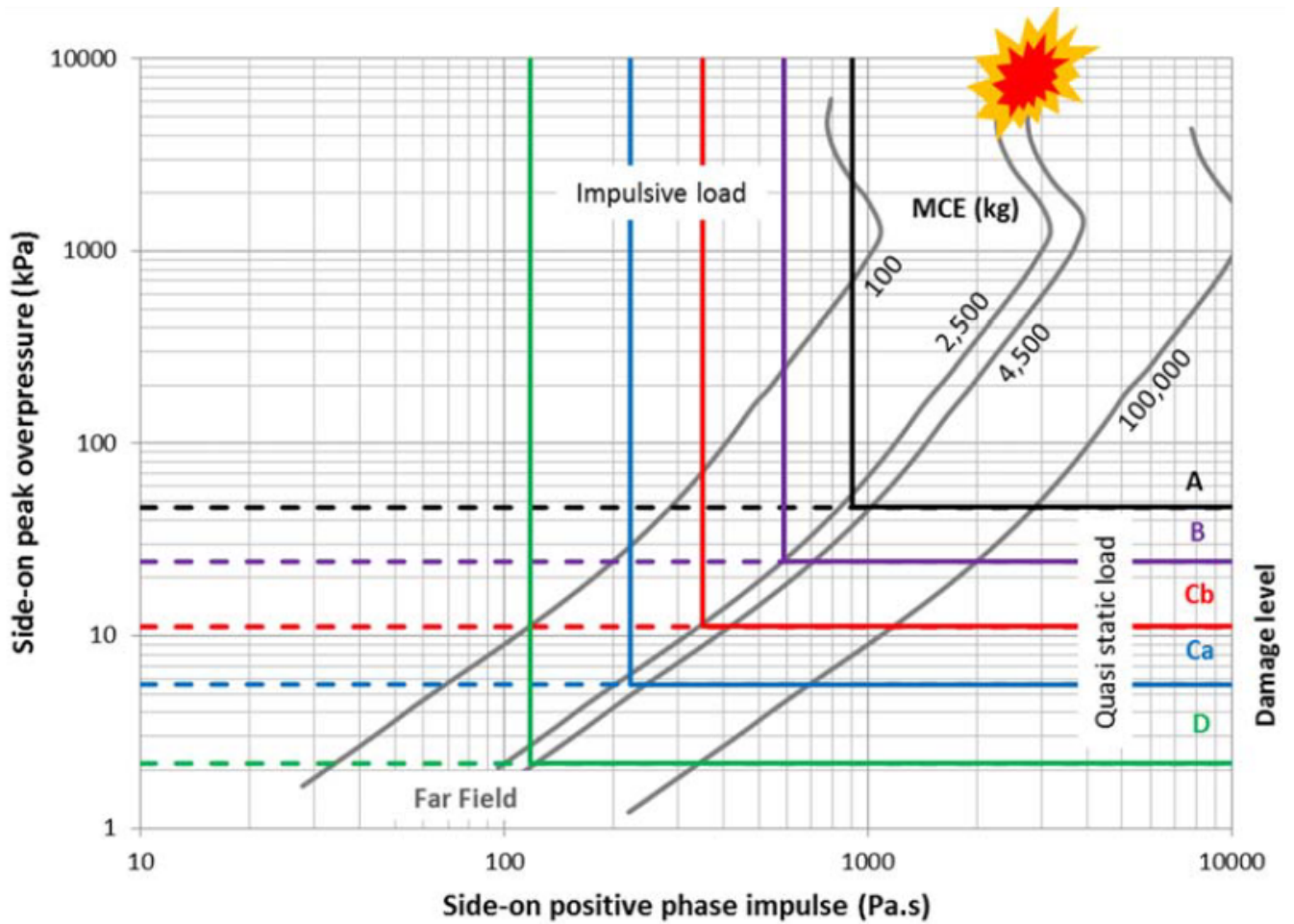


Figure 11 : Diagramme P-i pour 4 masses de matière active et niveaux de dégâts associés [4]

ANNEXE 5

LES DÉBRIS EN CAS D'EXPLOSION EN MASSE – BILAN DES ESSAIS ET EXPÉRIMENTATIONS

Preliminaire

Lors d'un accident pyrotechnique de type explosion en masse, les effets générés par le siège exposant (munitions, matières énergétiques...) à prendre en compte sont l'onde de souffle, les projections primaires et secondaires, l'environnement thermique et l'onde tellurique.

Pour ce qui concerne les projections : on distingue les fragments dits "primaires" et les projections "secondaires". Les fragments primaires proviennent de la rupture de l'enveloppe (comme les chaudières ou trémies, munitions) en contact direct avec l'explosif. Ces fragments, généralement de faibles dimensions, sont projetés à des vitesses initiales de quelques milliers de mètres par seconde et peuvent être mortels, même à grande distance de l'explosion.

Les projections secondaires proviennent des structures et autres éléments situés dans l'environnement immédiat de l'explosion. Ils sont généralement plus volumineux que les débris primaires et ont des vitesses de quelques centaines de mètres par seconde. Les projections de débris de cratère peuvent également résulter d'événements explosifs en masse et les quantités projetées sont alors plus importantes lors d'explosions souterraines qu'en surface.

Les lois relatives à l'établissement des distances de séparation entre installations ont dès le début des années 1970 pris en considération les débris et projections par l'imposition de distances forfaitaires fixes ou en les considérant pris sous enveloppe des effets de souffle par l'intermédiaire des lois réduites associées.

Position réglementaire historique et reprise dans le guide des bonnes pratiques de la profession

La note N° 805/IE/DEFA/SPC du 02 décembre 1960 relative à la sécurité pyrotechnique dans le travail des substances explosives et les fabriques de munitions précisent les éléments suivants : « *En ce qui concerne les projections (éléments de la structure accidentée ou de la munition en cours d'élaboration entre autres), l'expérience des accidents antérieurs et la connaissance du fonctionnement de la munition considérée ont conduit, dans certains cas, à formuler des règles pratiques du genre suivant : tel modèle de munition pris dans un incendie est susceptible de lancer – dans un rayon de x mètres – des éléments enflammés ou des projectiles explosant à l'impact. C'est le cas de certains critères contenus dans les règlements de l'armée de terre. Mais d'une manière générale, et sauf cas d'espèce, on est fondé à considérer que les garanties qui sont prises contre l'effet de souffle, soit seulement par le choix des intervalles, soit par l'interposition d'écrans appropriés, couvrent les effets à craindre des projections* ».

Bilan de l'état de l'art

Dans le cas des munitions, l'OTAN (principalement les Etats-Unis et Royaume Uni) a engagé ces trente dernières années de grandes campagnes d'essais de caractérisation de structures traditionnelles de stockage d'explosifs ou de munitions pour des masses de matière active allant de quelques kg à 75 tonnes.

L'ambition était de déterminer les effets à grande distance de ces projections. Au Royaume Uni, les résultats de ces essais ont d'ailleurs conduit le secteur civil à revoir ces zones de danger au milieu des années 2000 (*HSE Manufacture and Storage regulations, 2005*, idem pour le *DoD US en 2006*). L'OTAN a revu également en 2020 les niveaux de protection associés à ces effets dans son document de référence sur le stockage des munitions (selon l'AASTP-1 [3]).

Si jusqu'aux années 1970 les débris n'étaient pas considérés comme posant un problème majeur pour les stockages d'objets pouvant détoner ou exploser en masse, les nombreuses expérimentations menées depuis dans le cadre de l'OTAN ou de programmes nationaux ont montré qu'ils jouaient un rôle majeur, pouvant excéder les effets du souffle en termes de conséquences sur les personnes.

En fait, la plupart des accidents recensés provenant du transport, ils ne donnaient évidemment à l'époque que peu d'éléments sur les caractéristiques de projections de structures de maçonnerie par exemple. Il s'agit certainement là de la raison majeure qui fait que la communauté pyrotechnique ait mis tant de temps à réaliser que les débris secondaires pouvaient représenter un risque important lors d'explosions accidentelles.

Il faut aussi comprendre que la caractérisation des effets projections demande un effort très important. Lors d'expérimentations par exemple, le souffle est mesuré de manière directe assez aisément par des capteurs alors que la collecte des débris implique un travail long très fastidieux (parfois plusieurs semaines pour une équipe de plusieurs personnes dédiées à la simple tâche de collecte et classification). L'exploitation de ces expérimentations conduit à un constat fondamental : en dehors du champ très proche de l'explosion et pour des explosions en masse à partir de quelques centaines de kg, le risque pyrotechnique (traduit en termes de conséquences sur les personnes) est souvent dimensionné par des projections de type débris secondaires. Le retour d'expérience sur l'accident d'un dépôt de munitions MILAN aux Etats-Unis en 2003 confirme ce qui a été mis en évidence dans les expérimentations.

Cette note est centrée sur la problématique des débris secondaires lors d'explosions en masse, mais il existe également un retour d'expériences conséquent sur la question des projections primaires lors d'explosions en masse, des projections secondaires de type fragments de conteneurs ISO très utilisés dans la communauté, des explosions progressives de stocks de munitions (non détonant en masse). Ce retour d'expériences met en exergue l'impossibilité de traduire le risque posé par ces différentes natures de projections avec une seule loi universelle.

Synthèse des essais et expérimentations

On s'intéresse dans la suite de la note à la zone d'effet dite « *IBD* » (*Inhabited Building Distance*) qui correspond dans l'origine et la définition à la Z4 de la réglementation française. Ce point facilite les comparaisons directes avec les résultats expérimentaux de l'OTAN mais les conclusions de l'étude sont qualitativement transposables aux autres zones.

Quelques définitions :

- Pour les projections, l'*IBD* est la distance en mètres à laquelle un individu a une probabilité d'être touché à 1% par un éclat d'au moins 79 J (correspond à une densité de 1/600 ft²);
- On appelle densité de chargement, le rapport direct entre la masse de matière énergétique et volume du siège exposant (*PES*).

Les procédures expérimentales relatives à la collecte des débris et à la détermination de l'*IBD* sont décrites précisément dans le document américain *TP-21* [5] mais on peut faire la synthèse méthodologique suivante : dans les tests d'explosion, les débris sont ramassés et enregistrés soit en appliquant un maillage radial ou par GPS et trois méthodes existent pour déterminer la densité de débris dangereux et la distance *IBD* :

- L'*ADD* (*Actual Debris Density*) est définie comme le nombre de débris collectés dans un secteur divisé par l'aire du secteur. Cette approche ignore tous les débris qui ont atterri plus loin et par conséquent sous-estime les débris issus des murs. Cette méthode est considérée comme précise pour l'évaluation de débris de toiture ;
- La méthode dite de *PTN* (*Pseudo Trajectory Normal*) qui tient compte de tous les débris qui atterrissent dans les secteurs radiaux plus lointains et qui par conséquent surestime un peu le danger associé ;

- La méthode modifiée (*MPTN*) qui prend en compte un tiers des débris qui atterrissent dans les secteurs radiaux plus lointains.

Les approches *PTN* et *MPTN* évitent une sous-estimation du risque mais introduisent une dépendance au maillage. Cependant, les travaux d'Henderson en 2015 ont montré que au moins jusqu'à 500 kg de masse active, les distances *IBD* ne sont pas très sensibles à la définition de la densité des débris utilisée. Le risque débris est fortement directionnel, aussi il peut varier statistiquement d'une expérimentation à l'autre. Il est également important de noter que les distances de projection sont basées sur des résultats moyennés dans les directions perpendiculaires aux murs.

Henderson (Explosive Safety Seminar, 2006) [6]

Cette synthèse présentée à la communauté internationale en 2006 éclaire sur les limites des approximations en loi réduite pour envelopper les effets projections en s'intéressant à l'effet majeur de la densité de chargement sur les résultats.

La base de données des expérimentations retenue par Henderson :

- [a] 1982 : Preliminary testing of 1800 kg of HE bombs in brick walled, concrete roofed ;
- [b] 1985 : Testing of 500 kg of explosives or HE fragmenting shell in a variety of typical structures constructed with either brick or concrete walls and with or without protective roofs ;
- [c] 1988 : Testing of 1800 kg and 5600 kg HE fragmenting shell in brick walled/concrete roofed and all concrete buildings ;
- [d] 1990 : Testing of 75000 kg of mines in a typical UK designed igloo storehouse ;
- [e] 1995-6 : Testing of quantities from 10-50 kg of explosives in brick walled buildings with and without protective roofs ;
- [f] 1998 : Testing of 100-250 kg of explosives in brick walled buildings with and without protective roofs ;
- [g] 1999 : Testing of 40,000 kg of HE bombs in a brick walled, concrete roofed building ;
- [h] 2002 : Testing of 27,000 kg of HE fragmenting shell in a brick walled, concrete roofed building ;
- [i] ESKIMO 1 : 90,000 kg of explosives in an earth covered steel arch magazine ;
- [j] USAF Munition Storage Module : 27,000 kg of explosives in a pre-cast concrete panel earth covered magazine ;
- [k] SCIPAN 1 : 12,000 kg of explosives in an aboveground masonry and concrete walled structure with a protective roof.

Résultats :

On voit bien dans les figures ci-dessous la difficulté de traiter la question avec une seule distance forfaitaire à 400 m ou une simple masse nette d'explosif associée à une loi réduite. On note en effet la grande dispersion verticale sur la Figure 12, imputable aux volumes différents des installations testées pour une même masse de matière active. La différence de nature (matériaux notamment) joue également un rôle dans cette dispersion.

La Figure 13 explicite l'effet de la densité de chargement : il faudrait une loi réduite (en $Q^{1/3}$) en « marche d'escalier » pour être enveloppe des cas expérimentaux. On note que sur cette base expérimentale d'Henderson, la Z4 en $22 \cdot Q^{1/3}$ de la réglementation n'aurait un sens que pour des densités de chargement élevées.

Avec une loi unique, le conservatisme par rapport au risque sur les personnes ne sera pas toujours assuré. La densité de chargement semble être un meilleur paramètre, à moduler certainement selon les typologies d'installations.

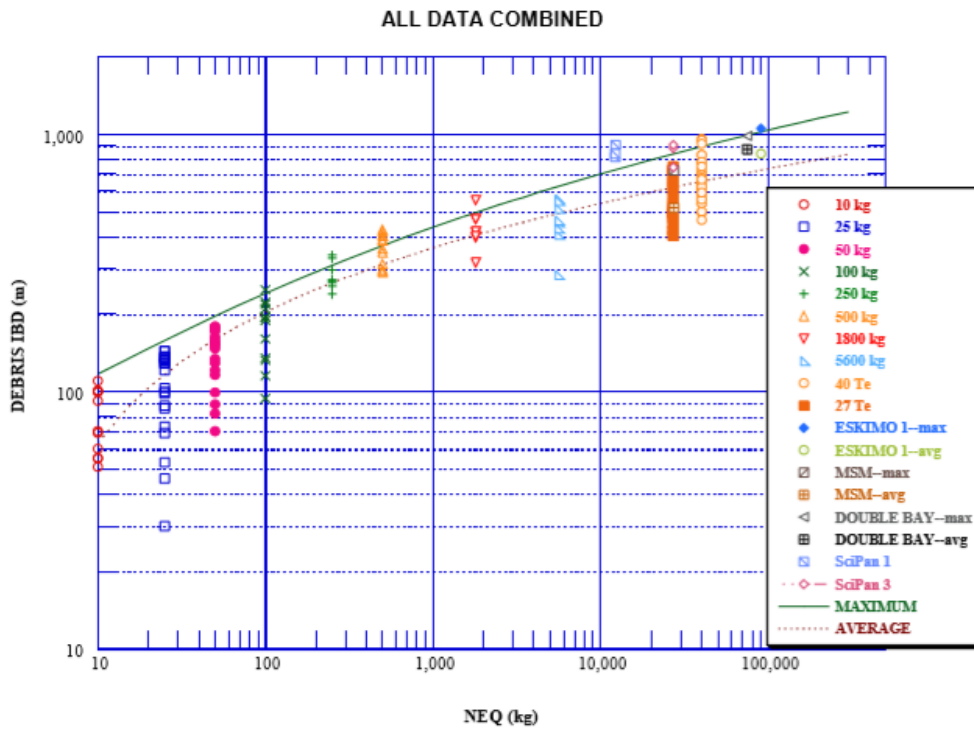


Figure 12 : IBD expérimentale en fonction de la masse d'explosif (NEQ)

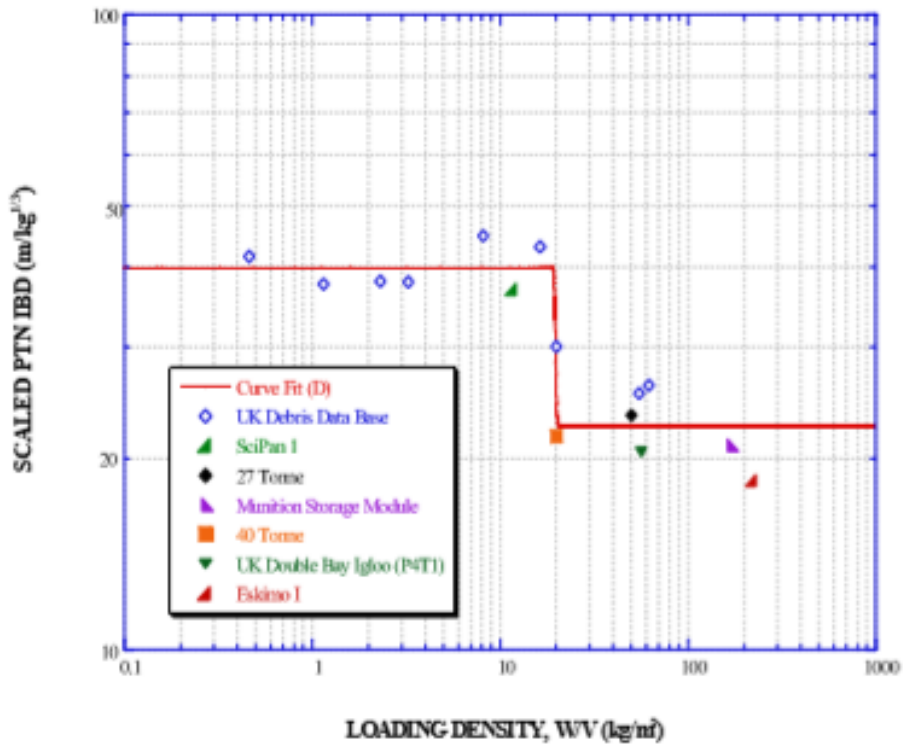


Figure 13 : IBD (exprimé en $Q^{1/3}$) en fonction de la densité de chargement

OTAN-CASG/MSIAC : bilan des expérimentations

Base de données expérimentale retenue [SVISDAK, CONWAY, GRONSTEN]

Magasins de type igloo	Stockages de surfaces non merlonnés	Stockages de surface merlonnés
ESKIMO I (Steel arch) 90 718 kg StackFrag Phase 4 (UK Double Bay) (Box magazine) 75 000 kg MSM (precast box) 27 433 kg Hastings 9: 45 kg Hastings 10: 68 kg Hastings 11: 36 kg Hastings 12: 27 kg Navajo 1: 204 kg Navajo 2: 68 kg Navajo 3: 68 kg Navajo 4: 68 kg Hastings smallest quantity trials: o ECM front: test 2-9: 5-45 kg (distance based on estimated door distance). test 2-8: 5-11 kg (door data, ricochet off frontal barricade) ECM rear: test 1: 18 kg (door data, ricochet off frontal barricade)	Small Quantity, Phase 1 Test 3—50 kg Small Quantity, Phase 1 Test 4—25 kg Small Quantity, Phase 2 Test 1—50 kg Small Quantity, Phase 2 Test 2—50 kg Small Quantity, Phase 2 Test 3—25 kg Small Quantity, Phase 2 Test 4—25 kg Small Quantity, Phase 3 Shot 1—250 kg Small Quantity, Phase 3 Shot 4—100 kg Small Quantity, Phase 3 Shot 5—250 kg Small Quantity, Phase 3 Shot 6—100 kg StackFrag2, Test 5—500 kg StackFrag2, Test 6—500 kg StackFrag2, Test 7—500 kg StackFrag3, Test 9—1810 kg StackFrag 3, Test 10 5599 kg StackFrag 3, Test 11—1810 kg StackFrag 3, Test 12—5600 kg UK 40 tonnes—40 000 kg UK 27 tonnes—27 015kg SciPan 1—12 249 kg SciPan 3—27 218 kg SciPan 4—1000 kg SciPan 5—2994 kg Kasun II-1—20 kg Kasun II-2—20 kg Kasun II-3—80 kg Kasun II-4—240 kg Kasun II-5—160 kg Kasun III-6—7 kg Kasun III-7—110 kg Kasun III-8—7 kg Kasun III-9—28 kg Kasun III-10—110 kg	Small Quantity, Phase 1 Test 3—50 kg Small Quantity, Phase 1 Test 4—25 kg Small Quantity, Phase 2 Test 1—50 kg Small Quantity, Phase 2 Test 2—50 kg Small Quantity, Phase 2 Test 3—25 kg Small Quantity, Phase 2 Test 4—25 g Small Quantity, Phase 3 Shot 1—250 kg Small Quantity, Phase 3 Shot 4—100 kg Small Quantity, Phase 3 Shot 5—250 kg Small Quantity, Phase 3 Shot 6—100 kg StackFrag2, Test 5—500 kg StackFrag2, Test 6—500 kg StackFrag2, Test 7—500 kg S StackFrag3, Test 9—1,810 kg StackFrag 3, Test 10 - 5599 kg StackFrag 3, Test 11—1810 kg StackFrag 3, Test 12—5600 kg UK 40 tonnes—40 000 kg UK 27 tonnes—27 015kg

Tableau 12 : Base de données expérimentale retenue [SVISDAK, CONWAY, GRONSTEN]

Exemple de résultats sur les stockages de surface maçonnerie ou béton renforcé :

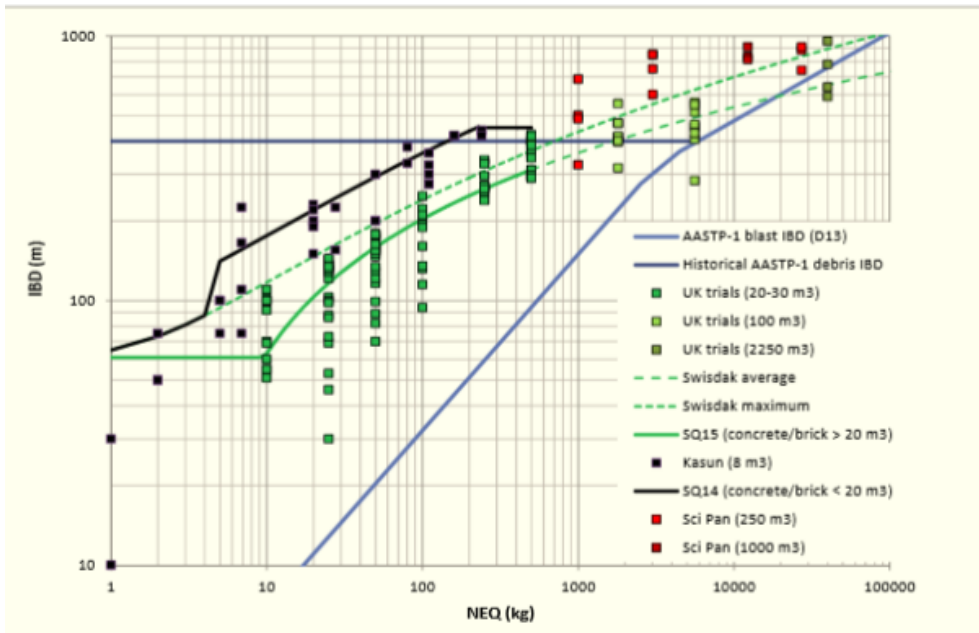


Figure 14 : Z4 (IBD) sur base de données complètes pour des stockages non merlonnés

On retrouve expérimentalement sur la Figure 14 les grandes conclusions de la synthèse Henderson. Il est intéressant de regarder les résultats pour des masses allant de 1 à 500 kg qui ont fait l'objet d'une attention particulière à l'OTAN via le programme SQQD (*Small Quantity Quantity-Distance*). On constate en effet que les approches réglementaires de type loi réduite en $22 \cdot Q^{1/3}$ ou distance forfaitaire fixe à 400 m (avec abattement au seuil 100 kg) n'ont que peu de sens.

Pour ce qui concerne les résultats expérimentaux de ce même type de structure protégées par des merlons (Figure 15), il y a toujours un effet majeur de la densité de chargement mais le conservatisme lié aux pratiques réglementaires est meilleur (surtout pour les masses importantes). Ce serait évidemment encore plus vrai au niveau des zones Z1, Z2 et Z3 où la protection apportée par les merlons est plus efficace.

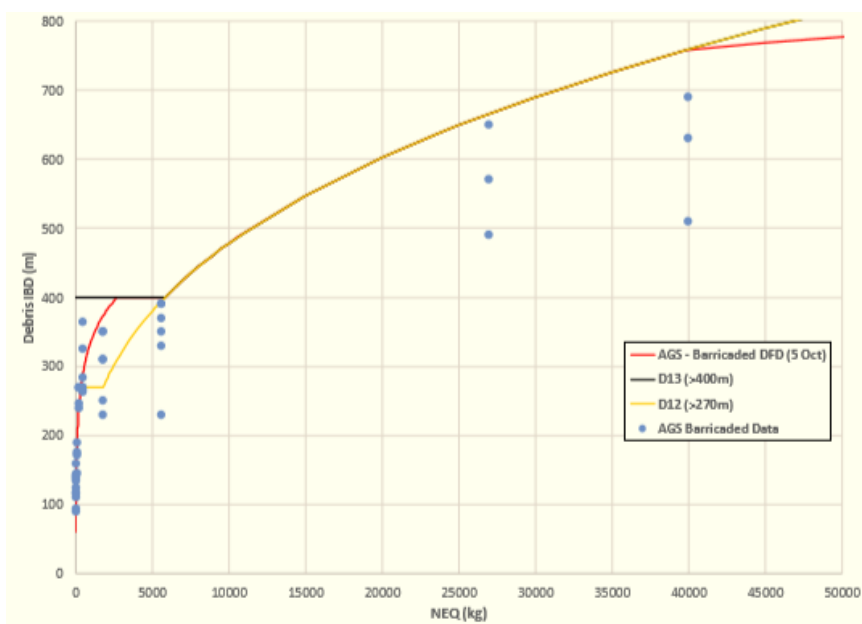


Figure 15 : Z4 (IBD) sur base de données complètes pour des stockages merlonnés

Le retour d'expériences de l'accident MILAN

L'explosion du magasin enterré P-69, *Milan Army Ammunition Plant* a eu lieu le 13 Octobre 2004. Le stockage contenait 2,3 t de Composition A-5 (99% RDX), 2,5 t de poudre double base M2 et 5,7 t de poudre M9. L'origine de l'accident est liée à la manutention de fûts de M9.

Cet accident du fait de ses conséquences tragiques a fait l'objet d'une investigation profonde des services compétents de l'*US Army*.



Figure 16 : Photos du dépôt MILAN après accident

L'analyse approfondie des débris générée par l'explosion révèle que dans de nombreux secteurs angulaires, on reconstitue une probabilité d'atteinte de 1% (Z4, IBD) jusqu'à des distances de 600 m. La portée maximale des débris retrouvés dépasse les 1000 m. Ces résultats seraient à mettre en parallèle avec les zones de danger évaluées par la réglementation française.

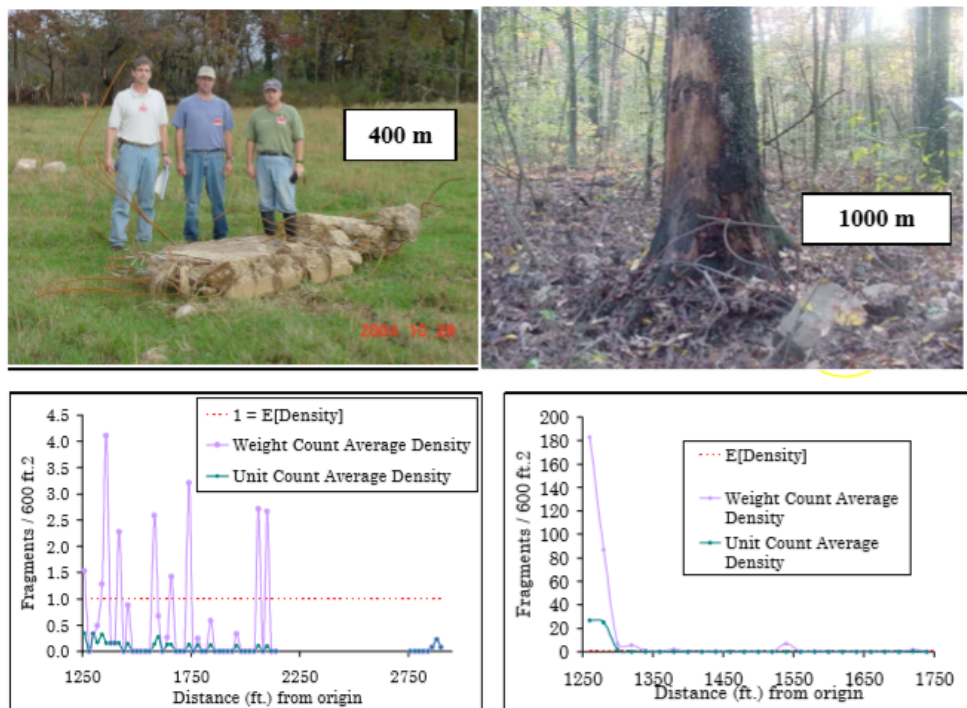


Figure 17 : Cartographie des débris

ANNEXE 6

CALCUL DES ZONES D'EFFETS THERMIQUES – FORMULES 1.3A ou 1.3B

Cette annexe est basée sur les planches de présentation de la réunion IPE – Ineris – SFEPA du 23 novembre 2020.

L'intérêt des formules figurant dans la réglementation actuelle et rappelée au §5.3.1 est de permettre un calcul simple des distances d'effets en fonction de la quantité de matières pyrotechniques présentes.

Rappels des définitions :

- La division 1.3 correspond aux "*Matières ou objets comportant un danger d'incendie avec danger minime par effets de souffle et de projection, mais ne présentant pas de danger d'explosion en masse*";
- Sous-division 1.3a: "*matières ou objets dont la combustion donne lieu à un rayonnement thermique considérable*";
- Sous-division 1.3b: "*matières ou objets qui brûlent assez lentement ou les uns à la suite des autres avec des effets minimes de souffle et de projections*".

Ces définitions de zone de dangers ont été complétées par la circulaire de 1981 qui fixe les seuils d'effets en fonction des phénomènes redoutés (cf. Tableau 13).

Désignation de la zone	Z1	Z2	Z3	Z4
Densité moyenne de flux de chaleur dégagée	15 kW/m ²	6 kW/m ²	-	-

Tableau 13 : Densités de flux thermiques associées aux zones Z1 et Z2 selon la circulaire du 8 mai 1981

Ces valeurs seuils sont indépendantes de la durée d'exposition et ne prennent pas en compte l'effet dose sur les personnes, observé lorsque celles-ci sont exposées aux flux thermiques pendant moins de 1 à 2 minutes.

Enfin, valeurs non techniquement expliquées, et il n'a pas été possible de retrouver les sources documentaires à l'origine de cet aspect de la circulaire de 1981.

Le classement dans les sous-divisions de risques 1.3a et 1.3b se fait selon un logigramme de classement par :

- La vitesse de combustion en gouttière ($1.3b \leq 50 \text{ mm/s} < 1.3a$);
- L'épreuve C de feu extérieur ($1.3b \leq 12 \text{ kW/m}^2 \text{ à } 25 \text{ m} < 1.3a$).

Pourtant, toutes les études et retours d'expériences sur les stockages de poudres ont démontré que les incendies de produits explosifs ont généralement l'allure de la Figure 18.

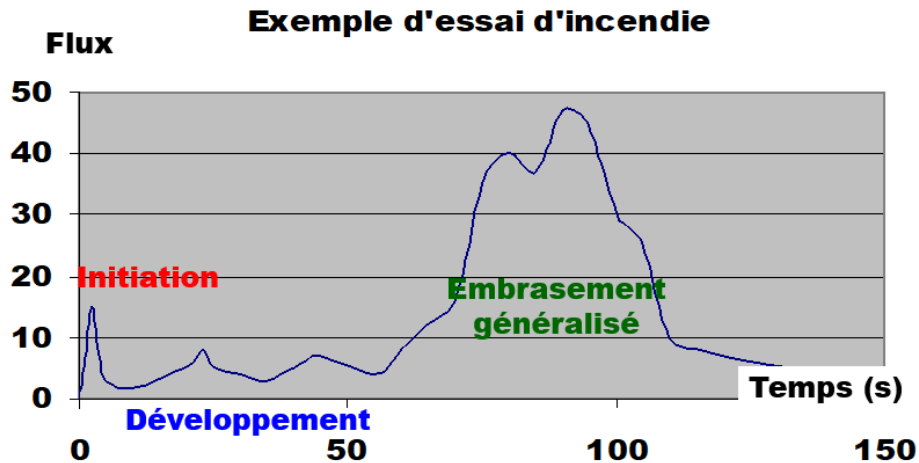


Figure 18 : Allure générale du flux de chaleur en fonction du temps d'un essai d'incendie

La durée de combustion dépend de nombreux facteurs, par exemple :

- La quantité de matières actives ;
- Son « fractionnement » par des contenants et/ou des emballages et le confinement.

La Figure 19 donne une allure générale de la courbe de flux en fonction de la durée de combustion pour plusieurs scénarios d'incendie.

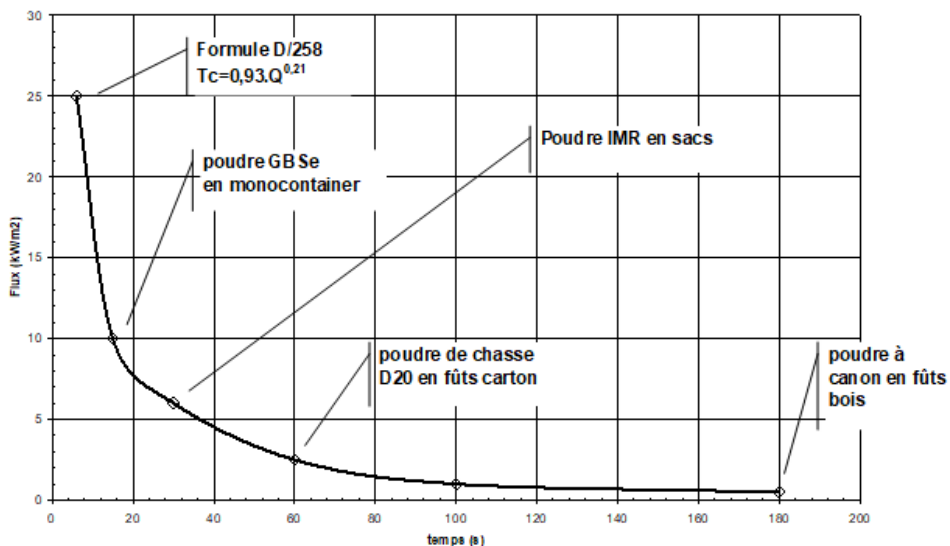


Figure 19 : Comparaison des durées de combustion et de densité de flux radiatifs pour 10 T de diverses poudres conditionnées dans différents emballages

Depuis 1981, de nombreuses études ont été faites par la Société Nationale des Poudres et Explosifs (SNPE, ArianeGroup actuellement) notamment pour définir le classement des matières et objets pyrotechniques dans ces deux sous-divisions.

De ces études, la SNPE concluait :

- La quasi-totalité des matières pyrotechniques relevant de la DR 1.3 appartiennent, de fait, à la sous-division 1.3b. C'est le cas de l'ensemble des poudres pour armes et des propergols solides ;
- En ce qui concerne les poudres pour armes les plus vives, les poudres d'allumages et autres compositions pyrotechniques, celles qui devraient relever de la sous-division 1.3a en raison du flux thermique qu'elles génèrent, sont en définitif classées en DR 1.1 du fait de leur vitesse de combustion supérieure à 400 mm/s et/ou de leur Indice d'Aptitude à la Détonation (IAD) supérieur à 240 cartes. C'est typiquement le cas de la poudre noire, matière déflagrante mais incapable de détoner, classée en DR 1.1.

Dans son Guide de 2015, le SFEPA donne quelques exemples de sous-classements de matières et objets pyrotechniques :

« De façon générale, la sous-division 1.3a caractérise plutôt les effets thermiques produits par la combustion rapide des matières et substances (poudres vives du type poudres d'allumage) alors que la sous-division 1.3b caractérise plutôt les effets de la combustion des objets pyrotechniques ou de matières et substances emballées.

Quelques exemples pour dimensionner les zones d'effets en utilisant les formules des DR :

- Des artifices de divertissement cloisonnés dans un colis brûlent avec une cinétique lente et correspondent de fait aux effets d'une sous-division 1.3b ;
- Une poudre fine va au contraire se décomposer avec une cinétique rapide et une sous-division 1.3a est plus généralement retenue ;
- Un exploitant peut prendre par excès une sous-division 1.3a (par exemple les effets de la flamme d'un propulseur). »

Nota : Ces points, qui concernent le classement des matières dans l'une ou l'autre des sous-divisions de risque 1.3a ou 1.3b, font toujours l'objet de discussions dans différents groupes de travail et ne sont actuellement pas tranchés.

ANNEXE 7 CARACTÉRISTIQUES DE L'ONDE TELLURIQUE

Préliminaire technique :

Aux fins d'analyse des risques, l'évaluation de l'ébranlement tellurique résultant d'une explosion accidentelle dans un magasin de stockage souterrain de munitions doit suivre un processus systématique, prenant en compte tous les facteurs importants qui ont une influence sur la propagation de l'onde tellurique ainsi que les paramètres de cette onde qui ont des effets significatifs sur la réponse des structures. La Figure 20 ci-dessous offre un aperçu de l'analyse permettant de déterminer l'indice des dommages aux bâtiments et, par conséquent, la létalité due à l'ébranlement tellurique.

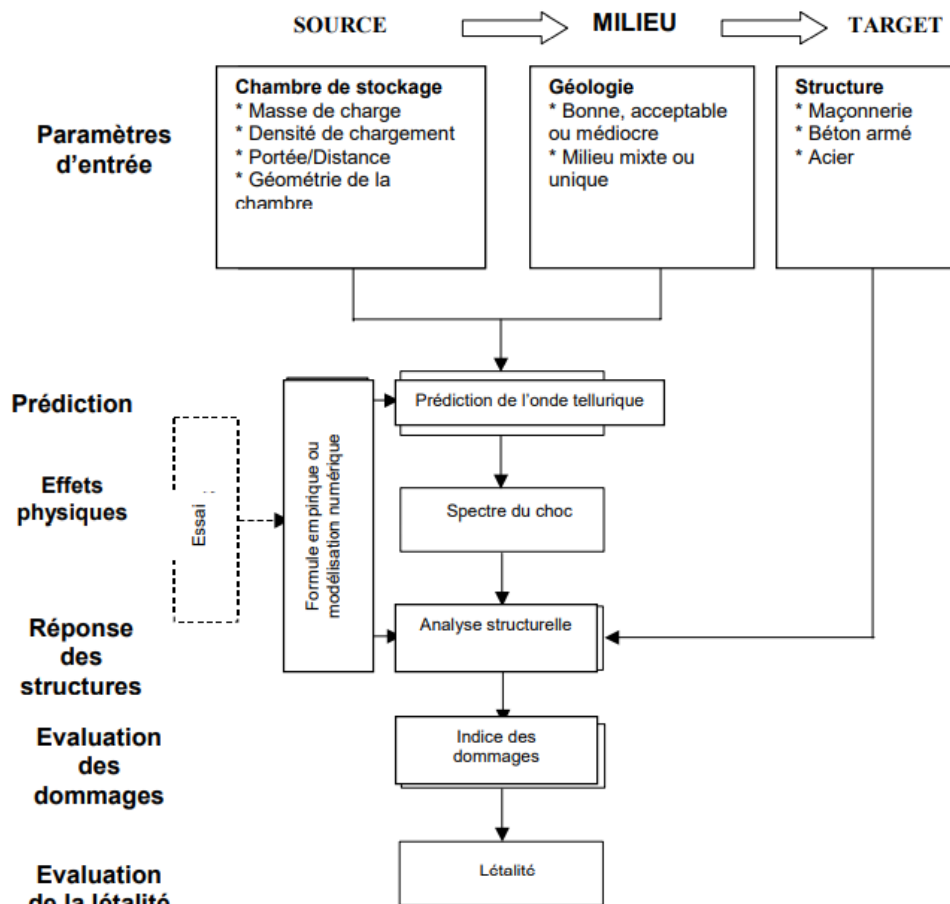


Figure 20 : Processus analytique de détermination de l'indice des dommages et de la létalité dus à l'ébranlement tellurique

Facteurs influençant les effets de l'ébranlement tellurique :

L'ébranlement tellurique dépend principalement des caractéristiques du site et peut être influencé par les facteurs suivants :

- Structure géologique et propriétés de la masse rocheuse ;
- Masse de la charge explosive et portée relative ;
- Densité de chargement de chambre ;
- Distribution de charge et volume de la chambre.

Classification géologique :

La classification géologique présentée dans le Tableau 14 ci-dessous est recommandée pour l'évaluation des paramètres d'onde tellurique. Si le type de roche n'est pas clair, la classification doit reposer sur les propriétés de propagation de l'onde plutôt que sur sa résistance. La densité globale, la vitesse d'onde sismique ainsi que les diaclases et leur orientation constituent les principales propriétés de la masse rocheuse qui ont une influence sur la propagation de l'onde.

Type de roche / Qualité de la masse rocheuse	Gabbro, Gneiss, Granite, Norite, Andésite, Dolérite, Diabase, Rhyolithe, Quartzite, Dolomie, Marbre, Calcaire*, Grès*	Argilite, Microgrès, Schiste bitumeux, Ardoise, Calcaire*, Grès*	Tuf, Craie, Roche Sel, Charbon, Calcaire*, Grès*
Masse rocheuse de bonne à très bonne qualité avec quelques discontinuités non altérées, ou très légèrement Q > 10 RMR > 65 RQD > 75% V _p > 4500 m/s	Bonne	Acceptable	Médiocre
Masse rocheuse de qualité acceptable à bonne avec quelques discontinuités modérément altérées 1 < Q < 10 50 < RMR < 65 50% < RQD < 75% 3500 < V _p < 4500 m/s	Acceptable	Acceptable	Médiocre
Masse rocheuse de qualité médiocre avec de nombreuses diaclases altérées Q < 1 RMR < 50 RQD < 50% V _p < 3500 m/s	Médiocre	Médiocre	Médiocre

Tableau 14 : Classification géologique d'une masse rocheuse

Géologie du site :

La géologie d'un site est, de plus, définie d'après les catégories suivantes :

- Milieu unique - pour lequel le site potentiel d'explosion (PES) et le site exposé (ES) se situent dans la même masse rocheuse ;
- Milieu mixte - où le substratum rocheux est recouvert d'une couche de terre d'épaisseur non négligeable (avec, en général, un rapport d'épaisseurs terre/roche de 0,2), qui a une influence sur la propagation et le contenu fréquentiel de l'onde tellurique qui atteint la structure. De plus, le PES se situe dans la roche qui abrite aussi les chambres de stockage alors que l'ES se situe dans une couverture de terre sur laquelle reposent des bâtiments. Si cette couverture de terre est inférieure à 0,05 fois la distance de transmission ou inférieure à 5 m, la géologie du site peut être assimilée à un milieu unique.

Paramètres de l'onde tellurique :

L'évaluation de l'onde tellurique doit être envisagée en termes d'évaluation de réponse des structures. Une définition complète de l'onde tellurique consiste donc en un spectre de réponses qui peut être obtenu soit de manière empirique, soit de manière analytique. Dans le cadre de cette évaluation de la réponse des structures, les paramètres fondamentaux de l'onde tellurique sont l'amplitude et le contenu fréquentiel. L'amplitude s'exprime souvent en termes de vitesse de particules de crête alors que le contenu fréquentiel peut être assimilée à la fréquence principale. Dans la mesure du possible, les calculs seront effectués de manière à déterminer aussi bien la composante horizontale que la composante verticale de l'onde tellurique.

Evaluation de la vitesse de particules de crête (PPV) et de la fréquence principale (PF) :

La vitesse de particules de crête et la fréquence principale obéissent aux équations suivantes :

$$PPV = A \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-m}$$
$$PF = B \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-n}$$

Où :

- *PPV* est la vitesse de particules de crête (en m/s) ;
- *PF* est la fréquence principale (en Hz) ;
- *R* est la distance radiale (en m) mesurée depuis la paroi de la chambre, le long de la ligne reliant le centre de la chambre au point de la surface terrestre considéré ;
- *Q* est la masse nette de quantité de matière active par détonation (en kg) ;
- *A* et *B* sont les valeurs initiales à portée relative $R/Q^{1/3} = 1$ (en m/s ou Hz) ;
- *m* et *n* sont des coefficients d'atténuation.

Les Tableau 15, Tableau 16 et Tableau 17 ci-dessous fournissent quelques valeurs initiales et coefficients d'atténuation utiles au calcul de la *PPV* et de la fréquence principale *PF*.

A.1 Chambre dont le rapport largeur/longueur vaut 1:2

Géologie : qualité de la roche	Densité de chargement, kg/m ³				m
	5	10	20	50	
	A				
Bonne	0.79	1.08	1.35	1.52	1.23
Acceptable	1.00	1.19	1.40	1.62	1.56
Médiocre	1.00	1.30	1.55	1.82	1.90

A.2 Chambre dont le rapport largeur/longueur vaut 1:4

Géologie : qualité de la roche	Densité de chargement, kg/m ³				m
	5	10	20	50	
	A				
Bonne	0.56	0.75	1.08	1.20	1.23
Acceptable	0.78	1.00	1.23	1.49	1.56
Médiocre	0.78	1.01	1.39	1.64	1.90

Tableau 15 : Calcul de la *PPV* dans un milieu unique

B.1 Chambre dont le rapport largeur/longueur vaut 1:2

Géologie : qualité de la roche	Densité de chargement, kg/m ³				m
	5	10	20	50	
	A				
Bonne	1.14	1.38	1.54	1.77	1.71
Acceptable	1.41	1.69	2.01	2.37	2.01
Médiocre	1.89	2.32	2.60	2.96	2.34

B.2 Chambre dont le rapport largeur/longueur vaut 1:4

Géologie : qualité de la roche	Densité de chargement, kg/m ³				m
	5	10	20	50	
	A				
Bonne	1.08	1.29	1.45	1.70	1.71
Acceptable	1.20	1.62	1.85	2.13	2.01
Médiocre	1.78	2.10	2.47	2.77	2.34

Rappel : Vitesse de particules de crête, $PPV = A (R/Q)^{1/3} \cdot m^{-n}$

Tableau 16 : Calcul de la PPV dans un milieu mixte

Géologie et géométrie de la chambre	Densité de chargement, kg/m ³				n
	5	10	20	50	
	B, Hz				
Milieu unique					
Chambre dont le rapport largeur/longueur vaut 1:2	85	76	72	65	0.84
Chambre dont le rapport largeur/longueur vaut 1:4	96	86	79	73	
Milieu mixte					
	Densité de chargement, kg/m ³				n
	5	10	20	50	
	B, Hz				
Chambre dont le rapport largeur/longueur est compris entre 1:2 et 1:4	64	61	51	45	0.67

Rappel : Fréquence principale, $PF = B (R/Q)^{1/3} \cdot n^{-n}$

Tableau 17 : Valeurs initiales (B) et des coefficients d'atténuation (n) utiles au calcul de la PF

Les présents modèles d'équations ne s'appliquent que jusqu'à des charges pesant 500 t et pour des chambres de longueur comprise entre 45 et 120 m, de 50 000 m³ de volume maximum et de rapport largeur/longueur compris entre 1/2 et 1/4.

Par ailleurs, la densité de chargement maximale considérée est de 50 kg/m³, avec une couverture rocheuse, ou couverture équivalente, d'environ $1 \cdot Q^{1/3}$ m. Il est, de plus, possible d'envisager des interpolations entre les valeurs recommandées pour des conditions de stockage différentes.

Dans le cas de sites de stockage où la couverture rocheuse, ou équivalente, est inférieure à $1 \cdot Q^{1/3}$ m, les équations associées aux tableaux précédents ne doivent pas être utilisées pour déterminer les paramètres de l'onde tellurique à une portée relative inférieure à 1 m/kg^{1/3}.

Essais d'ébranlement tellurique :

En cas de recours à des données et modèles spécifiques au site pour la détermination de l'onde tellurique, il convient de réaliser les différents essais dans des conditions géologiques représentatives du site, avec une distribution de charge et une géologie de chambre similaires à celles du site. Ces essais devront notamment être réalisés avec la masse de charge maximum, puis, avec un certain nombre d'autres cas de charge.

Modélisation numérique :

En présence de géologie complexe ou en vue d'une évaluation plus précise de l'onde tellurique, des modèles numériques peuvent être appliqués à condition d'avoir été validés par des données qualitatives en milieux géologiques appropriés. Par ailleurs, des codes hydrodynamiques convenablement étalonnés peuvent également être utilisés pour modéliser l'explosion dans la chambre de détonation.

Sollicitations exercées par des charges enveloppées :

Les valeurs obtenues pour l'onde tellurique avec des charges enveloppées sont généralement inférieures à celles de charges nues, en raison de nombreux facteurs tels que le type d'explosifs et de munitions. En l'absence de tout facteur de réduction connu, il est recommandé d'utiliser la quantité nette d'explosifs (NEQ) pour la détermination de l'onde tellurique.

Onde tellurique induite par le souffle :

En général, l'onde tellurique induite par le souffle est moins intense que l'onde tellurique directe. Dans le cas de soupçons contraires, des essais ou des calculs numériques doivent être réalisés pour confirmer les paramètres de sollicitation de l'onde tellurique. La vibration des bâtiments provoquée par les sollicitations du souffle ne doit pas être considérée comme une onde tellurique et doit donc faire l'objet d'une étude indépendante.

ANNEXE 8

LE PROJET ESKIMORE (EXPLOSIVES SAFETY KNOWLEDGE IMPROVEMENT OPERATION REDUX)

En 2002, l'*Explosive Safety Board* du DoD aux États-Unis (DDESB), a lancé une campagne d'expérimentations à grande échelle pour étudier la représentativité des distances d'éloignement traditionnellement utilisées dans la réglementation de sécurité pyrotechnique et alimenter en données les outils d'évaluation quantitatif du risque pyrotechnique développés au même moment.

Cette campagne d'essais s'est initialement focalisée sur des expérimentations à grande échelle permettant de caractériser :

- La génération de débris par des installations donneuses soumises à des explosions en masse et la tenue à l'onde de choc de structures receveuses potentielles ;
- Les capacités de pénétration/perforation des débris issus de l'explosion du donneur au niveau du toit et des murs des structures receveuses.

Par la suite, ce programme expérimental majeur a été étendu pour traiter d'autres points de sécurité pyrotechnique faisant l'objet de connaissances lacunaires. En 2006, il a été formalisé sous la forme du projet à long terme. Concernant la participation d'autres organisations, spécifiquement des pays de l'OTAN, elle a été au cœur du projet compte tenu des moyens financiers importants à mobiliser. Les Britanniques et les Australiens ont été actifs, ces derniers bénéficiant de grandes étendues permettant de faire des expérimentations jusqu'à plusieurs dizaines de tonnes de matière active (Woomera, sud de l'Australie).

Destinataires :

- INERIS/DG (à l'attention de M. Raymond COINTE)
- INERIS/PYRO (à l'attention de M. Lionel AUFAUVRE et Mme Sylvie BODIN-REMOND)
- MTE/DGPR/SRT/SDRA/BRIEC (à l'attention de M. Sylvain VERGAERT)
- TRA/DGT (à l'attention de Mme Gwennaëlle TOUZALIN)

Diffusion intérieure :

- ARM/DGA/INSP/IPE (à l'attention de l'IGHCA Françoise LÉVÊQUE)
- ARM/DGA/INSP/IPE/SECUMUN-SM (à l'attention de l'ICA Serge BORDACHAR et l'IETA Joffrey DUCHON)
- ARM/DGA/INSP/IPE/SECUPYRO-SP (à l'attention de l'ICETA1 Jean-Marc LEVEAU)
- ARM/DGA/DT/ST Pôle MAN (à l'attention de l'ICETA1 Pascal MARCHANDIN)