

# Etude des effets d'une explosion externe sur des réservoirs cylindriques : caractérisation du chargement

D-H. Duong<sup>a,b</sup>, L. Bouazaoui<sup>b</sup>, O. Pannetier<sup>b</sup>, J-L Hanus<sup>b</sup>, G. Prod'homme<sup>a</sup>, M. Reimeringer<sup>a</sup>

a. INERIS, Parc technologique ALATA, 60550 Verneuil en Halatte

b. PRISME, Université Centre – Val de Loire, ENSI Bourges

## Résumé :

*Ce travail vise à fournir des données de référence pour l'évaluation de la vulnérabilité de réservoirs soumis à une explosion externe. Des expérimentations ont été réalisées à échelle réduite satisfaisant des conditions de similitudes énergétiques et mécaniques. Des essais sur réservoirs rigides permettent de caractériser le chargement issu d'une détonation (répartition spatio-temporelle de la surpression et de l'impulsion).*

## Abstract :

*This work aims to provide baseline data for assessing the vulnerability of tanks subjected to an external explosion. Experiments were conducted on a reduced scale satisfying mechanical and blast scaling laws. Tests on rigid tanks are used to characterize the loading from a detonation (overpressure and impulse spatio-temporal distribution).*

**Mots clefs :** onde de choc, cylindre, chargement.

## 1 Introduction

Ce travail s'inscrit dans le contexte plus général de l'étude de la vulnérabilité de structures industrielles de type enceinte (stockage ou protection) soumises à une explosion ou un impact de projectiles (projet ANR VULCAIN). Les préconisations de l'Eurocode 1 partie 1-7 concernant les actions accidentelles sur les structures [1] conduisent à prendre en compte de tels scénarios dans les analyses de risques. L'objectif est de proposer des outils afin de prédire d'une part les chargements appliqués à ces structures et d'autre part la réponse de ces structures à ces mêmes chargements.

Si le chargement issu de l'interaction entre une onde de choc et une surface plane est relativement bien connu, on dispose ainsi d'abaques présentant le coefficient de réflexion ( $\Delta P_r/\Delta P_i$  rapport de la surpression réfléchie sur la surpression incidente) en fonction de l'angle d'incidence pour différents niveaux de surpression [2-4], il n'en est pas de même pour l'interaction entre une onde de souffle sphérique et une surface cylindrique [5]. Ce papier se limite à l'étude de structures du type réservoir de stockage cylindrique et de chargements issus d'explosions. Il se concentre sur le premier volet qui vise à fournir des données expérimentales de référence concernant les caractéristiques du chargement généré par une onde de souffle sur un réservoir cylindrique. Cet objectif est poursuivi à travers la réalisation d'essais à échelle réduite menés en laboratoire avec explosion de charges hémisphériques de gaz au niveau du sol.

Sur la base de données d'accidentologie et d'études de dangers fournies par les partenaires industriels du projet, trois géométries caractéristiques de réservoirs métalliques de stockage sous faibles pressions (tableau 1), et différentes caractéristiques d'ondes de choc issues de détonations (tableau 2) ont été retenues.

	Réservoir 1	Réservoir 2	Réservoir 3
Hauteur (m)	12	16	25
Diamètre (m)	12	28	70
Elancement	1	0.57	0.36
Epaisseur des viroles (mm)	5	9	14
Facteur d'échelle	1/48	1/90	1/140

Tab. 1: Géométrie des réservoirs

Surpression incidente	[100 mbar, 5 bars]
Temps d'application	[10 ms, 250 ms]

Tab. 2: Niveaux de pression et temps d'application

## 2 Programme et dispositif expérimental

Le programme expérimental est réalisé à l'échelle du laboratoire dans des conditions standards de pression et de température. Le passage de l'échelle réelle à l'échelle réduite repose pour l'onde de souffle sur la similitude de Hopkinson (égalité des distances réduites  $\lambda = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}$  où R représente la distance au centre de l'explosion et W l'énergie de l'explosion), qui conduit à un facteur 1 sur les niveaux de surpression, k sur les distances, les temps d'application et les impulsions et  $k^3$  sur les énergies. Pour la structure, on peut montrer que la réalisation d'une maquette dans le même matériau, avec un rapport k d'homothétie avec la structure réelle, avec un chargement de même intensité que le chargement réel mais de durée à l'échelle k, permettra d'assurer la similitude des périodes de vibration du cylindre qu'il soit assimilé à une poutre ou à une coque mince, des charges critiques de flambage et des contraintes à l'encastrement. Nous serons donc en mesure de reproduire les modes de défaillances dominants observés (figure 1). Le facteur d'échelle finalement retenu est choisi de telle manière qu'une même tôle puisse être utilisée pour réaliser les trois réservoirs (tableau 1).



Fig 1 : Flexion et flambage de réservoirs (AZF 2001, documentation INERIS)

Compte-tenu de la très faible épaisseur de tôle ( $e = 0.1$  mm), il n'est pas possible d'instrumenter les maquettes métalliques en capteurs de pression. En conséquence nous avons fait le choix de réaliser, pour l'étude du chargement, des maquettes indéformables en PVC ( $e = 1$  cm). Cette contrainte ne permettra pas de prendre en compte l'interaction déformation du réservoir et onde de souffle.

Le gaz détonant, mélange stœchiométrique de propane et d'oxygène, est confiné dans une demie bulle de savon de rayon  $R_0$  ( $R_0 = 4$  cm – 6 cm) formée au niveau du sol, à une distance R comprise entre 10 cm et 100 cm du cylindre rigide en PVC. Trois capteurs de pression sont placés à trois hauteurs différentes sur une même génératrice du cylindre et trois autres capteurs sont disposés sur le couvercle supérieur du réservoir (Fig. 2). Pour chaque distance entre le centre d'explosion et le cylindre, le cylindre est tourné autour de son axe principal tous les  $15^\circ$  ce qui permet d'étudier le champ de pression réfléchi sur l'ensemble du cylindre ( $\theta$  variant de  $0^\circ$  à  $180^\circ$ ).

Une carte d'acquisition de 8 voies permet de visualiser et d'acquérir les huit signaux de pression amplifiés par les huit amplificateurs de charge. Il est à noter que le nombre d'essais est réduit par l'excellente reproductibilité du chargement contrôlée par la mesure de la surpression incidente sur la table (capteur C5) et

des surpressions réfléchies sur une surface plane (capteur C8) et au sommet du réservoir (capteur invariant C7). A titre d'exemple, on reporte sur le figure 3 les surpressions réfléchies mesurées pour une même distance réduite sur les trois réservoirs. Le cas échéant, il est possible de recalculer le volume de la charge imparfaitement hémisphérique et d'en déduire l'énergie et la surpression incidente réelles.

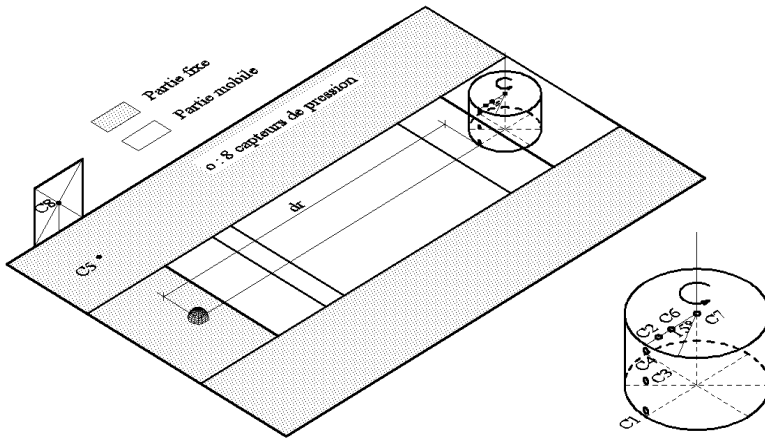


Fig 2: Dispositif expérimental

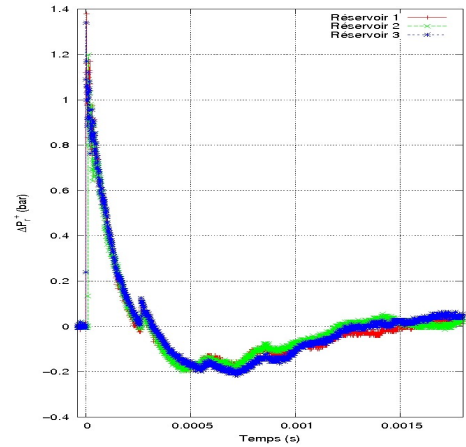


Fig.3 Reproductibilité de la surpression réfléchie

### 3 Résultats et discussion

Les effets potentiels d'une explosion sur une structure ne dépendent pas seulement de l'intensité du chargement mais également de son temps d'application. On s'intéressera donc à la fois au pic de surpression positive  $\Delta P_r^p/P_0$  à l'impulsion positive  $I^p/W^{1/3}$  et au temps d'application  $t^p/W^{1/3}$  réduits. Ces caractéristiques sont étudiées en fonction des paramètres expérimentaux suivants :

- distance réduite entre la source d'explosion et la génératrice du cylindre la plus proche ( $\theta=0$ ) ;
- position angulaire du capteur sur le cylindre ( $\theta \in [0;180]$ ) ;
- position verticale du capteur sur le cylindre.

#### 3.1 Surpression en fonction de l'angle et de la distance réduite

Pour chaque position angulaire du capteur sur le réservoir, une loi de surpression en fonction de la distance réduite est déduite de l'ensemble des données. On observe que pour des angles inférieurs ou égaux à 120 degrés, tous les capteurs situés sur une même génératrice présentent des réponses similaires (Fig. 4). Des lois de chargement polynomiales peuvent être identifiées pour chaque position angulaire :

$$\ln \frac{\Delta P_r^p}{P_0} = a (\ln \lambda)^2 + b (\ln \lambda) + c \quad (1)$$

Les coefficients sont déterminés par la méthode des moindres carrés et un algorithme de Levenberg-Marquat.

$\theta^\circ$	Capteurs bas, milieu, haut									Capteurs bas et milieu			
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
$\lambda(\min)$	0,64	0,69	0,79	1,02	1,13	1,37	1,55	1,62	1,78	1,74	1,99	1,97	2,02
$\lambda(\max)$	6,66	6,9	6,76	6,77	7,32	7,26	7,66	9,06	9,02	8,78	8,95	9,57	9,21
a	0,267	0,151	0,0531	-0,127	-0,233	-0,350	-0,282	0,0413	0,108	0,133	0,301	0,170	0,033
b	-2,12	-1,85	-1,58	-0,980	-0,553	-0,114	-0,231	-0,987	-1,15	-1,12	-1,43	-0,778	-0,218
c	1,130	0,961	0,761	0,281	-0,159	-0,697	-1,02	-1,08	-1,19	-1,49	-1,69	-2,528	-2,94

Tab. 3: Paramètres des lois de surpression réfléchie ( $\lambda$  en m.MJ<sup>(-1/3)</sup>)

Pour les angles supérieurs à 120°, la surpression ne peut plus être considérée comme constante sur une génératrice. La surpression enregistrée en haut du réservoir (C4) est plus importante. Une loi spécifique peut être déterminée pour cette position.

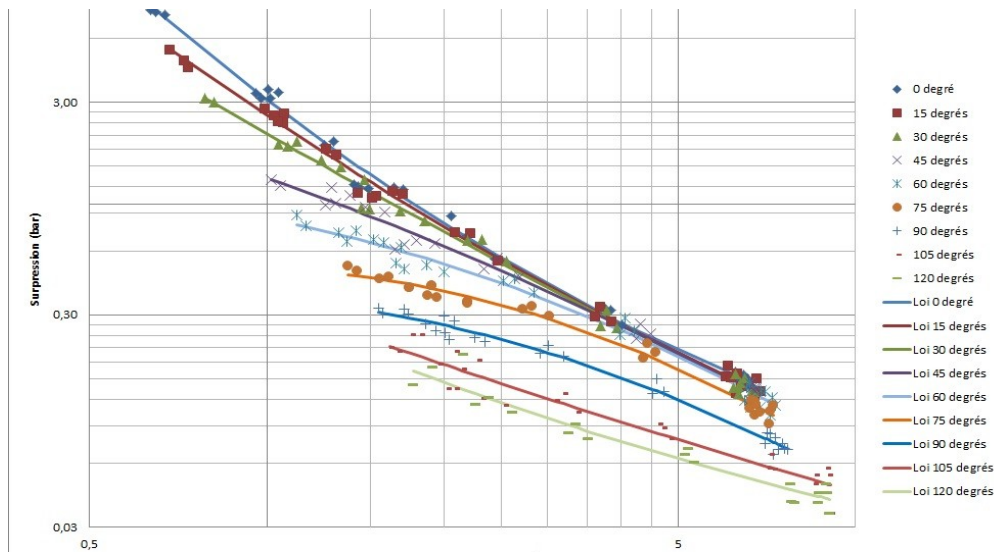


Fig. 4: Surpression positive en fonction de la distance réduite (position angulaire inférieure à 120 degrés)

### 3.2 Impulsion réduite en fonction de l'angle et de la distance réduite

D'une manière analogue, des lois de chargement polynomiales pour l'impulsion réduite peuvent également être identifiées pour chaque position angulaire :

$$\ln \frac{I^p}{\sqrt[3]{W}} = a (\ln \lambda)^2 + b (\ln \lambda) + c \quad (2)$$

$\theta^\circ$	Capteurs bas, milieu, haut									Capteurs bas et milieu				
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	
$\lambda(\min)$	0,65	0,71	0,8	1,04	1,15	1,4	1,56	1,65	1,78	1,83	2,05	2,04	2,07	
$\lambda(\max)$	6,39	6,16	6,48	6,77	6,62	6,74	7,16	7,24	7,79	7,61	7,29	7,52	7,41	
a	-0,012	-0,067	-0,182	-0,351	-0,266	-0,366	-0,182	-0,3	-0,097	-0,007	-1,2	-0,567	-0,123	
b	-1,052	-0,904	-0,595	-0,073	-0,223	0,028	-0,367	-0,034	-0,477	-0,653	2,59	1,038	-0,313	
c	-0,391	-0,473	-0,708	-1,071	-1,224	-1,524	-1,548	-1,869	-1,850	-2	-4,36	-3,219	-2,085	

Tab. 4: Paramètres des lois de surpression réfléchie ( $\lambda$  en m.MJ<sup>(-1/3)</sup>)

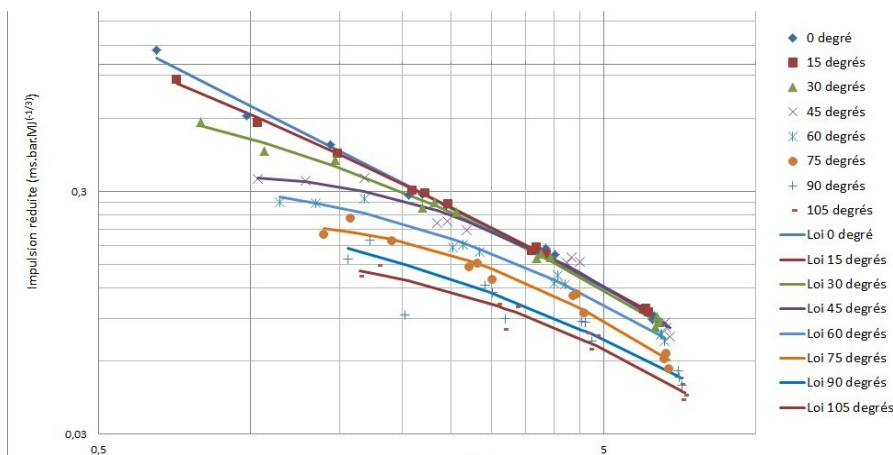


Fig. 5: Impulsion positive en fonction de la distance réduite (position angulaire inférieure à 105 degrés)

On observe à nouveau qu'il existe un angle critique au delà duquel il n'est plus possible de considérer que l'évolution de l'impulsion est similaire sur une génératrice.

### 3.3 Durée de la surpression en fonction de l'angle et de la distance réduite

La durée de la surpression positive réduite ne semble pas être affectée par la position angulaire pour des angles inférieurs à 75°. Une loi unique peut être déduite :

$$\ln \frac{t^p}{\sqrt[3]{W}} = -0,189 (\ln \lambda)^2 + 0,683 (\ln \lambda) - 0,178 \quad (3)$$

Ce résultat est cohérent avec les conclusions dressées par Brossard et al. [6].

### 3.4 Comparaison du chargement sur les trois réservoirs pour une même distance réduite

Le cas étudié est celui d'une charge de gaz de 6 cm de diamètre située à 40 cm des réservoirs. Nous représentons l'évolution du coefficient de réflexion ( $\Delta P_r/\Delta P_i$ ) sur les 3 réservoirs :

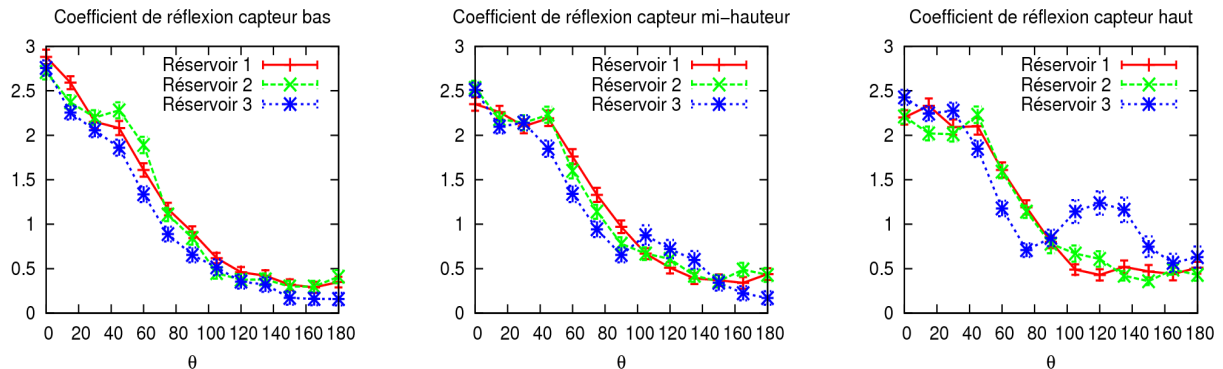


Fig. 6 : Evolution du coefficient de réflexion

Les évolutions relevées sont similaires pour les trois réservoirs avec à nouveau un écart significatif pour le capteur placé en haut sur le réservoir le moins élancé lorsque l'angle devient supérieur à 100°. Pour avoir une meilleure idée de l'évolution du chargement, nous représentons la répartition angulaire de la surpression sur le réservoir 1 à différents instants. La figure 7 met en évidence la décroissance rapide du chargement de pression exercé par l'onde de souffle lorsqu'elle parcourt le réservoir (l'onde met 2.47 ms pour quitter le réservoir). Ainsi, même si la valeur du coefficient de réflexion n'est pas identique pour des angles importants, cette différence n'aura vraisemblablement pas une incidence significative sur la réponse du réservoir puisque le niveau de chargement exercé sur cette partie sera très faible.

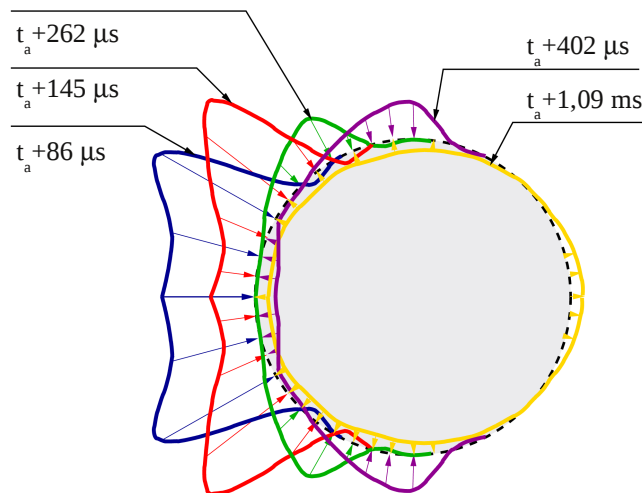


Fig. 7 : Evolution temporelle du chargement

Nous proposons enfin une dernière comparaison avec des résultats de simulations réalisées par Żóttak et Drikakis [7] qui modélisent la diffraction autour d'un cylindre infini soumis à un choc plan. Les niveaux de surpression incidente étant différents, pour permettre une comparaison, la surpression réfléchie est normalisée par sa valeur pour  $\theta=0$  et nous reportons nos valeurs à la base du cylindre.

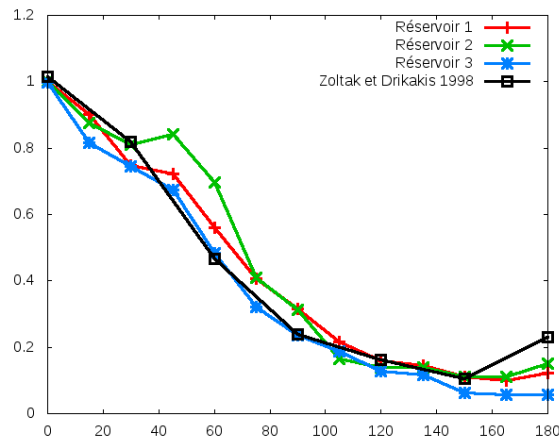


Fig. 8 : Pic de surpression incidente normalisée

Nous pouvons à nouveau observer une décroissance semblable du coefficient de réflexion de la surpression sur le pourtour du cylindre.

## 4 Conclusion

Dans cette étude nous avons développé un dispositif expérimental permettant de caractériser le chargement généré par la détonation d'un mélange de gaz propane-oxygène sur une structure cylindrique. Des lois empiriques exprimant les paramètres caractéristiques d'une onde de souffle - surpression positive, impulsion positive et durée d'application réduites - ont été établies en fonction de la distance réduite  $\lambda$  ( $m.MJ^{(-1/3)}$ ) sur le pourtour du cylindre. Ces résultats permettent de prédire les chargements sur un cylindre à l'échelle réelle par application des lois de similitude. Ils pourront également servir de cas de référence pour valider des modèles numériques. Suite à cette étude, une campagne d'essais sur des cylindres métalliques déformables est mise en place pour caractériser la réponse de ces structures soumises à une onde de souffle externe.

## Références

- [1] Eurocode 1, Actions on structures, Part 1-7, General Actions – Accidental Actions, NF EN 1991-7, European Committee for Standardization, 2007.
- [2] Baker WE, Cox PA, Westine PS, Kuelesz JJ, Strehlow RA, Explosions hazards and evaluations, Fundamental Studies in Engineering, Elsevier, 1983.
- [3] Kinney GF, Graham KJ, Explosive shocks in air, Second edition Springer Verlag Berlin, 1985.
- [4] UFC 3-340-02, Structures to resist the effects of accidental explosions, Unified Facilities Criteria, Department of Defense, USA, 2008.
- [5] Trélat S, Impact de fortes explosions sur les bâtiments représentatifs d'une installation industrielle, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2006.
- [6] Brossard J., Desrosier C., Purnomo H., Renard J., Pressure loads on a plane surface submitted to an explosion, 19th international symposium on shock waves, Marseille, France, 1995.
- [7] Żóttak J., Drikakis D., Hybrid Upwind Methods for the Simulation of Unsteady Shock-wave Diffraction over a Cylinder, Journal of Computers Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 162, 1998.