

Nota : c'est une banque de données "vivante" ; les calculs d'actualisation étant effectués au fur et mesure du recueil de nouvelles observations. Elle peut aussi servir de support pour la création de nouvelles bases de données

Autre difficulté : la modélisation du vieillissement des matériels.

En effet, pour déterminer des paramètres de fiabilité variables avec le temps ou avec la sollicitation, (lois de Weibull, lois Gamma ou Bêta), on doit effectuer une intégration numérique à deux dimensions du produit des densités *a priori* et de la fonction de vraisemblance : en fonction de leur informativité, les densités *a priori* associées à ces lois sont des lois Uniformes, des histogrammes, des lois Normale-Log-Normale, ou des avis d'experts exprimés sous forme de cote logarithmique (module logiciel IBM). L'utilisation de logiciels dédiés est indispensable dans ces cas.

Le premier type de logiciel permet de déterminer les paramètres de forme (indicateur de la cinétique de vieillissement) et d'échelle (indicateur de la durée de vie caractéristique) de la loi de vieillissement, comme par exemple ceux de la loi de Weibull ou de la loi Gamma. A partir de ces paramètres, on peut déduire l'évolution prévisionnelle du taux de défaillance ou de la probabilité de défaillance à la sollicitation du matériel en fonction du temps ou des sollicitations. Ainsi, le logiciel IBW3 (Inférence Bayésienne de Weibull, version 3) (Siadcom) est intéressant car il permet de calculer les deux paramètres de la loi de Weibull dans le cas de l'ob-

servation d'un très faible nombre de défaillances (voire zéro), alors que les autres logiciels de ce type tel "Durée de vie" (EDF-Inria-Siadcom) nécessitent le recueil d'au moins deux défaillances. L'interrogation d'experts permet en effet de compenser le manque d'information du retour d'expérience. En fonction des connaissances de ces derniers, on élicite des distributions *a priori* non informatives impropres – c'est-à-dire des distributions uniformes ou des histogrammes sur chacun des paramètres – ou des distributions informatives propres : la loi de Weibull pour le paramètre d'échelle et la loi Bêta pour le paramètre de forme.

Dans les deux cas, les experts peuvent visualiser graphiquement leur choix et effectuer des études de sensibilité interactivement.

Le deuxième type de logiciel tel IBTV (Inférence Bayésienne du Temps de Vieillessement) (EDF-ENEA-Siadcom) permet de calculer le moment d'initiation du vieillissement des matériels ou installations. Cette information est importante pour programmer les actions de maintenance préventive ou de maintenance exceptionnelle permettant de rénover, et de rajeunir les matériels. Ce logiciel représente le vieillissement sous forme d'une augmentation en échelon du taux de défaillance. Il détermine l'apparition d'une accumulation de défaillances lorsque le matériel ou l'installation atteint sa durée de vie moyenne. Contrairement à IBW3, il nécessite le recueil d'un nombre impor-

tant de défaillances pour mettre en évidence l'initiation du vieillissement.

Le logiciel IBTV comprend le module d'expertise IBM afin d'estimer la probabilité de succès de ces actions de prévention, et vérifie le bien fondé de l'expertise dès qu'un nouveau retour d'expérience devient disponible.

Des solutions existantes. Les logiciels présentés ici montrent que les difficultés majeures de la démarche bayésienne :

- choix de la densité *a priori*,
- élicitation (recueil), pondération, agrégation et modélisation de l'expertise,
- calcul de la densité *a posteriori* pour des paramètres constants ou variables,

sont maintenant totalement résolues.

Compte tenu de l'intérêt de cette démarche lorsque les défaillances sont rares, lorsque des modifications (de maintenance, de conception, d'exploitation) font que le futur ne sera pas à l'image du passé, ou enfin lorsque la seule source de connaissance est l'expertise, ces logiciels doivent maintenant faire partie de la panoplie des outils de tout ingénieur fiabiliste.

Henri Procaccia

Directeur ESReDA,

membre du réseau IMdR-SdF

[1] A. Lannoy, H. Procaccia – *L'utilisation du jugement d'expert en Sécurité de Fonctionnement*. Collection Lavoisier, Editions Tec & Doc, 2001.

[2] M. Procaccia, Siadcom : Expert ETD, rapport Ineris 0305, 2005. siadcom@siadcom.com

4

RECHERCHE

Le modèle de Sedov-Taylor et les zones de danger dans les installations pyrotechniques

Le modèle de Sedov-Taylor utilisé pour décrire les ondes de chocs sphériques pourrait être un modèle physique de base permettant de définir des zones de danger de manière analogue à ce qui a été proposé par l'Arrêté du 26 septembre 1980 fixant les règles de détermination des distances d'isolement relatives aux installations pyrotechniques. Il est intéressant d'analyser comment un outil aussi simple peut aider à établir les conséquences d'une explosion, dans diverses situations du domaine des risques industriels.

A lors qu'une évolution de la législation dans le domaine des ICPE (Installations classées pour la protection de l'environnement) conduira à moyenne échéance à une modification de l'approche du calcul des zones, un rapprochement entre le comportement d'une torche à plasma impulsioneuse et une explosion pyrotechnique a été fait lors de la thèse de

Jean Caillard en collaboration entre le laboratoire LASEP et GIAT Industries (thèse cofinancée par GIAT Industries et la Région Centre).

Le modèle de Sedov-Taylor. Le très élégant modèle de Sedov-Taylor décrivant l'évolution d'ondes de chocs fut d'abord développé pour être appliqué aux explosions fortes (bombes atomiques). Ce modèle, décrit superficielle-

ment par G. I. Taylor en 1941, fut clairement établi par L. Sedov en 1946, puis plus tard par J. von Neumann en 1947. La présentation la plus claire en revient à L. Landau dont l'ouvrage est systématiquement cité, même dans les plus récents. Actuellement, ce modèle est utilisé en astrophysique (explosions de supernovae), mais aussi pour interpréter des phénomènes d'ablation de maté-

riaux à partir de pulses lasers intenses ou encore pour interpréter des expériences d'explosions de fils électriques soumis à des pulses de courant intenses. Ce modèle n'avait pas, jusqu'ici, été utilisé pour des explosions chimiques, de produits de la division de risque I.I.

Les hypothèses. Considérons un milieu gazeux à la pression ambiante p_1 , assimilé à un gaz parfait en équilibre thermodynamique de masse volumique ρ et de rapport des chaleurs spécifiques γ ($\gamma = 1.4$ pour l'air). Pour générer une onde de choc sphérique, une énergie E est déposée instantanément dans le milieu ambiant au repos à un instant $t = 0$ pris comme référence des temps. L'énergie initiale déposée produit une onde de choc sphérique dont le rayon R évolue avec le temps t . L'analyse faite par la suite est réalisée à des distances suffisamment faibles pour que l'effet de l'onde de choc ne soit pas dans sa phase asymptotique, mais suffisamment grandes pour que l'on puisse supposer que le dépôt de l'énergie E s'est fait ponctuellement. Dans ce cas, la surpression p_2 juste derrière la discontinuité sphérique de rayon R produite par l'explosion est très grande devant la pression ambiante p_1 , et il est tout à fait justifié de négliger la pression p_1 face à la surpression p_2 .

Surpression et évolution du rayon de l'onde de choc en fonction du temps. Les équations du modèle de Sedov-Taylor proposées dans la littérature donnent l'expression de la surpression p_2 , et de l'évolution de R en fonction du temps :

$$R(t) = \beta \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/5} t^{2/5}$$

$$p_2 = \frac{8\beta^2}{25\gamma + 1} \rho^{3/5} E^{2/5} t^{-6/5}$$

où $\gamma = 1.033$ pour de l'air. En éliminant le paramètre temps des équations, il est simple d'établir la relation donnant la surpression p_2 en fonction de R :

$$p_2 = \frac{8\beta^5 E}{25\gamma + 1 R^3}$$

qui devient avec R (m), E (J) et p_2 (Pa) :

$$p_2 = 0.1568 \frac{E}{R^3} \quad (1)$$

Les zones de danger dans les installations pyrotechniques. Cette dernière relation permet de calculer la surpression p_2 en fonction de R si la valeur de E est connue. A partir des effets et conséquences de la surpression p_2 donnés dans le tableau 1, il est possible de définir des zones de danger en connaissant la valeur de E .

L'arrêté du 26 septembre 1980 introduit 5 zones Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 et Z_5 dans les-

Tableau 1 – Conséquences de surpressions générées par des ondes de choc

| Valeur de la surpression | Représentation sur la figure 1 | Conséquences |
|--------------------------|--------------------------------|---|
| 34.5 kPa | Point A | La plupart des constructions complètement détruites. |
| 20.7 kPa | Point B | Destruction totale des murs non renforcés des constructions. |
| 6.9 kPa | Point C | Limite supérieure de la résistance aux ondes de chocs de la plupart des constructions ordinaires. La plupart des maisons ordinaires sont rendues inhabitables. Personnes renversées par l'onde de choc. |
| 1.0 kPa | Point D | Limite typique des bris de vitres. |

Tableau 2 – Extrait de l'Arrêté du 26 septembre 1980 fixant les règles de détermination des distances d'isolement relatives aux installations pyrotechniques (JO 2 octobre 1980).

| Désignation de la zone | Z1 | Z2 | Z3 | Z4 | Z5 |
|------------------------------------|---|---|-------------------------|---------------------------|--|
| Dommages 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 |
| Distance R à la charge de masse | $0 < R \leq 5Q^{1/3}$ | $< R \leq 8Q^{1/3}$ | $< R \leq 15Q^{1/3}$ | $< R \leq 22Q^{1/3}$ | $< R \leq 44Q^{1/3}$ |

quelles les dommages sont qualitativement évalués. Pour chacune des zones, la distance R à la charge Q (kg) est donnée par des relations de la forme :

$$R_Z = A_Z Q^{1/3} \quad (2)$$

où chaque valeur de la constante A_Z est spécifique à une zone.

Il convient de remarquer que la relation (1) donne également accès à une relation donnant R en fonction de E :

$$R = 0.54 \frac{E^{1/3}}{p_2^{1/3}} \quad (3)$$

Les relations (2) et (3) sont identiques, mais la relation (2) est moins riche que (3) car la constante A_Z inclut la valeur de la surpression p_2 , ainsi que le pouvoir énergétique de l'explosif utilisé.

Nous avons décidé d'appliquer les relations (2) et (3) dans le cas de la détonation d'une charge de 10 kg de TNT, sachant que 1 kg de TNT libère une énergie de 4.18 MJ. La surpression p_2 en

fonction de R est représentée sur la figure 1. Les points A, B, C, D figurant dans le tableau 1 ont été placés sur la figure. On remarque que les points A, B et C sont localisés dans la zone Z_1 , et que le point D délimite la limite supérieure de la zone Z_2 . Le tableau 2 reprend les conséquences généralement observées pour les matériels et les personnels dans les différentes zones.

Conclusion. Le modèle de Sedov-Taylor est une base physique indéniable avec des hypothèses très simples permettant d'évaluer les surpressions générées par des ondes de choc. Cette présentation a été focalisée sur des ondes de choc sphériques, mais d'autres géométries (linéaire, plane) sont disponibles dans la littérature. Enfin, il convient de souligner que le modèle ne prend absolument pas en compte les effets de réflexion des ondes de chocs sur les obstacles. Toutefois, le modèle permet de fournir une base physique aux constantes A_Z qui figurent dans la relation de base utilisée pour définir les zones de danger de l'Arrêté du 26 septembre 1980.

Charles de Izarra, Olivier Vallée
(Université d'Orléans, LASEP)
Luc Brunet (CNRI)
et Jean Caillard (Giat Industries),
tous membres du réseau CNRI

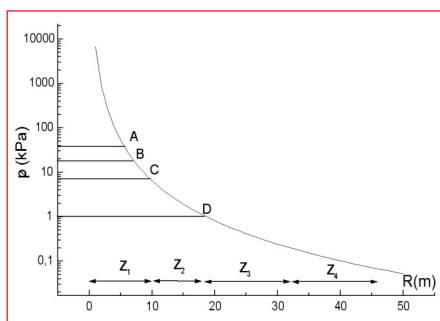


Figure 1 : pression p_2 en fonction de la distance pour la détonation d'une masse de 10 kg de TNT (zones de dangers représentées sur la figure).

LASEP : Laboratoire d'Analyse Spectroscopique et d'Energétique des Plasmas (UPRES-EA 3269 Université d'Orléans)
<http://www.univ-orleans.fr/lasep/>