



**HAL**  
open science

## **Etude expérimentale et numérique de la propagation d'une onde de souffle dans un conduite**

Matthieu Balbarie, Isabelle Sochet, Théo Roland

### ► **To cite this version:**

Matthieu Balbarie, Isabelle Sochet, Théo Roland. Etude expérimentale et numérique de la propagation d'une onde de souffle dans un conduite. 26e Congrès Français de Mécanique, Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3 - UMR CNRS 7239), Aug 2025, Metz, France. <hal-05312979>

**HAL Id: hal-05312979**

**<https://hal.science/hal-05312979v1>**

Submitted on 14 Oct 2025

**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.



HAL Authorization

# Étude expérimentale et numérique de la propagation d'une onde de souffle dans une conduite

M. BALBARIE<sup>a</sup>, I. SOCHET<sup>b</sup>, T. ROLAND<sup>b</sup>

a. CEA, DAM, CEA-Gramat, F-46500 Gramat, France, matthieu.balbarie@cea.fr

b. INSA Centre Val de Loire, laboratoire PRISME, Bourges Cedex, France, isabelle.sochet@insa-cvl.fr

## Résumé :

Le comportement d'une onde de souffle générée par la détonation d'une charge explosive à l'entrée d'une conduite est différent de celui observé après une détonation en champ libre. En effet, celle-ci se propageant dans un volume réduit, la surpression maximale reste importante sur de longues distances et peut avoir des effets néfastes sur les personnes et les équipements. Ce phénomène est étudié expérimentalement et numériquement dans cet article. Au laboratoire PRISME se trouve un banc de détonation permettant de reproduire des expériences de détonique à échelle réduite grâce à la détonation d'un mélange gazeux. Un tube creux, fixé au banc, permet de simuler la conduite. Des capteurs, placés à la surface du banc, mesurent la pression au passage de l'onde de choc sans perturber l'écoulement. La facilité de mise en oeuvre a permis la réalisation de nombreux essais en faisant varier plusieurs paramètres tels que la quantité de gaz injecté, le diamètre du tube et la distance source-tunnel. Ces résultats expérimentaux sont comparés aux modèles analytiques présents dans la littérature et à des simulations numériques effectuées avec le code de dynamique rapide HERA, développé au CEA. Ces simulations permettront d'affiner les modèles analytiques.

## Abstract

The behaviour of a blast wave generated by the detonation of an explosive near a tunnel entrance is different from that observed after a detonation in free field. Indeed, the latter propagating in a reduced volume, the maximum overpressure remains high over long distances and can have harmful effects on people and equipments. This phenomenon is studied experimentally and numerically in this article. At the PRISME laboratory, a detonation bench allows to reproduce detonics experiments at reduced scale thanks to the detonation of a gaseous mixture. A hollow tube, fixed to the bench, allows to simulate the conduit. Sensors, placed on the surface of the bench, measure the pressure at the passage of the shock wave without disturbing the flow. The ease of implementation has allowed the realization of numerous tests by varying several parameters such as the quantity of injected gas, the diameter of the tube and the source-tunnel distance. These experimental results are compared to analytical models present in the literature and to numerical simulations carried out with the HERA rapid dynamics code, developed at the CEA. These simulations will allow to refine the analytical models.

**Mots clefs : détonation gazeuse, tunnel, échelle réduite, banc de détonation, simulation numérique**

# 1 Introduction

La détonation d'un explosif en champ libre génère une onde de choc qui se propage dans l'air dont les caractéristiques principales (surpression, impulsion et temps d'arrivée) peuvent être évaluées à partir d'abaques [1] ou de formules [2]. Lorsqu'elle se propage dans un volume réduit, tel qu'une ruelle, un tunnel ou une conduite de ventilation, la décroissance de l'impulsion et de la surpression avec la distance est moindre. Les lois obtenues en champ libre ne sont plus applicables. Afin de protéger les personnes et les équipements de ces effets, il est nécessaire d'étudier la détonation en milieu confiné. Ce phénomène a été étudié expérimentalement et numériquement par de nombreux auteurs, notamment pour des charges détonant dans un tunnel, au niveau de l'entrée ou à l'extérieur.

Silverstrini [4] propose le concept de facteur de concentration d'énergie (ECF) afin de prédire la propagation du souffle pour une détonation dans un milieu confiné ou semi-confiné.

Lors de la détonation d'un explosif dans un tunnel, l'onde de choc se propage en suivant les lois en champ libre proche du point d'explosion, puis se réfléchit sur les parois. L'onde réfléchie est plus intense et rapide que l'onde incidente, ce qui a pour effet d'accélérer l'écoulement du choc dans le tube. Après une certaine distance qui dépend des dimensions de l'explosif et du tunnel, cet écoulement devient unidimensionnel. Bensalama [6] étudie numériquement et expérimentalement cette zone de transition. L'influence de la forme du tunnel a été étudiée par Uystepruyst [5].

Borgers [7] décrit une approche volumique pour déterminer la surpression maximale et l'impulsion dans les tunnels pour une détonation se produisant à l'intérieur et à l'extérieur du tunnel.

Le document TM 5-855-1 [3] donne des abaques de surpression dans un tunnel pour une détonation à l'extérieur dont le modèle EMI (Ernest Mach Institute) a été déduit. Liu [8] propose également une formule analytique pour estimer la décroissance de surpression pour une configuration similaire.

Ousji [9] et Luo [10] ont étudié la détonation à l'extérieur d'un tunnel expérimentalement à l'aide respectivement d'un tube à choc par explosif (EDST) fermé d'un côté et d'essais à grande échelle. De ces essais, Ousji propose un modèle empirique de la décroissance de la surpression incidente et réfléchie par la sorie fermée du tunnel, et Luo compare les effets de la forme de la charge sur la pression dans un tunnel à section rectangulaire.

Ces lois se basent sur des expériences mettant en jeu des masses d'explosif allant de la dizaine de grammes à plusieurs dizaines de kilogrammes en équivalent TNT. De façon analogue à ce qui est classiquement fait pour l'étude du souffle en champ libre, les auteurs proposent d'exploiter ces essais en recourant à la notion de distance réduite. Celle-ci est cependant modifiée pour prendre en compte les caractéristiques de la conduite [9]. Elle est égale à  $Z_t = D_t^2 L / M_r$  avec  $D_t$  et  $L_t$  le diamètre et la longueur du tunnel,  $L_{ct}$  la distance de la charge à l'entrée du tunnel,  $M_r = M_c * (1 - L_{ct} / \sqrt{L_{ct} + D_t^2/4})$  la masse d'explosif réduite, et  $M_c$  la masse d'explosif réellement utilisée.

L'objectif de l'étude est d'avoir des modèles permettant d'estimer les caractéristiques de l'onde en un point donné d'une conduite ou d'un tunnel de géométrie complexe, c'est à dire pouvant présenter des coudes, des bifurcations et des changements de section. Pour cela, nous nous appuyerons sur des résultats expérimentaux et numériques, qui permettront de valider les modèles existants, étendre leur domaine de validité ou, à défaut, de proposer de nouveaux modèles.

Le moyen expérimental utilisé permet de faire des expériences de détonation de mélange gazeux en lieu et place d'explosifs condensés, mettant en jeu des masses de l'ordre du gramme en équivalent TNT. Les

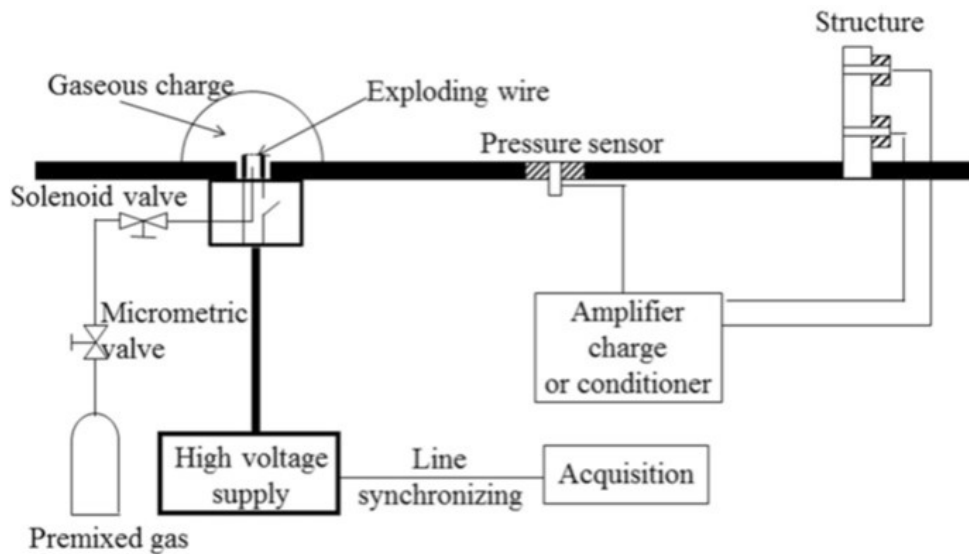


FIGURE 1 – Schéma du dispositif expérimental [12]

diamètres des tunnels étudiés varient entre 40 mm et 200 mm pour une longueur de 2 m. La distance d'éloignement varie entre 100 mm et 200 mm. Cela permet d'obtenir des informations sur la pression dans le tunnel sur des distances réduites modifiées jusqu'à 4,8 et 3,5 fois supérieures aux expériences de Ousji et Luo respectivement. Les simulations numériques sont réalisées avec le code d'hydrodynamique HERA [11], développé au CEA et utilisé pour modéliser la détonation d'explosifs et la propagation de l'onde de souffle.

Dans un premier temps, l'étude dans cet article va se limiter à démontrer la capacité à reproduire, par simulation numérique, les signaux de pression dans une conduite linéaire suite à la détonation à l'entrée de cette conduite.

## 2 Expériences

Les expériences ont été réalisées au laboratoire PRISME, à l'INSA Centre Val de Loire à Bourges [12]. Celui-ci possède un banc expérimental permettant d'étudier le comportement du souffle et des ondes de choc grâce à la détonation d'un mélange gazeux. Le schéma du banc est visible sur la figure 1. Il s'agit de plusieurs tables percées pouvant accueillir le système d'injection du gaz et des capteurs de pression. Les gaz mis en œuvre sont du propane et de l'oxygène en proportions stœchiométriques.

Le débit et le temps d'injection sont contrôlés afin d'obtenir le volume de gaz désiré. Le diamètre est obtenu par un anneau posé autour du système d'injection. Une solution savonneuse est appliquée sur le banc au niveau du système d'injection. A l'arrivée du gaz, la solution se gonfle et contient le gaz pour former une bulle hémisphérique (cf. figure 1).

L'amorçage du mélange se fait par la méthode du fil explosif [12]. Un fil de cuivre est soudé entre deux électrodes au niveau de l'injecteur, est mis sous haute tension (8 kV) et est sublimé. Cela génère un plasma dont les conditions thermodynamiques permettent la réaction du mélange gazeux.

Des études préalables ont permis de déterminer le diamètre et la longueur du fil de cuivre, ainsi que la tension à appliquer, afin d'obtenir la détonation du mélange gazeux [12].

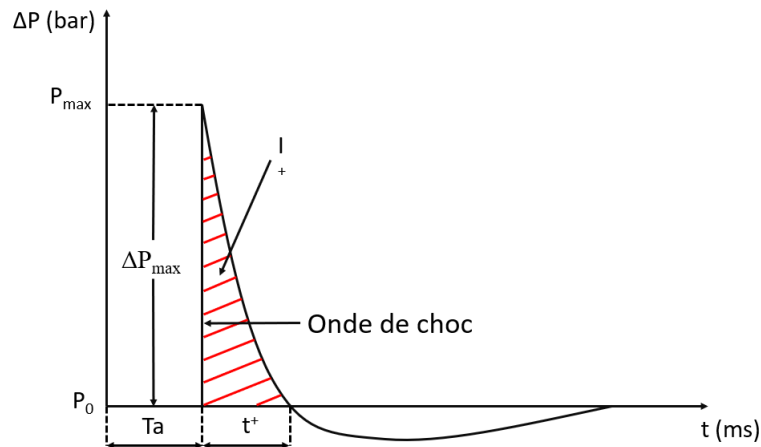


FIGURE 2 – Signal de surpression en fonction du temps typique d'une onde de souffle

TABLE 1 – Coefficients de la loi champ libre

G	a	b	c
$\frac{\Delta P_{max}}{P_0} (s.u.)$	0,128	-2,03	2,2
$\frac{I_+}{m^{\frac{1}{3}}} (bar.ms.kg^{-\frac{1}{3}})$	-0,0527	-0,699	0,771
$\frac{T_a}{m^{\frac{1}{3}}} (ms.kg^{-\frac{1}{3}})$	-0,107	1,79	-0,479

La pression générée par la détonation est mesurée par des capteurs Kistler 603 C. Ils affleurent à la table et mesurent donc la pression incidente de l'onde. Ils ont une fréquence d'acquisition de 1 MHz et une plage de mesure allant jusqu'à 32 bars.

La figure 2, montre le signal de surpression obtenu suite à la détonation en champ libre d'un explosif ou d'un mélange gazeux. Les caractéristiques principales d'une onde de choc, sont la surpression maximale  $\Delta P_{max}$  de l'onde de choc, l'impulsion de la phase positive  $I_+$ , et le temps d'arrivée de l'onde  $T_a$ .

Préalablement à cette étude, de nombreux essais ont été réalisés en champ libre et avec des volumes gazeux différents, montrant la répétabilité du procédé [12] [13]. Des lois empiriques ont ainsi été interpolées sur les résultats expérimentaux permettant d'estimer les caractéristiques citées ci-dessus en fonction de la distance réduite d'Hopkinson Z. Elles sont décrites par l'équation 1, G étant la valeur recherchée et a, b et c les coefficients associés dont les valeurs sont répertoriées dans le tableau 1. Elles sont valables pour une distance réduite comprises entre 1,72 et 41,85  $m.kg^{-\frac{1}{3}}$ .

$$G = \exp(a * \ln(Z)^2 + b * \ln(Z) + c) \quad (1)$$

Ces lois sont comparées aux données de la littérature pour la propagation d'une onde de choc dans l'air issue de la détonation d'un explosif solide, comme l'UFC 3-340-02 [1]. On peut ainsi établir une équivalence entre le rayon de la bulle de gaz et la masse de TNT.

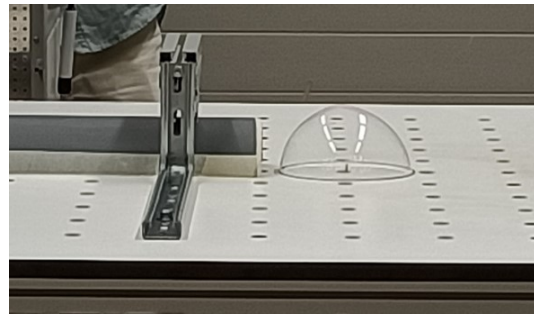
Ainsi dans cette étude, deux rayons de 60 mm et 80 mm sont étudiées, correspondant respectivement à une charge de 0,63 g et 1,5 g.

Sur le banc expérimental peuvent être placés des obstacles afin de perturber la propagation de l'onde de choc. Des tubes en PVC d'une longueur de 2 m, coupés en deux sur la longueur, et posés sur le banc représentent la conduite. Un dispositif de maintien, vissé sur la table, a été mis en place. La figure 3 montre

l'ensemble du dispositif expérimental. L'étanchéité est assurée par des bandes adhésives apposées sur les arêtes du tube en contact avec le banc.



(a) Vue globale du dispositif expérimental



(b) Zoom sur la bulle et l'entrée de la conduite

FIGURE 3 – Photographies du dispositif expérimental

### 3 Simulation numérique

#### 3.1 Plateforme HERA

Les simulations numériques ont été réalisées avec le code hydrodynamique HERA, développé au CEA [11]. Il est utilisé pour estimer les caractéristiques de l'onde de souffle, sa propagation et son interaction avec des obstacles [14] [15] [16].

Ce code se fonde sur la résolution des équations d'Euler par une méthode dite Lagrange-projection appliquée sur des maillages à raffinement adaptatif (AMR) [17]. Un solveur GAIA d'ordre 3 est utilisé pour la résolution de l'étape lagrangienne [18] [19] et la phase de projection se fait avec une reconstruction polynomiale d'ordre 3 [17]. L'interface entre plusieurs matériaux au sein d'une même maille est reconstruite grâce à la méthode d'Youngs [20].

#### 3.2 Calcul

L'explosif, l'air et la conduite sont modélisés dans le calcul. L'explosif est du TNT de masse 0,63 g et 1,5 g pour modéliser les charges expérimentales de rayon 60 mm et 80 mm respectivement. La conduite est un matériau considéré encastré et indéformable de 2 m de long. La simulation numérique est menée depuis l'instant d'amorçage de la charge, et sur une durée de 15 ms.

Un premier calcul en configuration 1D sphérique est mené pour modéliser la détonation de la charge explosive. Dans ce calcul, seuls l'air et l'explosif sont présents. Dans l'expérience, la bulle est hémisphérique. Les charges mises en jeu étant faibles, on peut considérer que la table de détonation est une surface rigide, la masse de la charge de TNT est doublée dans la simulation numérique. Les masses utilisées dans le calcul 1D sont donc de 1,26 g et 3 g pour les bulles de 60 mm et 80 mm respectivement. La taille de maille pour ce calcul 1D est de 100  $\mu\text{m}$  pour garder un front de choc raide. Ce calcul est arrêté juste avant que l'onde atteigne la conduite, et on procède à la projection des grandeurs de l'air et de l'explosif (pression, densité, ...) sur une grille 3D. Le calcul se poursuit en y intégrant la conduite et la table. Pour ce calcul, l'AMR est activé, les tailles de maille minimales et maximales sont respectivement de 2 mm et 32 mm. Le raffinement maximal est effectué à la frontière de la conduite avec les gaz (air et

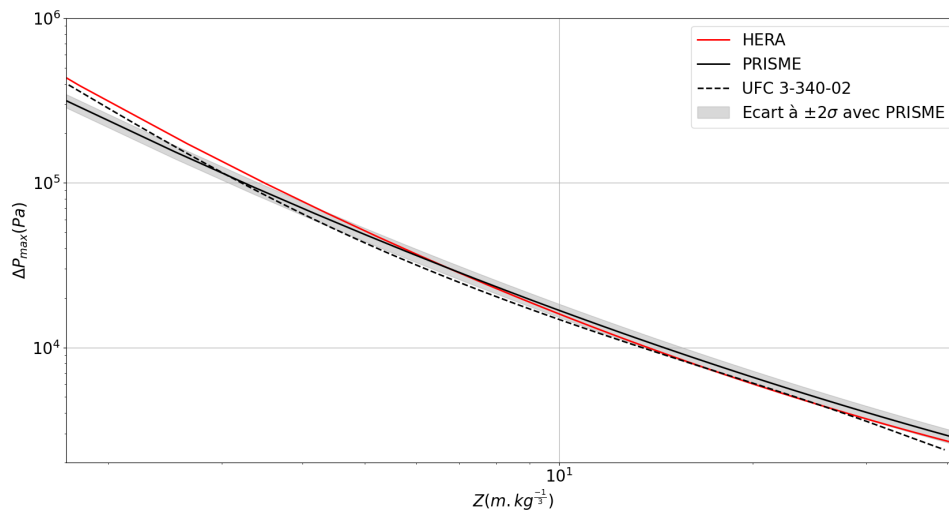


FIGURE 4 – Comparaison de la surpression obtenue expérimentalement, numériquement et avec les modèles empiriques pour une détonation en champ libre

TABLE 2 – Valeur des paramètres caractéristiques des configurations étudiées

Rayon de la charge $R_c(mm)$	60	80					
Distance charge-tunnel $L_{ct}(mm)$	100	200					
Diamètre du tunnel $D_t(mm)$	40	48	64	100	120	160	200

produits de détonation), et au niveau des chocs, calculé avec des gradients sur les pressions partielles. Des stations enregistrent la pression au passage de l'onde de choc.

## 4 Comparaison expérience-calcul

### 4.1 Détonation en champ libre

La figure 4 montre la surpression maximale obtenue avec le banc de détonation et les simulations numériques réalisées avec le code HERA. Ces résultats sont comparés aux lois empiriques du laboratoire PRISME (eq. 1) et de l'UFC 3-340-02 [1].

Les écarts-types entre les valeurs expérimentales et la loi PRISME sont de 4,7%, 15,3% et 2% respectivement pour la surpression maximale, l'impulsion positive et le temps d'arrivée. Une dispersion expérimentale sur l'impulsion apparaît lorsque la distance réduite devient importante ( $Z > 20 \text{ m.kg}^{-\frac{1}{3}}$ )

La simulation numérique est dans l'intervalle à  $2 \sigma$  de la loi PRISME à partir de  $Z = 3,5 \text{ m.kg}^{-\frac{1}{3}}$ . La simulation numérique surestime la surpression obtenue expérimentalement lorsque l'on est proche de la charge.

### 4.2 Propagation dans la conduite

Plusieurs configurations avec les conduites ont été étudiées en faisant varier le rayon  $R_c$  de la bulle (et donc la masse  $M_c$  d'équivalent TNT), la distance  $L_{ct}$  du centre de la bulle à l'entrée de la conduite et le diamètre  $D_t$  de la conduite. Le tableau 2 donne les vingt-huit configurations considérées.

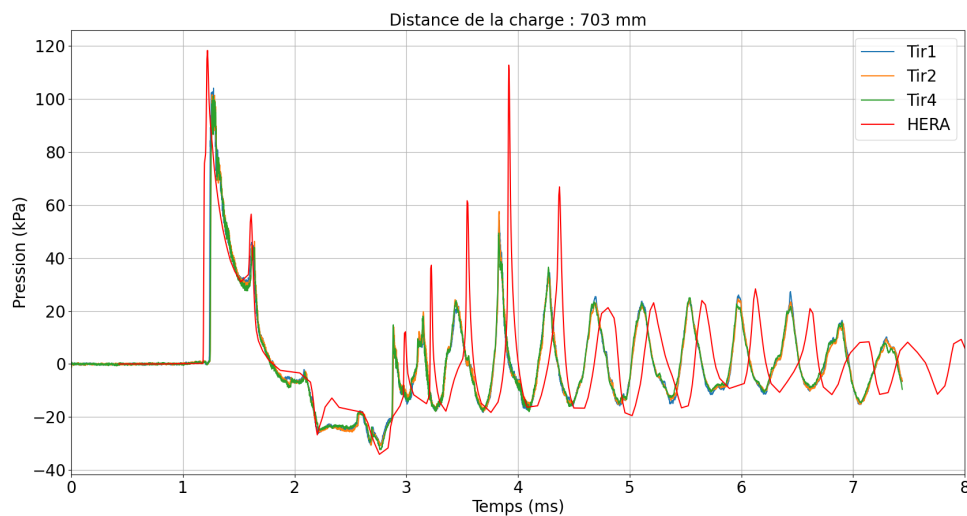


FIGURE 5 – Signal de pression en fonction du temps dans la conduite à 0,7 m de la charge.  $R_c = 60 \text{ mm}$ ,  $L_{ct} = 100 \text{ mm}$ ,  $D_t = 200 \text{ mm}$ .

Pour chaque configuration, un capteur de pression témoin est placé en champ libre à 200 mm de l'injecteur. Après chaque tir, la surpression maximale mesurée par ce témoin est comparée à la loi de l'équation 1. Si l'écart est supérieur à 5%, alors le tir n'est pas gardé. Pour chaque configuration, un minimum de trois tirs est retenu.

La figure 5 montre les signaux de pression en fonction du temps obtenus expérimentalement et numériquement à l'intérieur d'une conduite. Les trois courbes obtenues expérimentalement se superposent, montrant la répétabilité du moyen. La simulation numérique reproduit bien l'allure générale de la courbe, on y retrouve le pic de pression principal ainsi que le bon nombre de pics secondaires dus aux multiples réflexions dans la conduite. Certains pics secondaires ont tendance à être surestimés par la simulation numérique. On observe également un décalage temporel entre les pics secondaires.

Les figures 6 et 7 montrent respectivement la surpression maximale et l'impulsion obtenues expérimentalement et numériquement pour une des configurations étudiée. Elle est comparée aux lois analytiques de Liu [8], EMI [3] et Ousji [9]. Sur le graphe est également tracée la loi PRISME (eq. 1) pour une détonation en champ libre. Cela permet d'observer l'effet du tunnel sur la propagation de l'onde. La décroissance est bien plus faible. Les points expérimentaux à 200 mm cohérents avec cette loi sont issus du capteur témoin.

Lorsque l'onde entre dans le tunnel, celle-ci se réfléchit sur les parois. La surpression augmente donc avant de décroître à nouveau. Il y a une bonne corrélation, pour la surpression, entre l'expérience et la simulation numérique jusqu'à une distance de 1,25 m. Après cela, la décroissance de la surpression est plus rapide dans l'expérience que dans la simulation numérique.

Les modèles de Liu et EMI sous-estiment et surestiment respectivement les surpressions expérimentales avec un écart supérieure à 50%. Cela avait été observé par Ousji [9], qui a proposé une loi à partir d'expériences menées sur tubes à choc par explosif (EDST). Cette loi suit bien les données expérimentales pour le domaine sur lequel elle a été établie, c'est à dire à partir du moment où l'écoulement devient unidimensionnel (entre 350 et 400 mm) jusqu'à la distance réduite modifiée  $Z_t = 250 \text{ m}^3/\text{kg}$ , soit  $D = 1,25 \text{ m}$ . Après cette limite, la loi diverge par rapports aux données expérimentales et numériques. Cela

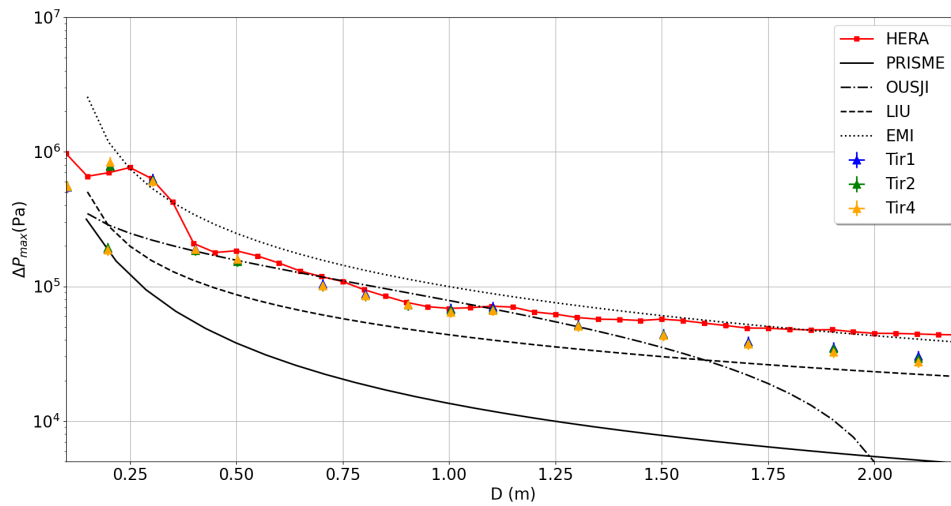


FIGURE 6 – Comparaison de la surpression obtenue expérimentalement, numériquement et avec les modèles empiriques en fonction de la distance à la charge.  $R_c = 60 \text{ mm}$ ,  $L_{ct} = 100 \text{ mm}$ ,  $D_t = 200 \text{ mm}$ .

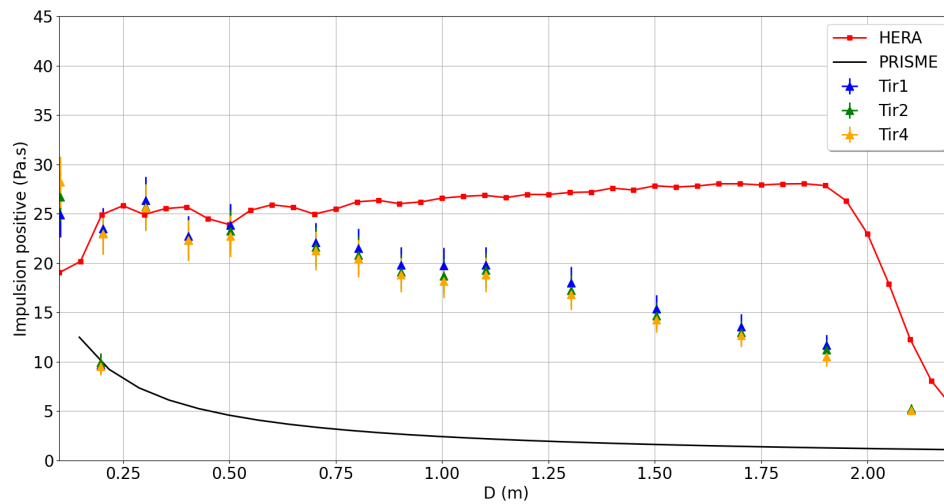


FIGURE 7 – Comparaison de l'impulsion obtenue expérimentalement, numériquement et avec les modèles empiriques en fonction de la distance à la charge.  $R_c = 60 \text{ mm}$ ,  $L_{ct} = 100 \text{ mm}$ ,  $D_t = 200 \text{ mm}$ .

montre également l'intérêt d'utiliser ce banc pour obtenir des données jusqu'à des distances réduites importantes.

L'impulsion positive dans les expériences décroît avec la distance alors qu'elle reste quasi-constante dans la simulation numérique. Cela peut également être expliqué par une perte d'étanchéité lors de l'expérience. Les valeurs sont comparables sur les 500 premiers millimètres. La simulation numérique ne prend pas en compte les frottements, il peut y avoir des effets de bords entre l'écoulement et le tube qui diminuent l'impulsion sur des grandes distances. Lors de certaines expériences, la conduite en PVC se soulevait, ce qui peut entraîner une perte d'étanchéité du système, et diminuer l'impulsion observée.

Des résultats similaires sont observés avec les autres configurations.

## 5 Conclusion - perspectives

Cet article présente un moyen expérimental permettant de faire des expériences de détonation à échelle réduite à l'aide d'un mélange gazeux. Il est appliqué à la mesure de la pression générée par la propagation d'une onde de souffle dans une conduite linéaire. Ce moyen est modulable, plus facile à mettre en œuvre que des expériences avec de l'explosif et relativement rapide à mettre en place ce qui permet de faire de nombreux essais pour des études paramétriques. Ainsi, l'influence du volume de gaz, de la distance de la charge à l'entrée de la conduite et du diamètre de celle-ci ont été étudiés.

Les résultats obtenus ainsi ont été comparés à la simulation numérique réalisée à l'aide du code hydrodynamique eulérien HERA, dans un premier temps en champ libre puis avec un obstacle. Les courbes de la pression en fonction du temps et de la surpression en fonction de la distance sont bien reproduites.

Ce dispositif expérimental permet d'obtenir des valeurs sur des domaines de distances réduites plus étendus que ceux utilisés dans la littérature, notamment pour établir les modèles empiriques.

Un travail d'amélioration de l'interaction de l'onde avec l'obstacle est à mener, notamment pour réduire la perte d'étanchéité afin de reproduire au mieux l'impulsion positive.

Les travaux futurs porteront sur l'influence d'autres paramètres sur la propagation de l'onde, comme la forme de la conduite, la présence de coudes, de bifurcations ou de changements de section.

## Références

- [1] U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency (2008). Technical Manuals, Unified Facilities Criteria (UFC), Structures to resist the effects of accidental explosions, UFC 3-340-02.
- [2] G.F. Kinney, K.J. Graham. Explosive Shocks in Air. Springer-Verlag New York Inc. (1985)
- [3] U.S. Army. TM 5-855-1. Air Force AFPAM 32-1147, Chapter 5, Technical Report NAVY NAVFAC (1997).
- [4] M. Silvestrini, B. Genova, F.J. Leon Trujillo . Energy concentration factor. A simple concept for the prediction of blast propagation in partially confined geometries. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22 (2009), 449–454.
- [5] D. Uystepuyst, F. Monnoyer. A numerical study of the evolution of the blast wave shape in rectangular tunnels. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 34 (2015), 215-231.

- [6] A.M. Bensalama, M.J.P. William-Louis, F. Monnoyer, C. Proust. A numerical study of the evolution of blast wave shape in tunnel. *Journal of Hazardous Materials* 181 (2010), 609-616.
- [7] J.B.W. Borgers, J.M. Ndambi, J. Vantomme. A volume approach to predict airblast parameters. *Military Aspect of Blast and Shock* (2008).
- [8] J. Liu, Q. Yan, J. Wu. "Analysis of Blast Wave Propagation Inside Tunnel". *Transactions of Tianjin University* 14 (2008) 358-362.
- [9] H. Ousji, B. Belkassam, M.A. Louar, D. Kakogiannis, B. Reymen, L. Pyl, J. Vantomme. Parametric Study of an Explosive-Driven Shock Tube as Blast Loading Tool. *Society for Experimental Mechanics* 40 (2016), 1307-1325.
- [10] D. Luo, J. Hu, A. Wang, X. Yu, M. Zhang, M. Yao, C. Li. Experimental and numerical study on external explosions of cylindrical versus spherical charges at tunnel entrance. *Defence Technology* 46 (2025), 227-243.
- [11] H. Jourden. HERA : A hydrodynamic AMR Platform for Multi-Physics Simulations. *Adaptive Mesh Refinement - Theory and Applications*, vol. 41, Lecture Notes in Computational Science and Engineering, Springer, Berlin (2005), 283-294.
- [12] I. Sochet. *Blast Effects - Physical Properties of Shock Waves*. Springer 2018.
- [13] J.M. Dewey, I. Sochet. Analysis of the blast waves from the explosions of stoichiometric, rich, and lean propane/oxygen mixtures. *Shock Waves* 31 (2021), 165-173
- [14] M. Nguyen-Dinh, N. Lardjane, C. Duchenne, O. Gainville. Direct simulations of outdoor blastwave propagation from source to receiver. *Shock Waves* 27 (2017), 593-614.
- [15] J. Ridoux, N. Lardjane, L. Monasse, F. Coulouvrat. Extension of geometrical shock dynamics for blast wave propagation. *Shock Waves* 30 (2020), 563-583.
- [16] R. Leconte, S. terrana, L. Giraldi. Predicting terrain effects on blast waves : an artificial neural network approach. *Shock Waves* 35 (2025), 37-55.
- [17] F. Duboc, C. Eaux, S. Jaouen, H. Jourden, M. Wolff. High-order dimensionally split Lagrange-remap schemes for compressible hydrodynamics. *Comptes rendus Mathématiques (1-2)* (2010), 105-110.
- [18] S. Del Pino, H. Jourden. Arbitrary high-order schemes for the linear advection and wave equations : application to hydrodynamics and aeroacoustics. *Comptes rendus Mathématiques* 342(6), 441-446 (2006).
- [19] O. Heuzé, S. Jaouen, H. Jourden. Dissipative issue of high-order shock capturing schemes with non-convex equations of state. *Journal of Computational Physics* 228 (2009), 833-860.
- [20] D.L. Youngs. *Time-Dependent Multi-material Flow with Large Fluid Distortion*. Numerical Methods for Fluid Dynamics (1982)