

## Impact d'une onde de choc sur une structure cylindrique

Sophie Trélat<sup>\*</sup>, Isabelle Sochet et Khaled Chetehouna

LEES, Laboratoire Energétique Explosions Structures, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Bourges, 88  
boulevard Lahitolle 18020 Bourges cedex, France  
<sup>\*</sup> sophie.trelat@ensi-bourges.fr

### Résumé :

*Dans un contexte de sécurité industrielle, il est important de connaître les caractéristiques de l'onde de souffle consécutive à une explosion d'origine quelconque, lorsque cette explosion se produit à proximité d'un bâtiment, ceci dans le but de protéger les installations et le personnel. Pour cela, une approche expérimentale est envisagée. L'objectif du présent travail est de définir des modèles de chargements appliqués à une structure de forme cylindrique rencontrée dans l'industrie et susceptible de subir une explosion à proximité des murs mais pas à leur contact. Cet objectif est poursuivi de manière originale à travers la réalisation d'essais d'explosions de gaz menés en laboratoire. Un certain nombre de lois sont exprimées et validées par les expériences. Des simulations numériques sont réalisées en parallèle à l'aide du code Autodyn, et une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux est obtenue.*

### Abstract:

*In an industrial safety context, it is important to know blast characteristics whenever an explosion occurs near a building. The experimental investigation is achieved by means of small-scale experiments using a propane-oxygen stoichiometric mixture as explosive. This approach is original because it aims at modeling high explosive detonation by gaseous charge explosion using an equivalent TNT. Several adimensional laws are expressed and validated by experiments. These relationships allow determining the propagation of a blast wave and its interaction on a cylindrical structure by the function of the position of the explosive charge when the explosion happens at ground level. Simulations are achieved with the Autodyn code, and a good correlation with experimental results is obtained.*

### Mots-clefs :

**Onde de choc, structure cylindrique, équivalent TNT.**

## 1 Introduction

Le travail présenté dans ce papier s'inscrit dans le cadre des études relatives à la vulnérabilité d'une structure cylindrique face à la détonation de substances explosives.

L'objectif est de proposer des outils afin de prédire les chargements appliqués à cette structure. Cet objectif est poursuivi à travers la réalisation d'essais menés en laboratoire. Ces essais simulent une forte explosion ayant lieu au sol. Cette étude consiste donc en premier lieu à recueillir des données expérimentales sur les effets de pression d'ondes de choc rencontrant un obstacle de forme cylindrique. Un point important est la validation d'une équivalence entre le TNT et le gaz utilisé dans les expériences, afin de permettre au final de modéliser par le biais d'explosion de gaz à petite échelle mais également à l'aide d'un code de dynamique des fluides Autodyn, des explosions de TNT à la même échelle que les expériences.

## 2 Dispositif expérimental

Le programme expérimental est réalisé à l'échelle de laboratoire dans les conditions standards de température et de pression. Le gaz détonant (mélange stœchiométrique propane-oxygène) est confiné dans une demi bulle de savon (étoile rouge sur FIG. 1) de rayon  $R_0$  ( $R_0 = 2,6$  et  $4,1$  cm) et contenant une énergie  $E$ , formée au niveau du sol, à une distance normale  $r$  de 10 cm de la structure

cylindrique (FIG. 1). Le cylindre étudié est un cylindre régulier, c'est-à-dire que sa hauteur est égale à son diamètre qui vaut 36 cm (FIG. 1).

La détonation est initiée à l'aide d'un système d'amorçage constitué de deux électrodes situées au centre de la charge explosive et d'un dispositif haute tension (Trélat, 2006). Trois capteurs de pression  $F_1$ ,  $F_2$  et  $F_3$  sont disposés sur la structure comme l'indique le schéma de la figure 1.  $F_2$  est situé à mi-hauteur du cylindre, c'est-à-dire à 18 cm du sol, et  $F_2F_3 = F_2F_1 = 15$  cm. L'angle  $\beta$  est l'angle de rotation du cylindre, il est défini par rapport à la génératrice centrale du cylindre passant par  $T_0$ . Par exemple, les capteurs  $F_1$ ,  $F_2$  et  $F_3$  visibles sur la figure 1 correspondent à un angle  $\beta$  égal à 0. Les expériences sont réalisées pour des angles  $\beta$  égaux à 0,  $-\pi/8$ ,  $-\pi/4$ ,  $-3\pi/8$  et  $-\pi/2$ . Ceci permettra d'étudier la répartition du champ de pression réfléchi par toute la face avant du cylindre, qui est directement exposée à l'explosion.

Des oscilloscopes numériques permettent de visualiser et d'acquérir les signaux de pression amplifiés par les amplificateurs de charge reliés aux capteurs. Les signaux de pression enregistrés peuvent ensuite être traités par voie informatique.

On note qu'afin d'éliminer la fraction bruitée des signaux étudiés, plusieurs types de filtres « passe-bas » sont généralement utilisés (Butterworth, Bessel, Chebyshev, ... etc), le filtre de Butterworth fait partie des algorithmes les plus fréquemment employés. Les fonctions de Butterworth utilisées ici pour réaliser le filtrage ont une réponse en amplitude de la forme (Bellanger, 1998) :

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2m}}$$

Dans cette relation,  $m$  est l'ordre du filtre choisi égal à 2 et  $f, f_c$  sont respectivement la fréquence et la fréquence de coupure.

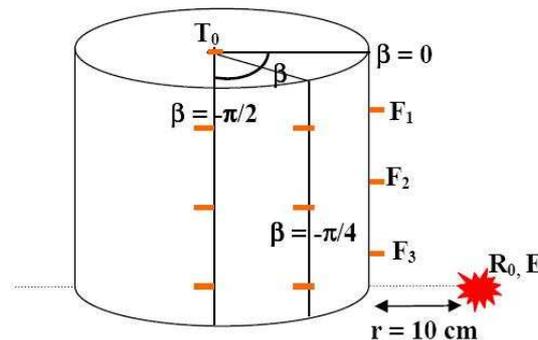


FIG. 1 – L'obstacle cylindrique et la position des capteurs de pression.

### 3 Approche numérique

Le logiciel utilisé dans notre étude est Autodyn Version 6. Il permet de simuler le comportement de solides, fluides ou de gaz sous des chargements très rapides. Ce logiciel combine plusieurs techniques numériques adaptées à trois grands types de problèmes : impacts et perforations, explosions et ondes de choc en milieu aérien, interaction entre une onde de choc et une structure.

#### 3.1 Equations d'état

Dans notre travail, l'explosif TNT est décrit par l'équation d'état de Johns, Wilkins et Lee qui est la forme d'équation la plus rencontrée en ce qui concerne les produits de détonation, elle est habituellement utilisée pour des pressions allant jusqu'à 100 MPa :

$$P = A \left(1 - \frac{w}{R_1 v}\right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 v}\right) e^{-R_2 v} + \frac{w E v_0}{v^2}$$

où  $v$  est le volume spécifique,  $E$  ( $J.kg^{-1}$ ) l'énergie interne spécifique des produits de détonation,  $v_0 = 1/\rho_0$  et  $A, B, R_1, R_2, w$  sont des constantes ajustables.

Pour l'explosif TNT, on a  $A = 3,7377 \times 10^8$  kPa;  $B = 3,7471 \times 10^6$  kPa ;  $R_1 = 4,15$  ;  $R_2 = 0,90$  ;  $w = 0,35$  et  $\rho_0 = 1,63$  g/cm<sup>3</sup>. Ici  $v$  est exprimé en cm<sup>3</sup> / g et  $P$  en Pa.

L'air modélisant le milieu environnant est décrit par l'équation des gaz parfaits qui s'écrit de manière générale :

$$P = \frac{nRT}{V}$$

où  $P$  est la pression (Pa),  $n$  le nombre de moles (mol),  $R$  la constante du gaz parfait ( $R = 8,314$  J · K<sup>-1</sup> · mol<sup>-1</sup>),  $T$  la température absolue (K) et  $V$  le volume (m<sup>3</sup>)

Elle peut s'écrire encore :

$$P = (\gamma - 1)\rho E$$

où  $\gamma$  est le rapport des chaleurs spécifiques,  $\rho$  la masse volumique et  $E$  l'énergie interne spécifique.

On a pour l'air :  $\gamma = 1,4$ ,  $\rho = 1,225 \times 10^{-3}$  g / cm<sup>3</sup> et  $E = 2,068 \times 10^5$  J.kg<sup>-1</sup>.

### 3.2 Equivalence énergétique

Autodyn permet de simuler la propagation d'une onde de choc consécutive à la détonation d'une charge solide de TNT, en milieu aérien, à proximité des murs d'une structure.

Une équivalence énergétique a pu être établie (Trélat *et al.*, 2003) sur la plage des distances radiales réduites  $\lambda$  appartenant à [0,29 – 15] (m.MJ<sup>-1/3</sup>) entre le gaz utilisé dans les expériences (mélange propane-oxygène en proportions stoechiométriques) et le TNT, explosif de référence (Baker *et al.*, 1983), permettant ainsi de pouvoir calculer la masse équivalente de TNT engendrant les mêmes effets mécaniques que la masse de la charge gazeuse expérimentale.

Cette équivalence énergétique traduit l'énergie  $E_{gaz}$  (MJ/m<sup>3</sup>) résultant de la détonation de la charge gazeuse en terme d'équivalent TNT :

$$E_{gaz} = 2,35 E_{TNT}$$

La valeur de l'équivalence est de 2,35 ce qui signifie que les mêmes effets mécaniques ont lieu aux mêmes abscisses radiales si l'énergie de la charge gazeuse est 2,35 fois plus grande que celle de la charge de TNT.

L'équivalence énergétique peut être traduite également en terme de charge équivalente (Dewey, 2004) de TNT, comme ceci :

$$0,5 E_{Sphérique} \times E_{v,gaz} = 2,35 E_{TNT}$$

soit :

$$\frac{2}{3} \pi R_0^3 \left( \frac{\Delta H_R^*}{n_T V_{mol}} \right) = 2,35 m_{TNT} E_{TNTmasse}$$

avec  $V_{Sphérique}$  le volume de la charge gazeuse sphérique,  $V_{mol}$  le volume molaire de gaz ( $V_{mol} = 22,4$  L/mol),  $E_{TNTmasse} = 4,6$  kJ/kg l'énergie massique du TNT,  $\Delta H_R^*$  (15,2 MJ/m<sup>3</sup>) (Trélat *et al.*, 2003) l'enthalpie de la réaction globale du mélange gazeux  $C_3H_8 + 5O_2$ ,  $n_T$  le nombre de moles de la réaction globale du mélange gazeux  $C_3H_8 + 5O_2$  ( $n_T = 6$  moles),  $R_0$  le rayon de la charge gazeuse et  $m_{TNT}$  la masse équivalente de TNT.

Par exemple, pour un confinement hémisphérique gazeux de rayon 0,04 m, la masse équivalente de TNT est de 0,01882 g compte tenu de l'équivalence énergétique citée ci-dessus.

### 3.3 Analyse numérique

Chaque analyse de ce type est réalisée en deux étapes : tout d'abord, la détonation de la charge de TNT et la propagation initiale de l'onde de choc consécutive à cette détonation sont modélisées en 1D avant que l'interaction avec la structure cylindrique ne se produise. Ensuite, la seconde étape consiste à appliquer la technique du « remapping » (Autodyn, 2005). Le « remapping » est une technique permettant d'utiliser les solutions du calcul initial effectué en 1D et de les imposer à toutes les régions ou à une région particulière d'un second modèle 3D prenant en compte la structure cylindrique.

Le schéma d'intégration numérique utilisé est l'algorithme d'Euler-FCT (Flux-Corrected-Transport ou flux du transport corrigé), qui est particulièrement recommandé lors des analyses de propagation d'un choc.

Des conditions dites « outflow » sont définies sur les parois extérieures des modèles 1D et 3D, ce qui signifie que le fluide peut s'étendre en dehors du modèle étudié comme s'il n'y avait pas de frontière.

La structure cylindrique est dite rigide : elle est considérée comme indéformable.

La taille des éléments choisie pour le modèle 3D est de 5 mm × 5 mm × 5 mm.

#### 4 Résultats et discussion

La répartition du champ de pression réfléchi par la face avant du cylindre directement exposée à l'explosion est étudiée en fonction des paramètres expérimentaux suivants : le rayon de la charge explosive  $R_0$  (m) et par conséquent l'énergie  $E$  (J) contenue dans la charge, la distance radiale réduite  $\lambda(\text{m} \cdot \text{MJ}^{-1/3}) = R/E^{1/3}$  (avec  $R$  (m) la distance entre le centre de l'explosion et le capteur de pression) et l'angle  $\beta$ .

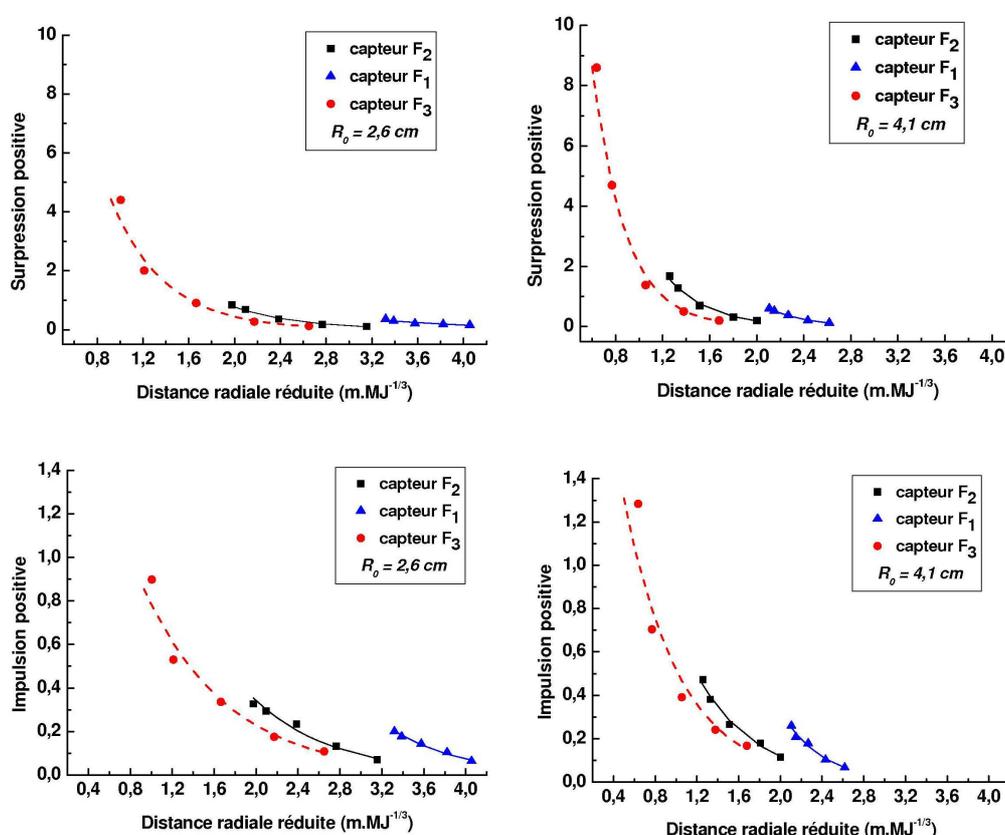


FIG. 2 – Pics de surpression  $\Delta P^+/P_0$  et impulsions positives  $I^+/E^{1/3}$  (bar.ms.MJ<sup>-1/3</sup>) réfléchies par la face avant du cylindre en fonction de la distance radiale réduite  $\lambda$  (m.MJ<sup>-1/3</sup>) pour deux tailles de confinement ( $R_0 = 2,6 \text{ cm} - E = 1,12 \text{ kJ}$  et  $R_0 = 4,1 \text{ cm} - E = 4,4 \text{ kJ}$ ).

Les évolutions de surpression positive et d'impulsion positive (ramenée à la racine cubique de l'énergie  $E$  contenue dans la charge explosive) sont représentées sur la figure 2 en fonction de la distance radiale réduite pour les trois capteurs, pour les cinq valeurs de  $\beta$  et pour deux tailles de confinements ( $R_0 = 2,6 \text{ cm}$  et  $R_0 = 4,1 \text{ cm}$ ). On observe que les évolutions des pics de surpression et des impulsions sont de forme exponentielle pour chacun des capteurs.

Les résultats de ces expériences peuvent alors être corrélés de la manière suivante :

$$y = a e^{-kx}$$

$$y = \Delta P^+/P_0 \text{ ou } y = I^+/E^{1/3} \text{ et } x = \lambda \text{ (m.MJ}^{-1/3}\text{)}$$

Pour chacun des paramètres surpression et impulsion, et pour deux tailles de confinement ( $R_0 = 2,6$  cm et  $E = 1,12$  kJ ;  $R_0 = 4,1$  cm et  $E = 4,4$  kJ), les valeurs des constantes  $a$  et  $k$  sont données dans le tableau 1.

Les tableaux 2 et 3 présentent enfin les résultats obtenus avec Autodyn pour la même géométrie expérimentale, avec une charge équivalente de TNT détonant à une distance normale de 10 cm du cylindre. L'erreur entre les résultats numériques et expérimentaux est calculée et reportée dans ces tableaux : on peut aisément constater que les résultats des expérimentations sont en très bon accord avec les résultats numériques, compte tenu d'une erreur pour les surpressions et les impulsions positives comprise entre 7,5 et 13,1 %.

	$y = \Delta P^+ / P_0$		$Y = \Gamma^+ / E^{1/3}$		
	$A$	$K$	$A$	$k$	
$F_1$	11,38	1,08	29,02	1,49	$R_0 = 2,6$ cm
	494,68	3,19	58,25	2,59	$R_0 = 4,1$ cm
$F_2$	27,07	1,78	4,70	1,31	$R_0 = 2,6$ cm
	58,47	2,88	4,27	1,79	$R_0 = 4,1$ cm
$F_3$	31,75	2,14	2,70	1,24	$R_0 = 2,6$ cm
	74,27	3,59	3,30	1,85	$R_0 = 4,1$ cm

TAB. 1 – Lois caractéristiques des surpressions et impulsions exprimées en fonction de  $\lambda$ .

$\beta$ (rad)	$F_1$	$F_1^{Aut.}$	erreur (%)	$F_2$	$F_2^{Aut.}$	erreur (%)	$F_3$	$F_3^{Aut.}$	erreur (%)
0	0,60	0,53	11,7	1,68	1,51	10,1	8,60	7,71	10,3
$-\pi/8$	0,52	0,47	9,6	1,28	1,19	7	4,70	4,29	8,7
$-\pi/4$	0,37	0,343	7,3	0,70	0,65	7,1	1,38	1,28	7,2
$-3\pi/8$	0,20	0,19	5	0,31	0,278	10,3	0,50	0,464	7,2
$-\pi/2$	0,12	0,115	4,2	0,20	0,187	6,5	0,28	0,26	7,1
			<7,5>			<8,2>			<8,1>

TAB. 2 – Surpressions positives pour une charge gazeuse de rayon 4,1 cm détonant au sol à 10 cm du cylindre.

$\beta$ (rad)	$F_1$	$F_1^{Aut.}$	erreur (%)	$F_2$	$F_2^{Aut.}$	erreur (%)	$F_3$	$F_3^{Aut.}$	erreur (%)
0	0,267	0,24	10,2	0,479	0,41	14,5	1,361	1,25	8,2
$-\pi/8$	0,212	0,19	10,5	0,388	0,32	17,5	0,743	0,66	11,1
$-\pi/4$	0,181	0,165	8,8	0,275	0,23	16,5	0,394	0,344	12,8
$-3\pi/8$	0,110	0,091	17,1	0,180	0,165	8,3	0,249	0,22	11,8
$-\pi/2$	0,070	0,061	13	0,121	0,11	8,9	0,172	0,157	8,5
			<11,9>			<13,1>			<10,5>

TAB. 3 – Impulsions positives pour une charge gazeuse de rayon 4,1 cm détonant au sol à 10 cm du cylindre.

De ces résultats, on peut observer que le dommage subi par la structure est le plus conséquent en ( $F_3$ ,  $\beta = 0$ ) ; ce point de mesure est en effet placé directement en face de l'explosion, l'angle d'incidence formé par le sol, le centre de l'explosion et le point de mesure est le plus faible (16,7°). Il apparaît clairement ensuite que le contournement de la paroi incurvée amoindrit les effets de l'explosion sur la structure. La figure 3 présente une expérience permettant de comparer l'atténuation de la surpression au niveau du capteur  $\beta = -\pi/2$  (Kinney, 1962 - Trélat, 2006) sur un cylindre et sur un parallélépipède (le schéma de la figure 3 est une vue de dessus d'un quartier des structures). Sur chaque structure, les capteurs sont situés à même hauteur du sol (3cm). Il ressort (Trélat, 2006) que la surpression mesurée sur le cylindre est 9,7 fois plus élevée que la surpression mesurée au niveau du parallélépipède, alors que le chemin approximativement parcouru par l'onde de choc pour atteindre le capteur  $\beta = -\pi/2$  depuis le centre de l'explosion, est quasiment le même au niveau du parallélépipède (39 cm) qu'au niveau du cylindre (38,3 cm). Cela signifie que la forme du cylindre, nettement plus aérodynamique que celle du parallélépipède, réduit nettement l'effet amortissant sur l'onde de souffle. Cependant, il

faut remarquer que la déformation de l'onde de choc n'est pas la même lorsqu'elle se propage autour du parallélépipède et lorsqu'elle se propage autour du cylindre.

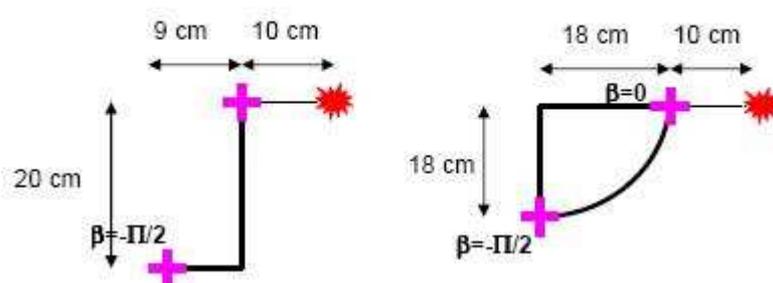


FIG. 3 – Comparaison des surpressions réfléchies sur un cylindre et un parallélépipède (schéma vu de dessus).

Cette étude a été conduite à échelle de laboratoire ; l'intérêt est ensuite de pouvoir prédire les caractéristiques de l'onde de souffle et son interaction avec la structure cylindrique à échelle réelle, ceci par application des lois de similitude de Hopkinson (Kinney, 1962). Cette étude à échelle réelle a été réalisée dans (Trélat, 2006), mais dans le cas d'une structure parallélépipédique ; la comparaison des résultats à échelle réelle et à échelle réduite s'avère très satisfaisante.

## 5 Conclusion

Cette étude a permis de modéliser, expérimentalement et numériquement, les surpressions et les chargements induits par la détonation d'une charge explosive et supportés par une structure cylindrique placée dans le champ de l'explosion. Pour cela, un certain nombre de lois exprimant les paramètres caractéristiques d'une onde de choc, surpression positive et impulsive positive réduite, ont été établies en fonction de la distance radiale réduite  $\lambda$  ( $\text{m.MJ}^{-1/3}$ ) et sur des plages précises de  $\lambda$ . La bonne corrélation entre résultats expérimentaux et numériques permet de conclure quant à la validité de l'équivalence énergétique de 2,35 entre le TNT et le mélange gazeux à base de propane et d'oxygène en proportions stoechiométriques sur la plage des distances radiales réduites appartenant à  $[0,29-15]$  ( $\text{m.MJ}^{-1/3}$ ).

## Références

- Autodyn, Remap Tutorial, version 6, user's manual. Century Dynamics Inc, 2005.
- Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.S., Kulesz, J.J. & Strehlow, R.A. 1983 Explosion hazards and evaluation. Fundamental Studies in Engineering. Elsevier, New-York.
- Bellanger, M., 1998 Traitement numérique du signal : Théorie et pratique, 6<sup>ème</sup> Edition, Dunod, Paris.
- Dewey, J.M. 2004 TNT equivalency of explosive sources. 18<sup>th</sup> International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock.
- Kinney, G.F. 1962 Explosive shocks in air. MacMillan, London.
- Trélat, S., Sochet, I., Autrusson, B., Cheval, K. & Loiseau, O. Strong explosion near a parallelepipedic structure. Shock Waves, SW-2005-10-03 (in press).
- Trélat, S. 2006 Impact de fortes explosions sur les bâtiments représentatifs d'une installation industrielle. Thèse de Doctorat – Université d'Orléans.