

## Une étude expérimentale de la fissuration de plaques métalliques en dynamique rapide

Martial Mosnier, Olivier Pennetier, Jérôme Renard, Patrice Bailly, Frédéric  
Mercier

► **To cite this version:**

Martial Mosnier, Olivier Pennetier, Jérôme Renard, Patrice Bailly, Frédéric Mercier. Une étude expérimentale de la fissuration de plaques métalliques en dynamique rapide. 17. Congrès Français de Mécanique (CFM'05), Aug 2005, Troyes, France. pp.NC. ineris-00972497

**HAL Id: ineris-00972497**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00972497>**

Submitted on 3 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Une étude expérimentale de la fissuration de plaques métalliques en dynamique rapide

Martial Mosnier, Olivier Pennetier, Jérôme Renard, Patrice Bailly, Frédéric Mercier

*Laboratoire Energétique Explosion Structures  
LEES, EA 1205, Université d'Orléans  
ENSI de Bourges, INERIS  
10 Bd Labitolle 18020 Bourges  
martial.mosnier@ensi-bourges.fr*

**Résumé :** *Des expérimentations sont réalisées sur la propagation dynamique de fissures dans des plaques métalliques minces, entaillées, sollicitées par explosions. Ces expériences ont permis de lier les paramètres – nature du matériau (en fonction de la ductilité), épaisseur des plaques, mode de chargement – à la fissuration qui se caractérise par la taille de fissure, son faciès et sa vitesse de propagation.*

**Abstract :** *Experiments are achieved in dynamic cracking on thin notched metallic plates loaded by explosions. These experiments allowed to link the parameters – classes of materials with different ductilities, thickness of samples, kinds of loading – to the different ways of cracking. Cracking is characterised by the size and the shape of the crack, its fracture facies and propagation velocity.*

**Mots-clefs :** plaques métalliques ; essais dynamiques ; explosion ; fissuration

## 1 Introduction

L'industrie met couramment en œuvre des enceintes métalliques sous pression, pouvant contenir des gaz, ou même, pour des niveaux thermodynamiques plus élevés, des gaz liquéfiés. Si, pour une raison quelconque (emballement de réaction, explosion interne, changement de phase...), une brusque montée en pression au sein d'un de ces réservoirs se produit et conduit à sa rupture, les effets dans l'environnement de la capacité peuvent être multiples et variés : effets de pression combinés ou non avec la projection de missiles, fusées (projection de fragments propulsés au cours de leur vol par la vaporisation du gaz liquéfié), etc. Ainsi, la quantification des effets potentiels de la rupture d'une capacité dans son environnement, par exemple dans le cadre d'une étude de dangers, passe par la caractérisation préalable de la réponse de réservoirs métalliques à des sollicitations en pression. Or, la réponse d'une enceinte à ces types de sollicitation est difficilement prévisible et tenter de la prévoir conduit, dans un premier temps, à déterminer expérimentalement la réponse d'échantillons de type plaque métallique soumis à des sollicitations diverses (déflagrations, détonations). Des expérimentations sur la propagation dynamique de fissures et la fragmentation ont été réalisées sur des plaques minces et vont être présentées dans ce papier. La gamme des matériaux utilisés regroupe des degrés de ductilité différents. De plus, trois épaisseurs de plaques ont été testées. Ces plaques sont aussi entaillées pour provoquer et diriger la fissuration. Elles sont chargées de façon dynamique, soit par déflagration, soit par détonation (mélange hydrogène-oxygène à la stœchiométrie). Ces expériences ont permis de lier les différents paramètres d'entrées – nature du matériau, épaisseur des plaques, type de chargement – à la fissuration des plaques. Cette fissuration se caractérise par la taille et la forme de la fissure, son faciès et sa vitesse de propagation.

## 2 Dispositif expérimental

Les études expérimentales de plaques circulaires soumises à un chargement impulsionnel sont nombreuses. Pour obtenir la déflexion de plaques, un moyen expérimental souvent utilisé fut de placer un explosif sous forme de feuille au centre de la plaque à tester [6],[4],[10],[7],[8],[12],[2]. Cette méthode fut réutilisée et améliorée [9], [11]. Une autre méthode pour déterminer la réponse dynamique de plaques circulaires est de soumettre les échantillons à des détonations sphériques [13]. Cependant, ces études ne

traitent pas du phénomène de rupture. Dans ce papier, le phénomène de déformation est suivi de la rupture par fissuration de la plaque. Les travaux sur la fissuration sont généralement appliqués directement aux réservoirs ou aux longs tubes [5], [1], [3].

## 2.1 Description du dispositif expérimental

Le système expérimental (figure 1 et figure 2) comprend deux tubes (tubes 1 et 2) au milieu desquels vient se positionner la plaque à tester. Une pompe permet de réaliser le vide dans les deux tubes. Puis, le mélange gazeux est introduit dans le tube 1 à pression choisie. La pression introduite dans le tube 1 avant le déclenchement de l'explosion est appelée pression initiale. L'équilibre des pressions initiales de part et d'autre de la plaque test se fait par une entrée d'air grâce à l'ouverture d'une vanne du tube 2. Ainsi, la plaque à tester n'est pas préalablement sollicitée. L'explosion est amorcée grâce à une alimentation adéquate. Pour une déflagration, l'amorçage est réalisé par étincelle électrique. Pour une détonation, un fil explosé est utilisé.



FIG. 1 – Photo du dispositif expérimental.

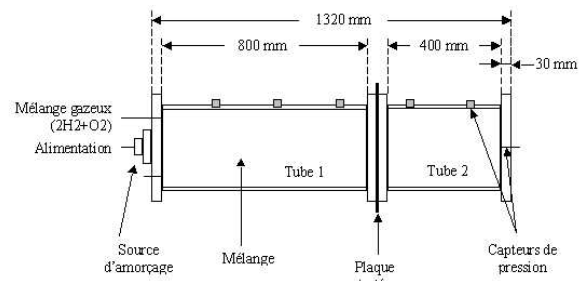


FIG. 2 – Schéma du dispositif expérimental.

Les tubes 1 et 2 sont en inox. Le premier mesure 800 mm de long et le second 400 mm. Le diamètre intérieur des tubes est de 193.7 mm et le diamètre extérieur de 219.1 mm. Les tubes, qui ont une épaisseur conséquente (12.7 mm), peuvent supporter de très importantes pressions. Aux extrémités des deux tubes sont placées des brides carrées de 300 mm de côté et de 30 mm d'épaisseur, munies de joints d'étanchéité. La plaque à tester est mise en place entre les brides des deux tubes. Elle est serrée grâce à 4 boulons. L'installation d'une plaque est facile et rapide car les deux tubes sont montés sur rails (figure 1).

## 2.2 Instrumentation

Les deux tubes sont équipés de 7 capteurs de pression (figure 2). Les capteurs de pression utilisés sont des Kistler 603B. Ces capteurs de pression sont reliés à une chaîne d'acquisition comprenant amplificateurs de charge (KISTLER 5011), oscilloscopes (Philips PM 3350), et P.C.

## 2.3 Echantillons testés

Les plaques sont testées sur une surface circulaire de diamètre 193.7 mm. Cette surface correspond au diamètre intérieur des tubes du dispositif. Les matériaux choisis sont les suivants, par ordre croissant de fragilité :

- Aluminium 5754 (AlMg3),
- Acier DC01 (EN 10.130-98),
- Aluminium 2017 A (AlCu4MgSi).

Des essais de traction (figure 3) ont été effectués pour connaître les propriétés des différents matériaux. Les résultats moyens obtenus sont résumés dans le tableau 1. Des plaques de trois épaisseurs différentes (0.5 ; 1 ; 2 mm pour les alliages d'aluminium et 0.8 ; 1 ; 2 mm pour l'acier) ont été testées dans

un premier temps. Ensuite, elles ont été entaillées pour provoquer et diriger la fissuration. Les entailles sont usinées axialement pour jouer le rôle de pré-fissures. Les plaques sont usinées par une machine à commande numérique ce qui permet d'obtenir des entailles reproductibles. Ces entailles sont placées au centre des plaques. Leur longueur est d'environ 10 mm pour une profondeur respectivement de 0.3 ; 0.7 ; 1.6 mm pour les alliages aluminium et 0.5 ; 0.7 ; 1.6 mm pour l'acier.

Matériau	Module de Young E MPa	Contrainte à la rupture MPa	R <sub>0,2</sub> MPa	Allongement %
Al 2017	75 242	390.8	265	18.77
Acier DC01	226 424	318.3	249	27.75
Al 5754	70 363	201.44	109.8	20.44

TAB. 1 – Propriétés de traction des différents matériaux.

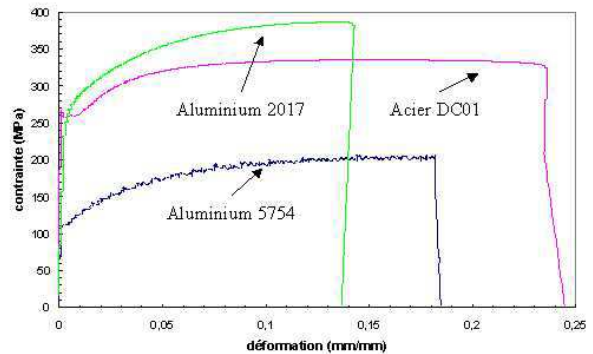


FIG. 3 – Comparatif des courbes des essais de traction effectués sur trois matériaux.

### 3 Résultats

#### 3.1 Chargement en pression de la plaque

##### 3.1.1 Signaux de pression

Le mélange gazeux utilisé est un mélange stœchiométrique d'hydrogène-oxygène ( $2H_2+O_2$ ). Il est employé aussi bien en détonation qu'en déflagration sous différentes pressions initiales (0.6, 0.8, et 1 bar). Les deux figures 4 et 5 représentent l'évolution de la pression en fonction du temps pour une déflagration (figure 4) et pour une détonation (figure 5) avec une pression initiale de 1 bar. Les pressions sont celles impactant l'échantillon testé.

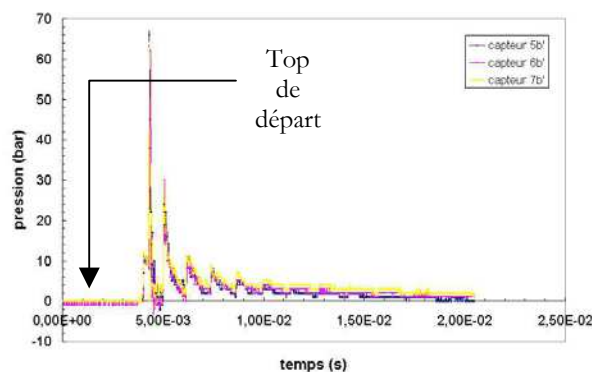


FIG. 4 – Courbes de pression en fonction du temps d'une déflagration avec une pression initiale de 1 bar

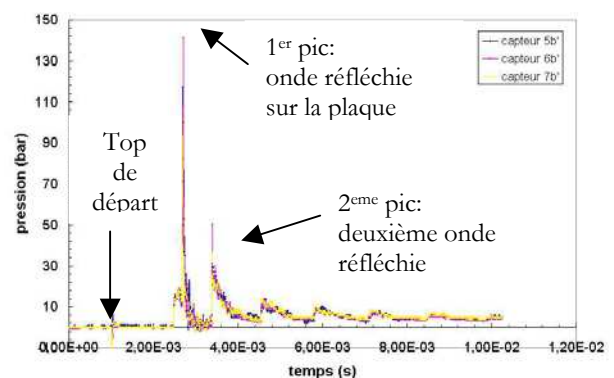


FIG. 5 – Courbes de pression en fonction du temps d'une détonation avec une pression initiale de 1 bar

Trois courbes sont représentées sur chaque figure. Ces trois courbes correspondent à trois capteurs de pression positionnés à différents endroits. Ils permettent de connaître la pression directement appliquée

sur différents endroits de la plaque. La comparaison des signaux de ces trois capteurs nous permet de conclure au fait que l'onde qui arrive sur la plaque est plane. De plus, plusieurs essais ont été effectués dans les mêmes conditions. Ils permettent de dire que les signaux de pression sont reproductibles aussi bien en détonation qu'en déflagration. Plusieurs pics forment l'allure des signaux de pression. Le premier, qui représente l'onde réfléchiée, est très élevée (pour une pression initiale de 1 bar, on obtient 63 bar en déflagration et 141 bar en détonation). Les autres pics correspondent aux ondes réfléchiées successives.

### 3.1.2 Chargement appliquée à la plaque

La plaque est soumise à une onde de pression. Deux signaux de pression, l'un en déflagration (figure 4) et l'autre en détonation (figure 5), ont été présentés précédemment. Cependant, suivant le type de chargement (déflagration ou détonation), le temps d'application du signal de pression sur l'échantillon est différent. En détonation, le pic de pression est plus important en amplitude mais plus bref en temps par rapport à une déflagration. De ce fait, le paramètre « impulsion » sera introduit, liant l'amplitude de pression à son temps d'application. Les impulsions appliquées aux échantillons de plaque à tester sont données pour différentes pressions initiales d'explosion, en déflagration dans le tableau 2 et en détonation dans le tableau 3. On remarque que, pour une même pression initiale, les impulsions en déflagration et en détonation ne sont pas très éloignées. L'impulsion en déflagration est environ 8 % plus élevées que celle en détonation, à pression initiale égale. Cependant, le paramètre « vitesse de l'onde arrivant sur la plaque » est très différent suivant le mode de chargement et la pression initiale de gaz introduite pour l'explosion. Cela vient du fait qu'une détonation est très rapide. Par exemple, le temps entre l'amorçage et l'arrivée de l'onde sur la plaque est de 1.55 ms en détonation (pression initiale 1 bar, figure 5) alors qu'il est de 3.3 ms en déflagration (pression initiale 1 bar, figure 4). Les vitesses de l'onde impactant la plaque (tableau 2) s'échelonnent de 163.3 m.s<sup>-1</sup> (pression initiale 0.6 bar) à 242.4 m.s<sup>-1</sup> (pression initiale 1 bar). Ces vitesses sont suivies par celles (tableau 3) en détonation : de 352.4 m.s<sup>-1</sup> (pression initiale 0.6 bar) à 516.1 m.s<sup>-1</sup> (pression initiale 1 bar). Les vitesses obtenues par détonation ne sont pas plus élevées du fait de la faible longueur du tube. En fait, l'explosion est seulement en train de transiter vers une détonation.

Pression initiale (bar)	Impulsion (N.s)	Pic de pression (bar)	Vitesse de l'onde (m.s <sup>-1</sup> )
1	156.89	63	242.4
0.8	124.31	45	222.2
0.6	100.85	10	163.3

TAB. 2 – Données liées au chargement en déflagration.

Pression initiale (bar)	Impulsion (N.s)	Pic de pression (bar)	Vitesse de l'onde (m.s <sup>-1</sup> )
1	144.69	141	516.1
0.8	115.51	90	434.8
0.6	93.84	34	352.4

TAB. 3 – Données liées au chargement en détonation.

## 3.2 Comportement de la fissure

Les résultats présentés dans ce paragraphe sont qualitatifs. Les fissures ont été obtenues pour des chargements bien précis. Elles se comportent différemment suivant le matériau et son épaisseur. Pour l'ensemble des échantillons testés et fissurés, plusieurs tests ont été effectués dans les mêmes conditions. Les fissures obtenues dans tous ces cas sont reproductibles, aussi bien d'un point de vue taille, forme, déformation que faciès de rupture, pour les trois matériaux utilisés.

### 3.2.1 Forme générale : plaques fissurées d'épaisseur 2 mm

Les plaques d'aluminium 5754 et 2017 sont entaillées et sont chargées en déflagration avec comme pression initiale 1 bar. L'ensemble des paramètres de ce chargement est donné dans le tableau 2. Il en résulte un comportement complètement différent de fissuration. Pour l'aluminium 5754 "ductile" (figure 6), la fissure est symétrique et a une forme de lèvres. Elle mesure 32 mm de long et 6 mm de large. Son faciès

est rugueux avec une rupture à 45° caractéristique d'une rupture ductile. Pour l'aluminium 2017 "fragile" (figure 7), la fissure est symétrique et allongée. Elle mesure 193 mm de long et 9 mm de large au centre. Son faciès est brillant et lisse, caractéristique d'une rupture fragile. Les faciès sont conservés pour des épaisseurs de 1 et 0.5 mm. Concernant l'acier DC01, son comportement se rapproche de celui de l'aluminium 5754 tant au niveau de la forme de fissure que du faciès.



FIG. 6 – plaque de 2 mm en alu 5754, déflagration à 1 bar



FIG. 7 – plaque de 2 mm en alu 2017, déflagration à 1 bar

### 3.2.2 Influence du type de chargement sur l'ouverture de fissure

#### 3.2.2.1 Plaques fissurées d'épaisseur 1 mm

Pour les plaques d'aluminium 5754 (0.8 bar) et d'acier DC01 (1 bar) d'épaisseur 1 mm, les formes et faciès de fissure se rapprochent de celles de l'aluminium 5754 à 2 mm aussi bien en détonation qu'en déflagration. En ce qui concerne l'aluminium 2017, l'arrêt de fissure, quel que soit le type de chargement, est très difficile à obtenir (figure 8). En général, la plaque se coupe en deux (figure 9) puis se découpe sur le contour du tube. De plus, l'influence du type de chargement intervient sur l'ouverture et la propagation de fissure de l'aluminium 2017. Une fine fissure d'environ 40 mm (figure 8) se crée, en déflagration, pour une impulsion de 124.31 N.s avec une onde impactant la plaque à 222.2 m.s<sup>-1</sup>. La même plaque se partage en deux en détonation pour une impulsion inférieures (93.84 N.s) mais avec une vitesse d'onde arrivant sur l'échantillon supérieure (352.4 m.s<sup>-1</sup>).



FIG. 8 – plaque de 1 mm en alu 2017, déflagration à 0.8 bar



FIG. 9 – plaque de 1 mm en alu 2017, détonation à 0.6 bar



FIG. 10 – plaque de 0.5 mm en alu 5754, déflagration à 0.6 bar



FIG. 11 – plaque de 0.5 mm en alu 5754, détonation à 0.6 bar

#### 3.2.3 Plaques fissurées d'épaisseur 0.5 mm

L'influence du type de chargement s'accroît avec la diminution d'épaisseur de la plaque. Elle reste présente sur l'aluminium 2017 mais n'intervient pas sur l'acier. Sur les plaques d'épaisseur 0.5 mm en

aluminium 5754, l'influence du type de chargement (déflagration ou détonation) est importante. Pour une même pression initiale de 0.6 bar (chargement : tableaux 2 et 3), la fissuration est légère pour une déflagration (figure 10). Elle est beaucoup plus conséquente lorsque la plaque est soumise à une détonation (figure 11). De ce fait, l'influence de la vitesse de l'onde arrivant sur la plaque est forte :  $163.3 \text{ m.s}^{-1}$  en déflagration pour  $352.4 \text{ m.s}^{-1}$  en détonation. L'impulsion sur la plaque est quasiment équivalente en déflagration (100.85 N.s) et en détonation (93.84 N.s).

## 4 Conclusion et perspectives

Cette étude a permis de voir qualitativement la fissuration de trois matériaux différents. Pour ces trois matériaux soumis à des chargement précis (c'est-à-dire permettant l'apparition d'une fissure), les formes, tailles et faciès sont clairement établis. Le paramètre manquant reste la vitesse de propagation de fissure. Des essais sont en cours de réalisation pour déterminer ce paramètre. Deux moyens sont mis en œuvre pour y parvenir : le premier est de placer des indicateurs de propagation de fissure car on connaît la direction de propagation, le second est un système de visualisation par caméra rapide.

Des travaux numériques sont réalisés en parallèles des travaux expérimentaux pour modéliser la déformation de la plaque et sa fissuration. Les premiers résultats comparatifs sur des plaques non entaillées qui ne se rompent pas sont concluants.

L'étude expérimentale de la fissuration de plaques métalliques présentée va être complétée par une étude de rupture de réservoirs. Les matériaux des réservoirs seront les mêmes que les ceux des plaques utilisées lors des essais en laboratoire (alu5754, acierDC01, alu2017). Les réservoirs auront une capacité d'environ 20 litres avec deux embouts hémisphériques. Ils seront testés horizontalement. L'explosion d'un gaz dans le réservoir provoquera la rupture. Cette rupture dynamique sera étudiée vis-à-vis du caractère ductile ou fragile des différents matériaux.

## Références

- [1]Beltman W., Bursu E., Shepherd J., Zuhail L., The structural response of cylindrical shells to internal shock loading, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 121,315-322 (1999)
- [2]Bodner S.R., Symonds P.S., Experiments on viscoplastic response of circular plates to impulsive loading, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 27, pp. 91-113 (1979)
- [3]Chao T.W., Shepherd J.E., Fracture response of externally-flawed cylindrical shells to internal gaseous detonation loading, In *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*. ASME (2002)
- [4]Duffey T.A., The large deflexion dynamic response of clamped circular plates subject to explosive loading, *Sandia Laboratories Research Report SC-RR-67-532* (1967)
- [5]Emery A.F., Kobayashi A.S., Love W.J., Place B.W., Lee C., Chao Y.H., An experimental and analytical investigation of axial crack propagation in long pipes, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 23, No.1, pp. 215-226 (1986)
- [6]Florence A.L., Circular plate under a uniformly distributed impulse, *Int. J. Solids Struct.* 2, 37-47 (1966)
- [7]Jones N., Impulsive loading of a simply supported rigid-plastic circular plate, *J. appl. Mech.* 35, 59-65 (1968)
- [8]Kelly J.M. and Wilshaw T.R., A theoretical and experimental study of projectile impact on clamped circular plates, *Proc. R. Soc. A306*, 435-447 (1968)
- [9]Nurick G.N., Martin J.B., Deformation of thin plates subjected to impulsive loading – a review – Part II : Experimental studies, *Int. J. Impact Engng*, Vol. 8, No. 2, pp. 171-186 (1989)
- [10]Symonds P.S., Survey of methods of analysis for plastic deformation of structures under dynamic loading. Division of Engineering, Brown University Report BU/NSRDC, pp. 1-67 (1967)
- [11]Teeling-Smith R.G., Nurick G.N., The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads, *Int. J. Impact Engng*, Vol. 11, No. 1, pp. 77-91 (1991)
- [12]Wierzbicki T., Florence A.L., A theoretical and experimental investigation of impulsively loaded clamped circular viscoplastic plates, *Int. J. Solids Structures*, Vol. 6, pp. 553 to 568 (1970)
- [13]Woznica K., Penner O., Renard J., Experiments and numerical simulation on thin metallic plates subjected to an explosion, *J. Eng. Mater. Technol.*, 123, 203-209 (2001)